

doi: 10.11933/CSE2026023

堆焊及热喷涂领域关键技术进展及应用

黄智泉¹ 李长久² 贺定勇³ 陈茜⁴ 赵军军⁵ 高站起¹ 王重阳¹

(1. 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司 郑州 450001;

2. 西安交通大学材料科学与工程学院 西安 710049;

3. 北京工业大学材料科学与工程学院 北京 100124;

4. 中国机械工程学会 北京 100048;

5. 浙江巴顿焊接技术研究院 杭州 311215)

摘要: 堆焊和热喷涂作为现代材料表面工程领域的核心技术,在工业制造与装备修复中发挥不可替代的作用。以堆焊技术向表面工程融合并拓展的历程回顾为切入点,重点阐述堆焊及热喷涂领域近10年来关键技术现状和发展趋势。在堆焊领域,从材料、工艺和设备等方面对电弧堆焊、高能束堆焊和特种堆焊技术的技术发展现状进行阐述,并对堆焊技术在各行业中的应用状况进行介绍。在热喷涂领域,针对冷喷涂、等离子喷涂物理气相沉积、悬浮液等离子喷涂、爆炸喷涂等当前技术研究热点进行简要介绍,对热喷涂耐磨涂层、热障涂层、耐蚀涂层和功能涂层的应用进行概述。针对堆焊及热喷涂技术未来的发展趋势,指出高端装备堆焊材料、复合堆焊技术以及堆焊过程的自动化、智能化和柔性化是未来堆焊技术的发展方向;开发新材料和新工艺以及提高涂层致密性是热喷涂技术的发展方向,可为堆焊和热喷涂技术发展和行业应用提供理论支撑与方向指引。

关键词: 堆焊; 热喷涂; 技术进展; 应用

中图分类号: TG174

Progress and Applications of Key Technologies in Overlaying and Thermal Spraying

HUANG Zhiquan¹ LI Changjiu² HE Dingyong³ CHEN Xi⁴
ZHAO Junjun⁵ GAO Zhanqi¹ WANG Chongyang¹

(1. China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd.,
Zhengzhou 450001, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

4. Chinese Mechanical Engineering Society, Beijing 100048, China;

5. Zhejiang E.O. Paton Welding Technology Research Institute, Hangzhou 311215, China)

Abstract: Overlaying and thermal spraying, core technologies in modern material surface engineering, have been indispensable in industrial manufacturing and equipment restoration since the 20th century. However, accelerated industrialization has imposed increasingly stringent demands on material surface properties—such as wear resistance, corrosion resistance, and high-temperature resistance—in sectors including machinery, energy infrastructure, and aerospace, exposing the limitations of conventional overlaying and thermal spraying techniques in addressing material protection and functional enhancement under complex operational conditions. By reviewing the integration and evolution of overlaying technology within surface engineering, this article highlights key

收稿日期: 2025-03-23; 修改日期: 2025-05-14; 接受日期: 2025-05-15; 上线日期: 2025-09-10。

Received March 23, 2025; Revised May 14, 2025; Accepted in revised form May 15, 2025; Available online September 10, 2025.

引用格式: 黄智泉, 李长久, 贺定勇, 等. 堆焊及热喷涂领域关键技术进展及应用[J]. 中国表面工程, 2025, 39(1): 275-297.

Citation format: HUANG Zhiquan, LI Changjiu, HE Dingyong, et al. Progress and applications of key technologies in overlaying and thermal spraying[J]. China Surface Engineering, 2025, 39(1): 275-297.

advancements and applications in both fields over the past decade while outlining their developmental trajectories. Technological advancements in materials, processes, and equipment in the field of overlaying technology have been systematically summarized using various methods. These include arc surfacing techniques, such as shielded metal arc surfacing, submerged arc surfacing, gas metal arc surfacing, self-shielded arc surfacing, tungsten inert gas surfacing, and cold metal transfer surfacing; high-energy beam surfacing approaches like plasma arc surfacing and laser cladding; and specialized surfacing technologies such as oxy-acetylene surfacing. Although traditional high-chromium iron-based wear-resistant flux-cored wires remain mature for engineering applications, recent efforts have prioritized cost-effective high-boron iron-based alternatives. Nickel-based, cobalt-based, and metal-ceramic composites continue to dominate material research, with high-entropy alloys (HEAs) emerging as focal points in laser cladding. Process studies emphasize the optimization of parameters such as current, speed, and powder / wire feeding rates, along with auxiliary techniques such as ultrasound, magnetic fields, and heat treatment, to enhance the layer microstructure and performance. Advancements in overlaying equipment have primarily focused on enhancing the efficiency, quality, and precision of the surfacing processes. Additionally, the article provides a detailed overview of the practical implementation of surfacing technology across industries such as petrochemicals, cement and mining, metallurgical and power generation, agricultural and forestry machinery, aerospace, medical devices, and nuclear energy. Current research in the field of thermal spraying focuses on technologies such as cold spraying, plasma spray-physical vapor deposition, suspension plasma spraying, and detonation spraying, each with distinct priorities. Cold spraying focuses on theoretical research, development of high-performance equipment, standardization of raw materials, and optimization of coating performance. Plasma spray physical vapor deposition concentrates on optimizing process parameters, such as powder feeding rate, plasma gas composition, and spraying distance, to regulate coating growth patterns and microstructures with the aim of achieving high-performance coatings. Suspension plasma spraying explores the fabrication of high-performance thermal barrier oxide ceramic coatings. The development of high-frequency focused-energy detonation spraying technology has resulted in an order-of-magnitude improvement in efficiency and significantly enhanced coating quality. Additionally, the applications of thermal spray coatings, including wear resistance, thermal barriers, corrosion resistance, and functional coatings, are summarized. Regarding the future development trends of overlaying and thermal spraying technologies, it points out that high-end equipment overlaying materials, composite overlaying technology, as well as the automation, intelligence, and flexibility of overlaying processes will be the future development directions for overlaying technology. For thermal spraying technology, the development of new materials, novel processes, and improvements in the coating density remain key advancement priorities. These findings provide theoretical support and directional guidance for the technological evolution and industrial applications of overlaying and thermal spraying technologies.

Keywords: overlaying; thermal spraying; technical progress; applications

0 前言

现代堆焊技术的起源可以追溯到 19 世纪末至 20 世纪初,与焊接技术的整体发展密切相关。19 世纪末,电弧焊技术的问世为堆焊技术奠定了基础。20 世纪 20 年代,药皮焊条的发明使电弧焊更稳定,促进了堆焊在工业中的实际应用。20 世纪 30 年代,美国、德国等国家开始出现与堆焊相关的专利,例如通过电弧或气焊在工件表面熔覆耐磨合金。20 世纪 50 年代后,埋弧焊、等离子弧焊和激光熔覆等新技术的出现,显著提升了堆焊的精度和效率,推动其在航空航天、能源石化等领域的应用。

我国堆焊技术的发展开始于 20 世纪 50 年代初期,从前苏联引进了堆焊技术和先进经验。在改革

开放初期,堆焊技术创造了可观的经济价值,在节能节材方面也做出了突出贡献。为进一步推动科技进步与创新,1979 年,徐滨士院士和数位堆焊界的前辈共同筹备,在焊接分会下组建了堆焊及热喷涂分委员会,后更名为堆焊及表面工程专业委员会。

随着新一轮科技和产业变革的深入,科学技术研究逐步向极端环境、极端尺寸、综合交叉等方向不断突破,堆焊及表面工程的专业领域也在不断融合与迭代升级,已延伸至堆焊、热喷涂以及其他表面工程等多个细分领域。堆焊及表面工程关键技术应用也逐步从简单的修复技术发展成为新品制造、旧件再制造等重要工艺环节。表 1 列出了堆焊和热喷涂技术以及相应学术组织的主要发展历程。

表 1 堆焊和热喷涂技术及相应学术组织的发展历程

Development history	Overlaying technology ^[1-2]	Thermal spraying technology ^[3]	Corresponding academic institution
Inception	Evolved in near parallel with welding technology.	Concept of thermal spraying was first proposed by Dr.Schoop in Switzerland in the 1910s.	Chinese Mechanical Engineering Society was established in 1936.
1950s	Domestically originated, with its primary application being the repair of geometry and dimensions.	Domestic development commenced, while the United States pioneered high-velocity oxygen fuel thermal spraying.	—
1960s	Combining dimensional recovery with surface enhancement, domestic research efforts were launched in the areas of flux-cored wire development and overlay welding for used roll repair.	Domestic efforts have focused on the research and application of plasma spraying technology.	Welding Society of the Chinese Mechanical Engineering Society was established in 1962.
1970s	Development focused on the application of powder plasma arc surfacing and submerged arc surfacing, along with the creation of self-shielded flux-cored wires.	Domestic efforts centered on the development and application of oxy-acetylene flame metal powder spraying technology.	Surfacing and thermal spraying (Ic) Sub-committee of the Welding Society of the Chinese Mechanical Engineering Society was established in 1979, with Professor XU Binshi serving as its first Chairman.
1980s	Development and application of carbon arc surfacing with high-carbon ferrochrome wear-resistant alloy powder blocks contributed to the rapid growth of the domestic wear-resistant surfacing industry.	Progress is marked by the development and application of high-velocity oxygen fuel spraying.	During its slow development phase, the Ic sub-committee’s professional advancement was predominantly focused on individual technologies such as surfacing, thermal spraying, and surface engineering.
1990s	This phase was characterized by the research and promotion of surfacing flux-cored wires and strips; concurrently, integration with intelligent control and precision grinding enabled the formation of near-net-shape technology.	Development of arc spraying advanced rapidly, characterized by high-energy / high-velocity equipment, standardized materials, and automated processes; meanwhile, Professor Herman introduced liquid feedstock thermal spraying, and Muehlberger proposed very low-pressure plasma spraying.	Phase of Cautious Advancement for Ic: this period witnessed rapid development in surface engineering. In 1993, the Surface Engineering Society was established under the Chinese Mechanical Engineering Society. Subsequently, in 1999, Ic was renamed as the Surfacing and Surface Engineering Technical Committee, with three specialized groups established: the Surfacing Group, the Thermal Spraying Group, and the Surface Engineering Group.
2000s	Surfacing industry has witnessed large-scale development, while high-energy beam techniques such as laser cladding have emerged as a major focus for both research and application.	Advances in new spraying materials and equipment have significantly broadened the range of applications.	Ic Reorientation Phase: influenced by the rapid advancement of surface engineering, Ic was positioned in 2004 as the sole national-level academic society dedicated to the surfacing field. It established surfacing technology as its core discipline, while maintaining coverage of thermal spraying and other surface engineering specialties.
2010s	Development is primarily oriented towards high efficiency, automation, enhanced precision, and intelligentization.	Cold spray technology entered the stage of industrial application after 2015.	Ic Vigorous Development Phase: during this period, biennial academic conferences were established. These conferences played a pivotal role in tracking academic trends, guiding market developments, serving as a communication hub, facilitating information exchange, and advancing the profession.
2020s	It is integrated with technologies such as wire arc additive manufacturing and reverse engineering, enabling its practical implementation in engineering applications.	Research is problem-driven, focusing on solving challenges in equipment service.	In 2022, the professional scope was refined into four key areas: surfacing, thermal spraying, additive manufacturing, and other surface engineering technologies. In 2023, the inaugural International Conference on Surfacing and Surface Engineering was successfully held.

1 堆焊技术进展及应用

堆焊,是为增大或恢复焊件尺寸,或使焊件表面获得具有特殊性能的熔敷金属而进行的焊接^[4]。堆焊技术广泛应用于传统工业领域和航空航天等高端制造领域的零件制造与修复,创造了显著的经济和社会效益。

近 10 年来,堆焊技术作为制造和再制造技术的重要支撑,迎来了前所未有的发展机遇。为实现碳达峰、碳中和目标,国家大力发展循环经济,多个

部委先后出台了与再制造相关的政策指导性文件及法规,聚焦高端装备制造业关键件再制造,加快推动工业绿色发展。

近 10 年来,以堆焊、修复、再制造等关键词制定的标准 40 余项,且多数集中在激光修复、激光再制造、核电设备堆焊等关键技术领域。

堆焊技术根据热源种类可以分为三类:电弧堆焊、高能束堆焊和特种堆焊,每一类根据焊接原理又可以分为不同的堆焊方法,表 2 列示了各种堆焊方法的特点和应用范围^[5]。

表 2 堆焊方法及特点

Table 2 Overlaying methods and characteristics

Surfacing method		Characteristic	Primary application scope
Arc surfacing	Shielded metal arc surfacing	Simple and versatile equipment, high mobility and flexibility, excellent accessibility	Irregularly shaped components and scenarios where automation is difficult to implement
	Submerged arc surfacing	High production efficiency, good formation, high dilution rate, easy to automate	Primarily suitable for flat position surfacing; ideal for large, distortion-resistant components
	Gas metal and self-shielded arc surfacing	High current density, wide variety of shielding gases	Internal cladding of vessels, large-area surfacing of rolls, and on-site repair; semi-automatic equipment is particularly suited for complex-shaped components
	Tungsten inert gas surfacing	Low deposition efficiency, stable arc, easily controlled bead geometry, high quality	Suitable for small, complex parts; can replace oxy-acetylene welding for larger, poorly weldable components
	CMT surfacing	Low heat input, excellent distortion control, high-quality surfacing layer	Suitable for thin-walled structures and components with high-quality requirements
High-energy beam surfacing	Plasma arc surfacing	Concentrated energy, easily controlled dilution and surface profile, high-quality surfacing layer, complex equipment	Widely used for valve sealing surfaces, oil drill pipe tool joints, mold cutting edges, ploughshare blades, etc.
	Laser surfacing	High efficiency, low dilution, small heat-affected zone, capable of surfacing all metals, unaffected by magnetic fields	Wear / heat / corrosion-resistant surfacing on component surfaces, e.g., oil drill bits, turbine blades
	Electron beam surfacing	Concentrated energy, narrow heat-affected zone, minimal welding distortion, performed in a vacuum chamber	Particularly suitable for reactive metals, superalloys, precision instruments, and thin-walled structures
	Oxy-acetylene surfacing	Simple equipment, flexible operation, low dilution, high-quality surfacing layer	Small-batch surfacing of high-quality, smooth-surfaced, complex-shaped workpieces
	Electroslag surfacing	High deposition efficiency, low dilution, high heat input, relatively easy adjustment of surfacing layer composition	Mainly used for simple-shaped, medium-to-large components requiring thick surfacing layers
Specialized surfacing	Friction surfacing	Concentrated heat source, high heating efficiency, small heat-affected zone, dense surfacing layer with properties close to forgings	Suitable for dissimilar material combinations with vastly different physical / mechanical properties at room and high temperatures
	High-frequency induction surfacing	Shallow penetration, thin surfacing layer, high production efficiency, high metallurgical bond strength	Wear parts for agricultural machinery like ploughshares, rotary blades, turf cutters, sugarcane knives
	Electrospark deposition	Low heat input, no preheating required for base metal, no annealing, distortion, or residual stress	Repair of heat-sensitive, poorly weldable workpieces, especially slender and thin-shell structures

1.1 堆焊技术研究进展

近年来，国内外学者在电弧堆焊、高能束堆焊和特种堆焊等技术的机理、材料、工艺、设备等方面有了新的研究进展。

1.1.1 电弧堆焊

电弧堆焊是一种利用电弧作为热源，将填充金属和母材加热至熔化状态，从而形成冶金结合的堆焊方法。电弧堆焊广泛应用于机械零件、设备表面的强化、修复等领域，具有操作简便、成本低廉等优点。根据堆焊过程中电弧的状态，电弧堆焊技术又可以分为常规 / 传统电弧堆焊和冷金属过渡堆焊 (Cold metal transfer, CMT)。

(1) 常规 / 传统电弧堆焊

常规 / 传统电弧堆焊过程中，电弧相对稳定、连续，且热输入较大，主要包括焊条电弧堆焊、埋弧堆焊、熔化极气体保护及自保护电弧堆焊、钨极氩弧堆焊等。

焊条电弧堆焊是焊工手工操纵焊条进行堆焊的方法，焊条电弧堆焊示意图如图 1 所示。在电弧热作用下，母材和焊条熔化，形成具有几何形状的液态金属，当热源移走后形成熔覆层。药皮焊条熔化

后变成熔渣盖在熔覆层表面，可有效隔离周围空气的侵害。焊条电弧堆焊是最早应用的一种电弧堆焊方法，研究相对成熟，通过调整焊芯和药皮的配方成分，使熔覆层获得所需性能。焊条电弧堆焊具有设备简单、操作灵活、堆焊修复工作效率高、不受工件外形和堆焊位置影响等优点，但是也具有局限性，如基体稀释率高、大批量生产效率低、焊工劳动强度大和焊材利用率低等。因此焊条电弧堆焊主要适用于小批量和形状不规则零件堆焊及现场修复。刘洪冰等^[6]采用 LRF-01 铸铁焊条修复风电机组裂纹，堆焊后性能满足风电机组标准要求，运行一年多未出现质量问题。郭太平等^[7]采用 ENiCrMo-3 镍基焊条进行压力容器焊缝处的补堆焊及接管内壁的堆焊，结果表明产品堆焊质量优良，所有接管内壁堆焊层及壳体纵、环焊缝补堆焊层均一次合格。

埋弧堆焊是一种将电弧掩埋在预先铺好的颗粒状焊剂层下，通过电弧产生的热量将焊材、焊剂和基材熔化形成熔覆层的工艺方法，埋弧堆焊示意图如图 2 所示。埋弧堆焊具有烟尘少、无弧光、堆层质量好、生产效率高和易于自动化等优点，但在制造或修复复杂零件方面还有一定的局限性。杨乘东

等^[8]对不锈钢带极埋弧堆焊层的剥离机理进行了研究, 结果表明, 过渡区Ⅱ型边界和气孔是堆焊层发生剥离的内因; 随着堆焊层数的增加, 堆焊层界面残余应力增大, 较大的残余应力是剥离发生的外因。徐常恩等^[9]研究交变纵向磁场对 Q235-B 轧辊套埋弧堆焊层的影响, 外加纵向磁场使堆焊层最外层硬度提高 9.9%, 其对熔池的周期性搅拌作用使堆焊层微观组织得到细化, 晶粒尺寸降低 28%。

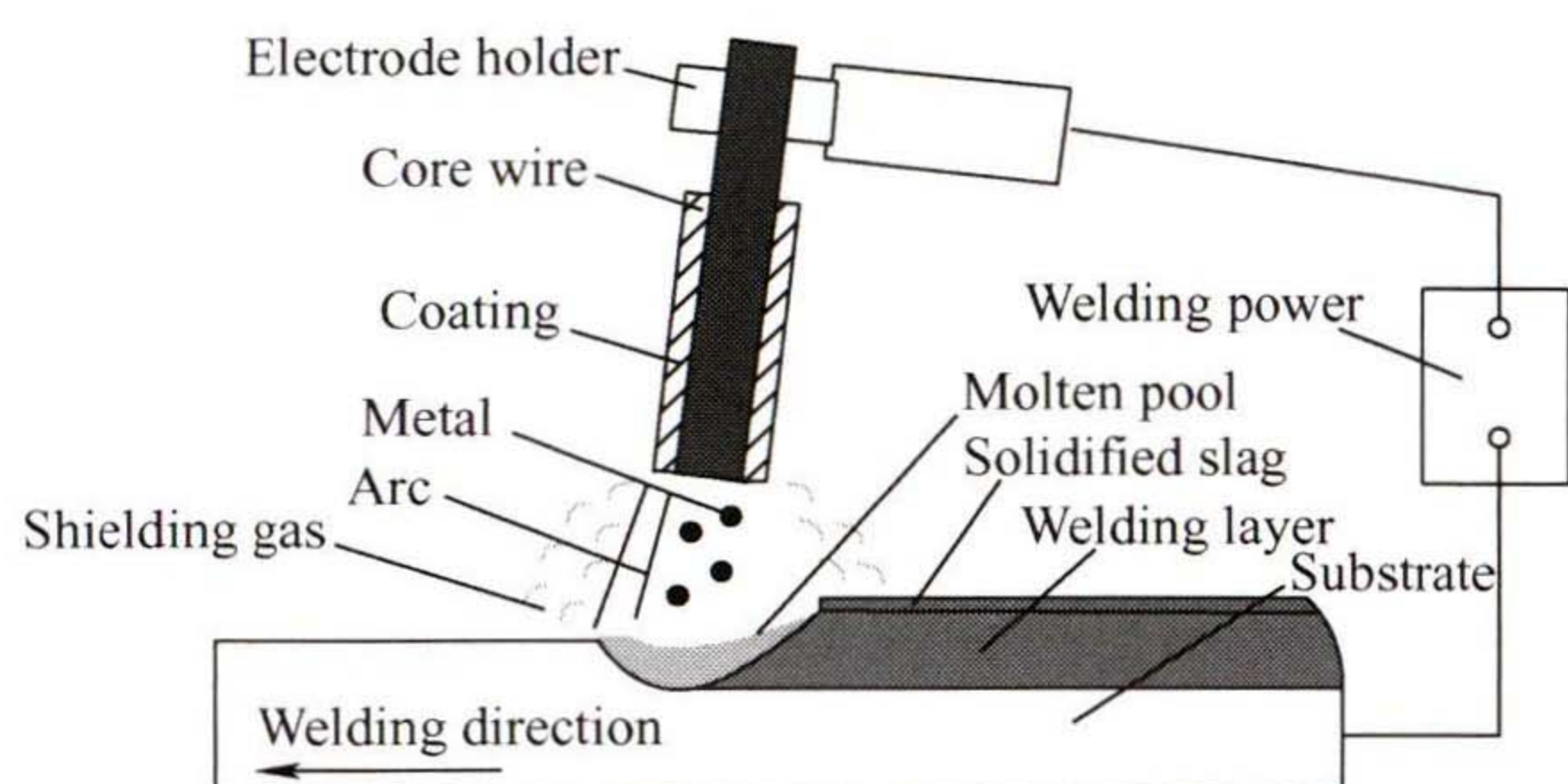


图 1 焊条电弧堆焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shielded metal arc surfacing

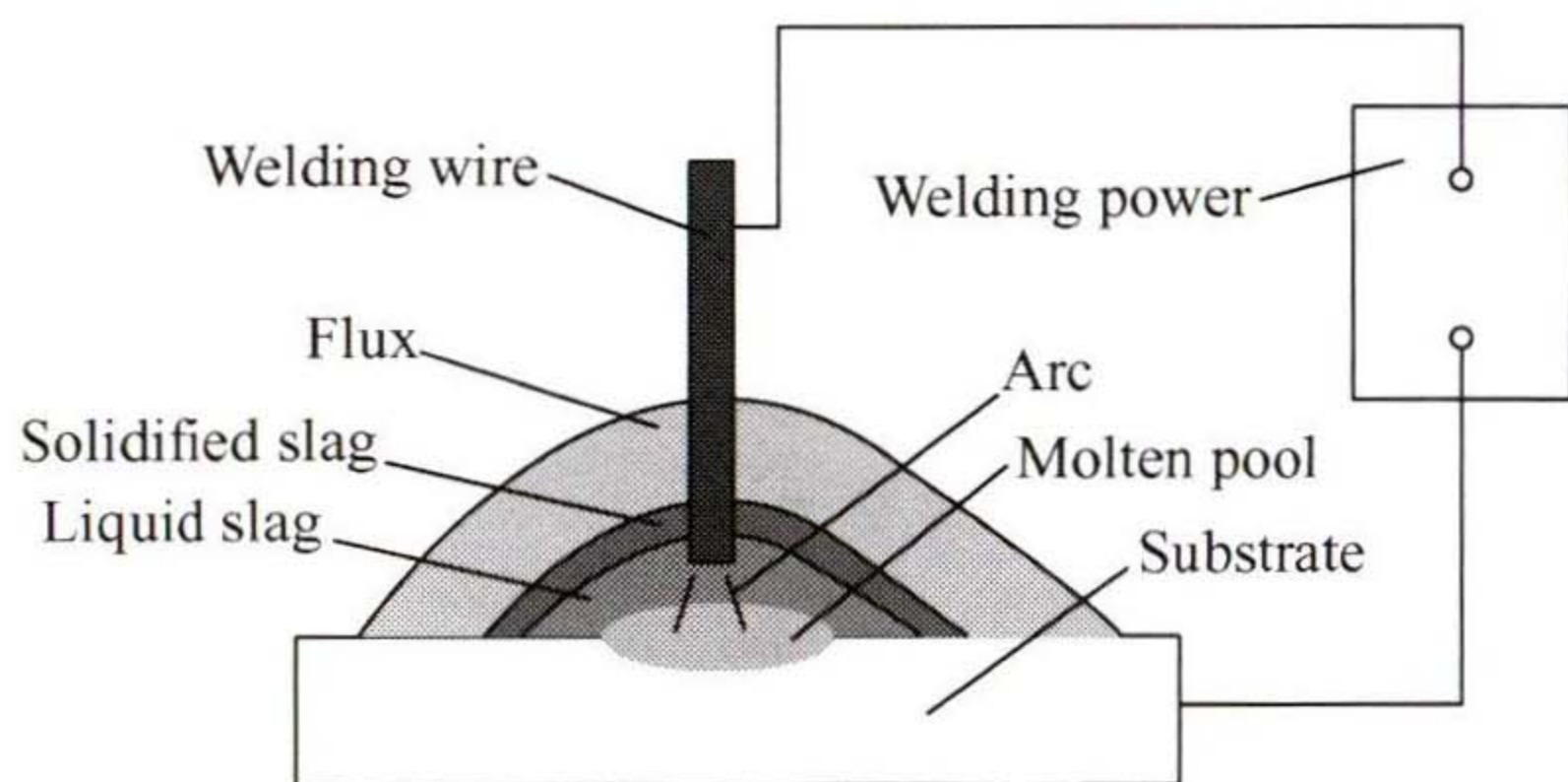


图 2 埋弧堆焊示意图

Fig. 2 Schematic diagram of submerged arc surfacing

熔化极气体保护及自保护电弧堆焊是采用 CO_2 、Ar、混合气体或采用自保护药芯焊丝进行熔覆层保护的一种电弧堆焊方法, 图 3 为熔化极气体保护堆焊示意图。气体保护电弧堆焊具有焊接质量好、效率高、操作简单、能够实现半自动、全自动和手工操作、灵活性高以及可满足不同类型工件熔覆的优点。曾邦兴等^[10]在制备 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 增强铁基复合堆焊层时分别采用三种不同的保护气体（纯 Ar、80% Ar+20% CO_2 、纯 CO_2 ），结果表明, 纯 Ar 保护时堆焊层中 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 的析出量最多, 为 $0.54 \text{ 个}/\mu\text{m}^2$, 平均显微硬度 708 HV, 磨损量仅为纯 CO_2 保护下的 9.5%, 耐磨性能最佳。

钨极氩弧堆焊 (Tungsten inert gas welding, TIG) 采用惰性气体 Ar 保护, 使用钨极作为非消耗性电极, 通过电弧产生的热量熔化母材和填充金属, 形成熔覆层, 图 4 为钨极氩弧堆焊示意图。张楷等^[11]建立了一种 RSM 与 NSGA-II 算法集成的钨极氩弧工艺参数多目标优化方法, 优选出的最优参数组合

为单位热输入量 $17.82 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$, 送粉量 $8 \text{ g}/\text{mm}$, SiC 质量分数 2%。随后在 316L 不锈钢表面进行了最优参数的纳米 SiC 颗粒增强不锈钢材料的堆焊试验, 结果表明熔覆层显微硬度提高 9.9%, 熔深降低 31.9%, 稀释率降低 22.4%, 熔覆层成形良好无缺陷, 顶部区域为均匀分布的细小等轴状晶粒以及 SiC 颗粒。

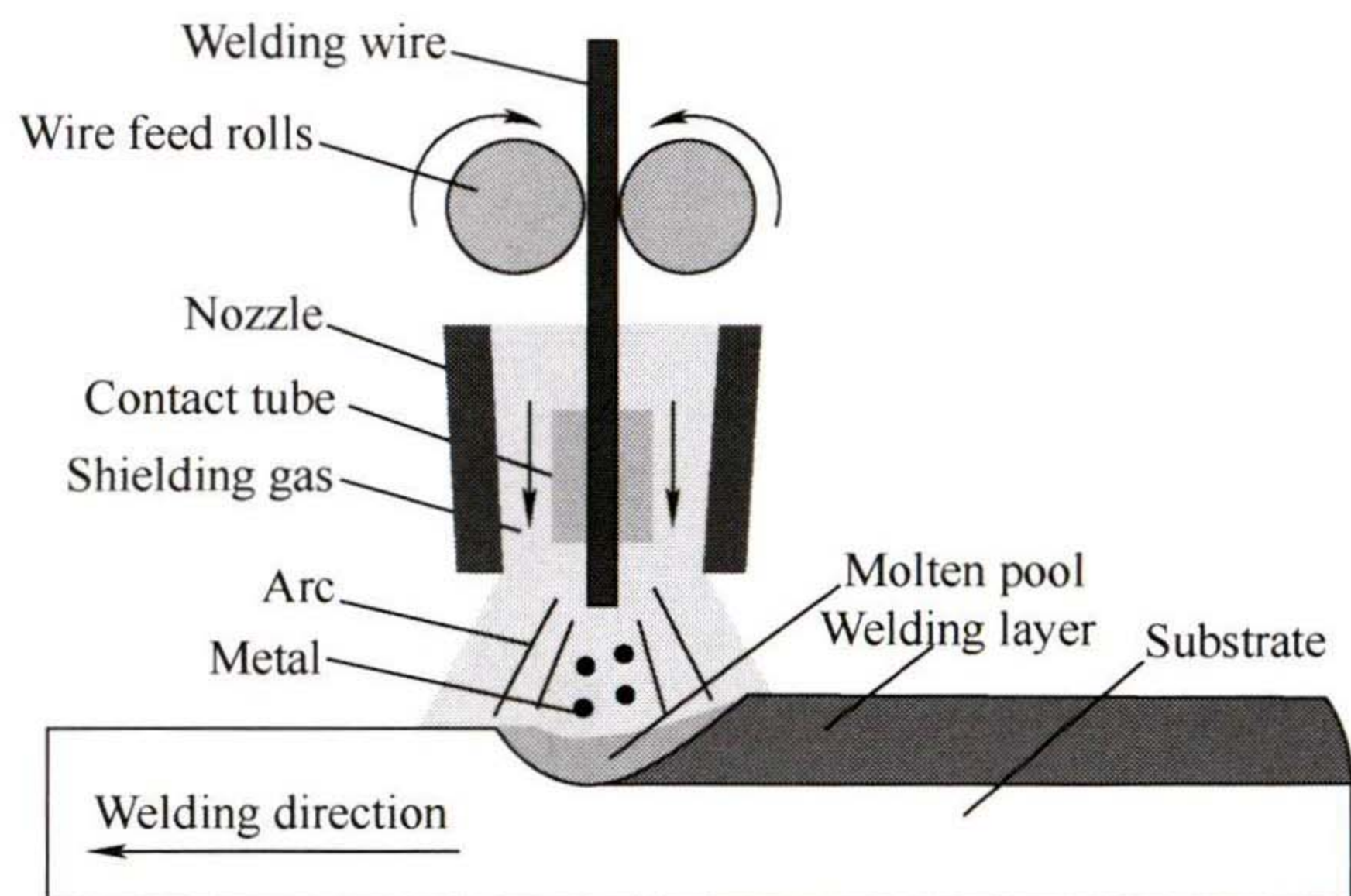


图 3 熔化极气体保护堆焊示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gas metal arc surfacing

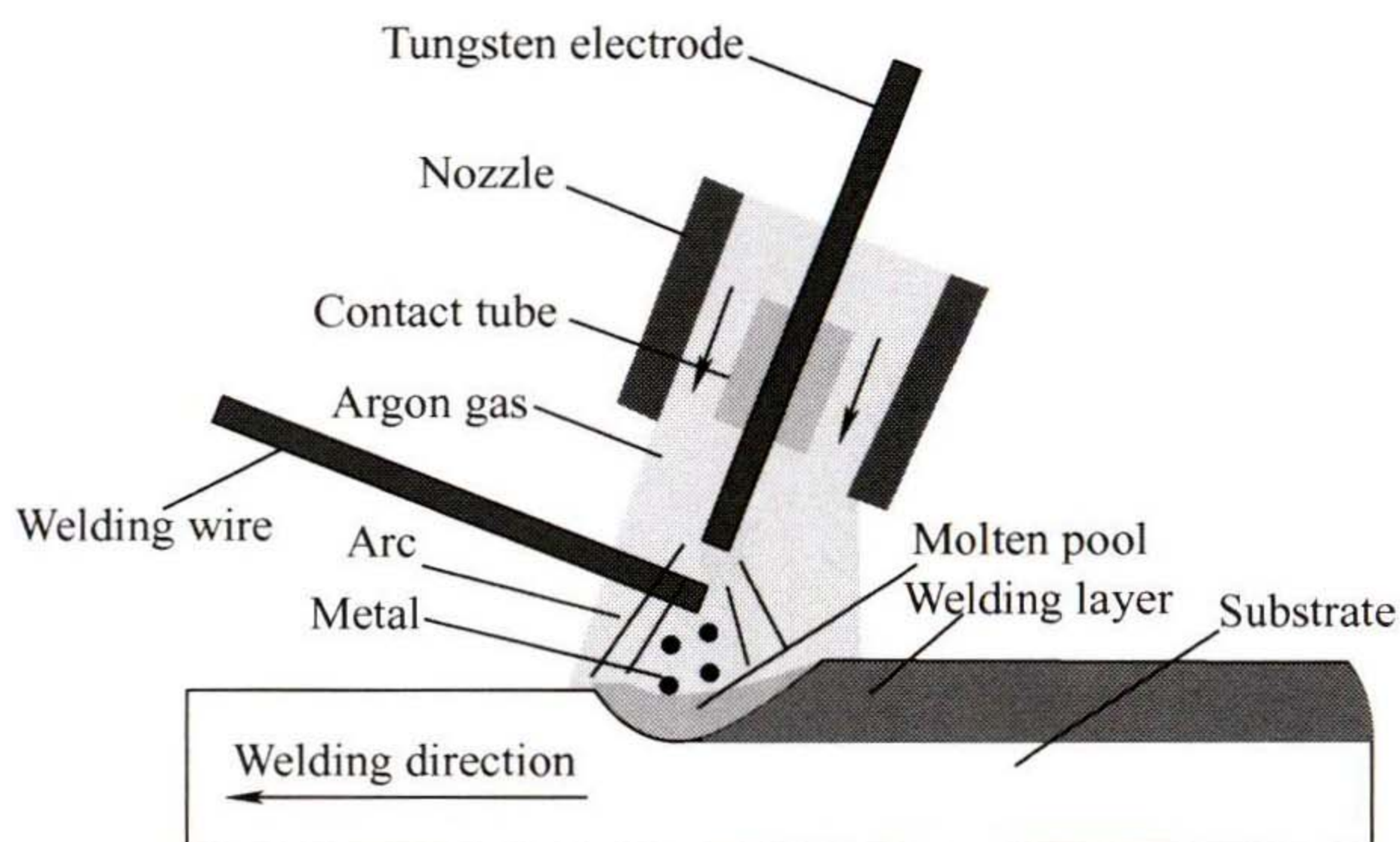


图 4 钨极氩弧堆焊示意图

Fig. 4 Schematic diagram of tungsten inert gas surfacing

上述四种常规/传统电弧堆焊方法在工作原理上存在一定差异, 但在堆焊材料研究领域具有显著的共性特征。

在材料体系研发方面, 传统的高铬铁基耐磨堆焊药芯焊丝在工程应用中已经非常成熟。为了降本提质, 国内近 10 年来对高硼铁基耐磨堆焊药芯焊丝研究较多, 且取得的原创成果达到世界领先水平。相应的合金系列有: Fe-Cr-B-C、Fe-Cr-B、Fe-Cr-Mo-B、Fe-Cr-B-Nb-C、Fe-Cr-B-Ti-C、Fe-Cr-B-Si-C 等^[12]。王旭等^[13]制备了五种不同硼含量的 NiCrB 粉芯丝材 (硼的质量分数为 0%~3.5%), 通过钨极氩弧堆焊制备堆焊合金, 然后在 800°C 的温度下进行 200 h 的氧化试验, 结果表明硼的质量分数为 0.8% 时, 堆焊合金硬度明显提高, 抗氧化性较好, 硼的质量分数大于 1.6% 时会产生大量 CrBO_3 ,

降低抗氧化性能。贾华等^[14]研究了 Ti 或 Nb 的添加量对 Fe-Cr-C-B 系铁基堆焊合金耐磨性的影响, 结果如图 5 所示。添加 5% Ti 时, 含 Ti 堆焊合金的耐磨性最好, 此时硬度为 66 HRC, 磨损量为 0.048 7 g; 添加 4% 的 Nb 时, 含 Nb 堆焊合金的耐磨性最好, 此时硬度为 65 HRC, 磨损量为 0.052 4 g。同等条件下, Ti 与 C 的亲合力比 Nb 更强, TiC 能优先形成, 同时 Ti 的原子质量比 Nb 小, 在同等添加量条件下, 能生成更多的 TiC 硬质相, 因此含有适量 Ti 的铁基堆焊合金耐磨性更好。

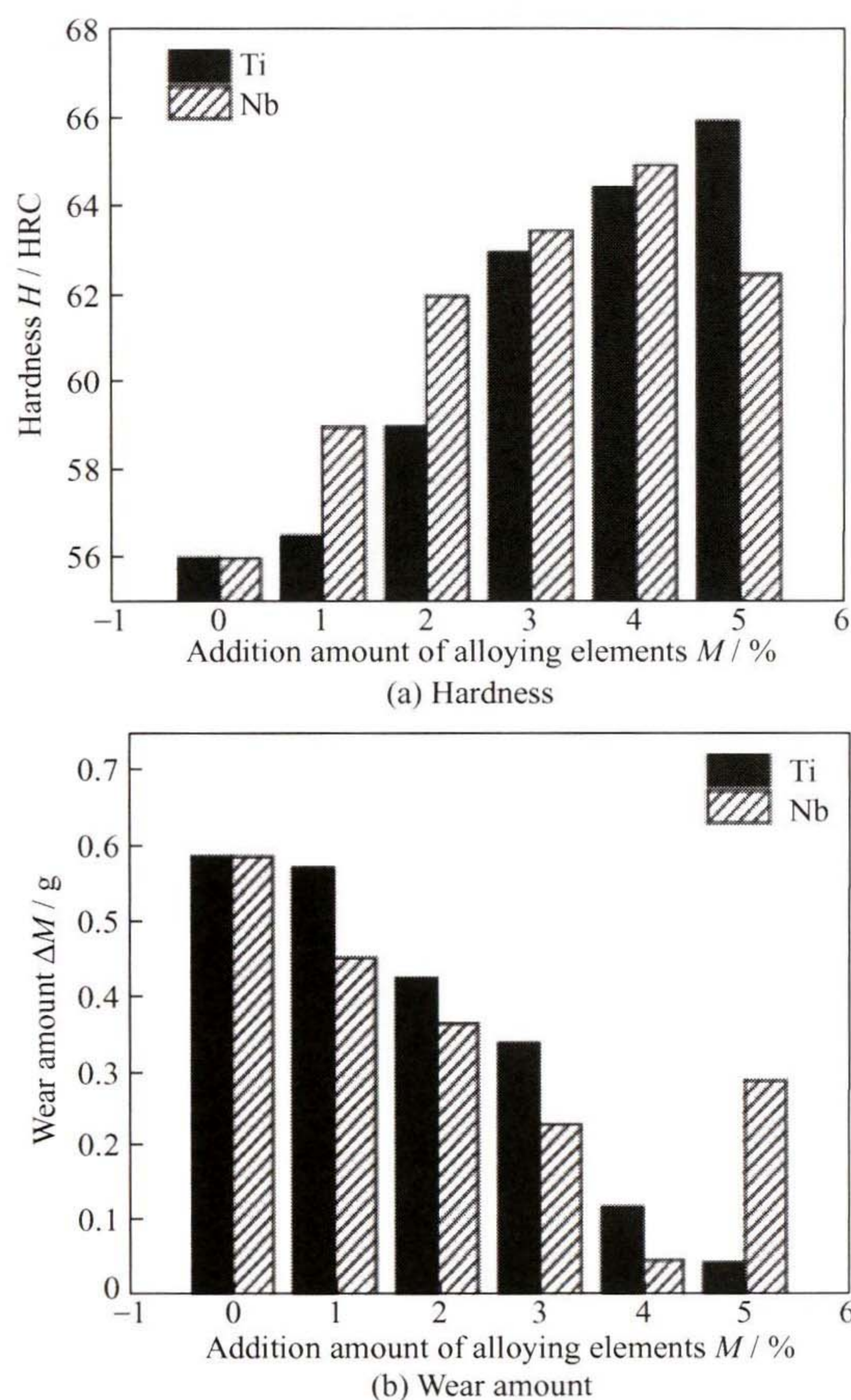


图 5 不同 Ti 或 Nb 添加量时堆焊层的硬度和磨损量

Fig. 5 Hardness and wear of surfacing layer with different additions of Ti or Nb

除铁基堆焊材料外, 镍基堆焊材料也是国内外的研究热点。MOHAMMAD 等^[15]进行 Ni 基 WC 复合材料的熔化极气体保护堆焊时, 发现 WC 颗粒的物理损失、堆焊层的加工特性受到电流水平、送粉速率等焊接参数的影响。郑明涛等^[16]采用双钨极单热丝氩弧堆焊工艺进行核电设备管板镍基合金堆焊, 并对堆焊合金的性能进行验证。结果表明, 在优化的焊接工艺参数下, 双钨极单热丝氩弧堆焊工艺焊接速度可达 700~900 mm/min, 熔敷效率可达 2.5~6 kg/h, 约为普通单热丝工艺三倍。在保证核电产品及管壳式换热器类设备镍基堆焊层质量的

前提下, 双钨极单热丝氩弧堆焊工艺能够缩短核电产品的制造周期。

陶瓷颗粒具有高硬度、高强度、耐磨耐热耐蚀、化学性质稳定, 且与基体润湿性良好的优点。通过控制陶瓷颗粒的种类、数量、大小、形态、分布以及与基体组织之间的匹配情况, 能进一步提升堆焊层的耐磨性。目前, 碳化物、氧化物、硼化物和氮化物等都可以作为陶瓷颗粒, 如 TiC、NbC、WC、 Al_2O_3 、 TiB_2 、TiN、VC 和 SiC 等。马笑晗等^[17]在 Q235 钢基体上进行药芯焊丝电弧堆焊, 制备含 TiC 的亚共晶高铬铸铁堆焊耐磨层, 结果表明 TiC 具有明显的细化晶粒作用, 能够提高堆焊合金的硬度、抗磨粒磨损性能和抗冲击磨损性能, 同时原位合成的 TiC 较粉芯中直接添加的性能更好。

在堆焊工艺研究方面, 付鹏^[18]研究超声振动对电弧堆焊 308 不锈钢堆焊层组织和性能的影响。施加超声振动后, 合金元素聚集和偏析减少, 堆焊首层的晶粒平均枝晶从 35.0 μm 降到了 19.6 μm , 降低了 44%, 第二层晶粒平均直径从 84.6 μm 降到了 48.3 μm , 降低了 42.9%, 如图 6 所示。同时超声振动优化了堆焊层的综合性能, 堆焊首层横截面硬度提高了约 11.3%, 第二层提高了 7.7%, 堆焊首层抗拉强度平均增加了 214.4 MPa, 第二层的抗拉强度提高了 63.3 MPa, 试样抗弯强度极限值为 1 241.8 MPa, 增加了将近 42.0 MPa。张智等^[19]研究

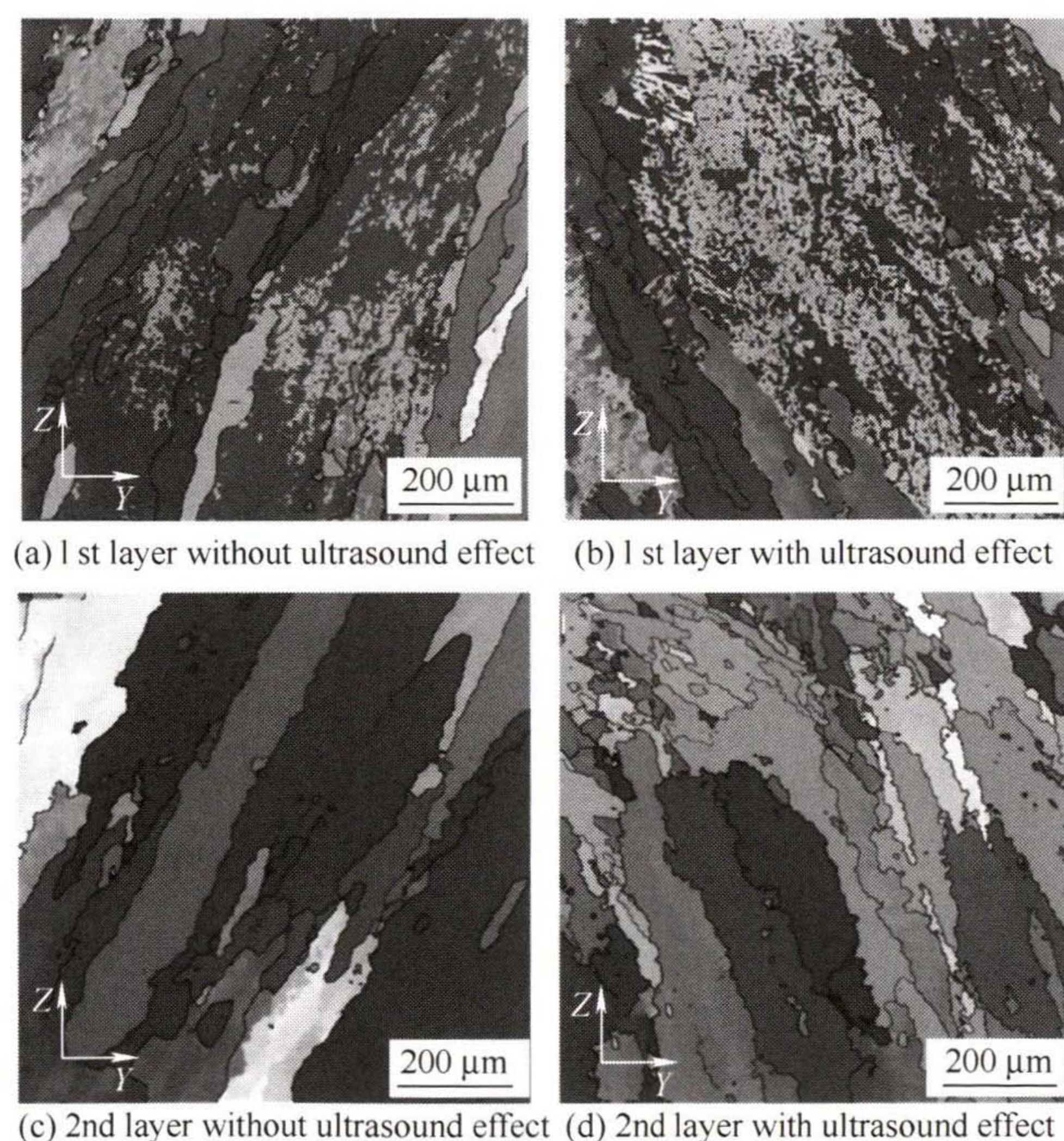


图 6 施加超声和未施加超声堆焊单层晶 IPF 图

Fig. 6 IPF plots of applied and unapplied ultrasonic overlay single-layer crystal

了热处理对不锈钢药芯焊丝堆焊过渡层的影响,结果表明,热处理后不锈钢堆焊试样弯曲性能下降的主要原因是富Cr硬脆碳化物的析出,下降程度与热处理时间和温度有关,并针对Q345R和15CrMo两种材料提出适用的热处理工艺参数。

在设备研发方面,为提高堆焊效率,国内外电弧堆焊设备主要向多丝堆焊系统、多机头堆焊系统、多热源复合堆焊系统方向发展。此外,自动化堆焊前处理装备实现了堆焊效率的进一步提升,如碳弧气刨连续送碳棒结构解决了工作不连续等问题。数控技术的加入则使得堆焊设备在精度控制上得到保障,例如自动打磨系统与扫描相机相配合,提高了执行精确度。

(2) CMT 堆焊

CMT (Cold metal transfer, CMT) 堆焊是一种无焊渣飞溅的新型焊接工艺技术。CMT 堆焊过程中,电弧是稳定且连续的,热输入相对较小,工艺过程如图7所示。在电弧产生的过程中,焊丝向熔池方向运动,当焊丝伸进熔池时,电弧熄灭,焊接电流降低,此时焊丝回抽来促进熔滴分离,将熔滴过渡进熔池。CMT 堆焊可以获得较低的稀释率,有效降低母材对堆焊层成分的影响,减小工件变形。

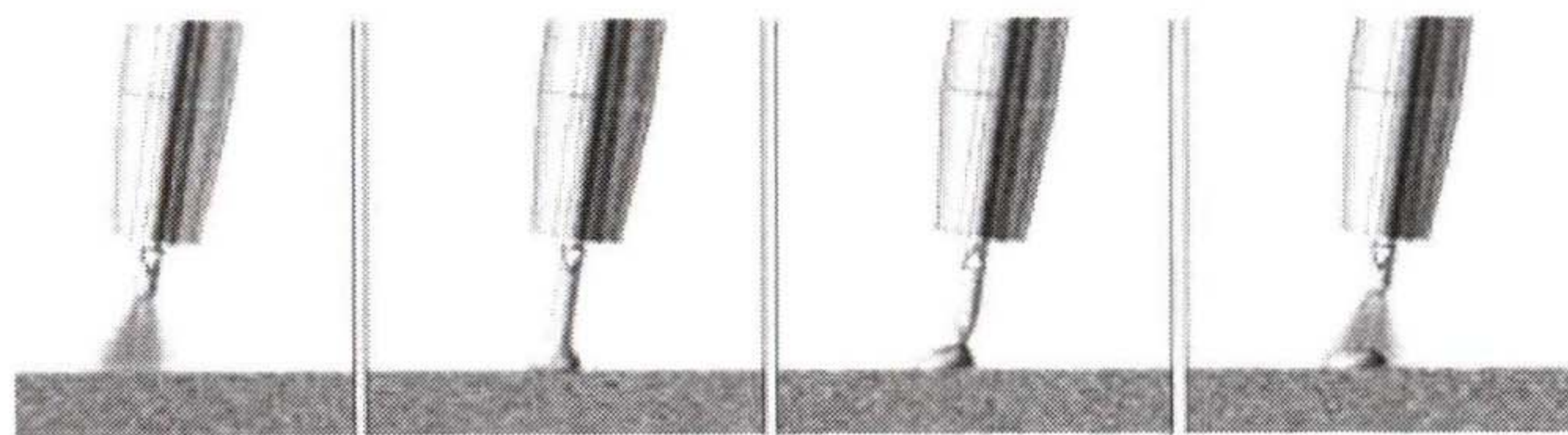


图7 CMT 堆焊示意图

Fig. 7 Schematic diagram of CMT surfacing

近10年来,随着全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设的快速推进,垃圾焚烧锅炉和生物质锅炉受热面管壁的高温腐蚀防护问题愈发突出。采用CMT技术在垃圾焚烧炉管排堆焊Ni基材料(如Inconel 625)为主的研究和工程应用已取得了良好的效果,使用寿命提高6~8倍。

在CMT堆焊材料方面,铁基、镍基、钴基以及金属陶瓷复合材料均能进行CMT堆焊。XUE等^[20]在铁含量极低的Inconel 625焊接堆焊层中,研究了距基体不同距离处的微观结构演变和晶间腐蚀行为,结果表明,堆焊层性能的不均匀性是微观结构演变过程中形成的固有特性,随着距基体距离的增加,晶间腐蚀抗性增强,此外,枝晶间(阳极)区域加剧了电偶腐蚀,界面附近出现了渗透最深的高敏感区域。THINESH等^[21]在AISI316L钢基材上堆焊Stellite-6合金,并通过使用TOPSIS方法优化

了CMT堆焊工艺参数,提高了堆焊层性能。

在CMT堆焊工艺优化方面,徐连勇等^[22]采用冷金属过渡加脉冲的堆焊工艺制备Inconel 625合金堆焊层,堆焊层成型良好且无缺陷,主要由Ni固溶体、MC型碳化物和Laves相构成,顶部为等轴晶,中部为树枝晶,底部为一次柱状晶;提高堆焊层中的小角度晶界和特殊大角度晶界中的 $\Sigma 3^n$ 晶界,能够提高晶间耐腐蚀性。周春东等^[23]研究了CMT Cycle Step堆焊工艺中焊接速度、送丝速度、间隔时间和熔滴数量等参数对堆焊层成形尺寸及表面特征纹路的影响,通过正交试验建立了各参数与堆焊层熔宽厚度、表面鱼鳞纹步长之间的回归模型。李立英等^[24]分别采用TIG和CMT工艺堆焊X80/2205双金属复合管管端,TIG和CMT堆焊层中铁素体与奥氏体的比例有差异,分别为37:63和54:46,如图8所示(蓝色为铁素体,红色为奥氏体)。同时CMT堆焊层的耐点蚀性能较TIG堆焊层更强,从堆焊效率和耐蚀性考虑,CMT更适合于复合管的管端堆焊。

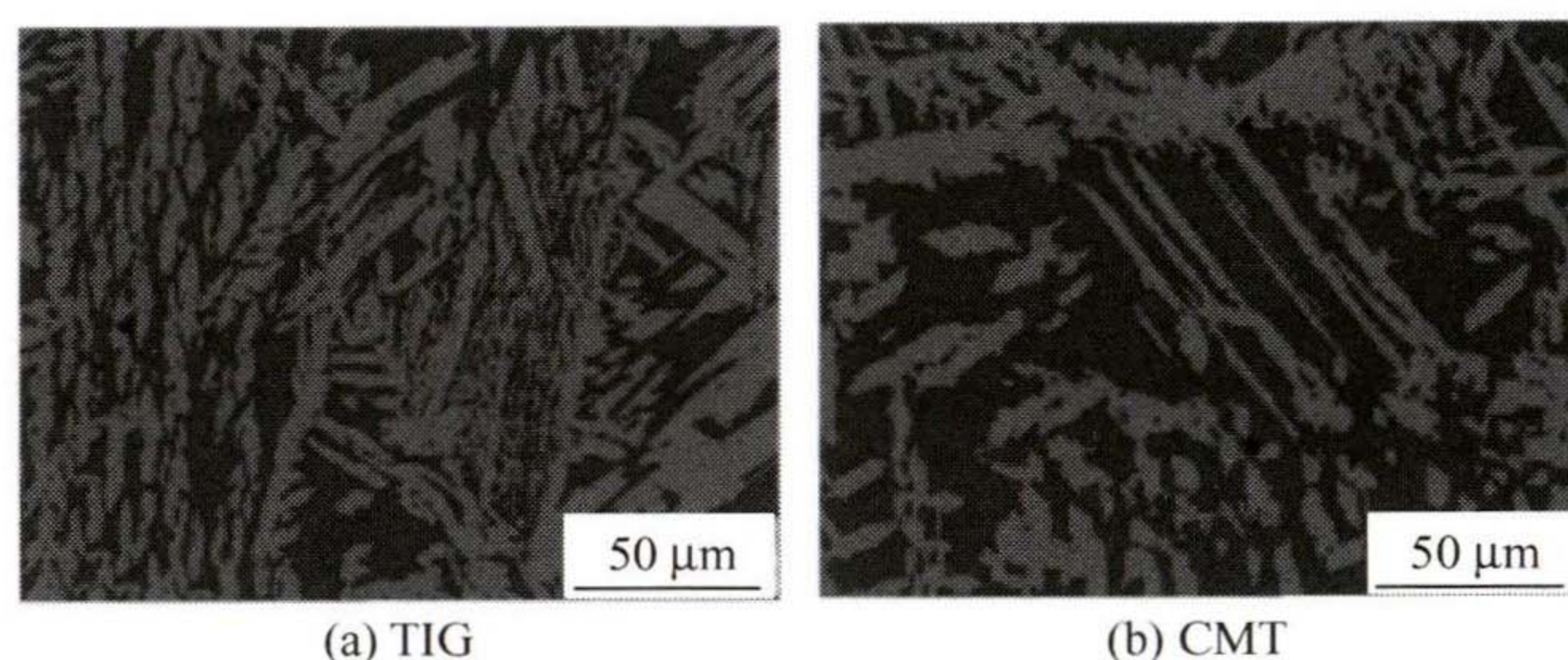


图8 耐蚀层 EBSD 形貌

Fig. 8 EBSD morphologies of corrosion resistant layer

1.1.2 高能束堆焊

高能束堆焊技术包括等离子弧堆焊、激光堆焊和电子束堆焊,其中研究和应用较多的是等离子弧堆焊和激光堆焊。

(1) 等离子弧堆焊

等离子弧堆焊是一种采用等离子弧作为热源,且能适应各种高合金钢以及高性能材料(如CoCrW等)堆焊要求的堆焊方法,其堆焊层比电弧堆焊层宽且薄。等离子弧堆焊示意图如图9所示。近年来,等离子弧堆焊技术在轨道交通、矿山机械设备的缺陷修复方面应用较广,且在航空领域的发动机叶尖磨损和叶片表面裂纹的修复方面,其堆焊过程稳定性更高。

在材料体系研发方面,高硼铁基材料依然是研究热点。宗琳等^[25]在Q235钢基体上进行了不同B质量分数的Fe-B-Ti-C合金等离子弧堆焊,结果表明堆焊层表层的显微硬度平均值随B质量分数的增

加不断提高,当 B 质量分数为 4.7% 时,堆焊层顶端的显微硬度平均值最高,为 991 HV_{0.2},当 B 质量分数达到 7.1%,堆焊层过共晶组织中产生大量块状脆性的 Fe₂B 初生相,堆焊层出现内部裂纹。

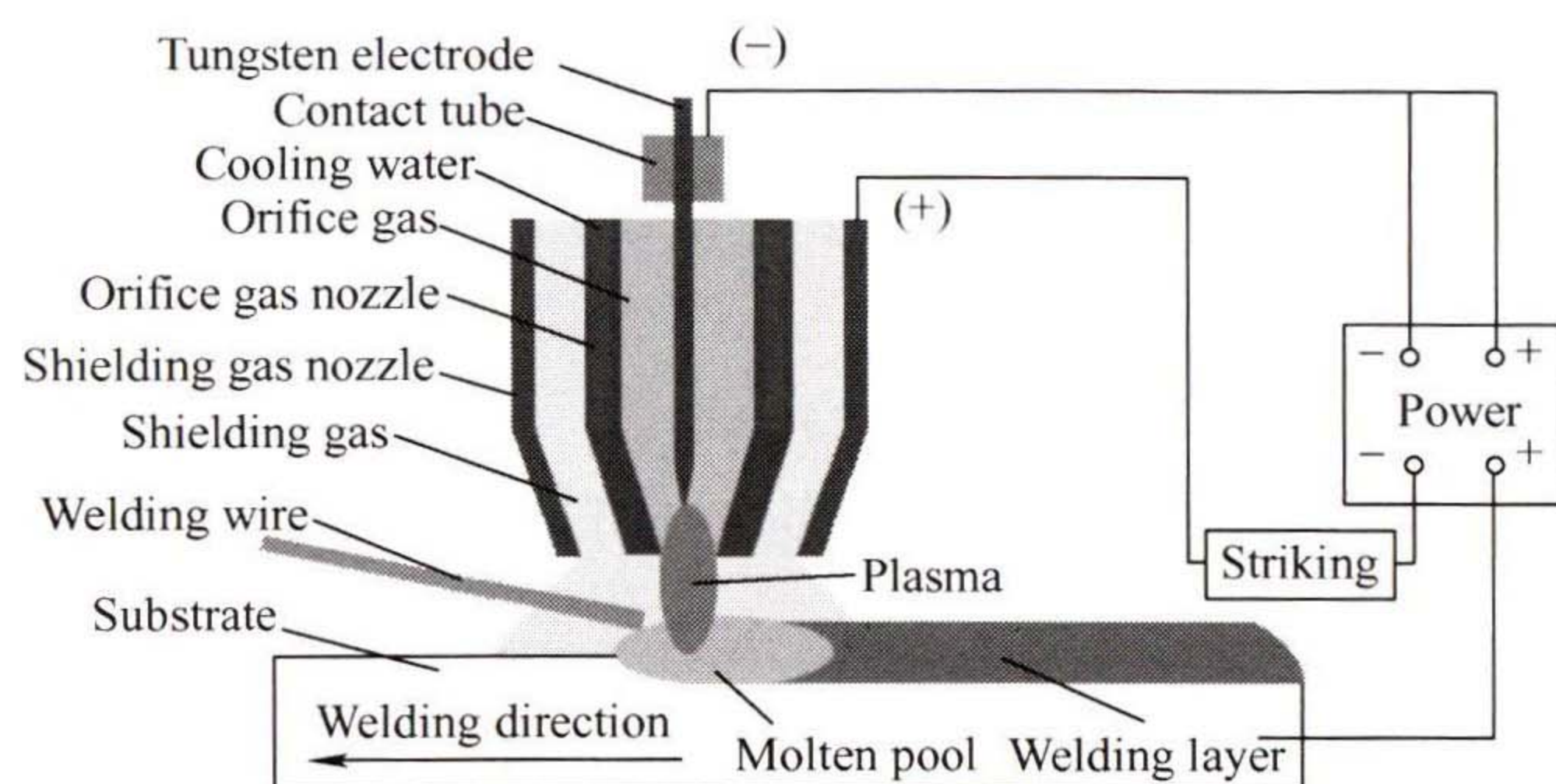


图 9 等离子弧堆焊示意图

Fig. 9 Schematic diagram of plasma arc surfacing

镍基材料、钴基材料均可通过等离子弧堆焊在工件表面形成高性能熔覆层。关锰等^[26]在 304H 不锈钢表面进行 Stellite6 合金等离子弧堆焊,结果表明,钴基堆焊层与不锈钢基体结合良好,堆焊层主要为柱状晶,熔合区为平面晶区。刘治宇等^[27]在 Q235 钢板上进行不同 WC 含量的镍基合金等离子弧堆焊,当 WC 添加量(质量分数)达到 30% 时,堆焊层中部的片层状共晶组织开始向块状转变,此时堆焊层的维氏硬度分布较稳定,平均值为 767.2 HV_{0.5},室温条件下的磨损失重最小。

金属陶瓷复合材料的等离子弧堆焊也是研究热点。郝建军等^[28]在 Q235 旋耕刀上进行 Fe / WC / CeO₂ 金属陶瓷复合层的等离子弧堆焊,其耐磨性相较 Fe / WC 堆焊层提高约 20%。王振宇等^[29]在 Q235 钢基体上进行了不同 Y₂O₃ 含量的镍基合金等离子弧堆焊,添加 Y₂O₃ 有利于堆焊层中碳化物的规则化,并以 WC 为核心生长。当 Y₂O₃ 的添加量达到 1.2% 时,堆焊层维氏硬度最高(970 HV_{0.5}),比未加 Y₂O₃ 的堆焊层硬度高 283 HV_{0.5}。

在工艺研究方面,主要集中堆焊电流、堆焊速度和送粉/丝速率等工艺参数、超声、磁场和热处理等辅助工艺对堆焊层组织性能的影响。KARTSEV^[30]建立的一阶多项式回归方程,能定性表征各工艺因素在堆焊层沉积过程中的贡献大小,为等离子弧堆焊的深入研究提供了理论计算依据。杜航等^[31]采用脉冲等离子丝粉混合熔覆技术在 TC4 表面制备 WC / Ti 堆焊层,发现在 WC 颗粒周围形成了以 TiC 相为主的强化组织,同时 WC 在堆焊层中有显著的“沉底”现象。张春霖等^[32]在 42CrMo

钢基体表面进行了 WC 颗粒增强镍基合金的等离子弧堆焊,研究发现,高预热温度和长保温时间能够有效阻碍 WC 颗粒的沉降,提高堆焊组织的均匀性,而 WC 颗粒和二次碳化物分布的均匀性则显著影响堆焊层的耐磨损性能。不同预热温度下堆焊层的磨损数据如图 10 所示,相较于 200 °C, 400 °C 预热具有更好的抗摩擦磨损性能,磨损率降低 51.89%。

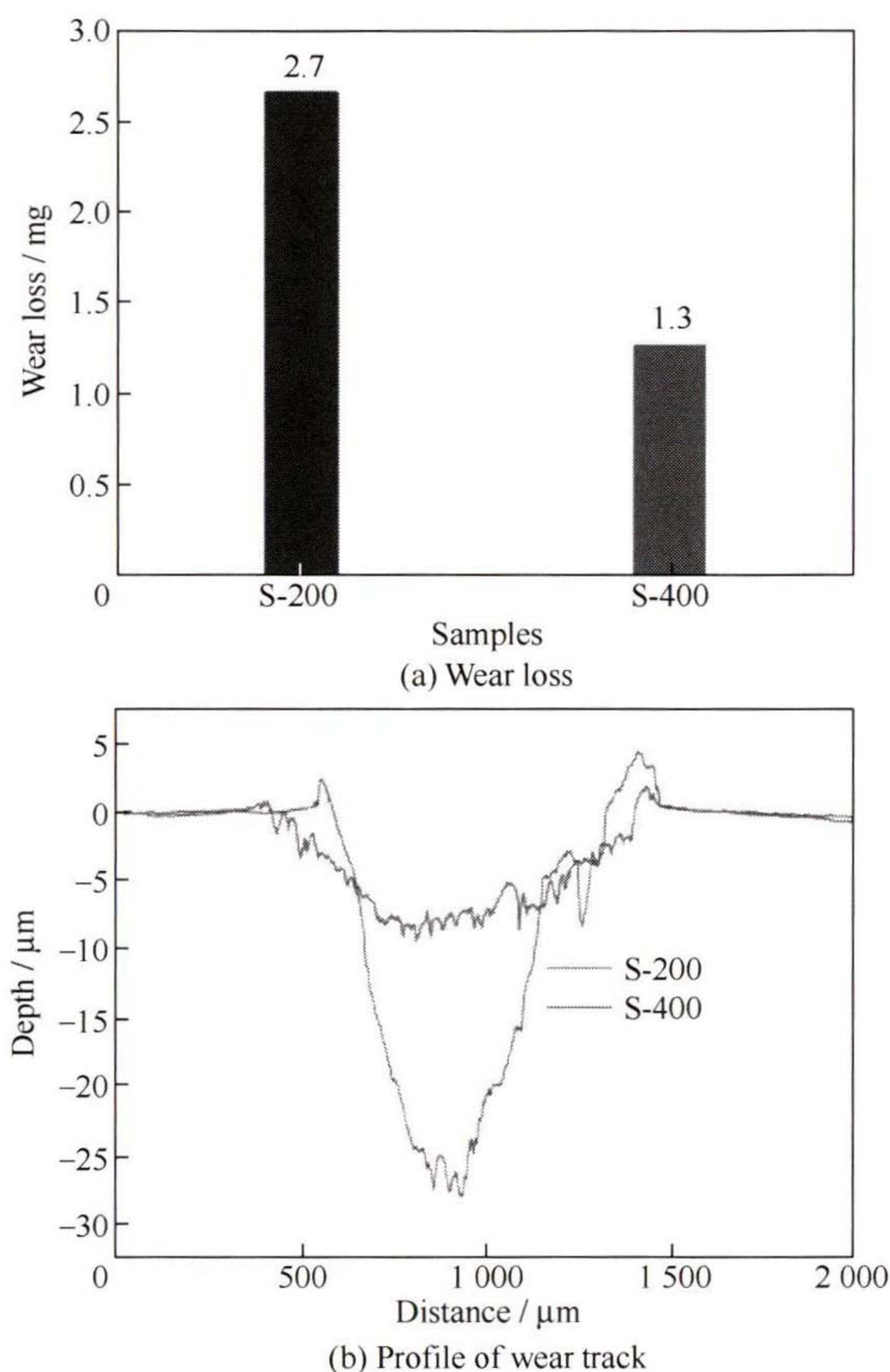


图 10 不同预热温度下堆焊层的磨损数据

Fig. 10 Wear data of the surfacing layers at different preheating temperature

(2) 激光堆焊

激光堆焊是采用激光束轰击堆焊材料及母材表面产生热能作为热源,从而进行堆焊的一种工艺。激光堆焊可分为激光合金化及激光熔覆^[4]。前者是用激光束有控制地熔化一定深度的母材,使新添加的合金元素与母材表层熔合,形成和母材及新添材料性质都不相同的新的合金表层,从而达到表面改性的目的。后者仅使预置或添加的合金全部熔化,而母材表面微熔,熔覆层与母材形成冶金结合。激光熔覆稀释率低,这是其与激光合金化的主要区别。

国内外关于激光熔覆的研究和应用广泛, 图 11 为激光熔覆示意图。激光熔覆具有能量密度高、加热冷却速度快、稀释率小、熔覆材料广泛等特点。

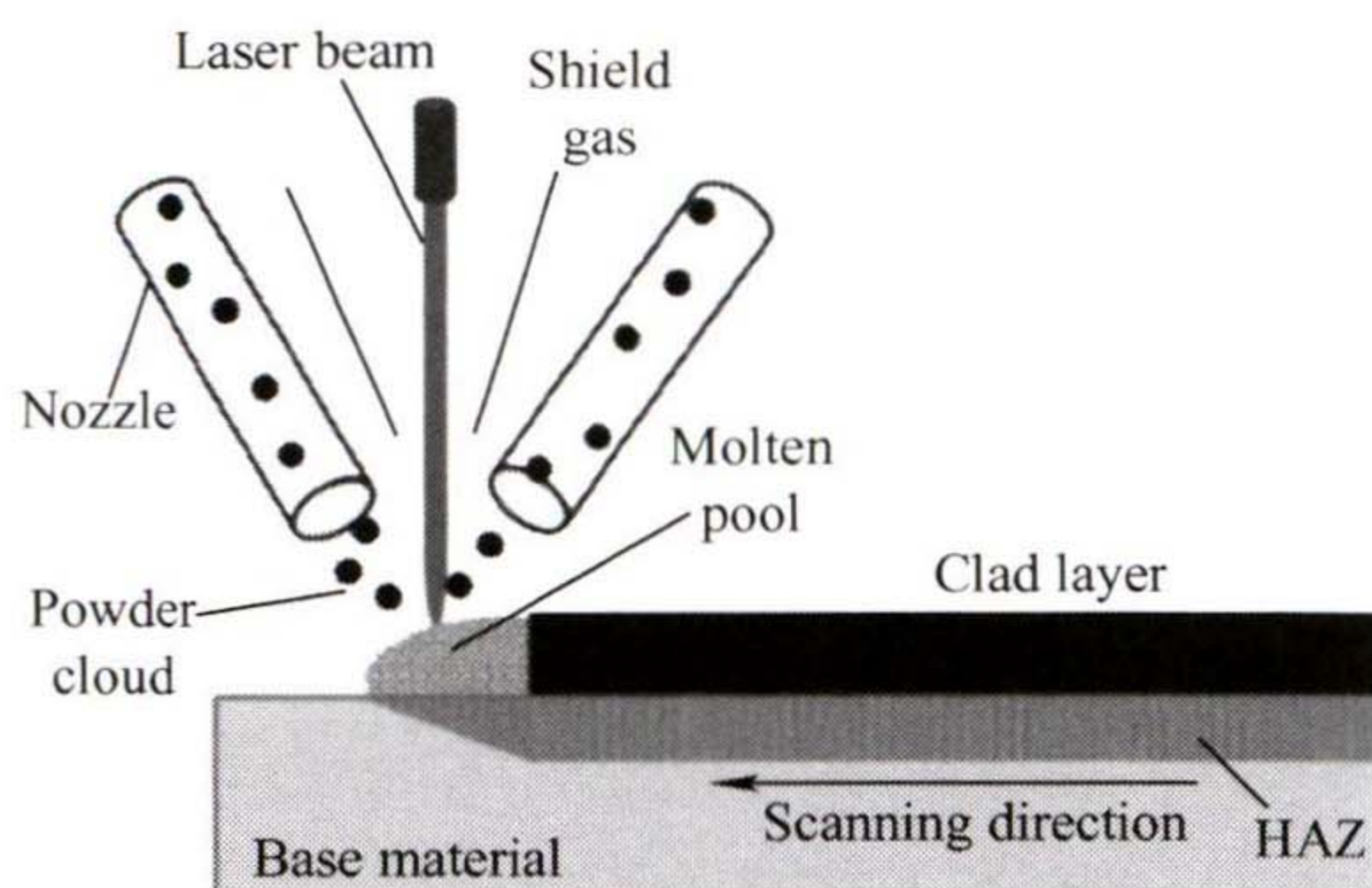


图 11 激光熔覆示意图

Fig. 11 Schematic diagram of laser cladding

近几年来, 得益于激光技术的快速发展, 除了传统的粉末激光熔覆技术外, 国内外相继开发了蓝光激光熔覆、丝材激光熔覆、同轴激光熔覆、多束激光熔覆等迭代技术。蓝光激光器的出现提高了铜、铝等高反射率材料对激光能量的吸收率, 极大提升了激光熔覆效率。丝材作为激光熔覆材料则大大提高了材料的利用率, 同时减少了粉尘污染, 促进绿色环保。同轴激光熔覆时, 多束激光同时作用于同

一熔覆区域, 丝材与激光束同轴耦合, 利用激光能量叠加或空间分布, 提高加工灵活性、熔覆效率和组织性能。多束激光熔覆中, 不同激光具有不同波长、方向和动态特征, 每个激光束可用于预热、熔化、精细加工或后处理等不同功能, 从而降低单束激光的热输入, 减少热应力和变形, 灵活调整多束激光的能量分布以满足复杂形状需求。

目前激光熔覆材料主要有丝材、自熔性合金粉末、陶瓷粉末、复合粉末和高熵合金, 主要类别及特点见表 3, 其中高熵合金近年来在激光熔覆领域引起了广泛关注和研究。谢玉莹等^[33]在 K418 镍基合金表面设计并制备了 NiCoCrTaAl-TiC 复合激光熔覆层, 熔池边界随 Al 含量的增加逐渐消失, 熔覆层硬度、耐磨性呈先减小后增加的趋势, Al 含量(质量分数)为 15% 时其耐磨性达到最佳, 较不加 Al 的熔覆层约提高 25%。张国建等^[34]在 Q345 钢表面进行了 FeCoNiCr_{0.5}Al_{0.2} 高熵合金激光熔覆, 高熵合金熔覆层与 Q345 钢基体冶金结合良好; 随着高熵合金熔覆层数的增加, 稀释率降低, 硬度提高, 耐磨性和耐腐蚀性大幅提升, 可以根据不同的性能需求灵活选择制备不同层数的熔覆层。

表 3 激光熔覆材料

Table 3 Materials used for laser cladding

Material type	Description & composition	Characteristic	Advantage
Wire	Includes metallic wires, cermet composite wires, and particle-reinforced metal matrix composite wires.	Broad applicability across various substrate materials and engineering scenarios	High material utilization, low cost, and high deposition efficiency
Self-fluxing alloy powder	Primarily include Fe-based, Ni-based, and Co-based alloys	Powders contain self-fluxing elements (Si, B) providing simultaneous deoxidation and fluxing action during deposition	Favorable processability and deposition morphology
Ceramic powder	Powders composed of carbides, nitrides, oxides, and silicides	Commonly employed in fabricating high-temperature wear-resistant, corrosion-resistant coatings and thermal barrier coatings	Good wear resistance, corrosion resistance, high-temperature strength, and oxidation resistance
Composite powder	Materials formed by mechanically blending or coating / encapsulating metallic materials with ceramic materials	Synergistic integration of metallic toughness / ductility with ceramic hardness / wear resistance	Balanced formability and comprehensive performance
High-entropy alloy	Alloys composed of five or more principal metallic elements mixed in equiatomic or near-equiatomic ratios	Exhibits characteristic effects: high-entropy effect; sluggish diffusion effect; severe lattice distortion effect; cocktail effect	High hardness, high strength, excellent corrosion and oxidation resistance

在激光熔覆工艺研究方面, 董刚等^[35]在 17-4PH 钢表面进行同材料的激光熔覆, 并采用热处理的方式释放应力和改善组织, 提高抗汽蚀性能。GARBADE 等^[36]在球磨机中对纯元素形式和铁合金形式 (FeTi、FeCr、FeB) 的预混粉末进行机械合金化, 开发了 Fe-Cr-C 堆焊合金, 通过激光熔覆工艺将预混粉末沉积在 SS316 基底上, 结果表明, 微观结构由复杂的碳化物和奥氏体基体组成, 经过 500 °C、4 h 回火处理后, 热处理合金的硬度从

463 HV 增加到 486 HV。张国松等^[37]在 27SiMn 钢基体表面分别进行了 1.6、1.8 和 2.0 kW 激光功率的 (Fe_{0.25}Co_{0.25}Ni_{0.25}Cr_{0.125}Mo_{0.125})₈₆B₁₄ 高熵合金激光熔覆, 熔覆层 XRD 衍射图谱如图 12 所示。当激光功率为 1.6 kW 时, 熔覆层以 BCC 相为主, 呈现 BCC+FCC 双相结构, 且由表及里 Mo₂B 含量不断减少、BCC 相含量逐渐增加, 熔覆层组织均质化最高, 摩擦因数相对稳定, 耐磨损性能最佳。

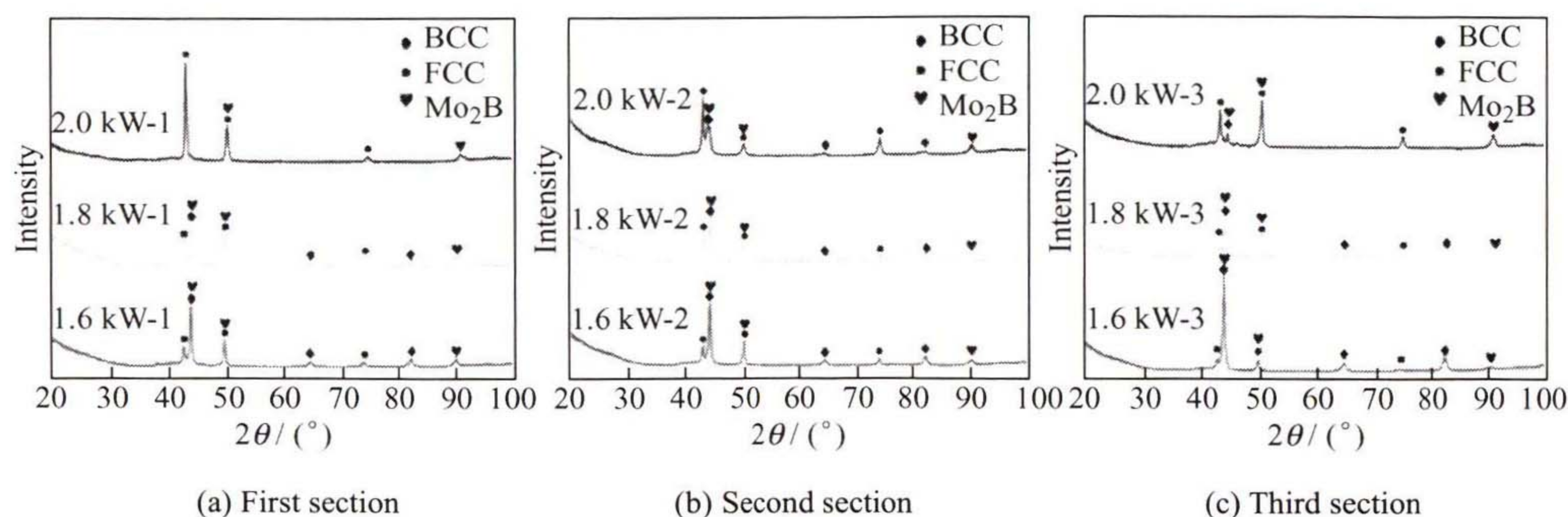


图 12 $(\text{Fe}_{0.25}\text{Co}_{0.25}\text{Ni}_{0.25}\text{Cr}_{0.125}\text{Mo}_{0.125})_{86}\text{B}_{14}$ 高熵合金熔覆层的 XRD 衍射图谱

Fig. 12 XRD patterns of $(\text{Fe}_{0.25}\text{Co}_{0.25}\text{Ni}_{0.25}\text{Cr}_{0.125}\text{Mo}_{0.125})_{86}\text{B}_{14}$ high-entropy alloy coating

1.1.3 特种堆焊

特种堆焊是利用火焰、摩擦热等特殊热源加热填充金属和母材，从而形成堆焊层的方法。特种堆焊技术主要包括氧乙炔堆焊、电渣堆焊、摩擦堆焊、高频堆焊、电火花堆焊等。关于特种堆焊近年来的文献研究较少，研究和应用相对较多的是氧乙炔堆焊技术。

氧乙炔堆焊是将乙炔与氧气混合燃烧产生的火焰为热源的堆焊方法，氧乙炔堆焊装置如图 13 所示。由于氧乙炔焰温度较低，氧-乙炔堆焊时母材的熔深很浅，甚至能将熔深控制在 0.1 mm 以内。因此利用氧乙炔堆焊工艺可以减少母材对堆焊层的稀释，堆焊层的质量容易保证。

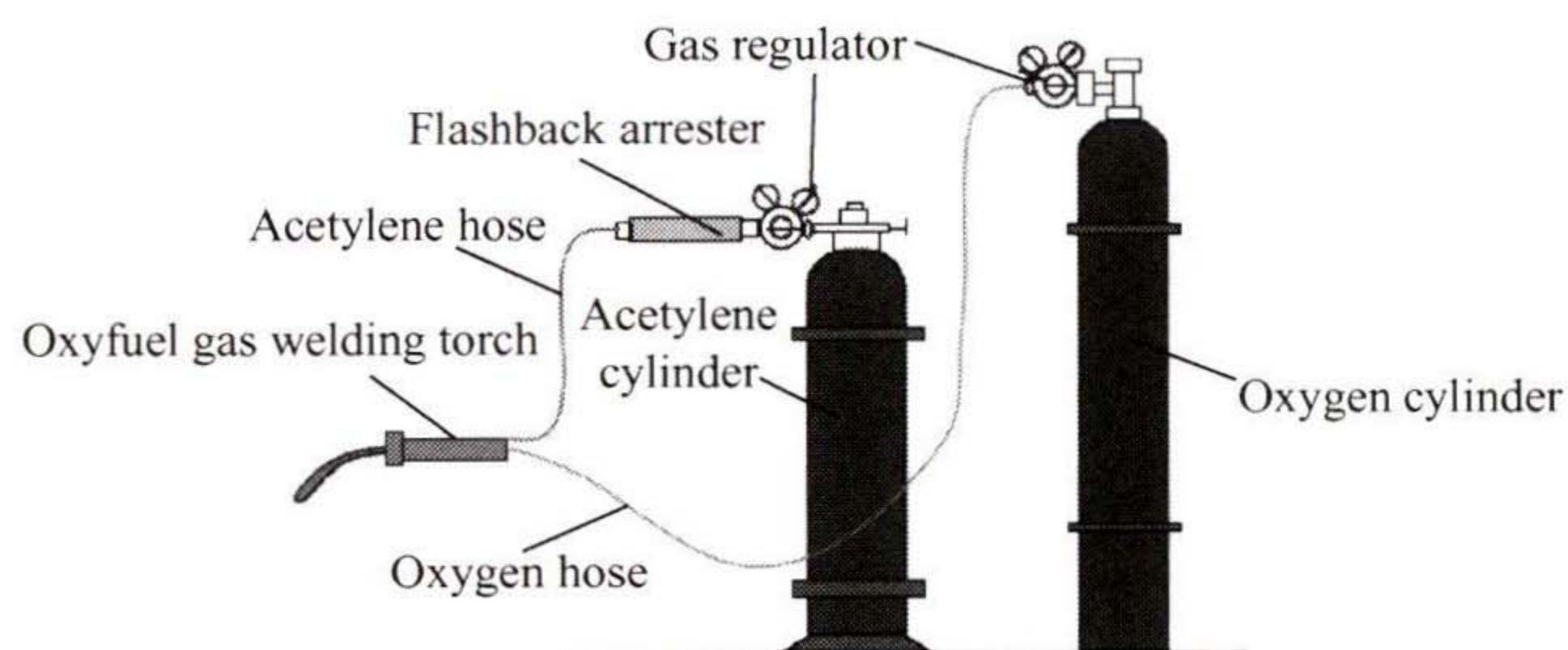


图 13 氧乙炔堆焊装置示意图

Fig. 13 Schematic diagram of oxy-acetylene surfacing device

氧乙炔堆焊过程中的可见度高，能够在小面积工件上施焊而获得成形良好的堆焊层。堆焊设备简单、价格便宜、操作方便简单，甚至可以使用气焊设备改装而成，适用于表面光洁同时质量要求较高的零部件小面积堆焊，广泛应用于犁铧、阀门、油井钻头零部件^[38]。

在堆焊材料方面，氧乙炔堆焊对材料的要求不高，甚至可以使用任何材质和形状的边角料作为堆焊材料，如中碳钢、低合金钢、结构钢、不锈钢、钴基合金、高铬合金铸铁等。针对不同堆焊合金可采用不同倍数的乙炔过剩焰，倍数越高渗碳越多，

但过高会使堆焊合金不平整、硬度不均匀，一般倍数 ≤ 4 。含碳量高的低熔点堆焊合金如高铬铸铁、钴基合金等采用三倍乙炔过剩焰，Cr-Ni 奥氏体钢采用 2~2.5 倍以防止渗碳降低耐蚀性。Ni 基合金采用小于 2 倍乙炔过剩焰或中性焰。吴伟建等^[39]在 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢表面进行 Co6B 合金的氧乙炔堆焊，结果表明两种合金具有良好的相容性，通过适当的热处理工艺，能够获得致密且均匀细小的堆焊层组织，并显著提高硬度。时海芳等^[38]采用氧乙炔堆焊在钻头牙轮牙爪表面制备 Co119 合金耐磨层，与感应熔覆相比，氧乙炔堆焊在耐磨层的应用中表现出更高的硬度和耐磨性能。氧乙炔堆焊 WC 颗粒增强材料的研究主要集中在 WC 颗粒的溶解机理及控制方面。戴乐等^[40]研究了堆焊工艺对堆焊层中 WC 颗粒溶解行为的影响，发现氧乙炔堆焊虽然火焰温度低，但是加热时间长，导致 WC 颗粒较长时间处于高温，溶解更为严重。ABYAZI 等^[41]研究了氧乙炔堆焊 WC 强化 Ni 基材料在不同冲击角度下的冲蚀行为，同时发现在 WC / NiCrBSi 复合涂层中存在 WC 的部分溶解行为^[42]，如图 14 所示，在碳化钨颗粒与镍基基体界面附近形成块状的富钨碳化物 W_2C 。

在工艺研究方面，主要集中在喷嘴直径和喷焊工艺优化。杨亚涛等^[43]研究了第三代核电站控制棒驱动机构钩爪钴基合金的氧乙炔堆焊，结果表明喷嘴直径、预热温度对组织及性能影响较大，喷嘴直径 (1.5~2.0 mm) 越大，制备的堆焊层硬度越高，且组织由近共晶组织转变为过共晶组织。在工艺优化上有研究表明在堆焊过程中使用大功率的软火焰，并在重熔过程中使用中性火焰或弱碳火焰，可以确保堆焊层表面光滑、均匀，减少孔隙率，从而提高堆焊层的性能。

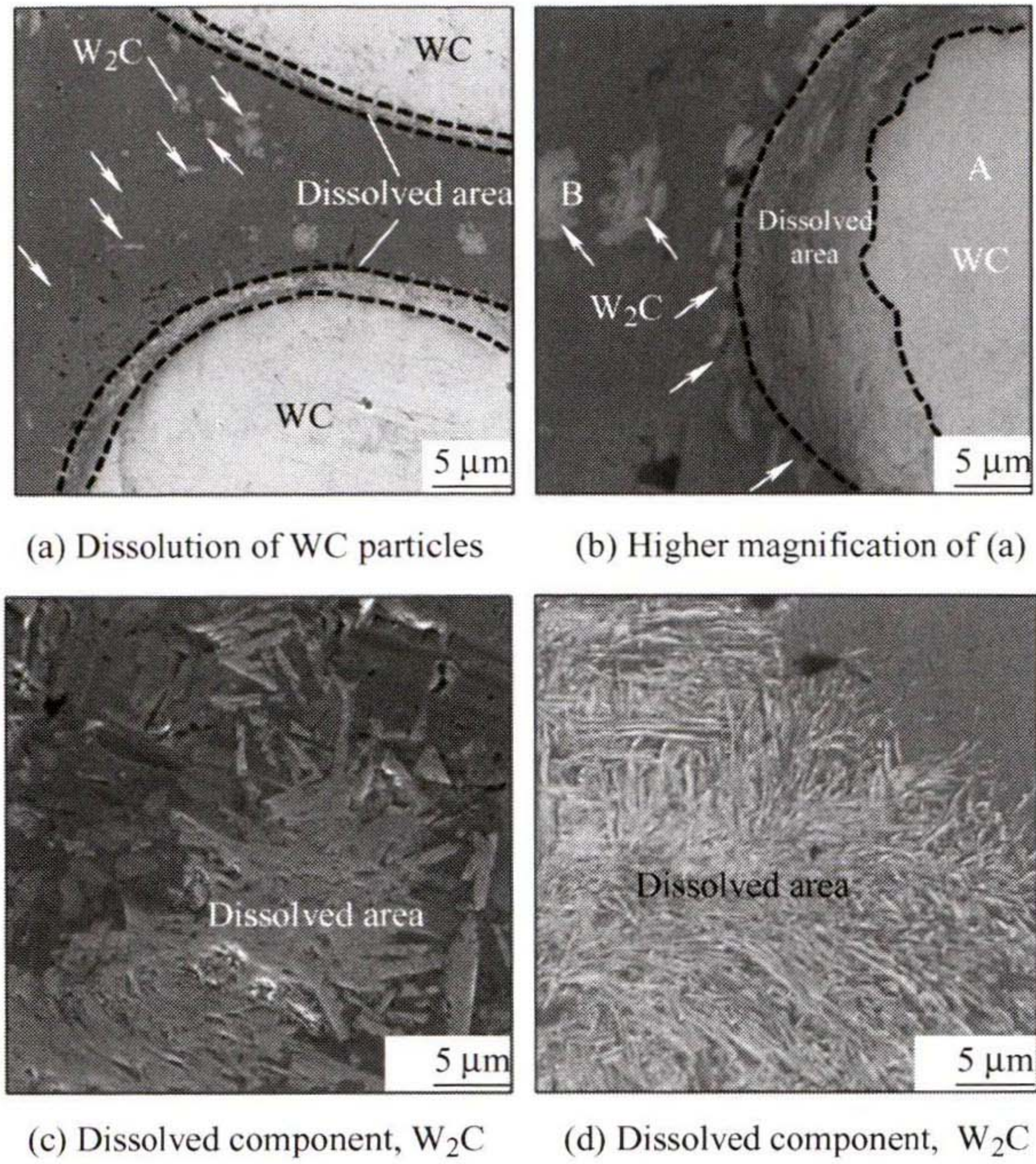


图 14 碳化钨颗粒在 WC / NiCrBSi 复合涂层中的溶解 FE-SEM 图

Fig. 14 FE-SEM micrographs showing the dissolution of tungsten carbide (WC) particles in WC / NiCrBSi composite coating

1.2 堆焊技术的行业应用

堆焊技术在石油化工、水泥矿山、冶金电力等

多个行业中有着广泛应用，其主要目的是通过在金属表面添加一层具有特定性能的材料来改善零件的耐磨性、耐蚀性、抗疲劳性等性能，从而延长设备的使用寿命并降低维护成本。

1.2.1 石油化工

石化行业动力设备的大型机组等机械设备故障率较高，如风机、汽轮机、压缩机、烟气轮机等，风机叶片、汽轮机高速转子及瓦轴颈、压缩机转子叶轮及叶片、烟气轮机叶片及轮盘等零部件易出现气体冲刷和腐蚀失效。此外，在换热器、油水过滤器、阀门、塔、炉、罐、管道等部位，因原油中含有大量的硫、氯离子也容易造成腐蚀^[44]。

石油化工行业广泛采用多种堆焊工艺，如等离子粉末堆焊、带极电渣堆焊、埋弧堆焊等，表 4 为部分石油化工行业堆焊应用。根据不同的工作环境和性能需求，可以选择合适的材料和工艺参数，以达到最佳的堆焊效果。例如通过堆焊修复阀板密封面，延长阀门的使用寿命，同时节省大量生产成本；基于 PLC 控制实施野外恶劣环境下的石油钻杆耐磨带自动堆焊，保证焊接过程的稳定性和可靠性，如图 15 所示，石油钻头的堆焊技术不仅提高了钻头的耐磨性，还提升其使用寿命。

表 4 石油化工行业应用

Table 4 Applications in petrochemical industry

Technology	Typical components and application areas for surfacing	Research and application examples
Oxy-acetylene surfacing	Valve sealing surfaces, pump casings, oil drill bits, drill pipes	Co119 cast rods were utilized for surfacing on KX84-310 journal bearings, achieving a resultant hardness of 57 HRC.
Electroslag surfacing	Hydroprocessing reactor internal walls ^[45]	Single-layer strip cladding technology has matured internationally and is progressively becoming the mainstream method for internal wall surfacing of hydrogenation reactor vessels ^[46] . Domestic standards typically specify a single-layer cladding thickness between 4.0 and 4.5 mm for the internal walls of hydrogenation equipment ^[47] .
Submerged arc surfacing	Bimetallic pipe end preparation	Buttering welding was performed on 2205 / X80 bimetallic pipe ends using ENiCrMo-3 filler metal, yielding an average tensile strength of 728 MPa with hardness values well-matched to the base material ^[48] .
Plasma arc surfacing	Sealing rings, valve seats, valve cores, PDC drill bits	The sealing surfaces of mining equipment gate valves were processed via plasma transferred arc powder surfacing with a nickel-based corrosion and wear-resistant alloy, effectively replacing traditional manual oxy-acetylene welding.
Tungsten inert gas surfacing	Pipe internal walls	The internal wall of an X70 pipeline was clad with duplex stainless steel ER2209 employing the Hot-Wire TIG surfacing process ^[49] .

等离子粉末堆焊技术因其高结合强度、灵活的粉末设计及工艺性、高生产效率在石油化工行业中应用广泛，常被用于高磨损、高腐蚀和高温环境下的设备零部件修复和强化，通过将高温合金材料如

镍基或钴基合金粉末堆焊到石化设备表面，提高其耐磨性和耐腐蚀性。对于一些特殊材料或复杂形状的零部件，通常还需要结合其他表面处理技术来达到最佳效果。

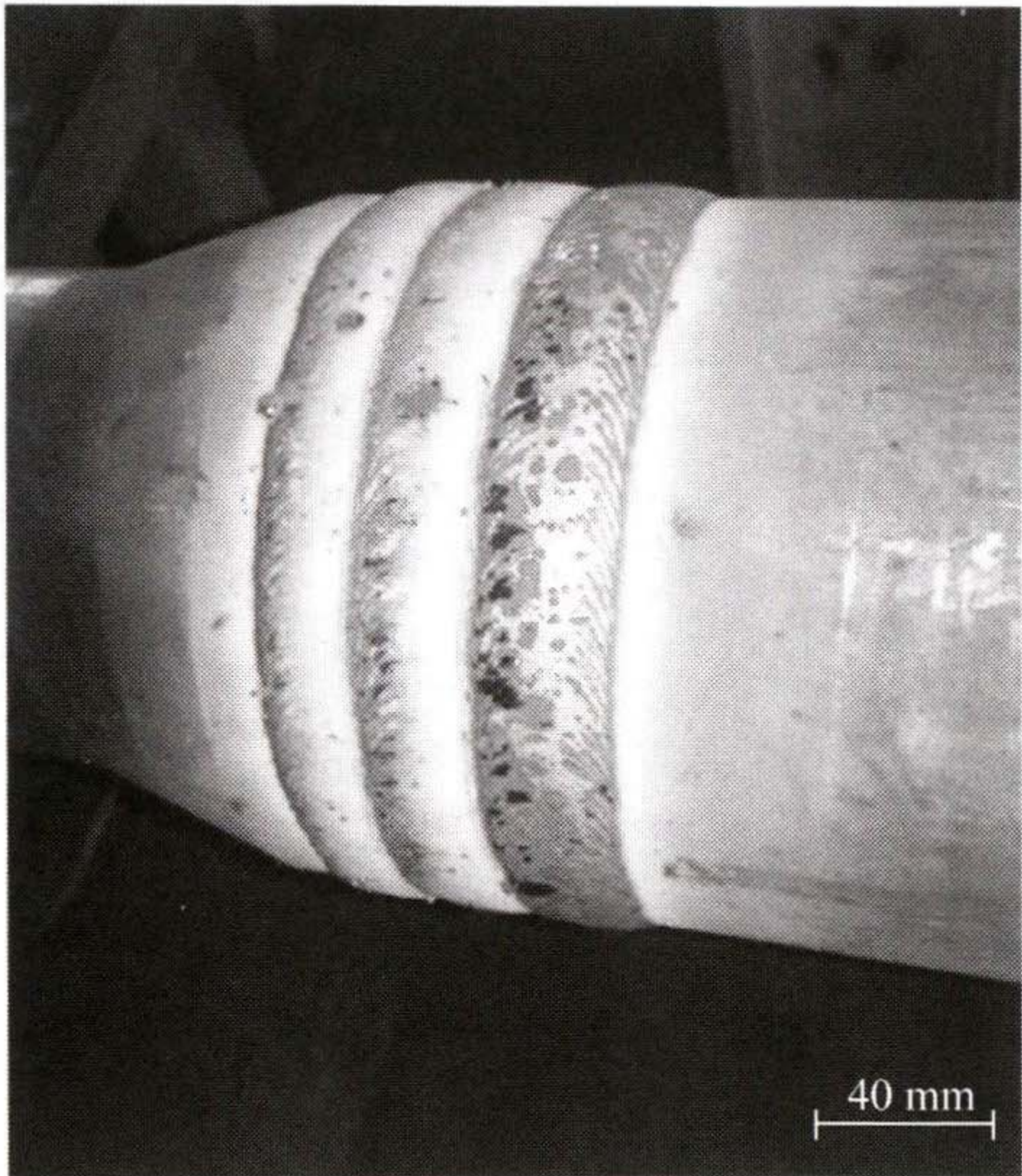


图 15 石油钻杆耐磨带堆焊

Fig. 15 Surfacing of wear-resistant strip on oil drill pipe

1.2.2 水泥矿山

堆焊技术自 20 世纪开始广泛应用于水泥矿山工业中的各种机械设备，如立式辊磨、辊压机、球磨机等，以解决这些设备在运行过程中由于磨损出现的效率下降和能耗增加等问题。通过堆焊耐磨材料，可以显著提高设备部件的耐磨性能，从而延长设备的使用寿命并减少维护成本。在选择堆焊工艺时，需要根据设备部件的最终性能要求（如高耐磨性或抗冲击性）来决定。常见的堆焊方法包括电弧堆焊、手工补焊等。堆焊技术在水泥建材中的应用已非常成熟，形成了《水泥工业用耐磨件堆焊通用技术条件》JCT 2104—2012 等行业标准。

以中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司为代表的从事再制造的企业在水泥建材工业堆焊再制造方面具有丰富的应用案例，在电弧堆焊再制造中引入了钢结硬质合金及其复合堆焊等技术，形成了系列耐磨产品，提高了产品服役寿命，图 16 为硬质合金电弧堆焊制造的辊压机柱钉辊产品。

矿山机械堆焊主要以液压支架、采煤机、刮板输送机等煤矿综采成套装备为对象，以附加值高、易磨损失效、结构复杂、零部件种类繁多的行星减

速器行星架、液压支架立柱、刮板输送机链轮轴等为主体，借助电弧堆焊、等离子弧堆焊、激光熔覆等再制造技术提高设备耐磨性和延长使用寿命。例如在矿用链轮表面堆焊一层马氏体不锈钢层，提升其耐磨性和耐腐蚀性；采用等离子弧堆焊技术在截齿表面堆焊特殊合金粉末，有效延长截齿的使用寿命，避免过早失效。



图 16 辊压机柱钉辊

Fig. 16 Column nail roller of roller press

1.2.3 冶金电力

冶金行业生产设备大部分在高交变应力、高热应力的恶劣环境下运行，如槽型辊、校直辊、半钢辊、连铸辊、高炉溜槽、铸管模、料钟、热（冷）轧工作辊等。在这些设备中，各种轧辊无疑是其中最关键的设备零件。轧辊通常为双金属结构，由工作层和辊芯两部分通过冶金结合组成，芯部由高韧性材料制成，表面为具有高硬度特性的工作层。轧辊在实际轧制过程中受较大轧制循环应力、瞬间强烈冲击力、辊面周期性接触应力、薄弱处周期性冷热循环热应力以及轧辊生产过程中的残余应力，并且受冶金缺陷等因素影响，往往会造成辊面磨损、疲劳裂纹、辊面剥落、轧辊断裂等结果。在应用方面，早在 20 世纪 50 年代，我国就开始使用堆焊方法修补普通钢质轧辊^[50]。表 5 为堆焊技术在冶金电力行业的部分应用。等离子弧堆焊再制造技术提高了轧辊的抗磨损性能、有效延长其使用寿命，得到了比较广泛的应用。研究人员围绕等离子弧堆焊技术

表 5 冶金电力行业应用

Table 5 Applications in metallurgical power industry

Technology	Typical components and application areas	Research and application examples
Arc surfacing	Rolls, four-roll crusher roll shells, edger rolls for wide hot strip mills; pulverized coal boiler water walls & superheaters, hydro turbine guide vanes.	Following heat treatment, the roll achieved a hardness of 65 HRC; the service life of the repaired edger rolls demonstrated a 2.5-fold increase.
Plasma arc surfacing	Rolls, nuclear power steam generator tube sheets, etc.	Research indicates that dual hot-wire plasma cladding offers comprehensive advantages in terms of production efficiency, cladding layer purity, and overall quality for large-area nickel-based alloy cladding on tube sheets ^[51] .
Laser cladding	Rolls, nuclear valve sealing surfaces, etc ^[52] .	Cobalt-based alloys and nickel-based alloys are deposited onto the sealing surfaces of nuclear valve discs.

在失效轧辊修复再制造、降低再制造轧辊成本、轧辊循环堆焊修复、防止再制造轧辊堆焊层开裂等方面开展了大量研究与应用, 目前堆焊技术应用及产业化较为成熟。

电力系统的磨损腐蚀环境复杂, 常常由于系统中某个零部件的局部磨损或高温腐蚀而整体失效, 如火电锅炉、汽轮机、发电机的三大主机系统, 输煤、输灰、制粉等辅机系统中的中速辊、螺旋输煤管、球磨机衬板、引风机叶片、排粉风机叶轮、碎煤机锤头、风扇磨锤头、落煤斗, 水电站的水轮机叶轮、核电阀门, 垃圾焚烧电站水冷壁等部件, 在恶劣工况环境条件下运行时常因磨损和腐蚀而失效。依靠表面堆焊的方法进行部件的表面预防护和已磨损部件的堆焊修复, 可以显著增加设备的使用寿命。此外, 堆焊技术还被用于冶金电力行业超大型工件的增材制造, 图 17a、17b 分别为哈电、东电研制的堆焊增材制造冲击式和轴流式水轮机真机转轮, 一定程度上解决了堆焊过程的质量稳定性差和劳动强度高等问题。



(a) Impact water turbine rotor



(b) Rotor of axial water turbine

图 17 水轮机转轮

Fig. 17 Rotating wheel of water turbine

1.2.4 农林机械

农林机械在使用过程中常由于环境影响、机械质量等问题导致其关键运动部件过度磨损, 因此农林机械设备制造需要质量更高的材料以应对不同的工况^[53-54]。由于长期在土壤中作业, 磨粒磨损是犁铧和深松铲等耕地农具最主要的磨损形式, 水泵、灌溉机等灌溉机械主要的磨损类型是腐蚀磨损。随着农林机械的发展, 农林机械关键运动部件的耐磨性、耐腐蚀性不足已成为制约其普遍推广应用的重要因素。

采用等离子弧堆焊、激光熔覆等表面技术提高农林机械关键运动部件的耐磨性, 有利于提高农林机械的工作效率, 部分农林机械常用技术及示例见表 6。目前各种耐磨材料和表面技术在农林机械关键运动零部件上的应用还处于初级阶段, 图 18 为旋耕刀刀片表面耐磨层堆焊。

表 6 农林机械常用技术及示例

Table 6 Common technologies and examples of agricultural and forestry machinery

Technology	Typical components and application areas	Research examples
Plasma arc surfacing	Lawn mower blades, subsoiler shallow points	Blades: coated with an Fe-Cr alloy and subjected to a microheat treatment. This treatment extended the service life by nearly three times compared to standard 65Mn steel cutting blades. Shovel points: plasma-clad layer demonstrated a 1.7 to 2 times improvement in wear resistance and a 3 to 10 fold increase in microhardness compared to the untreated base material.
Laser cladding	Lawn mower blades, rotary tiller blades, subsoiler shallow points	Coatings: microhardness of various coatings—including Ni35B, TiC, a WC nickel-based alloy coating, and a Ni62 composite coating using WC+TiC as the reinforcement phase—was measured to be 2.5 to 3 times greater than that of the substrate material.



图 18 旋耕刀耐磨层堆焊

Fig. 18 Wear-resistant layer surfacing on rotary tiller blade

等离子弧堆焊是提高农林机械零部件耐磨性的常用技术, 但对农林机械零部件的形状和厚度有一定要求, 处理的零部件部位均为平面结构。激光熔覆在经过最佳工艺参数处理后或者添加不同的颗粒, 可以大幅度提高农林机械关键运动零部件耐磨性能, 其热量集中、热影响区小的特点使其适合于具有空间曲面结构的农林机械零部件修复, 不易发生变形。激光熔覆在我国农林机械制造中的应用尚

不普遍,但发展前景良好。

1.2.5 航空航天

航空发动机的一些零部件在使用过程中,因磨损、腐蚀或其他损伤问题改变了其原有的几何形状和尺寸,从而破坏了零件之间的工作能力和配合特性。目前,航空发动机零部件的修复和强化广泛采用堆焊技术。

为了满足飞机燃气轮机降本增效的需求,在关键易损零部件表面激光熔覆一层高机械强度和高耐温性能的材料,如镍基高温合金,在航空航天领域发挥了重要的作用^[55]。图 19 为航空发动机叶片堆焊,通过堆焊技术可以在发动机叶片、涡轮叶片等高温高速工作的零部件上形成耐磨、耐腐蚀的合金层,从而提高其使用寿命和性能。此外,通过堆焊工艺在喷嘴表面形成一层具有高耐磨性和抗腐蚀性的合金层,可以确保火箭喷嘴在极端工作条件下的可靠性和耐用性;通过堆焊在航天器外壳上形成一层防护涂层,增强其抗冲击和抗腐蚀能力,从而提高航天器的整体性能和安全性;通过激光熔覆增材制造技术,可以制造出特定形状和性能要求的结构件。

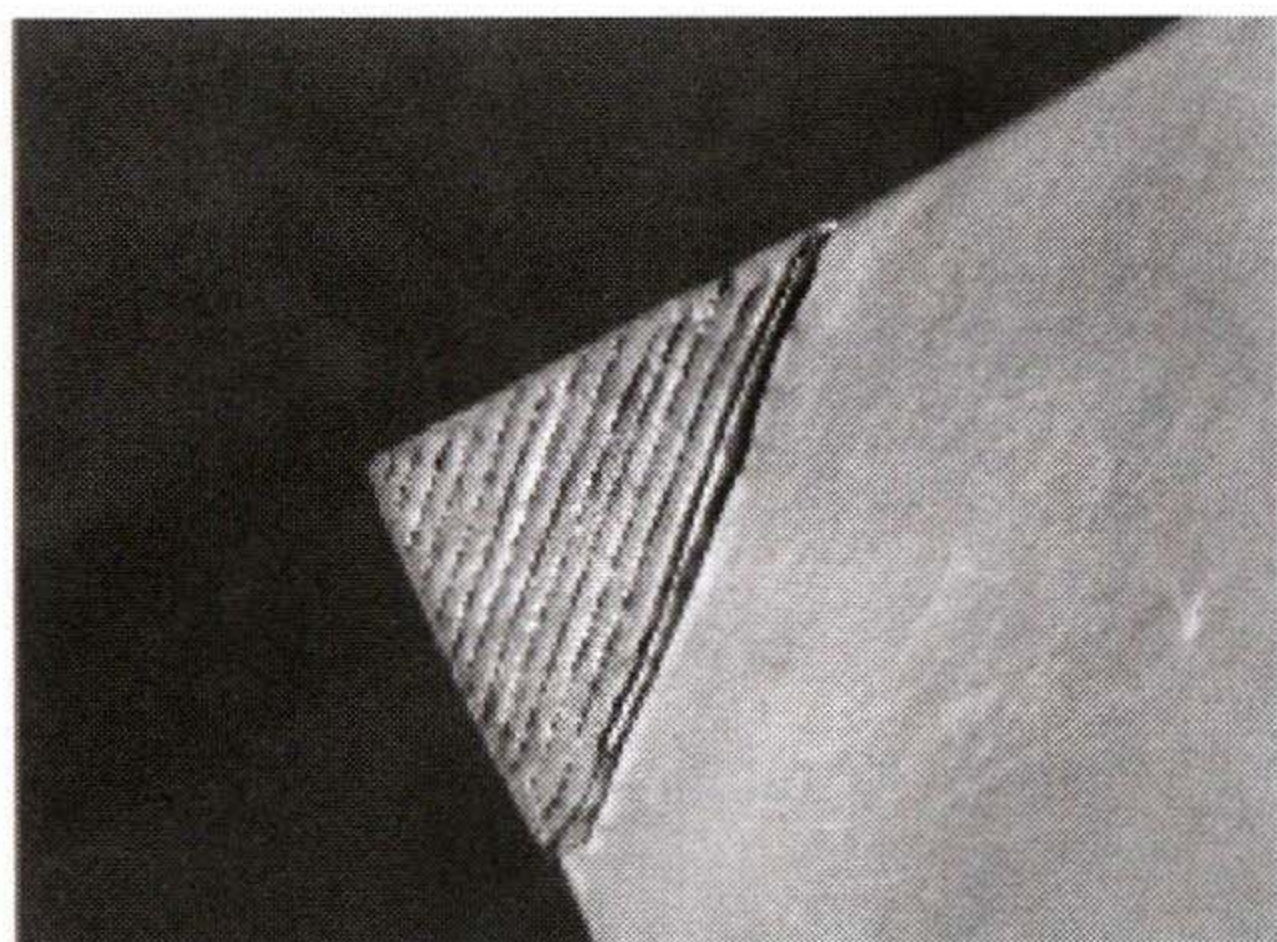


图 19 航空发动机叶片堆焊

Fig. 19 Welding of aviation engine blades

1.2.6 医疗器械

堆焊技术在医疗卫生器械领域具有重要的先进应用,主要用于提高器械的耐磨性、耐腐蚀性、生物相容性以及功能性。

在提高器械的耐磨性和寿命方面,医疗手术器械在使用过程中需要承受高频摩擦和机械应力。堆焊技术可以通过在器械表面堆焊耐磨材料提高其耐磨性和使用寿命。典型代表为堆焊碳化钨涂层的骨科手术钻头和锯片、堆焊硬质合金的牙科钻头。国外一项股骨颈骨折接受内固定手术病例中,采用碳化钨六角钻头切割螺钉周围的骨质,成功移除了螺钉^[56]。

堆焊技术可以通过堆焊生物相容性材料以满足医疗器械接触人体组织或体液所要求的耐腐蚀性和

生物相容性。典型代表为堆焊钛合金或钴铬合金涂层的人工关节和植入物、堆焊不锈钢或镍钛合金的手术钳和镊子。激光熔覆技术通过优化熔覆层结构、减少金属离子释放、提高熔覆质量、增强力学性能以及促进细胞附着与生长等多种方式,在提高生物相容性方面发挥了巨大作用。有研究表明,激光熔覆制备的氮化硅熔覆层具有良好的生物活性和抗菌性能,有利于提高医疗器械在人体内长期使用的效果^[57]。在 Ti-6Al-4V 合金上堆焊 Ti-Al₂O₃ 时,通过调整激光扫描速度和混合粉末比例,可以制备出具有优异耐腐蚀性的熔覆层,同时减少对周围组织的潜在毒性^[58]。医疗器械中的金属材料(如钛、不锈钢等)在长期使用过程中可能会释放金属离子,导致生物相容性问题。激光熔覆可以通过改性表面或添加生物活性熔覆层来减少金属离子的释放。例如,激光熔覆被用于在不锈钢表面涂覆羟基磷灰石,从而改善其生物相容性和减少金属离子的潜在毒副作用^[59]。

堆焊技术在医疗卫生器械领域的应用前景广阔,随着材料科学和制造技术的进步,其应用将更加广泛和深入。

1.2.7 核能动力

先进堆焊技术在核能动力领域具有重要的研究和应用价值,主要用于提高核电站关键部件的耐磨性、耐腐蚀性、抗辐射性以及延长其使用寿命。典型部件如核反应堆压力容器、蒸汽发生器、核燃料组件、核电站泵阀部件、核废料处理设备。

先进堆焊材料的研发和应用是提升核能设备性能的重要手段,镍基合金因其优异的耐腐蚀性和高温性能被广泛应用于蒸汽发生器管板等关键部件的制造,基于铜、硅、铁和镁氧化物的复合激光材料显著提高了耐腐蚀性^[60],石墨烯增韧陶瓷用于核电管道堆焊修复,以提升材料的韧性和耐磨性。图 20 为蒸汽发生器管板镍基堆焊现场图。



图 20 蒸汽发生器管板镍基堆焊

Fig. 20 Nickel-based overlay welding for steam generator tube sheets

在核岛机械设备中的典型堆焊应用主要为修复和强化关键部件耐腐蚀性和机械强度。在第四代反应堆中的应用方向主要集中在熔盐堆结构材料、防腐蚀处理、激光金属沉积等。研究表明在小型模块化反应堆中,通过激光堆焊 Alloy 82 合金进行防腐蚀处理特

别适用于需要无钴材料的第四代反应堆^[61]。
随着新材料、新工艺和智能化技术的发展,堆焊技术在核能领域的应用将更加广泛和深入,为核电站的安全运行和可持续发展提供重要支持。表 7 为堆焊技术在核能动力行业的部分应用。

表 7 核能动力行业应用
Table 7 Applications in the nuclear power industry

Typical components and application areas	Service conditions and requirements	Application examples
Nuclear reactor pressure vessel	Subjected to long-term high temperature, high pressure, and radiation, leading to material aging and degradation.	Strip cladding and laser cladding are applied to the inner surface of pressure vessels.
Steam generator	Long-term exposure to high-temperature, high-pressure water vapor, prone to corrosion and stress corrosion cracking.	Nickel-based alloy overlay welding and plasma surfacing provide surface protection for tube sheets ^[62] .
Nuclear fuel assembly	Operates under sustained high temperature, high pressure, and intense radiation, susceptible to wear and deformation.	Electron beam surfacing enhances zirconium alloy or stainless steel surfaces, while laser material deposition repairs localized damage.
Nuclear power plant pump and valve components	Long-term contact with high-temperature, high-pressure fluids, susceptible to corrosion and erosion / wear.	Tungsten carbide surfacing is used for pump and valve sealing surfaces, and cobalt-based alloy overlays improve corrosion resistance and high-temperature performance.
Nuclear waste treatment equipment	Long-term exposure to highly radioactive substances, requiring exceptional corrosion resistance and radiation resistance.	Titanium alloy is deposited on nuclear waste containers, and ceramic materials are applied via surfacing to enhance radiation resistance.

2 热喷涂技术进展及应用

热喷涂技术是一种将喷涂材料(粉末、线材或棒材等)加热到熔融或半熔融状态,用高速气流使其雾化,并以一定速度喷射到基体表面,形成耐蚀、耐磨及耐高温等特性涂层的技术。

该技术最重要特点是:能实现在任意基体表面沉积制备的任何材料涂层,且能使零部件表面性能,特别是耐磨损性、耐腐蚀性、耐高温隔热性等性能得以强化,显著提升使用寿命。热喷涂技术广泛应用于国民经济重要领域,成为提升高端装备性能不可或缺的技术。如热障涂层制备技术在航天航空领域被认为是高性能航空发动机与重型燃气轮机制造的关键技术之一。

2.1 热喷涂技术研究进展

常见的热喷涂工艺根据热源性质不同可分为火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂等,按照喷涂粒子速度和温度的不同,还可以进一步细分为普通喷涂和超音速喷涂等。近年来,冷喷涂技术在基础研究和产业应用上都得到了长足发展,其他喷涂技术也均有所突破。

2.1.1 冷喷涂技术

冷喷涂是近 20 年发展起来的新型喷涂方法,采用微米尺度(5~50 μm)的粉末粒子,在完全固态的情况下,通过高速撞击(300~1 200 m/s)产生的剧烈塑性变形实现粒子结合的材料沉积方法^[63];其低温固态沉积特性可避免高温下材料熔化凝固引

起的各种问题,因此在涂层制备、失效金属构件修复、增材制造等领域具有广阔的应用前景。

近年来,美国大力推广冷喷涂技术在军事领域的应用。国内西安交通大学、西北工业大学、中科院金属所、广东省科学院新材料研究所、浙江工业大学等研发机构也在不断推动冷喷涂修复技术发展,目前该技术已经在航空、航天、轨道交通、汽车等诸多领域实现广泛应用。

近年来,冷喷涂领域的基础研究主要集中在冷喷涂粉末粒子的沉积结合机理、粒子在超音速气流中的气固两相流相互作用原理、冷喷涂金属沉积体组织特征与调控原理等基础理论研究,以及高性能冷喷涂装备的开发、原材料粉末的技术标准、特定工况的沉积体性能满足问题等应用方面。

冷喷涂装备方面,商用化的高性能高压冷喷涂技术取得了巨大进展,以日本等离子技研的 Plasma 系列、德国 Impact Innovations 公司的 CGT 系列、美国 VRC Metal Systems 系列为代表的高性能设备已经在全球销售,其主要技术指标:气体压力与温度上限目前可分别高达 7 MPa 与 1 100 ℃,核心消耗件加热器的使用寿命达 1 000 h 以上,已达到工业化稳定生产要求。在 Laval 喷管制造方面,除了尺寸优化设计外,日本等离子技研公司开发了硬质合金、陶瓷、耐热高分子等多种材质的喷管,解决了长期困扰冷喷涂喷管易堵塞的问题。国内主要有陕西德维自动化公司、北京联合涂层等企业联合研究机构开发了高压冷喷涂装备,在主要技术指标方面与国外高性能装备基本一致,但在稳定性等方面还

存在差距。以澳大利亚的 Titomic 公司为代表的国外企业在外资支持下基于商用的高压冷喷涂系统进行了二次开发, 基于桥架与机械手协同作用, 实现了纳米级金属构件的快速制造, 其冷喷涂制造的 4.5 m 高的钛合金火箭外壳模型亮相国际展会。

2.1.2 等离子喷涂物理气相沉积技术

等离子-物理气相沉积 (Plasma spraying physical vapor deposition, PS-PVD) 综合了等离子喷涂 (Atmospheric plasma spraying, APS) 与物理气相沉积 (Physical vapor deposition, PVD) 两种工艺的优点, 能在形状复杂零件表面制备均匀涂层, 具有沉积速率高、可结构定制化等特点, 是近 10 年来发展迅速的一种高温防护涂层和功能涂层制备的方法, 在航空发动机和燃气轮机防护涂层领域被视为高性能热障涂层制备技术发展的新方向^[64]。

国内首台自主 PS-PVD 设备由西安交通大学研制, 其工作压力低至 50~200 Pa, 等离子射流被拉长至 1~2 m, 直径扩张至 0.2~0.4 m。

目前国内外该技术领域研究重点集中在送粉率、等离子气体组成、喷涂距离等工艺参数优化上, 通过改变工艺参数来调控涂层的生长模式以及显微结构, 以期获得优质性能涂层。

2.1.3 悬浮液等离子喷涂技术

悬浮液等离子喷涂的原理是将涂料加入到载流气体中形成悬浮液, 通过等离子体将悬浮液中的涂料粉末加热熔化后, 喷镀在工件表面上形成涂层。该技术有效解决细微颗粒、亚微米颗粒、纳米颗粒无法直接送入热喷涂热源的问题^[65], 制备的涂层结构呈多样化, 可获得柱状结构、垂直分割结构、高孔隙率与高比表面、或致密性强的高性能涂层。

该技术具有高效、高精度、节能环保的特点, 且可以喷涂金属、陶瓷、塑料等各种材料, 其制备的涂层性能也显著提升。利用亚微颗粒进行沉积, 可制备得到高性能热障氧化物陶瓷涂层。研究表明, 此类结构涂层在高低温热循环试验中, 其抗热循环脱落能力表现优越, 且热循环寿命明显高于薄的 PVD 热障涂层; 该技术是制备燃气轮机热端部件热障涂层的一种低成本制造方法^[64]。

2.1.4 爆炸喷涂技术

爆炸喷涂是由可燃混合气体在爆炸室中剧烈燃烧所产生的爆炸冲击波将喷涂粉末粒子高速喷向工件形成涂层的一种工艺。20 世纪 50 年代初, 美国最早发明该技术, 但起初对外进行了封锁。20 世纪 60 年代起, 前苏联乌克兰巴顿焊接研究所着手相关研究, 开发出了独特的爆炸喷涂装备。由于该技术

在当时具有一定的危险性和技术难度, 其他国家鲜少开展研究。苏联解体后, 乌克兰对外开始公开出售该装备和技术。中国在 20 世纪 70 年代也研制出了爆炸喷涂设备, 但其设备性能相比乌克兰还存在一定差距。

爆炸喷涂具有热源温度高、在爆炸波冲击下喷涂粒子速度大等特点, 其制备的涂层具有致密度高、孔隙率小、与基体结合强度好等特点, 且因其对基体热影响小, 此类涂层性能一般要优于其他热喷涂技术制备的涂层。但其沉积效率低、噪音大等缺点限制了该技术的推广应用。国内目前仅有约 50 台爆炸喷涂设备, 绝大部分应用在航空航天等高端装备领域, 且多数是从乌克兰和俄罗斯引进。

近几年, 乌克兰巴顿所开发了高频聚能爆炸喷涂技术, 将其效率提升了一个数量级以上, 能够以 20~50 Hz 的爆炸频率进行连续喷涂, 且涂层质量得到进一步提升。目前浙江巴顿焊接技术研究院引进了该技术和装备, 并进行了相应的技术开发。高频聚能爆炸喷涂技术大大提高了热喷涂涂层的质量, 特别是在涂层与基体的结合强度和致密度等方面, 远超常规热喷涂技术, 在航空、航天、能源、交通、冶金等重点领域的高质量涂层制备中可以获得更广泛应用。

2.2 热喷涂技术应用领域

2.2.1 耐磨涂层

耐磨涂层用于设备零部件表面预防、强化, 保护基体材料免受摩擦、冲击、腐蚀等形式的磨损, 部件使用寿命是一般处理的几倍甚至几十倍, 以较低的成本即可达到很高的性能。耐磨涂层的特点是硬度高、结合强度高、适用性广, 可根据不同工况选择材料, 如金属、陶瓷、金属陶瓷等。常用的涂层材料主要有: 镍铬合金、钼合金、碳化钨、碳化铬及氧化铝、氧化锆、氮化硅等。耐磨涂层广泛应用于航空航天领域、汽车制造、机械制造、能源领域、石油化工、电子工业, 以及医疗器械、建筑和纺织等其他领域, 其应用范围还在不断拓展。

在航空航天领域, 为满足航发动机刷式封严涂层高温耐磨性能的要求, 国内已广泛采用 NiCr-Cr₃C₂、NiCr-Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 涂层作为刷丝密封跑道耐磨涂层。张昂等^[66]采用大气等离子喷涂工艺新研制的 NiCoCrAlYTa-Cr₂O₃-Cu-Mo 高温耐磨涂层, 在 800 °C 表现出良好的摩擦磨损性能。

在石油工程领域, 刘明等^[67]采用旋转式内孔高能等离子喷涂技术在泥浆泵缸套内表面制备出高硬度 (达 1 300 HV_{0.3}) 金属陶瓷复合涂层, 与传统双

金属缸套相比,成本相当但其使用寿命延长至两倍。

2.2.2 热障涂层

热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)是一种用于保护高温环境下工作的金属部件免受极端温度影响的先进材料技术。TBCs的工作层材料主要为 Al_2O_3 、 ZrO_2 等低导热、耐烧结以及高温稳定的陶瓷隔热层,根据结构形式一般分为双层、多层和梯度结构层三种,其中双层结构应用最为广泛。制备TBCs的众多方法中应用最广泛的是等离子喷涂和电子束物理气相沉积。TBCs广泛应用于航空发动机和燃气涡轮的高温部件,如涡轮叶片、发动机燃烧室、火箭喷口等。美国几乎所有的军用和商用航空发动机都采用TBCs。TBCs可显著降低航空发动机涡轮叶片的表面温度,提高发动机的推力和效率,减少燃油消耗,延长其使用寿命^[68]。随着高超音速飞行器的出现及发展,其高温部件表面温度已经远远超过 $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$,甚至接近 $2\,300\text{ }^\circ\text{C}$,针对不同应用需求,广东省科学院新材料研究所开发出多种适配于不同喷涂工艺和服役温度的高温/超高温陶瓷粉体,使用PS-PVD技术研制了PtAl为粘结层和GYbZ为面层的超高温热障涂层^[69],使用APS技术实现了内孔超厚热障涂层及大面积异形均匀涂层的制备;此外,还开发了掺杂Gd、Yb、Sc稀土元素的Gd-Sc-YSZ和Gd-Yb-YSZ涂层,其隔热性能和抗CMAS热腐蚀性能远优于YSZ涂层^[70]。由于YSZ($8\%\text{ Y}_2\text{O}_3$ 稳定 ZrO_2)综合性能优异,特别是具有突出的高韧性,目前“两机”上仍广泛使用YSZ陶瓷材料。

此外,在发电厂中,燃气轮机的叶片、燃烧室,以及核装置的隔热屏等高温部件也使用TBCs,以提高热效率并减少冷却需求,从而提升电效率和减少腐蚀。在汽车发动机的活塞、气缸盖、排气系统等部位,以及涡轮增压器的叶片和壳体等均有使用TBCs。

2.2.3 耐蚀涂层

耐蚀涂层,是在基材表面涂覆一层或多层具有耐腐蚀性的材料,避免基材表面直接与腐蚀介质接触,提高基材在腐蚀介质中的抗腐蚀能力,延长基材的实际使用寿命。常用的耐蚀涂层主要有: Ni基或NiCr基合金耐蚀涂层、Zn合金耐蚀涂层、Al合金耐蚀涂层、FeCrAl合金或FeCrNi合金耐蚀涂层、耐高温塑料耐蚀涂层以及聚苯硫醚耐蚀涂层等。耐蚀涂层既在船舶制造、海洋装备、石油化工、航空航天以及新能源领域等高端制造业中有广泛的工程应用,又在钢结构、土木建筑、汽车制造、室内装

饰等常见民用领域发挥着重要作用。

近年来,科研工程人员对自修复耐蚀涂层进行了大量研究。刘昊等^[71]使用大气等离子喷涂和表面修饰的方法制备了疏水性能良好的氧化钇稳定氧化锆涂层,涂层的水平均接触角可达 141.8° ,具有良好的抗结垢性和耐蚀性。梁玉伟等^[72]使用超音速火焰喷涂,在310S不锈钢基体上制备了耐蚀性良好的FeCrMoBSi非晶涂层,并对经历了不同热处理状态的涂层耐蚀性进行了研究,确定了热处理对涂层耐蚀性的影响。

2.2.4 功能涂层

功能涂层是指通过涂覆技术在基材表面形成一层具有特定功能的涂层,以改善基材的性能或赋予基材新的功能。这些功能除了提高常用的耐磨、耐蚀和耐热性能外,还包括提高导电性能、绝缘性能、阻燃性能、光学性能、减震阻尼性能、吸收光波性能、生物相容性、抗菌和自清洁性能等多种特殊性能。

近年来,功能涂层在航空航天、电子技术、先进能源以及生物医疗等多个领域均有广泛应用。韩日飞等^[73]使用热喷涂技术制备了双层CoNiCrAlY/ YCrO_3 红外隐身涂层,在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下有较低的红外发射率和良好的热稳定性。黄建勇^[74]在单晶硅基体上制备了具有减反射和下转移双重功能的ZnO纳米晶体涂层,有效提高了太阳能电池的光电转换率。郭亚飞^[75]制备了一种由高温封严涂层用包覆型粉末和高温基相材料经团聚混合而成的混合粉末,并使用大气等离子喷涂技术获得了性能良好的双层高温封严涂层,涂层的摩擦系数减小,对叶片基体的保护效果得到提升。

3 未来与展望

3.1 堆焊技术发展趋势

随着互联网、云计算、大数据等新一代信息技术的飞速发展,新一代的人工智能技术也在不断深入传统制造行业,深刻影响着先进制造核心技术的变革与发展。与此同时,秉承创新、质量、绿色发展以及向服务型制造转变等发展方向始终是先进制造业的航向标。

(1) 面对日益激烈的全球竞争局势,突破关键核心技术与高端制造装备受制于人的局面,切实推动关键领域自主创新,解决高端装备基体材料;如Ni基、Co基等高温合金堆焊过程的工艺和性能优化问题,是解决装备成形精度和质量的重要保证。

(2) 基于国内设备大型化和单个技术成熟度高的优势, 多专业融合复合技术得以快速发展。如开发堆焊复合材料、复合热源、融合粉末冶金堆焊复合技术等。

(3) 针对零部件几何构型复杂化、材料复杂化、尺寸大型化和精细化的特点, 堆焊过程和工艺控制要求越来越高, 集成形、智能控制一体化的系统平台需求越来越大, 以期达到过程的智能化、柔性化, 实现流程管理和过程监控一体化功能。例如刘仁培^[76]和 SHEN 等^[77]研制了基于分区策略的混合填充路径规划算法、焊枪姿态优化设计算法、曲面分层算法, 气刨工艺规程与离线编程准则等, 专用于大型复杂模具堆焊制造过程中的工艺、材料、软件技术等方面的开发。采用研制的成套技术和集成的硬件装备应用于数 10 个厂家数百套模具的焊接, 均获得了令人满意的质量和精度。

3.2 热喷涂技术发展趋势

近 10 年来, 热喷涂技术研究方向以解决服役工况中的问题为导向, 主要集中在以下几个方面: 新型热喷涂技术与涂层制备研究; 基于热喷涂工艺特点, 通过涂层制备开发新兴材料的应用; 基于熔融粒子碰撞中界面结合形成控制的致密涂层制备。

新型热喷涂技术与涂层制备方面, 针对金属涂层存在贯通孔隙而不耐腐蚀的难题, 西安交通大学通过材料设计并结合工艺控制, 设计了难熔金属包覆镍基或铁基粉末的复合粉末方法, 采用气罩等离子喷涂制备得到了高结合强度的类块体致密合金涂层, 并通过喷丸处理获得了致密耐腐蚀涂层^[78]。与此同时, 还通过改进等离子喷枪, 显著提升粒子过热温度, 实现了完全致密的耐腐蚀镍基自熔合金与 NiCr 合金涂层的制备^[79]。

针对航空与航天发动机的高端陶瓷喷涂粉末需要依赖于进口的现状, 国内采用喷焊合金粉末与 WC 系硬质合金等耐磨粉末, 通过气流分筛控制粒度, 达到显著效果。此外, 将高熵合金用作新型热喷涂材料也逐渐成为发展趋势。

针对海洋环境下的污损及其腐蚀防护, 通过材料选择、添加封孔剂、涂层设计有望提供长效防护涂层^[80]。

针对等离子喷涂陶瓷涂层呈现多孔层状结构的缺点, 西安交通大学近期研究发现, 对于熔点低于约 1 500 °C 的陶瓷, 临界结合温度降至室温。因此, 氧化陶瓷在大气氛中喷涂时不受氧化困扰; 且试验结果表明, 在室温下直接喷涂, 也可以得到沉积粒子结合充分的陶瓷涂层^[81]。

多功能超疏水热喷涂涂层是近几年的研究热点之一。它能充分展现两者特性, 如超疏水涂层的自清洁、抗结霜结冰等特性以及热喷涂涂层表面粗糙、微纳结构等特征。其基本原理是阻止水溶性腐蚀液体的润湿浸入, 是一种制备耐腐蚀涂层的新方法。理论上, 通过设计制备, 可以得到虽表面磨损但仍可以长效维持超疏水特性的高效涂层。

随着新技术的不断升级, 智能与耐腐蚀涂层材料与技术也必定是未来研究的热点之一。如腐蚀产物主动填充热喷涂涂层的原始孔隙, 实现封闭孔隙且阻止进一步腐蚀, 这种材料体系的开发研究成为一种战略需求。

参 考 文 献

- [1] 何实, 李家宇, 赵昆. 我国堆焊技术发展历程回顾与展望[J]. 金属加工, 2009(22): 25-27.
HE Shi, LI Jiayu, ZHAO Kun. Review and prospect of the development history of welding technology in China[J]. MW Metal Forming, 2009(22): 25-27. (in Chinese)
- [2] 单际国, 董祖珏, 徐滨士. 我国堆焊技术的发展及其在基础工业中的应用现状[J]. 中国表面工程, 2002, 15(4): 19-22.
SHAN Jiguo, DONG Zuyu, XU Binshi. Development of surfacing technology and status of its application in basic industries[J]. China Surface Engineering, 2002, 15(4): 19-22. (in Chinese)
- [3] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(4): 1-22.
LI Changjiu. Applications, research progresses and future challenges of thermal spray technology[J]. Thermal Spray Technology, 2018, 10(4): 1-22. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 焊接术语: GB/T 3375-1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Welding term: GB/T 3375-1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994. (in Chinese)
- [5] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 焊接方法及设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
The Welding Society of Chinese Mechanical Engineering Society. Welding handbook: welding method & equipment[M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 刘洪冰, 卢仁峰, 陈超凡, 等. 风电机组用 QT400-18Al 焊条电弧焊堆焊修复研究[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 89-94.

- LIU Hongbing, LU Renfeng, CHEN Chaofan, et al. Arc welding process and properties for QT400-18Al in wind turbines[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(8): 89-94. (in Chinese)
- [7] 郭太平, 王迎君, 金卿, 等. Q345R+Incoloy 825 合金复合钢板制压力容器的制造[J]. 压力容器, 2023, 40(7): 81-86.
- GUO Taiping, WANG Yingjun, JIN Qing, et al. Manufacturing of Q345R+Incoloy 825 alloy composite steel plate pressure vessel[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(7): 81-86. (in Chinese)
- [8] 杨乘东, 茹祥坤, 唐伟宝. 核岛主设备不锈钢带极埋弧堆焊剥离机理分析[J]. 压力容器, 2023, 40(6): 22-26.
- YANG Chengdong, RU Xiangkun, TANG Weibao. Disbonding mechanism analysis of stainless steel cladding by submerged arc welding with band-electrode[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(6): 22-26. (in Chinese)
- [9] 徐常恩, 李亮, 王栋, 等. 电磁搅拌对轧辊埋弧堆焊层组织性能的影响[J]. 焊接技术, 2024, 53(5): 29-34.
- XU Changen, LI Liang, WANG Dong, et al. Effect of electromagnetic stirring on microstructure and properties of roll submerged arc surfacing[J]. Welding Technology, 2024, 53(5): 29-34. (in Chinese)
- [10] 曾邦兴, 胡永俊, 邹晓东, 等. 保护气体对(Nb, Ti)C 增强铁基复合堆焊层组织与性能的影响[J]. 焊接, 2022(6): 33-41.
- ZENG Bangxing, HU Yongjun, ZOU Xiaodong, et al. Influence of shielding gas on microstructure and properties of (Nb, Ti)C reinforced Fe-based composite surfacing layer[J]. Welding & Joining, 2022(6): 33-41. (in Chinese)
- [11] 张楷, 高辉, 林渊浩, 等. 基于 RSM 和 NSGA-II 算法的同轴送粉氩弧熔覆工艺参数分析[J]. 焊接学报, 2024, 45(12): 106-116.
- ZHANG Kai, GAO Hui, LIN Yuanhao, et al. Process parameters analysis of coaxial powder feeding argon arc cladding based on RSM and NSGA-II algorithm[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(12): 106-116. (in Chinese)
- [12] 贾华. 多元复合强化耐磨堆焊药芯焊丝及堆焊层耐磨机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- JIA Hua. Study on multiple composite reinforced wear-resistant surfacing flux cored wire and wear-resistance mechanism of surfacing layer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 王旭, 贺定勇, 邵蔚, 等. 硼含量对 NiCrB 堆焊合金高温氧化性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 247-254.
- WANG Xu, HE Dingyong, SHAO Wei, et al. Effect of boron content on high-temperature oxidation resistance of NiCrB surfacing alloy[J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 247-254. (in Chinese)
- [14] 贾华, 高明, 刘政军. Ti 和 Nb 对铁基堆焊合金组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(3): 87-91, 133-134.
- JIA Hua, GAO Ming, LIU Zhengjun. Effect of Ti and Nb on microstructure and properties of Fe based surfacing alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(3): 87-91, 133-134. (in Chinese)
- [15] MOHAMMAD R K, SHENG H W, JASMIN J. Characterization of cold metal transfer and conventional short-circuit gas metal arc welding processes for depositing tungsten carbide-reinforced metal matrix composite overlays[J]. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128: 2551-2570.
- [16] 郑明涛, 王莉, 周小龙, 等. 管板镍基合金双钨极自动 TIG 堆焊工艺研究及应用[J]. 压力容器, 2024, 41(9): 16-22.
- ZHENG Mingtao, WANG Li, ZHOU Xiaolong, et al. Research and application of double tungsten automatic TIG for tubesheet cladding nickel base alloy[J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(9): 16-22. (in Chinese)
- [17] 马笑晗, 贺定勇, 秦志恒, 等. TiC 对亚共晶高铬铸铁堆焊合金组织及磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 142-150.
- MA Xiaohan, HE Dingyong, QIN Zhiheng, et al. Effects of TiC on the microstructure and wear resistance of hypoeutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 142-150. (in Chinese)
- [18] 付鹏. 超声振动辅助电弧堆焊 308 不锈钢组织和性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2024.
- FU Peng. Study on the organization and properties of ultrasonic vibration-assisted arc overlay welding of 308stainless steel[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [19] 张智, 王建硕, 陈建国, 等. 热处理对不锈钢药芯焊丝堆焊过渡层的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(11): 1152-1158.
- ZHANG Zhi, WANG Jianshuo, CHEN Jianguo, et al. Effect of heat treatment on transition layer of stainless steel flux cored wire weld overlay[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(11): 1152-1158. (in Chinese)

- [20] XUE Z, WANG H, HE N, et al. Study on intergranular corrosion mechanism of low dilution rate Inconel 625 weld overlay[J]. *Corrosion Science*, 2025, 244: 112659.
- [21] THINESH B, RAGURAMAN D, SENGOTTUVEL P. Optimization of CMT welding parameters of Stellite-6 on AISI 316L alloy using TOPSIS method[J]. *International Journal of Integrated Engineering*, 2023, 15(1): 161-172.
- [22] 徐连勇, 王成, 杨连河, 等. P110 套管内壁 CMT/P 堆焊 Inconel 625 合金的组织及性能研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(14): 159-168.
- XU Lianyong, WANG Cheng, YANG Lianhe, et al. Research on the microstructure and properties of Inconel 625 alloy by CMT/P overlay welding on the inner wall of P110 casing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(14): 159-168. (in Chinese)
- [23] 周春东, 章晓勇, 彭勇, 等. CMT Cycle Step 工艺参数对焊缝表面特征纹路及成形尺寸的影响[J]. *焊接学报*, 2023, 44(5): 95-101, 134-135.
- ZHOU Chundong, ZHANG Xiaoyong, PENG Yong, et al. Effect of CMT cycle step process parameters on weld surface characteristic texture and forming size[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(5): 95-101, 134-135. (in Chinese)
- [24] 李立英, 盛学臻, 戴国文, 等. X80/2205 双金属复合管 CMT/TIG 管端堆焊组织及性能[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6): 156-162.
- LI Liying, SHENG Xuezheng, DAI Guowen, et al. Microstructures and properties of CMT and TIG surfacing layers at X80/2205 bimetal mechanical lined pipe end[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(6): 156-162. (in Chinese)
- [25] 宗琳, 王学昭, 徐俊尧, 等. 硼化物强化铁基堆焊合金组织与性能的研究[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(19): 83-86, 92.
- ZONG Lin, WANG Xuezhao, XU Junyao, et al. Study on microstructure and properties of iron base hardfacing alloy strengthened by borides[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(19): 83-86, 92. (in Chinese)
- [26] 关锰, 雍兴平, 田云, 等. 等离子堆焊 Stellite6 合金高温耐磨性能研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43(6): 815-820.
- GUAN Meng, YONG Xingping, TIAN Yun, et al. High temperature wear resistance of plasma surfacing stellite6 alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2023, 43(6): 815-820. (in Chinese)
- [27] 刘治宇, 王振宇, 刘政军, 等. 等离子弧堆焊 WC 增强镍基堆焊层的组织及耐磨性研究[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(17): 27-31.
- LIU Zhiyu, WANG Zhenyu, LIU Zhengjun, et al. Microstructure and wear resistance of plasma arc surfacing WC reinforced Nickel-based surfacing layer[J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(17): 27-31. (in Chinese)
- [28] 郝建军, 占志国, 侯俊英, 等. 旋耕刀 Fe/WC/CeO₂ 等离子堆焊层制备及其组织性能[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(24): 1-8.
- HAO Jianjun, ZHAN Zhiguo, HOU Junying, et al. Preparation and microstructure properties of Fe/WC/CeO₂ plasma surfacing layer for rotary blades[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(24): 1-8. (in Chinese)
- [29] 王振宇, 刘政军, 艾星宇, 等. Y₂O₃ 对等离子堆焊 WC/Ni60 堆焊层组织及性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(2): 100-104.
- WANG Zhenyu, LIU Zhengjun, AI Xingyu, et al. Effects of Y₂O₃ on microstructure and properties of plasma surfacing WC/Ni60 surfacing layer[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(2): 100-104. (in Chinese)
- [30] KARTSEV S V. Mathematical model of optimization of controlled parameters of the plasma surfacing technological process of wear-resistant coatings[J]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, 49(9): 823-828.
- [31] 杜航, 徐睦忠, 姜忠礼, 等. TC4 表面脉冲等离子填丝-送粉熔覆 WC/Ti 组织及强韧性研究[J]. *电焊机*, 2024, 54(11): 25-32.
- DU Hang, XU Muzhong, JIANG Zhongli, et al. Microstructure and strength-toughness of pulsed plasma filament-powder feeding cladding WC/Ti layer on TC4[J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(11): 25-32. (in Chinese)
- [32] 张春霖, 张丽, 李胜利, 等. 不同预热温度 WC 增强镍基合金堆焊层的微结构演化与摩擦学性能[J]. *表面技术*, 2024, 53(9): 127-136.
- ZHANG Chunlin, ZHANG Li, LI Shengli, et al. Microstructure evolution and tribological property of WC reinforced nickel based alloy surfacing layer fabricated at different preheating temperature[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(9): 127-136. (in Chinese)
- [33] 谢玉莹, 刘思思, 刘金刚, 等. 激光熔覆 NiCoCrTaAl-TiC 复合涂层组织性能及摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2024, 37(5): 253-262.
- XIE Yuying, LIU Sisi, LIU Jingang, et al. Organizational and tribological properties of laser-melted

- NiCoCrTaAl-TiC composite coatings[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(5): 253-262. (in Chinese)
- [34] 张国建, 程西云, 纪秀林, 等. 激光熔覆不同层数 FeCoNiCr_{0.5}Al_{0.2} 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 表面技术, 2024, 53(21): 187-197.
- ZHANG Guojian, CHENG Xiyun, JI Xiulin, et al. Microstructure and properties of FeCoNiCr_{0.5}Al_{0.2} high entropy alloy coating with different layers fabricated by laser cladding[J]. Surface Technology, 2024, 53(21): 187-197. (in Chinese)
- [35] 董刚, 胡健东, 王永强, 等. 直接时效处理对 17-4PH 激光熔覆层组织及抗汽蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2025, 38(6): 124-134.
- DONG Gang, HU Jiandong, WANG Yongqiang, et al. Effect of direct aging treatment on microstructure and cavitation resistance of 17-4PH laser cladding layer[J/OL]. China Surface Engineering, 2025, 38(6): 124-134. (in Chinese)
- [36] GARBADE R, DHOKEY N. Influence of heat treatment on the microstructure, hardness and fracture toughness of premixed iron based hardfacing weld overlay[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62(2): 444-450.
- [37] 张国松, 王文超, 刘涛, 等. 激光熔覆 FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} 高熵合金涂层组织调控及耐磨耐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2024(3): 1-6.
- ZHANG Guosong, WANG Wenchao, LIU Tao, et al. Microstructure control and wear and corrosion resistance of laser cladding FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} high entropy alloy coating[J]. Hot Working Technology, 2024(3): 1-6. (in Chinese)
- [38] 时海芳, 王红蕾. 氧乙炔堆焊与感应熔覆制备的 C0119 合金涂层的组织性能比较[J]. 材料保护, 2021(8): 54.
- SHI Haifang, WANG Honglei. Comparison of microstructure and properties of Co119 alloy coating prepared by oxyacetylene surfacing and induction cladding[J]. Materials Protection, 2021(8): 54. (in Chinese)
- [39] 吴伟建, 刘城淼, 李权. 焊接工艺对 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢和 Co6B 合金堆焊层相容性的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7): 326-330.
- WU Weijian, LIU Chengmiao, LI Quan. Effect of welding process on compatibility of 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel and Co6B alloy surfacing layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(7): 326-330. (in Chinese)
- [40] 戴乐, 桂赤斌, 李连杰. 焊接工艺对药芯焊丝堆焊层中 WC 颗粒溶解行为的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(3): 164-166.
- DAI Le, GUI Chibin, LI Lianjie. Influence of surfacing process on dissolution of WC particles in surfacing layers of flux-cored wires[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(3): 164-166. (in Chinese)
- [41] ABYAZI A, TAKHT K M. Solid particle erosion wear characteristics of WC-reinforced Ni-Based coating deposited by oxy-acetylene flame welding[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2023, 32: 1242-1259.
- [42] ZENG M, YAN H, YU B B, et al. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of laser cladding Ni-WC coating on AlSi5Cu1Mg alloy[J]. Transaction Nonferrous Metal Society of China, 2021, 31(9): 2716-2728.
- [43] 杨亚涛, 薛松, 郭宝超, 等. 三代核电控制棒驱动机构钩爪钴基堆焊工艺研究[J]. 电焊机, 2019, 49(9): 55-59.
- YANG Yatao, XUE Song, GUO Baochao, et al. Study on hardfacing process of the latch with cobalt alloys about the third-generation nuclear power control rod drive mechanism[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(9): 55-59. (in Chinese)
- [44] 胡邦喜, 莽克伦, 王静洁, 等. 堆焊技术在国内石化、冶金行业机械设备维修中的应用[J]. 中国表面工程, 2006, 19(3): 4-8.
- HU Bangxi, MANG Kelun, WANG Jingjie, et al. Application of surfacing on mechanism equipments maintaining of petroleum chemical industry and metallurgy industry in China[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(3): 4-8. (in Chinese)
- [45] QIN M, CHENG G X, LI Q, et al. Evolution of welding residual stresses within cladding and substrate during electrosag strip cladding[J]. Materials (Basel), 2020, 13(18): 4126.
- [46] 张利尧. 加氢反应器单层带极电渣堆焊及堆焊层性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- ZHANG Liyao. A study on single layer electrosag surfacing-and-properties of surfacing deposit for hydrogenation reactor[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [47] 刘艳, 马小兵, 王军杰, 等. 加氢精制反应器制造中的单层带极电渣堆焊技术[J]. 化工机械, 2020, 47(3): 393-396.
- LIU Yan, MA Xiaobing, WANG Junjie, et al. Application of single-layer electrode electrosag welding in hydrogenation refining reactor[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2020, 47(3): 393-396. (in Chinese)
- [48] 冯妍冉. 2205/X80 双金属复合管管端堆焊及对焊接头组织性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.

- FENG Yanran. Study on microstructure and properties of surfacing layer and butt welding joint of 2205/X80 bimetal composite pipe[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020. (in Chinese)
- [49] 许小波, 肖德明, 张念涛, 等. X70 管道内壁双相不锈钢热丝 TIG 堆焊工艺[J]. 焊接, 2015(12): 39-42, 71.
- XU Xiaobo, XIAO Deming, ZHANG Niantao, et al. Hot-wire TIG surfacing process with duplex stainless steel on inside wall of X70 pipe[J]. Welding & Joining, 2015(12): 39-42, 71. (in Chinese)
- [50] 沈凤刚, 刘景凤. 金轧辊堆焊技术综述[J]. 中国表面工程, 2006, 19(3): 14-19.
- SHEN Fenggang, LIU Jingfeng. Summarization of hard surfacing technology for metallurgical rollers[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(3): 14-19. (in Chinese)
- [51] 李双燕, 张茂龙. 核电设备中的镍基合金堆焊工艺[J]. 发电设备, 2017, 31(6): 5.
- LI Shuangyan, ZHANG Maolong. Application of Nickel-based alloy cladding technology in manufacture of nuclear power equipment[J]. Power Equipment, 2017, 31(6): 5. (in Chinese)
- [52] 王鑫宇. 含铝镍基合金熔覆层在碱金属盐中的高温腐蚀特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- WANG Xinyu. Research on high temperature corrosion characteristics of aluminum-containing Ni-based alloy cladding layers in alkali metal salts[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024. (in Chinese)
- [53] 王志文, 刘秀波, 周安, 等. 表面技术提高农林机械耐磨性能及应用研究进展[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 102-116.
- WANG Zhiwen, LIU Xiubo, ZHOU An, et al. Research progress of surface technology to improve the wear resistance of agricultural and forestry machinery and application[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 102-116. (in Chinese)
- [54] 项胜喜. 试论农业机械的作业特点[J]. 农机化研究, 2006(3): 223.
- XIANG Shengxi. An analysis of the operational characteristics of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(3): 223. (in Chinese)
- [55] MORGADO T, VALENTE C. Development status of laser cladding and the new metallic alloys[J]. Preprints, 2018, 23: 0417.
- [56] YANAGISAWA Y, EDA Y, YAMAZAKI M. Technical note on the removal of a “cold-welded” lag screw from a Trigen Meta-Tan nail[J]. Trauma Case Reports, 2021, 35: 100526.
- [57] MARIN E, ZANOCCO M, BOSCHETTO F, et al. In vitro comparison of bioactive silicon nitride laser claddings on different substrates[J]. Applied Sciences, 2020, 10: 9039.
- [58] MTHISI A, POPOOLA A, ADEBIYI D, et al. Laser cladding of Ti6Al4V alloy with TiAl_2O_3 coating for biomedical applications[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 350: 012005.
- [59] 张政. TC4 合金表面激光原位合成 $\text{Ti-Ti}_x(\text{B/C/Si})_y$ 系生物相容涂层的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- ZHANG Zheng. Study on in situ laser synthesizing $\text{Ti-Ti}_x(\text{B/C/Si})_y$ biocoatings on TC4 alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [60] KLUFOVÁ, PAVLA, KŘÍŽ, et al. Development of laser clads with high corrosion resistance for nuclear power Industry[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2189: 020011.
- [61] CHOI, INSUNG. Laser cladding of alloy 82 powder for corrosion protection in small modular reactors[J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2023, 61: 561-572.
- [62] 林海燕. 核电蒸汽发生器管板镍基合金 Inconel690 电渣堆焊工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LIN Haiyan. Research on electric slag cladding technology of Inconel 690 for nuclear power steam generation tube-sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [63] PAPYRIN A, KOSAREV V, KLINKOV S, et al. Cold spray technology[J]. Advanced Materials & Processes, 2001, 159(9): 49-51.
- [64] VABEN R, BAKAN E, MACK D E, et al. A perspective on thermally sprayed thermal barrier coatings: current status and trends[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31: 685-698.
- [65] RAT V, CHAZELAS C, GOUTIER S, et al. In-flight mechanisms in suspension plasma spraying: issues and perspectives[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31: 699-715.
- [66] 张昂, 郭孟秋, 王长亮, 等. 大气等离子喷涂 $\text{NiCoCrAlYTa-Cr}_2\text{O}_3\text{-Cu-Mo}$ 高温耐磨涂层组织和性能[J]. 材料工程, 2025, 53(1): 202-210.
- ZHANG Ang, GUO Mengqiu, WANG Changliang, et al. Microstructure and properties of $\text{NiCoCrAlYTa-Cr}_2\text{O}_3\text{-Cu-Mo}$ high-temperature wear-resistant coating prepared by APS[J]. Journal of Material Engineering, 2025, 53(1): 202-210. (in Chinese)
- [67] 刘明, 马国政. 内孔高能等离子喷涂在泥浆泵缸套内表

- 面强化与修复中的应用[J]. 中国表面工程, 2020, 33(5): 2.
- LIU Ming, MA Guozheng. Application of high-energy plasma spraying on the inner hole in the surface strengthening and repair of mud pump cylinder liners[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(5): 2. (in Chinese)
- [68] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 新型高温/超高温热障涂层及制备技术研究进展[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2722-2732.
- GUO Hongbo, GONG Shengkai, XU Huibin. Research progress on new high/ultra-high temperature thermal barrier coatings and processing technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2722-2732. (in Chinese)
- [69] WANG Z F, FAN J F, KANG K W, et al. Foreign object damage behavior and failure mechanism of Al_2O_3 -modified TBCs prepared by PS-PVD[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(7): 2289-2303.
- [70] 张金萌, 沈少波, 郭薇, 等. Gd-Sc(Yb)-YSZ 陶瓷涂层的隔热性能及抗 CMAS 热腐蚀性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52(5): 18-26, 33.
- ZHANG Jinmeng, SHEN Shaobo, GUO Wei, et al. Study on thermal insulation performance and CMAS hot corrosion resistance of Gd-Sc(Yb)-YSZ ceramic coatings[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2024, 52(5): 18-26, 33. (in Chinese)
- [71] 刘昊, 赵国勇, 李丽, 等. 等离子喷涂制备疏水氧化钇稳定氧化锆涂层及其抗垢耐蚀性研究[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(18): 26-32.
- LIU Hao, ZHAO Guoyong, LI Li, et al. Preparation of hydrophobic yttria-stabilized zirconia coating by plasma spraying and its scale and corrosion resistance[J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(18): 26-32. (in Chinese)
- [72] 梁玉伟, 王婕, 宋鹏, 等. FeCrMoSiB 非晶涂层的耐磨耐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(1): 191-200.
- LIANG Yuwei, WANG Jie, SONG Peng, et al. Wear and corrosion resistance of FeCrMoSiB amorphous coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025, 45(1): 191-200. (in Chinese)
- [73] 韩日飞, 周琦, 史天杰, 等. YCrO_3 钙钛矿陶瓷高温红外隐身涂层制备与性能研究[J]. 热喷涂技术, 2024, 16(3): 44-49.
- HAN Rifei, ZHOU Qi, SHI Tianjie, et al. Research on preparation and properties of YCrO_3 perovskite high temperature infrared stealth coating[J]. Thermal Spray Technology, 2024, 16(3): 44-49. (in Chinese)
- [74] 黄建勇. 应用于太阳能电池的减反和下转移双功能涂层的制备及性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- HUANG Jianyong. Anti-reflection and down-shifting dual-function coating preparation for solar cell application[D]. Hefei: University of Science And Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [75] 郭亚飞. 多孔型高温可磨耗封严涂层的制备及其性能研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- GUO Yafei. Study of preparation and properties of porous abradable seal coating used in high temperature[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)
- [76] 刘仁培. 一种适用于模具电弧增材制造的微渣气保护药芯焊丝: ZL201610533124.5[P]. 2018-06-19.
- LIU Renpei. A kind of micro-slag gas-shielded flux-cored wire suitable for mold arc additive manufacturing: ZL201610533124.5[P]. 2018-06-19. (in Chinese)
- [77] SHEN Y, WEI Y, LI Z, et al. Wire and arc additive remanufacturing of hot-forging dies: a preliminary study[J]. Welding in the World, 2022, 66(8): 1691-1702.
- [78] TIAN J J, WEI Y K, LI C X, et al. Effect of post-spray peening treatment on the corrosion behavior of NiCr-Mo coating by plasma spraying of the shell-core-structured powders[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27: 232-242.
- [79] DONG X Y, LUO X T, GE Y, et al. Enhancing the hot-corrosion resistance of atmospheric plasma sprayed Ni-based coatings by adding a deoxidizer[J]. Materials & Design, 2021, 211: 10154.
- [80] WEN J X, LI H. Thermal spray coatings for protection against microbiologically induced corrosion: recent advances and future perspectives[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31: 829-848.
- [81] LI C J, ZHANG Q L, YAO S W, et al. Plasma spraying of dense ceramic coating with fully bonded lamellae through materials design based on the critical bonding temperature concept[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(1-2): 53-62.
-
- 作者简介: 黄智泉, 女, 1969 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为耐磨堆焊材料、粉末冶金和再制造工程。
E-mail: 1210362687@qq.com
- 赵军军(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为表面工程和再制造工程。
E-mail: zhjj@zjpaton.com