

DOI: 10.3969/j.issn.1009-0622.2025.02.009

氩弧熔覆原位合成 WC 改性钢铁材料的组织与性能

杨 燕¹, 唐 方², 燕盈萍¹

(1.张家界航空工业职业技术学院, 湖南 张家界 427000; 2.长沙天一智能科技股份有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘 要: WC 改性钢铁材料兼具硬质相的高强度、高硬度和基体金属良好的塑性与韧性, 广泛应用于机械、冶金、化工等领域。为克服传统 WC 改性钢铁材料应用中存在的溶解析出、成本较高等问题, 本研究以钨铁、石墨、还原铁粉和中碳锰铁为原材料, 采用氩弧熔覆技术在 Q235 钢表面原位合成 WC 颗粒增强铁基涂层材料, 研究 W 含量对 WC 改性钢铁材料组织与性能的影响。结果表明: 熔覆涂层与 Q235 钢界限分明, 无气孔、裂纹等缺陷, 冶金结合良好。在 W:C=1:1.5 (摩尔比, 下同) 的情况下, W 含量增加促进原位合成 WC 颗粒, 显著提高基体材料的硬度和耐磨性能。当 W 含量增加到 50% 及以上时, WC 颗粒数量显著增加, 均匀弥散分布于基体表面, 涂层材料洛氏硬度达 61 HRC 及以上, 相对耐磨性约为 Q235 钢的 66 倍及以上, 对钢铁材料组织与性能的改善作用明显。

关键词: 钨铁; 原位合成; WC; 氩弧熔覆; 组织; 性能

中图分类号: TB331

文献标识码: A

0 引 言

钢铁作为一代工业基石材料, 储量丰富、可循环利用且潜在性能范围宽, 广泛应用于机械、冶金、船舶、化工等领域^[1-2]。经过几十年的高位发展, 钢铁材料面临废钢产能激增, 极端工况性能不足等难题^[3-4]。这使钢铁改性研究成为学术界和工业界密切关注的课题之一。

WC 改性钢铁材料因耐磨性能突出, 增强相与基体金属润湿性好, 强度与韧性适配性高等特点而备受关注^[5-6]。粉末冶金作为经典制备工艺, 允许调整钢铁材料的成分, 增强相的体积分数以及粒径分布等参数, 高 WC 配比铁基材料能够产生具有高理论密度的均匀微观结构以及有前途的硬度和压痕韧性值, 机械性能与传统的钴结合 WC 材料相当^[7-8]。热等静压、放电等离子烧结 (SPS)、激光增材制造等技术的发展, 将 WC 改性钢铁材料的发展推向了新的阶段。SPS 凭借快速升温、短时保温以及高脉冲电流引发的自热效应, 能有效抑制 WC 颗粒长大, 细化微观组织, 使 WC 在钢铁基体中弥散更加均匀, 显著提升材料综合性能^[9-11]。激光

增材制造复合材料组织致密无气孔, 增强相与基体呈现良好的冶金结合, 同时兼具快速成形和激光熔覆的特点, 适用于结构复杂、难加工以及薄壁零件的近净成形^[12-13]。熔覆技术异军突起, 激光熔覆、电弧熔覆借助高能束流或电弧热源, 将 WC 与铁基合金粉末同步熔化、快速凝固于基材表面, 形成冶金结合涂层, 熔覆层厚度精准可控, 稀释率低, 可显著增强钢铁材料的耐磨性、耐蚀性, 在煤机刮板、轧辊修复等领域崭露头角^[14-16]。相较其他多种制备工艺, 氩弧熔覆技术在确保材料性能的前提下, 兼具设备成本和运行费用低、生产效率高、操作灵活性好、材料适用性广等特点, 在众多企业和行业中拥有广阔的应用空间^[17]。近年来, 借助数值模拟、机器人技术以及自动化控制系统等, 对氩弧熔覆技术进行协同优化, 进一步拓展了其应用范围和性能提升空间, 有力地推动了其在机械制造、航空航天、汽车工业等多个领域的普及与应用, 为产业升级和技术创新注入了新的活力^[18-19]。尽管 WC 改性钢铁材料在综合性能方面表现卓越, 且制备工艺相对成熟, 但直接添加 WC 颗粒时存在溶解析出现象, 原位合成 WC 颗粒的材料成本仍具优化空间, 以及一

收稿日期: 2024-12-09

资助项目: 湖南省教育厅科学研究项目 (23C1041)

作者简介: 杨 燕 (1992-), 女, 湖南张家界人, 讲师, 主要从事新材料及其特种热工装备研究工作。

直以来困扰业界的强度与延性难平衡问题没有得到有效解决,均在很大程度上限制了其实际应用^[20-25]。

本试验以钨铁和石墨为原材料,采用氩弧熔覆技术原位合成 WC 改性钢铁材料,通过调整钨铁添加量,分析不同钨含量下材料的微观组织、硬度、耐磨性等的变化规律,为优化 WC 改性钢铁材料的性能提供理论依据。同时,也为解决 WC 改性钢铁材料在实际应用中的成本和技术问题提供新的思路和方法。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与试样制备

氩弧熔覆基体材料为 Q235 钢,化学成分见表 1。其应用广泛,价格便宜、韧性很好,但强度和耐磨性不高,通过氩弧熔覆在其表面制备一层 WC 颗粒增强层,可大幅度提高其性能,拓宽其应用范围。熔覆试板的尺寸为 80 mm×40 mm×10 mm。先用砂轮机去除试板表层铁锈和氧化层,再用丙酮清洗,最后用电风吹干待用。

表 1 Q235 钢的化学成分 %
Tab.1 Chemical composition of Q235 steel

牌号	元素含量				
	C	Mn	Si	S	P
Q235	0.14~0.22	0.30~0.65	≤0.30	≤0.05	≤0.04

氩弧熔覆涂层材料为钨铁 (FeW, $w(W)$ 为 78.10%)、石墨 ($C \geq 99.00\%$)、还原铁粉 ($Fe \geq 99.90\%$) 和中碳锰铁 (FeMn, $w(Mn)$ 为 71.84%)。钨铁和石墨为原位合成 WC 的钨源和碳源;还原铁粉活性较高,能降低熔覆层与基体之间的界面张力,形成良好的冶金结合;中碳锰铁作为重要的合金添加剂,能降低熔覆层中的氧含量,提高材料的综合力学性能。制备如表 2 所示的合金粉末,并分别标记为 No.1 (30% W)、No.2 (40% W)、No.3 (50% W) 和 No.4 (60% W)。先将混合均匀的合金粉末与阿拉伯树胶按 40:1 的质量比调成黏稠状,其中 1 g 阿拉伯树胶用 8 mL 水稀释;再将黏稠状粉末材料堆敷在 Q235 试板表面(堆敷厚度约 1~2 mm);最后经 150 °C 烘干 2 h 待用。

氩弧熔覆工艺参数为:直流正接、钨极直径为 2.4 mm、喷嘴直径为 9 mm、堆焊电流为 140 A、氩气流量为 10 L/min,熔覆后空冷。待第一熔覆层冷却后,用角磨机去除材料表面氧化皮,依照前述方法与参数熔覆第二层并空冷。

表 2 熔覆层合金粉末配比 %

Tab.2 Powder ratios for cladding

编号	含量				
	W	钨铁	石墨	还原铁粉	中碳锰铁
No.1	30	38.5	3.0	余量	7.5
No.2	40	51.0	4.0	余量	7.5
No.3	50	64.0	5.0	余量	7.5
No.4	60	77.0	6.0	余量	7.5

注: W:C=1:1.5 (摩尔比)

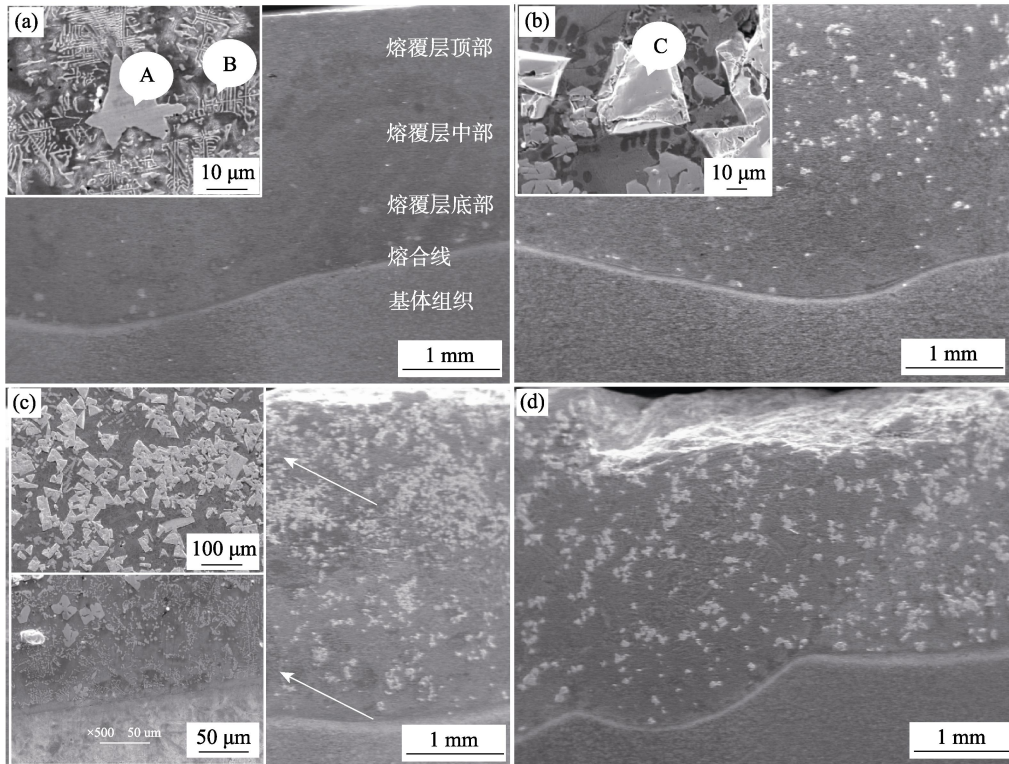
1.2 组织分析与性能表征

采用 4XFZ 型金相显微镜(上海万衡精密仪器有限公司)和 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜(带 Oxford7854 电子能谱仪)(日本电子株式会社)观察和分析材料的组织与形貌。采用 HV-1000 型显微硬度测试仪(上海茶明光学仪器有限公司)测材料纵向显微硬度(加载载荷 1.96 N,保压时间 15 s,每层测 5 个点,并取平均值)。采用 HR-150A 洛氏硬度计(莱州华银试验仪器有限公司)测材料硬度(加载载荷 15 kg,取 7 个检测点,相邻检测点间距大于 3 mm,去掉最高值和最低值取平均值)。采用 MLS-23 型湿沙橡胶轮式磨损试验机(张家口市诚信试验设备制造有限公司)测材料的耐磨性能(磨料重量为 1.5 kg,圆盘转速为 240 r/min,磨损为 1 000 r,施加载荷为 24.5 N)。

2 试验结果与分析

2.1 材料的组织分析

图 1 为不同 W 含量条件下氩弧熔覆原位合成 WC 涂层的显微组织。从图 1 可以看出, Q235 基体与熔覆涂层界限分明,无气孔、裂纹等缺陷,冶金结合良好。当 W 含量为 30% 时,熔覆涂层中依稀可见亮白色物质,熔覆层底部、中部和顶部组织无明显差异。对熔覆层中典型的深灰色组织进行局部放大并辅以 EDS 分析, A 点所示的多边形块状物和 B 点所示的鱼骨状物质中 Fe、W 原子百分比接近,初步确定其为表现形态不同的复式碳化物 M_6C 。当 W 含量为 40% 时,涂层中出现边界棱角分明,亮白色的颗粒物质,EDS 分析显示其 W、C 原子百分比接近,为原位合成的 WC。WC 颗粒零散分布于熔覆涂层中,熔覆层底部 WC 数量少,中部和顶部 WC 数量增多,其结果如图 1 (b) 和表 3 所示。当 W 含量增加到 50% 及以上时,原位合成 WC 数量显著增加,亮白色 WC 颗粒呈典型三角形、四边形形态,



(a)No.1; (b)No.2; (c)No.3; (d)No.4

图 1 氩弧熔覆原位合成 WC 涂层的显微组织

Fig.1 Microstructure of WC-reinforced coating

表 3 图 1 中各点的 EDS 成分测试结果 %

Tab.3 EDS analysis of points in Fig.1

点位	元素含量			
	Fe	W	C	Mn
A	33.89	29.73	34.28	2.10
B	39.76	25.57	34.67	-
C	3.70	43.11	53.19	-

且弥散分布于熔覆涂层。图 1 (c) 所示的 W 含量为 50% 的熔覆涂层呈现纵向分布不均匀现象, 从熔覆层底部到熔覆层顶部, 复式碳化物数量减少, 原位合成 WC 数量增多。图 1 (d) 所示的材料组织不均匀现象有所改善, 主要受以下因素影响: 一方面, 较高的 W 含量使 WC 生成过程中原子扩散距离相对较短, 大量快速生成的 WC 颗粒没有足够的时间聚集长大, 只能在原位不断成核, 形成弥散分布状态; 另一方面, 在相同的氩弧熔覆工艺条件下, 高 W 含量熔池冷却速度相对较慢, 较慢的冷却速度使 WC 颗粒有更多时间在熔池中扩散迁移, 促进 WC 弥散分布; 此外, 样品选取角度等因素也会影响视野所见 WC 颗粒的分布情况。

在氩弧熔覆过程中, 高能量热源使钨铁、石墨

等原料迅速熔化, 形成一个高度混合的液态 Fe-W-C 合金体系。在高温液态环境下, W 原子和 C 原子克服彼此之间的扩散阻力, 相互靠近并发生反应生成 WC。根据相关相图知识与试验结果, 本试验涉及的主要反应有:



热力学理论计算发现原位合成 WC 反应的自由能总体上保持负值, 说明 WC 在高温下倾向于自发形成^[26]。原位合成 WC 的数量和分布受温度、W 含量等多重因素影响。SUETIN DV 等^[27]采用第一性原理计算得出 Fe₃W₃C 和 WC 的形成能分别为 0.12 eV/atom 和 0.17 eV/atom, 说明 Fe₃W₃C 比 WC 更容易形成。本试验中的 Fe₃W₃C 涉及少量 Mn 元素等的固溶, 故将 Fe₃W₃C 标记为 M₆C。当钨含量较低 (如 30%) 时, 可供反应的 W 数量少, 与 C 反应生成 WC 的机会少, 熔覆涂层中 WC 数量少, M₆C 数量多。随着 W 含量增加到 40%~60%, 参与反应的 W 数量增多, 按照化学反应平衡原理, 在高温熔覆环境下, W 与 C 反应生成 WC 的反应更易向右进行, 熔覆涂层中 WC 数量增多, M₆C 数量减少。

在熔覆层底部, 由于靠近基体, 热量散失较快, 凝固速度相对较快, 这使反应物没有足够的时间反应生成 WC。而从底部向上, 凝固速度逐渐变慢, 反应时间延长, 同时, 熔池的对流作用将更多的 W 和 C 带到熔覆层顶部附近, 为 WC 的生成提供更有利的条件, 所以原位合成 WC 呈现从熔覆层底部到顶部数量逐渐增多的趋势。当 W 含量增加到一定程度后, 对氩弧熔覆过程中 WC 形核与长大、熔池冷却与凝固的协同作用发生微妙变化, 使 WC 颗粒在基体中的分布更加均匀弥散。

2.2 材料的性能分析

基于不同 W 含量对熔覆涂层微观组织的影响, 并结合图 3 分析发现, W 含量为 50% 是一个极大的转折点, 当 W 含量达 50% 时, 原位合成 WC 数量显著增多, 熔覆层洛氏硬度值增加到趋于稳定状态, 相对耐磨性的提升较其他阶段增幅最大。W 含量为 50% 时熔覆层的各项性能接近 W 含量为 60% 的熔覆层, 且能较好地反映本试验条件下多数材料的组织和性能从熔覆层底部到顶部分布不均匀这一共性问题。本试验对 W 含量为 50% 涂层材料的纵向显微硬度进行深入分析, 结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, 熔覆层底部、中部和顶部多个采样点的显微硬度分布比较集中, 均值分别为 930 HV、1 100 HV 和 1 000 HV, 熔覆层各层组织均匀。熔覆层底部、中部和顶部的硬度值较基体而言有明显提高, 且呈现先升高后缓慢下降趋势, 这可能与熔覆层中硬质颗粒沿熔覆方向纵向分布不均匀有关。熔覆层底部 WC 数量少, 但共晶碳化物与固溶强化协同作用使材料硬度较基体明显提高; 熔覆层中部 WC 颗粒数量多, 弥散强化作用显著, 对材料硬度的作用明显; 熔覆层顶部由于 WC 下沉现象, 硬度略有下降。

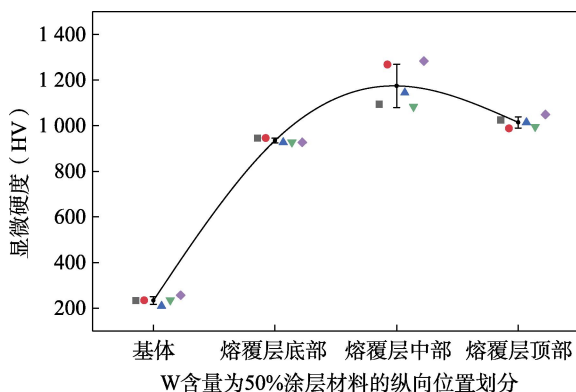


图 2 W 含量为 50% 涂层材料的纵向显微硬度分布
Fig.2 Longitudinal micro-hardness distribution of the coating material with 50% W content

图 3 为不同 W 含量涂层材料的洛氏硬度、磨损失重与相对耐磨性示意图。由图 3 可以看出, 材料的洛氏硬度随 W 含量增加先快速增加后缓慢增加并趋于平缓。当 W 含量为 30% 时, 材料硬度约为 55 HRC, 当 W 含量增加到 40%~60% 时, 硬度升高并维持在 61 HRC 左右。相同磨损条件下, Q235 钢总磨损转数 1 000 r 后, 磨损失重约为 0.722 g, 将其相对耐磨性标记为 1。不同 W 含量熔覆涂层材料的磨损失重均低至 0.013 g 以下, 相对耐磨性约为 Q235 钢的 60~70 倍。氩弧熔覆反应制备 WC 熔覆涂层显著提高了 Q235 钢的硬度和材料的耐磨性能, 对改善钢铁材料的组织和性能产生了积极的影响。

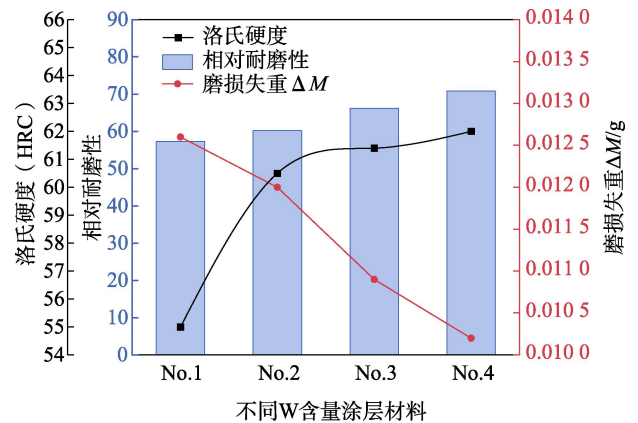
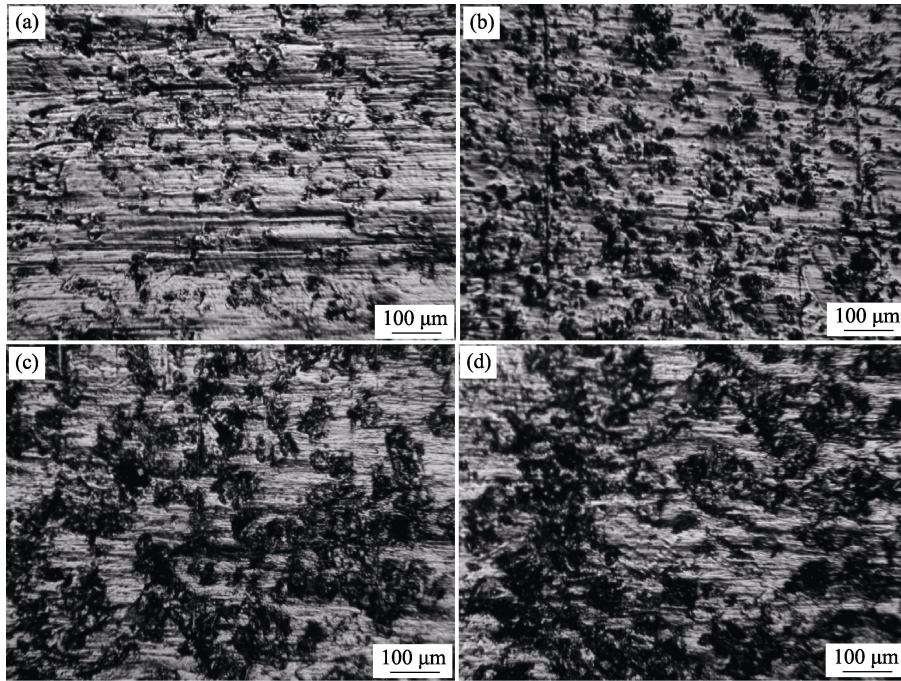


图 3 不同 W 含量涂层材料的洛氏硬度、磨损失重与相对耐磨性

Fig.3 Rockwell hardness, wear weight loss, and relative wear resistance of coating materials with different W contents

图 4 为不同 W 含量涂层材料的表面磨损形貌。由图 4 (a) 可以看出, 当 W 含量为 30% 时, 熔覆涂层表面磨痕连续, 沟槽较深, 磨损较严重。当 W 含量增加到 40% 时, 熔覆涂层表面磨痕断续, 沟槽较浅, 磨粒对材料的显微切削作用大大减弱。当 W 含量增加到 50%~60% 时, 大量原位合成的 WC 颗粒在熔覆涂层表面形成均匀而致密的保护骨架, 构成“阴影保护”效应, 显著提高了材料的耐磨性能。

出现上述现象的主要原因在于材料的耐磨性并非完全是材料的固有属性, 受材料自身特性和外部环境等多重因素的影响。本试验所用材料为原位合成的 WC 颗粒增强铁基涂层材料, WC 颗粒硬度极高, 显微硬度达 1 730 HV, 是提供涂层高耐磨性的关键成分; 钢铁基合金作基体, 起支撑 WC 颗粒、赋予涂层材料一定韧性和强度的作用。试验用磨粒为石英砂, 硬度为 900~1 200 HV。当石英砂作用



(a)No.1; (b)No.2; (c)No.3; (d)No.4

图 4 不同 W 含量涂层材料的表面磨损形貌

Fig.4 Surface wear morphology of coating materials with different W contents

于软质钢铁基基体时, 石英砂被称为硬质磨粒。硬质石英砂楔入基体中, 在外力作用下对基体进行显微切削, 产生深而连续的犁沟。当石英砂作用于硬质 WC 颗粒时, 石英砂被称为软质磨粒。硬质 WC 颗粒阻碍石英砂在材料表面的运动并使其不能楔入基体中, 对熔覆涂层构成良好的保护作用。当 W 含量较低时, 熔覆涂层中 WC 数量较少, M_6C 数量较多, 硬质 M_6C 作为主增强相赋予材料较高的耐磨性能, 熔覆涂层相对耐磨性达 Q235 基体的 58 倍。随着 W 含量增加, M_6C 与 WC 颗粒的含量呈现此消彼长的趋势, 熔覆涂层的耐磨性稳步提升。当 W 含量增加到 50%~60%时, 原位合成 WC 的数量显著增多, 分布均匀而弥散, “阴影保护”作用显著增强, 熔覆涂层相对耐磨性达 Q235 基体的 66 倍及以上。

3 结 论

(1) 以钨铁和石墨为原材料, 采用氩弧熔覆技术在 Q235 钢表面原位合成 WC 颗粒增强铁基涂层材料, Q235 基体与熔覆涂层界限分明, 无气孔、裂纹等缺陷, 冶金结合良好。

(2) 当 W:C=1:1.5 (摩尔比) 时, W 含量增加促进原位合成 WC 颗粒。当 W 含量达 50%及以上

时, WC 数量显著增加, 弥散分布于基体, 对钢铁材料形成有效强化和保护。氩弧熔覆原位合成 WC 在涂层中存在纵向分布不均匀现象。

(3) 在本试验条件下, 随 W 含量增加, 硬质 WC 增多, 材料硬度增加, 耐磨性能增强, 熔覆涂层磨损前后组织均匀。当 W 含量增加到 50%及以上时, 材料硬度达 61 HRC 及以上, 相对耐磨性约为 Q235 钢的 66 倍及以上。

参考文献:

- [1] 江雪雷, 许 颖. 基于 THz-TDS 技术的钢板锈蚀厚度的无损检测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 245-251.
JIANG Xuelei, XU Ying. Nondestructive testing of corrosion thickness of steel plate based on THz-TDS technology[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2022, 49(11): 245-251.
- [2] LIANG Wei, GENG Ruming, ZHI Jianguo, et al. Oxide metallurgy technology in high strength steel: a review[J]. Materials, 2022, 15(4): 1350.
- [3] WANG Peng, RYBERG Morten, YANG Yi, et al. Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply-and demand-side mitigation efforts[J]. Nature Communications, 2021, 12: 2066.
- [4] WU Di, GOU Haojie, SHI Yifan, et al. Influence of different

- shaped three-dimensional preforms on the microstructure and wear resistance of WC/iron-based configuration composites[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2025, 130: 107132.
- [5] ZHANG Wengao, LI Zulai, WEI He, et al. Interfacial structure of WC-Fe metal-matrix composite (WC/Fe₃W₃C and Fe/Fe₃W₃C) stability, electronic and mechanical properties from first-principles calculations[J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104470.
- [6] LIAO Zexin, HUANG Xiedong, ZHANG Fei, et al. Effect of WC mass fraction on the microstructure and frictional wear properties of WC/Fe matrix composites[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 114: 106265.
- [7] GRAIRIA A, BELIARDOUH N E, ZAHZOUH M, et al. Dry sliding wear investigation on tungsten carbide particles reinforced iron matrix composites[J]. Materials Research Express, 2018, 5 (11): 116528.
- [8] PITTARI J J, MURDOCH H A, KILCZEWSKI S M, et al. Sintering of tungsten carbide cermets with an iron-based ternary alloy binder: processing and thermodynamic considerations[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 76: 1-11.
- [9] ZHANG Zhanzhan, NING Jiaqing, GE Min, et al. Effect of W-to-C atomic ratio on microstructure and performance of in-situ WC/Fe composite prepared by spark plasma sintering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 121: 106643.
- [10] ZHANG Zhanzhan, CHEN Yunbo, ZUO Lingli, et al. The effect of volume fraction of WC particles on wear behavior of in-situ WC/Fe composites by spark plasma sintering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 69: 196-208.
- [11] ZHANG Zhanzhan, CHEN Yunbo, ZHANG Yang, et al. Tribology characteristics of ex-situ and in-situ tungsten carbide particles reinforced iron matrix composites produced by spark plasma sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 704: 260-268.
- [12] 李刚, 熊梓连, 曾永浩, 等. 激光增材制造 WC 增强铁基复合材料组织结构及性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49 (4): 271-277.
- LI Gang, XIONG Zilian, ZENG Yonghao, et al. Microstructure and properties of WC reinforced iron matrix composites manufactured by laser additive[J]. Surface Technology, 2020, 49 (4): 271-277.
- [13] ZHOU Yiqi, WANG Li, KONG Decheng, et al. Ultra-high strength metal matrix composites (MMCs) with extended ductility manufactured by size-controlled powder and spherical cast tungsten carbide[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 182: 108194.
- [14] 刘金刚, 郑文捷, 王高升, 等. 20Cr2Ni4A 钢表面 WC 增强铁基涂层耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2021, 50 (6): 236-242.
- LIU Jingang, ZHENG Wenjie, WANG Gaosheng, et al. Study on wear resistance of 20Cr2Ni4A steel surface WC reinforced iron-based coating[J]. Surface Technology, 2021, 50 (6): 236-242.
- [15] JIA Runnan, LIU Shenglin, LUO Zhichao, et al. Microstructure and wear resistance of WC and high chromium cast iron hardfacing layers[J]. Coatings, 2020, 10 (9): 852.
- [16] PRABANJAN S, KARTHICK K, REJVIN KUMAR J R, et al. Wear behavior and metallurgical characteristics of particle reinforced metal matrix composites produced by hardfacing: a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33: 599-606.
- [17] 郝晨帆, 孟君晟, 丁皓, 等. 氩弧熔覆 Al_xCoCrFeCuNi 高熵合金涂层组织与耐磨性[J]. 表面技术, 2023, 52 (12): 360-368.
- HAO Chenfan, MENG Junsheng, DING Hao, et al. Microstructure and wear resistance of Al_xCoCrFeCuNi high entropy alloy coating by argon arc cladding[J]. Surface Technology, 2023, 52 (12): 360-368.
- [18] 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.
- [19] 陈志辉, 孟君晟, 丁皓, 等. 氩弧熔覆制备钛合金涂层的研究进展[J]. 材料保护, 2023, 56 (12): 140-147.
- CHEN Zhihui, MENG Junsheng, DING Hao, et al. Research progress of titanium alloy coating prepared by argon arc cladding[J]. Materials Protection, 2023, 56 (12): 140-147.
- [20] LI Ping, LI Xiao, LI Yongcun, et al. Microstructure and mechanical properties of millimeter WC particle-reinforced high-chromium cast iron composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28 (12): 7816-7827.
- [21] XIAO Qi, SUN Wenlei, YANG Kaixin, et al. Wear mechanisms and micro-evaluation on WC particles investigation of WC-Fe composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 420: 127341.
- [22] 罗海文, 沈国慧. 超高强度高韧化钢的研究进展和展望[J]. 金属学报, 2020, 56 (4): 494-512.
- LUO Haiwen, SHEN Guohui. Progress and perspective of ultra-high strength steels having high toughness[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (4): 494-512.
- [23] CHEN Hongyu, GU Dongdong, KOSIBA K, et al. Achieving high strength and high ductility in WC-reinforced iron-based composites by laser additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101195.

- [24] WANG Shengwei, WANG Shuize, WU Honghui, et al. Towards enhanced strength-ductility synergy via hierarchical design in steels : from the material genome perspective[J]. Science Bulletin, 2021, 66 (10) : 958–961.
- [25] REN Congcong, ZHAO Nana, MA Li, et al. Preparation and formation mechanism of (W) WC/Fe bundle reinforced iron matrix composites[J]. Ceramics International, 2024, 50 (23) : 51152–51161.
- [26] 王淑峰. 原位冶金碳化钨复合材料研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- WANG Shufeng. Study of tungsten carbide composite produced by in-situ metallurgy[D]. Qingdao : Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [27] SUETIN D V, SHEIN I R, IVANOVSKII A L. Structural, electronic and magnetic properties of η carbides ($\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ and $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$) from first principles calculations[J]. Physica B: Condensed Matter, 2009, 404 (20): 3544–3549.

Microstructure and Properties of WC-Reinforced Steel Matrix Composites Fabricated by TIG Cladding

YANG Yan¹, TANG Fang², YAN Yingping¹

(1. Zhangjiajie Aviation Industry Vocational Technical College, Zhangjiajie 427000, Hunan, China; 2. Changsha Tianyi Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha 410100, Hunan, China)

Abstract: Using ferrotungsten, graphite, reduced iron powder, and medium-carbon ferromanganese as raw materials, an in-situ synthesized WC particle-reinforced iron-based coating material was fabricated on the surface of Q235 steel via argon arc cladding technology to investigate the effect of tungsten (W) content on the microstructure and properties of carbide-modified steel materials. The results indicate that the cladding coating exhibits a well-defined interface with the Q235 steel substrate, free of pores, cracks, or other defects, and achieves excellent metallurgical bonding. When the molar ratio of W:C is maintained at 1:1.5, an increase in W content promotes the in-situ synthesis of WC particles, significantly enhancing the hardness and wear resistance of the matrix material. As the W content reaches 50% or higher, the number of WC particles increases markedly, forming a uniform and dispersed distribution within the matrix. The Rockwell hardness of the coating material attains 61 HRC or above, and its relative wear resistance reaches approximately 66 times or higher compared to Q235 steel, demonstrating significant improvements in the microstructure and performance of the steel material.

Key words: ferrotungsten; in situ synthesis; WC; TIG cladding; microstructure; properties

(编辑 : 游航英)