

高铬铸铁叶片堆焊工艺研究进展

高吉昌¹, 门秀花¹, 姜帅¹, 付秀丽^{1,✉}, 蒋振峰², 李艳²

1 济南大学机械工程学院, 济南 250000

2 淄博大亚金属科技股份有限公司, 山东 淄博 255000

高铬铸铁因良好的耐磨损、强度、韧性及抗高温、耐腐蚀性能, 常被应用于抛丸机叶片、大型挖泥泵叶轮、水泥球磨机耐磨衬板等受磨损冲击的器件, 通常采用堆焊工艺对高铬铸铁工件的磨损表面进行修复, 以延长其使用寿命, 降低制造新工件时产生的资源消耗。本文综述了高铬铸铁叶片堆焊过程中焊接电流、层间温度、冷却条件等工艺参数对高铬铸铁堆焊层组织结构、晶粒大小的影响, 讨论了钒、钛、铌、稀土纳米颗粒等合金粉末及由合金粉末制成的药芯焊丝对高铬铸铁堆焊层组织成分、组织结构的影响, 对比了现有传统堆焊工艺缺陷, 指出了堆焊加工工艺未来发展的方向。

关键词 高铬铸铁 堆焊 叶片 加工参数 药芯焊丝 耐磨性

中图分类号: TG455 **文献标识码:** A

Progress of Surfacing Technology of High Chromium Cast Iron Blades

GAO Jichang¹, MEN Xiuhua¹, JIANG Shuai¹, FU Xiuli^{1,✉}, JIANG Zhenfeng², LI Yan²

1 School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250000, China

2 Zibo Taa Metal Technology Co., Ltd., Zibo 255000, Shandong, China

Because of its good wear resistance, high chromium cast iron is often used as shot blasting machine blade, large dredging pump impeller and other wear impact occasions. Fatigue damage of wear and crack on the surface of workpiece are usually repaired by stacking welding process to prolong their service life, significantly reduce the resource consumption generated by manufacturing new artifacts. This paper summarizes the influence of the process parameters and the performance of the hot metal welding tape. The influence of welding current, interlayer temperature and cooling condition on the tissue structure and grain size of high chromium cast iron stack and the influence of the welding wire containing vanadium, titanium, niobium and rare earth nanoparticles on the tissue composition and structure of high chromium cast iron stack are discussed respectively; compared with the existing traditional surfacing process, the future development direction of surfacing process is pointed out.

Key words high chromium cast iron, surfacing, blade, processing parameters, drug-core welding tape, wear resistance

0 引言

高铬铸铁因自身的组织特点, 所具有的韧性、耐磨性、高温强度和耐热性等性能优于一般铸铁, 已经替代普通白口铸铁、镍硬铸铁成为抛丸机叶片、水泥球磨机耐磨衬板、移动反击式破碎机板锤、渣浆泵零件等器件的常用材料。

以抛丸机叶片为例, 磨损与裂纹萌生等破坏都从叶片表面开始, 磨损叶片如图 1a 所示; 根据叶片的材质和工作环境的要求, 通常会选择具有较高的硬度和耐磨性的药芯焊丝作为堆焊材料, 然后使用埋弧焊、气焊或者等离子弧堆焊等堆焊工艺, 将药芯焊丝在叶片磨损部位进行堆焊修复, 修复过程如图 1b 所示。

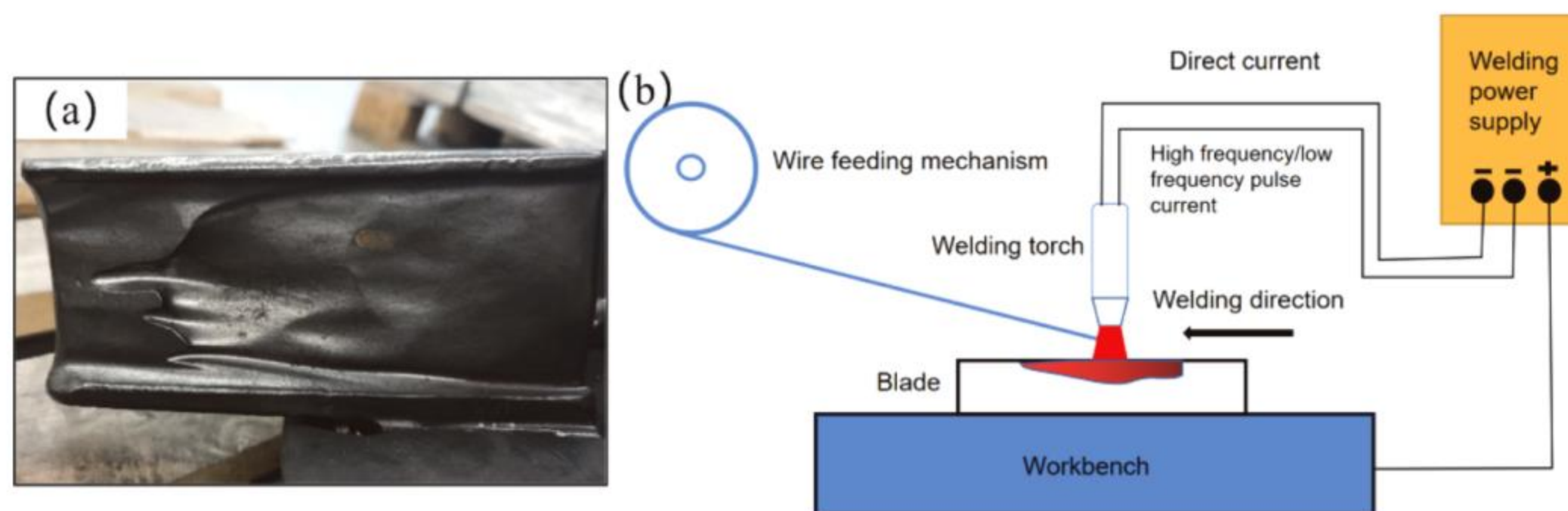


图 1 叶片的磨损与堆焊修复图: (a) 磨损叶片; (b) 堆焊修复

Fig. 1 Wear and surfacing repair of blades: (a) wear blade; (b) surfacing repair

利用表面强化手段提高叶片表面性能是延长工件寿命的重要方式。表 1^[1-13] 为各表面强化方式的优缺点对比。

高性能耐磨堆焊层可以在不显著增加制造成本的情况下有效延长工件的使用寿命^[14]。堆焊技术因可以实现基体






与耐磨堆焊层的结合, 结合层深厚、结合强度高、基体和堆焊层之间没有明显界面、经济优势和生产效率高而得到广泛应用^[15]。常见的堆焊工艺主要包括手工电弧堆焊、埋弧焊、气体保护堆焊、钨极氩弧焊堆焊、等离子弧堆焊、电渣堆焊。这

基金项目: 山东省自然科学基金重点项目 (ZR2020KE022); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2021ME179); 国家自然科学基金面上项目 (52175408)

This work was financially supported by the Key Project of Shandong Provincial Natural Science Fund (ZR2020KE022), General Project of Shandong Natural Science Foundation (ZR2021ME179), and National Natural Science Foundation of China (52175408).

表 1 强化方式对比

Table 1 Comparison of the reinforcement methods

表面强化方式	原理	优点	缺点
 <p>喷丸</p>	将高速的丸料喷射到需要强化的工件表面,在工件表面产生塑性变形,从而在工件表面上产生强化层	在工件表面强化层引入残余应力,提高工件表面的疲劳抗力 ^[1]	弹丸冲击方向离散度较小,法向冲击较多,出现堆叠、孔隙等特征
 <p>滚压^[2]</p>	利用滚压工具对工件表面施加压力,使工件表面产生塑性流动,提高工件表面质量	工艺简单可控,形成有效残余压应力层,降低工件表面粗糙度,提高硬度 ^[4]	有分层现象,表层易脱落,强化效果有限 ^[3]
 <p>电镀</p>	电镀 ^[5] ,就是利用电解,在工件表面形成均匀、致密、结合良好的金属或合金沉积层的过程	增强工件耐腐蚀性、增加硬度、防止磨损,工艺简单,参数易于控制	电镀表面枝晶无序生长,基体表面存在不均匀的电场分布
 <p>激光冲击^[6]</p>	利用高能诱导金属表面形成等离子体并发生等离子爆炸 ^[7] ,使材料表面发生塑性变形,从而细化晶粒,引入残余应力,提高材料的硬度、耐磨耐蚀性以及疲劳性能 ^[8-10]	加载压力高,塑性变形影响程度深,冲击区域和加载压力可控性好 ^[11-12]	工件表层晶粒出现非晶化;组织中形成了大量位错缠结及形变孪晶等亚结构缺陷
 <p>堆焊</p>	用焊接的方法把金属熔化在工件表面,修复工件的磨损表面或强化工件的表面质量	有效提高工件的耐磨性、耐热性等,降低生产成本,效率高,无环境破坏,结合强度高,无分层现象	焊接工艺参数难匹配 ^[13] ,缺乏自主研发的焊丝

些焊接工艺都以相同的加工原理影响堆焊层的表面质量、焊缝沉积量和质量以及焊道的几何形状^[16],这些影响在很大程度上取决于它们的工艺参数。上述堆焊工艺中影响堆焊层表

面质量的加工参数主要为焊接电流、冷却条件、层间温度、焊接速度以及不同合金粉末成分的药芯焊丝等。图 2 为冷却条件、电流大小加工参数对表面形貌的影响对比图^[17-18]。

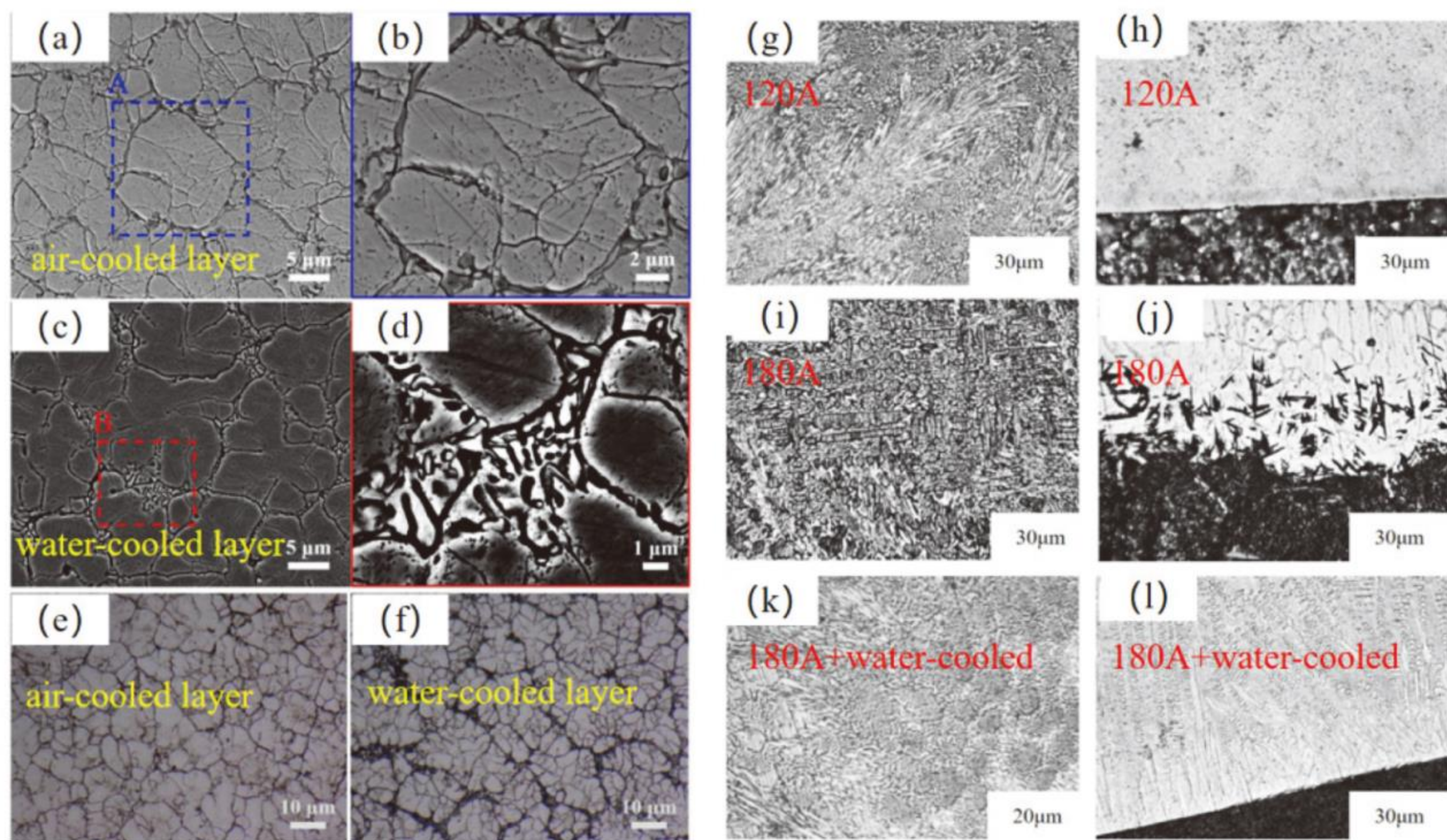


图 2 (a)风冷层二次电子形态;(b)放大区域 A;(c)二次电子区放大图水冷层的形态;(d)放大区域 B;(e)风冷层和(f)水冷层的光学微观形态^[17];用电流(g,h)120 A 沉积的、(i,j)180 A 沉积的、(k,l)180 A 沉积的且具有水冷基底的涂层的微观结构;(g,i,k)沉积金属的中心部分;(h,j,l)熔化区^[18]
 Fig. 2 (a) Secondary electron morphology of air-cooled layer; (b) enlarged view of region A; (c) secondary electron morphology of water-cooled layer; (d) enlarged view of region B; optical microscopic morphologies of (e) air-cooled and (f) water-cooled layers^[17]; microstructure of coating deposited with current (g,h) 120 A, (i,j) 180 A, and (k,l) 180 A with water-cooled substrate; (g,i,k) central part of deposited metal; (h,j,l) melting zone^[18]

本文主要简述了高铬铸铁叶片堆焊工艺的研究进展,分析了焊接电流、层间温度、冷却条件在堆焊过程中对高铬铸铁叶片堆焊层组织及性能的影响,综述了药芯焊丝中钒、稀土纳米颗粒、钛等对堆焊层组织及性能的影响,对比传统堆焊工艺(如等离子弧堆焊、钨极氩弧焊等)的现有不足,展望了未来堆焊加工工艺的发展方向,对提高高铬铸铁叶片堆焊层的耐磨性和硬度等性能具有重要意义。

1 堆焊加工参数对高铬铸铁叶片堆焊层性能的影响

由于焊接时既要保证高铬铸铁叶片堆焊后完整可用,又要保证焊丝中的成分受焊接工艺因素的影响尽可能小,那么焊接过程中的电流、电压、位置、速度、层间温度、冷却条件等焊接参数^[19]对确定焊接质量具有重要作用^[20-21]。合理地匹配焊接电流^[22-23]、焊接速度^[24]、层间温度和冷却条件,才能得到具有高耐磨性、高硬度等良好性能的高铬铸铁叶片堆焊层。

1.1 焊接电流对高铬铸铁叶片堆焊层耐磨性的影响

焊接电流的幅值决定了输入到工件的热量大小,电流

过小或频率过低时,药芯焊丝的熔滴会堆积在工件表面,导致熔合不完全^[25]。过大的焊接电流会导致焊缝金属中马氏体板条的加宽、 $M_{23}C_6$ 碳化物的粗化和维氏硬度的降低。因此,这两种现象都会显著降低高铬铸铁叶片的焊接质量^[26]。此外,引入脉冲电流有利于在堆焊过程中小热输入下获得更大的穿透深度^[27-28],脉冲电流还可以促进熔池中液态金属的对流,对高铬铸铁叶片的组织分布起重要作用。研究表明^[29],随着堆焊过程中电流或脉冲电流频率的增加,熔合区晶粒尺寸增大,脉冲电流能得到更好的晶粒细化组织,熔合区内组织的不均匀性显著降低,熔合区的晶粒尺寸和共晶分布均匀(如图3所示),从而使得堆焊层获得较高的硬度及耐磨性。低电流脉冲气体保护焊是对传统焊接技术的发展。在焊接中使用脉冲电流可以实现“每脉冲一滴”过渡模式^[30],具有低飞溅和良好可控性的优点^[31]。Fan等^[32]利用小电流脉冲熔化极气体保护焊的周期性脉冲冲击特性将其与激光束焊接电流进行了方波拟合,引入复合焊接方式(如图4所示),发现通过引入小电流脉冲熔化极气体保护焊,可以有效增大激光束流焊接工件时的熔池深度,提高焊接效率

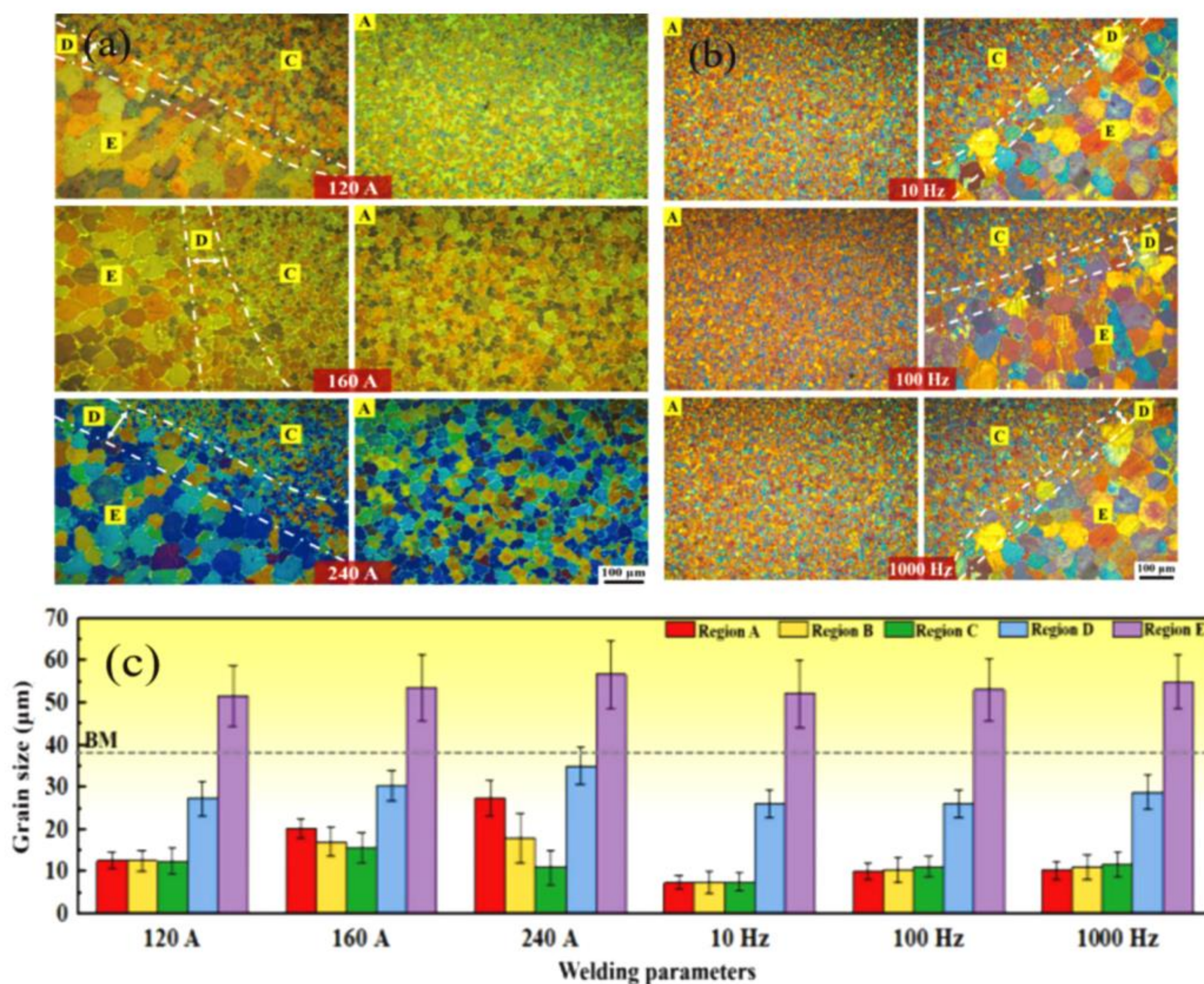


图3 堆焊层显微组织:(a)直流电流下微观组织对比;(b)脉冲电流下微观组织对比;(c)熔合区晶粒大小^[29](电子版为彩图)

Fig. 3 Microtissue of stacking layer: (a) microtissue comparison under DC current; (b) microtissue comparison under pulse current; (c) grain size of fusion zone^[29]

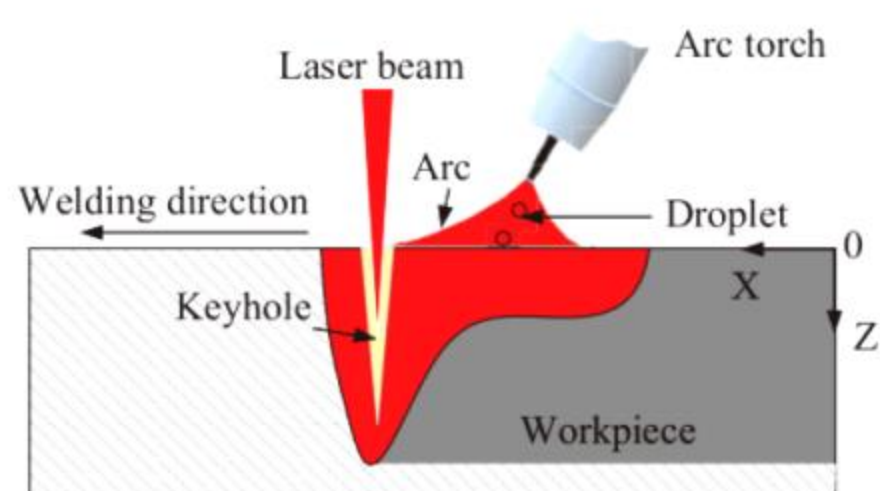


图4 低电流脉冲辅助大功率激光焊接示意图^[32]

Fig. 4 Schematic diagram of low-current pulse-assisted high-power laser welding^[32]

与搭接能力。Zhou等^[33]提出了一种新的焊接电流模式,即三脉冲步进焊接电流模式。比较常规恒定焊接电流下的焊接效果发现,三脉冲步进焊接电流下的焊接焊缝有更好的耐磨性能。

在高铬铸铁叶片堆焊过程中,焊接电流的大小、种类和极性都会对高铬铸铁叶片的性能产生影响。当焊接电流逐渐变大时,高铬铸铁叶片上的电弧力增大,导致热源位置下移,焊接电流与焊缝熔深呈现出近似于正比例关系变化,单

位时间内消耗的焊丝增多,堆焊工件表面的熔池加深,电弧的移动范围会受到限制,从而影响堆焊高铬铸铁叶片的成型^[34]。高铬铸铁叶片在脉冲电流的作用下,凝固组织中的初生碳化物均匀化,其形态和分布得到改善。脉冲电流处理后,初生碳化物的形态由粗棒状转变为块状或颗粒状,这种微观结构的耐腐蚀性、显微硬度和耐磨性也得到了提高,如图5a、b所示^[35],显微硬度对比如图5c、d所示。对于未经脉冲电流处理的工件,初生碳化物表面有明显的裂纹,沿显微硬度印记的对角线向外扩展(见图5c)。然而,在经脉冲电流处理的工件中未发现明显的裂纹扩展(见图5d)。微裂纹的平均长度远小于未经脉冲电流处理的工件中初生碳化物的平均长度。这些结果表明,脉冲电流处理后,初生碳化物的显微硬度和断裂韧性以及基体结构的致密性都得到了改善。

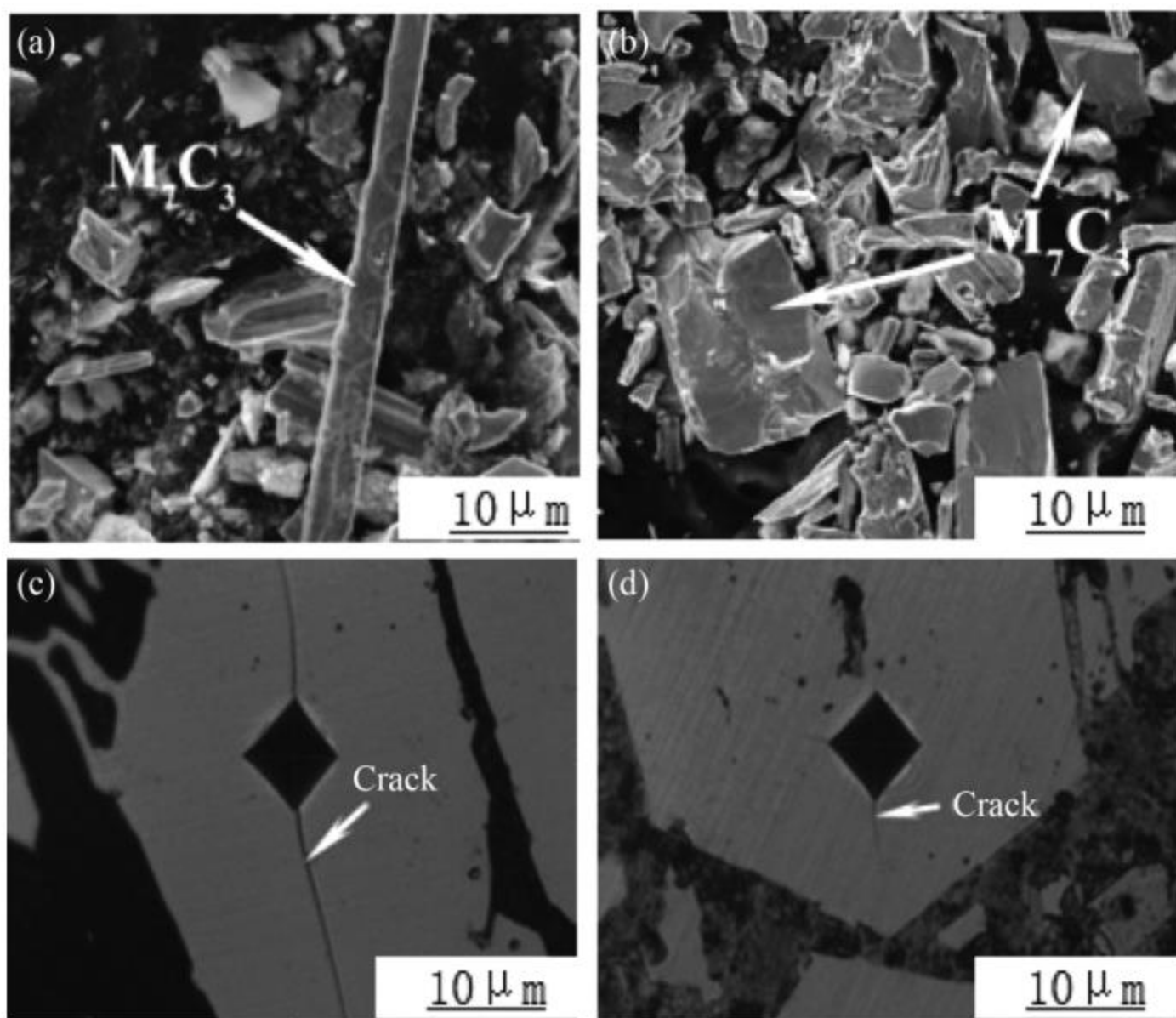


图5 高铬铸铁堆焊层组织:(a)未用脉冲电流处理的堆焊层组织;(b)脉冲处理过的堆焊层组织;(c)未用脉冲电流处理的微观组织;(d)高频脉冲处理过的微观组织^[35]

Fig. 5 High chromium cast iron surfacing layer organization: (a) surfacing tissue treated without pulse current; (b) pulsed-treated surfacing tissue; (c) microscopic tissue not treated with pulse current; (d) microscopic tissue treated with high-frequency pulses^[35]

综上所述,脉冲电流细化晶粒主要是通过对熔池的振荡作用,促进糊状区枝晶的破碎与枝晶尖端的重熔,增加形核点,阻碍柱状晶生长,从而细化了堆焊层晶粒^[36]。根据实际工况及堆焊工艺,采用脉冲电流及复合脉冲电流进行表面修复堆焊,焊接层的晶粒细化效果更高^[37]。

1.2 层间温度对高铬铸铁叶片堆焊层耐磨性的影响

为了在长时间使用中保持耐磨性,通过多道次和多层焊接生产具有所需厚度的堆焊高铬铸铁合金。在堆焊过程中,层间温度是指相邻两层材料之间的温度差异。层间温度的变化会影响熔池形成、凝固过程和涂层的性能。因此,了解和控制好层间温度对获得良好的堆焊质量至关重要。韩佳源^[38]在高铬铸铁基复合材料上,对其进行了不同层间温度的堆焊试验,在不同层间温度下,发现高铬铸铁堆焊层的微观结构的组成成分没有变化,但由于层间温度的下降,碳化物的体积分数增加,高铬铸铁堆焊层的耐磨性增强。

Zhang等^[39]在层间温度分别为230℃、80℃和30℃的条件下,采用药芯电弧焊(FCAW)制备了过共晶高铬铸铁

(HHCCI)涂层,发现层间温度对初生碳化物形貌的影响较大,而对其组成的影响较小。随着层间温度的降低,初生碳化物的数量增加,初生碳化物的大小和平均自由程减小,如图6所示,工件表面堆焊层的耐磨性明显增强。Dong等^[40]研究了电弧增材制造工艺(WAAM)过程中合金组织与层间温度之间的复杂关系,在不同层间温度的条件下,制备了单程多层组件,用于微观结构表征。他们发现,不同层间温度下,所有试样的硬度与耐磨性均呈先升高后下降的趋势。层间温度较高的试样的顶面附近硬度下降趋势不明显。

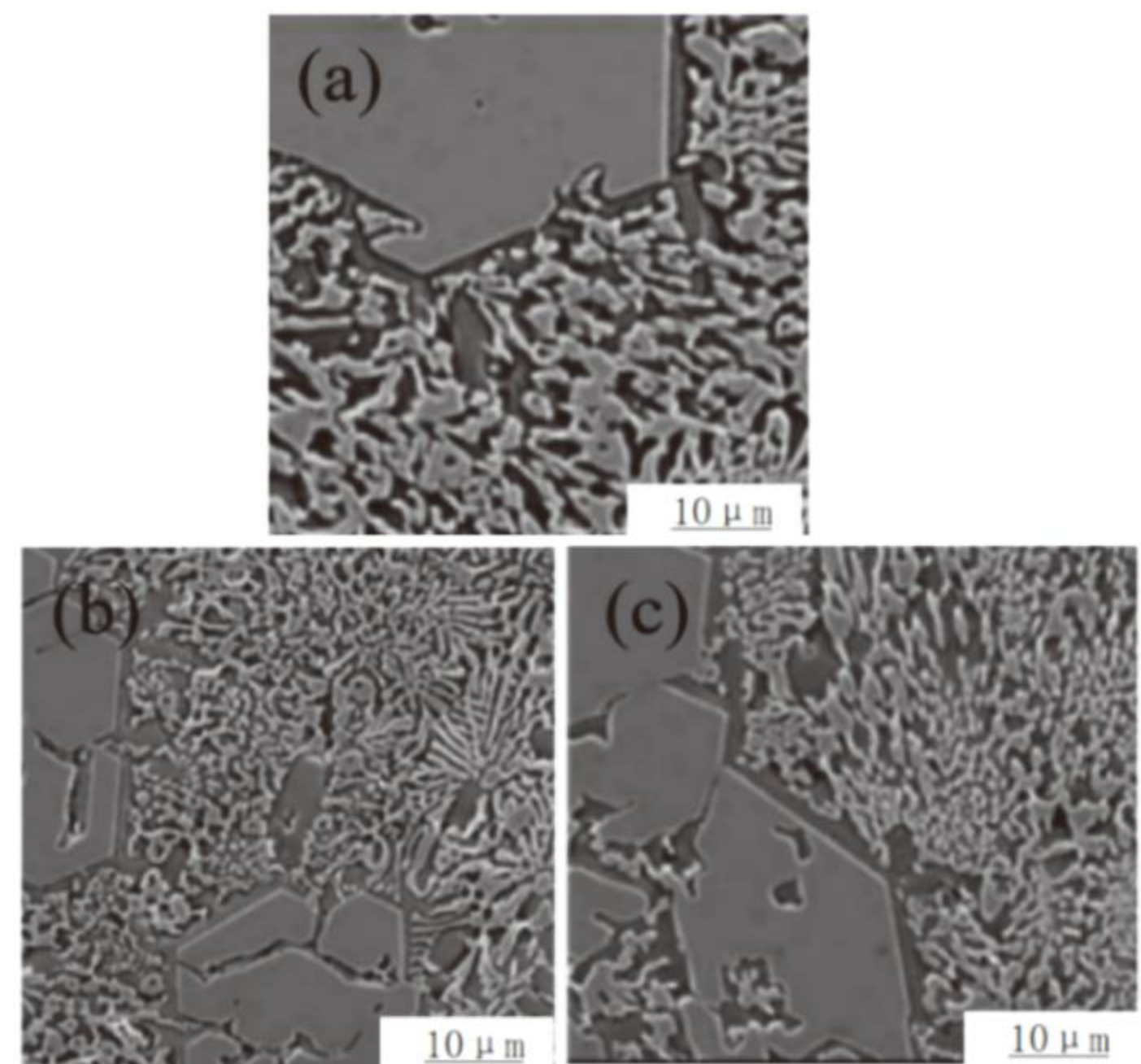


图6 不同层温下的组织形貌:(a)层温230℃时的组织形貌;(b)层温80℃时的组织形貌;(c)层温30℃时的组织形貌^[39]

Fig. 6 Microstructure at different layer temperatures: (a) tissue morphology at layer temperature 230 °C; (b) tissue morphology at layer temperature 80 °C; (c) tissue topography at layer temperature 30 °C^[39]

层间温度过低会导致焊接量不足,熔池深度减小,焊接层不够厚实,堆焊层晶粒组织排列不规整^[41],使得晶粒组织会受到破坏。层间温度过高会导致熔池深度增大^[42],影响堆焊层的强度、韧性、耐磨性。对比图7堆焊层的冲击断口SEM形貌可知,在层间温度较高的试样断口的较大面积上会出现大量的枝晶,并且会表现出断裂的特征,可以清楚地看到离散、断续分布的大小不等的孔洞,出现易发生断裂的疏松缺陷。合理的层间温度^[43]有助于提高堆焊层的组织结构,使其更加均匀,从而提高堆焊层的强度、韧性、耐磨性,最后达到提高高铬铸铁叶片耐磨性的目的。

1.3 冷却条件对高铬铸铁叶片堆焊层耐磨性的影响

与铸造相比,堆焊时控制合金凝固速度更为困难,因为堆焊从液滴形成到熔池凝固的过程非常快,所以冷却的方式及冷却速度也是影响堆焊层微观结构特征的重要因素^[44-45]。Zhang等^[46]研究了冷却条件对高铬铸铁电弧堆焊层组织和磨料磨损行为的影响。通过空气和液氮冷却制备高铬铸铁堆焊合金(低温冷却装置如图8所示),焊剂药芯与基体在电弧热作用下产生熔池,液氮冷却管在焊剂药芯后进行熔池冷却。光学显微镜和扫描电子显微镜分析发现,液氮喷射冷却使初生奥氏体细化,高铬铸铁电弧堆焊层形貌显著改善,如图9所示。

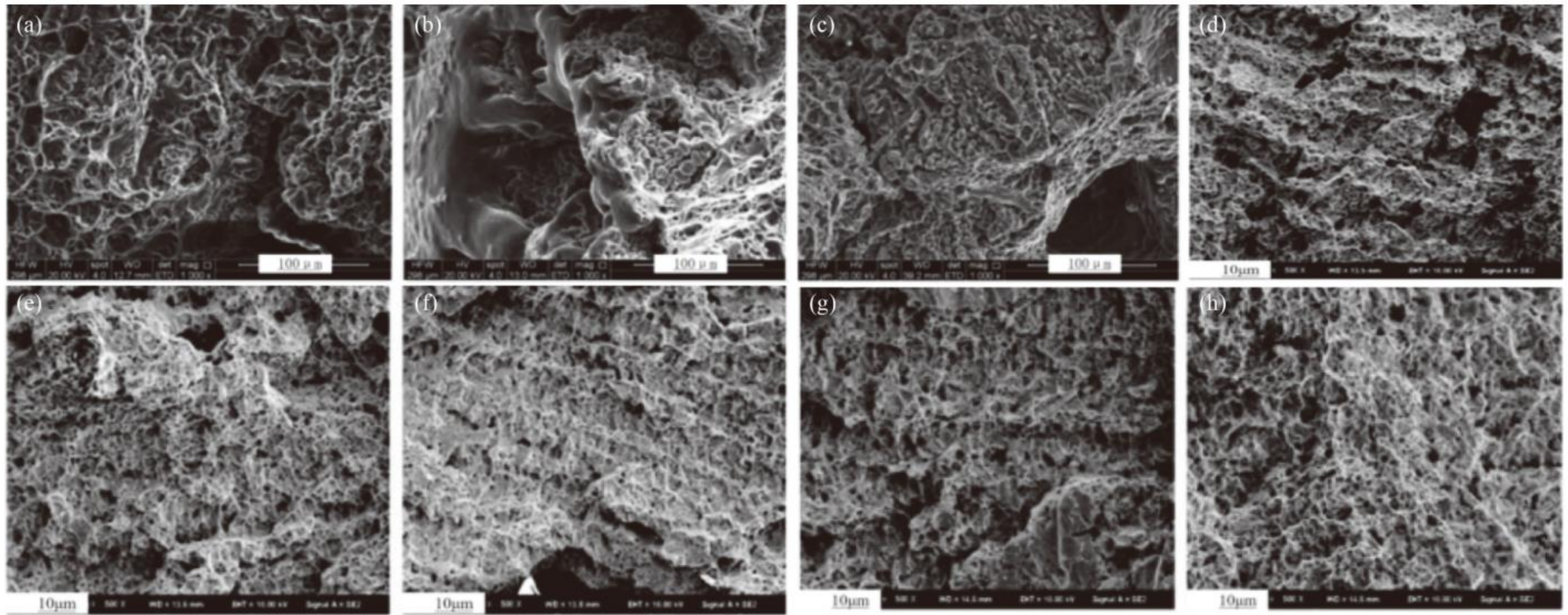


图7 不同层间温度下堆焊层冲击断口的微观形貌:(a)210 °C; (b)220 °C; (c) 230 °C^[42]; (d) 25 °C; (e) 60 °C; (f) 100 °C; (g) 150 °C; (h) 200 °C^[43]

Fig.7 Micromorphology of impact fracture of surfacing layer at different interlayer temperatures:(a)210 °C; (b)220 °C; (c) 230 °C^[42]; (d) 25 °C; (e) 60 °C; (f) 100 °C; (g) 150 °C; (h) 200 °C^[43]

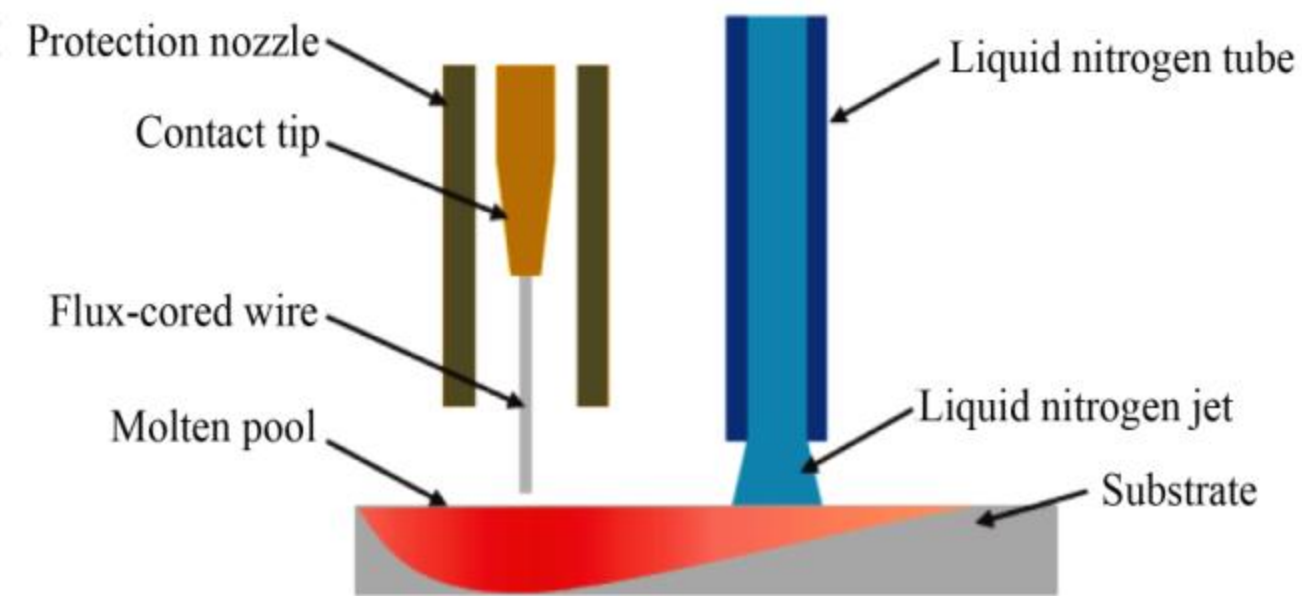


图8 液氮冷却装置的原理示意图^[46]

Fig.8 Schematic diagram of the liquid nitrogen cooling device^[46]

耐磨性试验表明,在相同条件下液氮喷射冷却堆焊合金具有比空气冷却堆焊合金更好的耐磨性。

研究表明,将峰值温度和冷却速度控制在一定范围内,可以有效地提高焊接质量^[47],加热/冷却控制的堆焊工艺有助于提高合金焊接性、耐磨性和吸附性能^[48]。Sun等^[49]对比了空气冷却、铜冷却和水冷却三种条件,发现使用铜冷、水冷强制冷却方法相较于空冷可以大大缩短高温停留时间及热影响区的宽度。

液氮射流的冷却方式改变了高铬铸铁堆焊层的凝固组

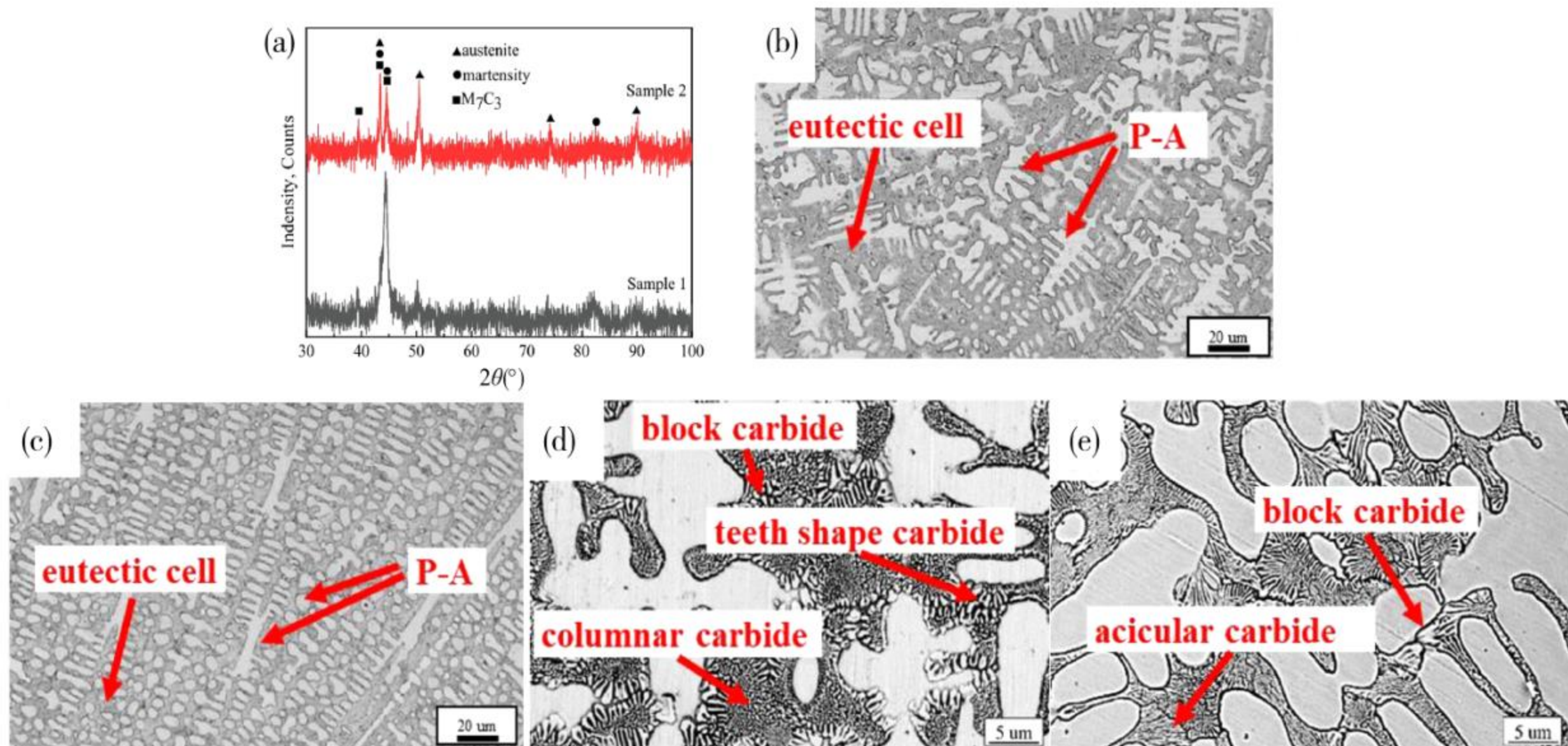


图9 堆焊合金的微观结构:(a)堆焊合金的XRD图;(b)空冷的初生奥氏体微观形态;(c)液氮冷却的初生奥氏体微观形态;(d)空冷共晶单元微观形态;(e)液氮冷却共晶单元微观形态^[46]

Fig.9 Microstructures of the surfacing alloys:(a) XRD patterns of the surfacing alloys; (b) micromorphology of air-cooled incipient austenite; (c) micromorphology of liquid nitrogen-cooled born austenite; (d) micromorphology of air-cooled eutectic unit; (e) micromorphology of liquid nitrogen-cooled eutectic unit^[46]

织,使共晶组织细化,共晶碳化物从棒状变为针状,还会使高铬铸铁堆焊层的初生奥氏体的硬度增加。空冷、空冷+水冷等方式也会对焊接堆焊层的组织尺寸、合金元素含量、硬度、冲击韧性等产生影响^[50]。合理地选择单一冷却方式或复合冷却方式会提高高铬铸铁叶片堆焊层组织的均匀性,提高堆

焊层表面的耐磨性^[51-52]。

2 药芯焊丝对高铬铸铁叶片堆焊层的影响

药芯焊丝具有熔敷速率快、改善焊缝质量、易实现自动堆焊等特点,对高铬铸铁堆焊层有很大影响。钢带为焊接层

提供机械强度和韧性,不同种类的合金元素粉末为堆焊层提供特定的性能,如硬度、耐磨性、耐腐蚀性、抗裂性等。

2.1 含稀土纳米颗粒的药芯焊丝对高铬铸铁叶片堆焊层性能的影响

含稀土氧化物纳米添加剂的焊丝通过堆焊工艺增加高铬铸铁叶片中初生碳化物的体积分数,进而提高高铬铸铁叶片堆焊层的硬度^[53]。Sapate 等^[54]发现,随着纳米添加剂的增加,高铬铸铁堆焊合金的硬度和初生碳化物的体积分数均先升高后降低。初生碳化物体积分数的增加使得合金的硬度增加。稀土元素已被广泛用于改善高铬铸铁和钢的微观

结构^[55-56]。王学亮等^[57]采用纳米 WC/TiC 复合粒子强化高铬铸铁,发现将 WC/TiC 复合粒子添加到高铬铸铁叶片中,可以抑制基体的生长,使 M_7C_3 的生长形态发生变化,如图 10a、b 所示,加入 WC/TiC 复合粒子后,其碳化物比常规高铬铸铁叶片更细,且碳化物从粗大的条形转变为间断的网状结构,WC/TiC 复合粒子起到形核细化作用,使其具有更好的抗磨损性能。安亚君等^[58]采用氩弧熔覆的方法,向堆焊层中添加 0%~0.2% 的稀土氧化铈,结果显示,加入一定量的稀土氧化铈可以使晶粒变得更细(见图 10c、d),还可以提高其堆焊层熔覆层的硬度和耐磨性。

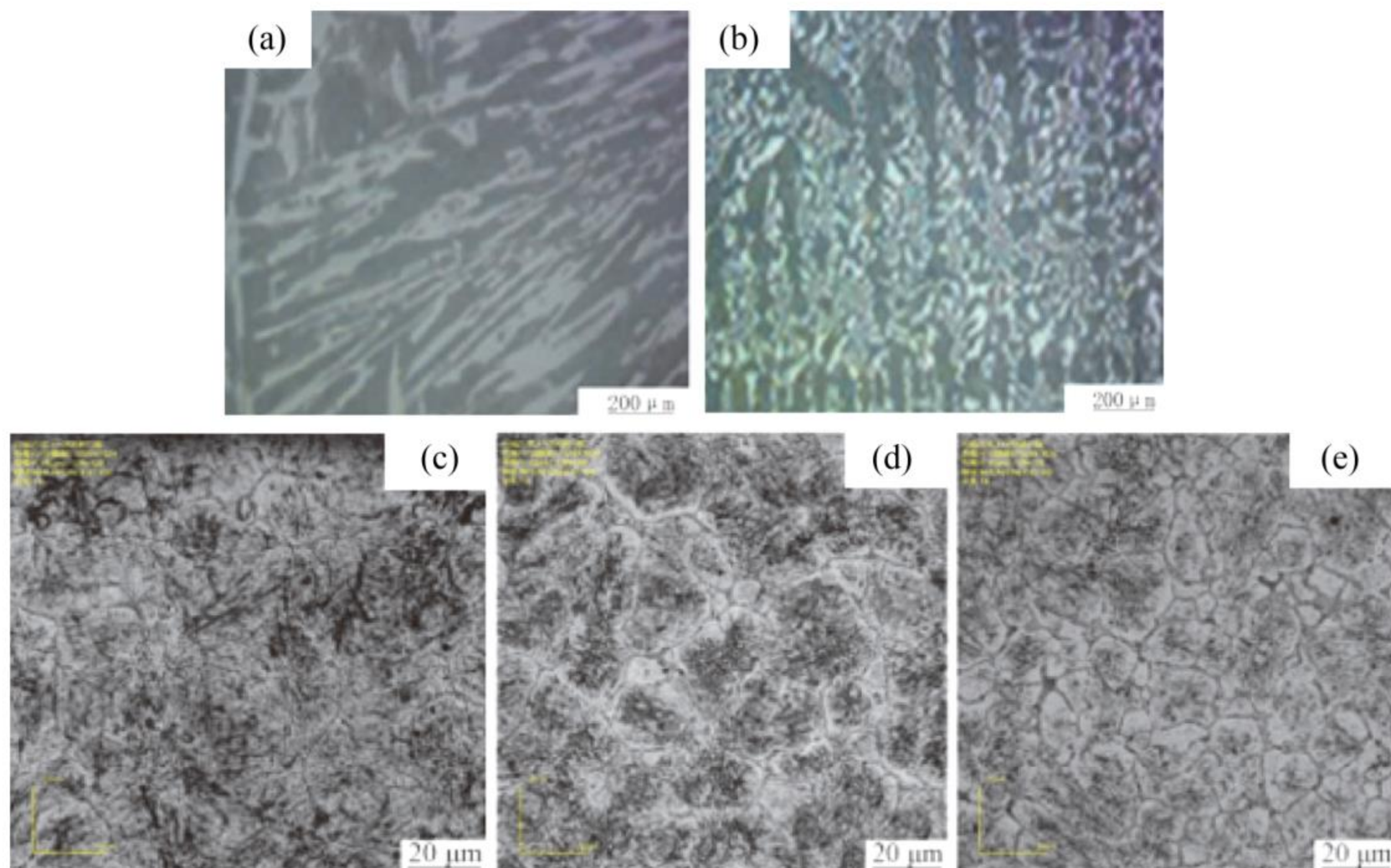


图 10 添加纳米材料前后的高铬铸铁叶片显微组织:(a)未添加纳米 WC/TiC 材料的显微组织;(b)添加纳米 WC/TiC 材料显微组织^[57]。不同稀土含量工作层组织:(c)0%RE,(d)0.1%RE,(e)0.2%RE^[58]

Fig. 10 Microtissue of high chromium cast iron leaves before and after the addition of nanomaterials:(a) microtissue without nano WC/TiC material;(b) microtissue of nano WC/TiC material^[57]. Working layer tissues of different rare earth contents:(c) 0%RE,(d) 0.1% RE,(e) 0.2%RE^[58]

高铬铸铁堆焊合金的硬度、耐磨性变化与高铬铸铁堆焊合金的微观结构变化密切相关。稀土纳米颗粒的加入可以促使晶粒细小化,晶粒细化可以提高高铬铸铁堆焊层的强度和硬度,并改善其耐磨、耐腐蚀性能;可以改善高铬铸铁叶片堆焊层的相变行为,从而得到更加均匀的组织结构;可以改变堆焊层的晶格结构和变形行为,从而影响堆焊层的残余应力状态。合适的残余应力分布可使堆焊层的耐疲劳性能和抗变形能力提高。

2.2 含钒药芯焊丝对高铬铸铁叶片堆焊层的影响

钒是一种和碳有极强亲和力的元素,能与碳形成 VC、 V_2C 碳化物,在钢或铸铁中加入少量的钒,可以使其组织晶粒变细,并能增强其强度和韧性,在一定程度上改善了高铬铸铁叶片的硬度和耐磨性。Qi 等^[59]在焊丝中加入钒铁的质量分数分别为 0%、1.5%、2% 和 3%,采用堆焊工艺制备了含钒添加剂的高铬铸铁硬耐磨层,堆焊金属的微观结构如图 11a—d 所示, M_7C_3 型大块原生碳化物是在含有游离钒添加剂的堆焊金属中沉淀出来的。随着钒添加剂含量的增加,堆焊金属的显微组织明显细化,碳化物的尺寸逐渐减小,共晶碳化物的量增加,随着钒添加量的增加,高铬铸铁堆焊金

属的磨损失重减小,高铬铸铁堆焊金属的耐磨性逐渐提高。Zhuang 等^[60]研究了钒的加入对等离子弧焊法制备的堆焊合金组织和性能的影响。结果表明,随着钒添加量的增加,堆焊合金的硬度先升高后降低(见图 11e),而双体磨料的耐磨性呈持续升高的趋势,但其变化趋势不受荷载和力变化的影响。

2.3 其他合金元素的药芯焊丝对高铬铸铁叶片堆焊层性能的影响

在药芯焊丝中加入钨(W)^[61]、钛(Ti)等强碳化物形成元素^[62-64],可以进一步提高高铬铸铁叶片堆焊层的耐磨性。龚建勋等^[65]使用药芯焊丝自保护明弧焊方法,制备了 Fe-Cr-C-B-Si 堆焊合金,结果表明,随着 Si 含量的提高,堆焊层的碳化物形貌、分布及尺寸都会有明显的变化,如图 12a—c 所示,堆焊层中生成了含初生双相的复合碳化物,使叶片堆焊层的硬度升高,耐磨性上升。丁芬等^[66]研究了铌元素对堆焊合金显微组织的影响。结果表明,当铌含量逐渐增加时,NbC 硬质相析出,此时堆焊层组织发生变化,从共晶组织转变为亚共晶组织(如图 12d、e 所示),合金硬度从 64HRC 提升到 69HRC,耐磨性大幅提升。

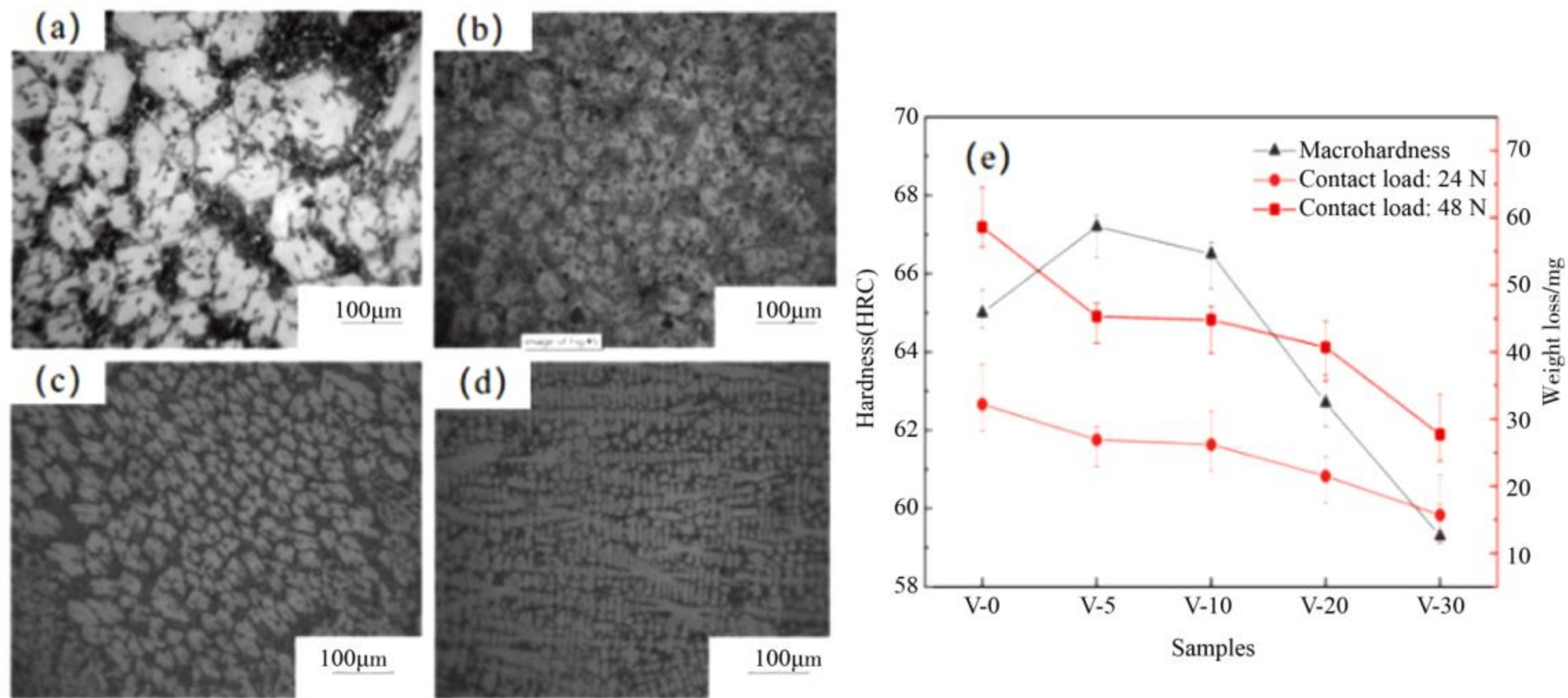


图 11 含钒添加剂的堆焊金属的微观结构:(a)含钒 0%;(b)含钒 1.5%;(c)含钒 2%;(d)含钒 3%^[59];(e)不同的钒添加物下合金的宏观硬度和磨损损失^[60]

Fig. 11 Microstructure of surfacing metals containing vanadium additives: (a) vanadium 0%; (b) vanadium 1.5%; (c) vanadium 2%; (d) vanadium 3%^[59]; (e) macroscopic hardness and wear loss of alloys under different vanadium additives^[60]

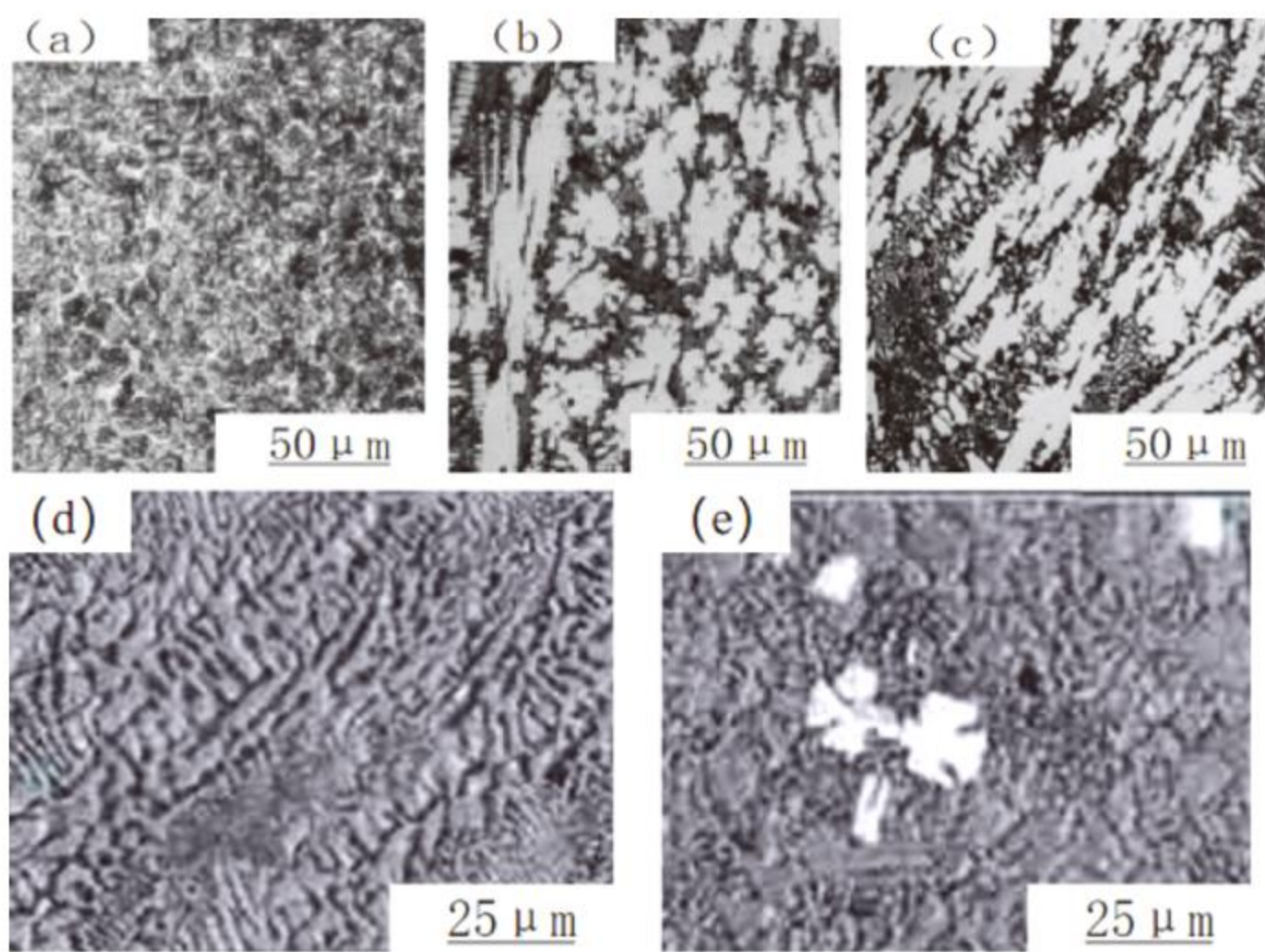


图 12 Fe-Cr-C-B-Si 堆焊合金显微组织:(a)未加钨;(b)加少量钨;(c)较高钨含量^[65]。堆焊合金的背散射电子表面形貌:(d)未添加 Mo;(e)添加 Mo^[66]

Fig. 12 Microstructure of Fe-Cr-C-B-Si surfacing alloy: (a) without niobium; (b) a small amount of niobium; (c) higher niobium content^[65]. Backscattered electron surface morphology of surfacing alloy: (d) without Mo; (e) with Mo^[66]

线澜清等^[67]利用等离子弧进行了堆焊实验,并对堆焊层进行了硬度和耐磨性的测试。结果表明,在不同 Mo 含量下,堆焊层的洛氏硬度可达 64.5HRC,比无 Mo 的情况下高 15%,耐磨性能是无 Mo 情况下的 1.2 倍。廖禄泰等^[68]在药芯焊丝中同时加入钒和钼,发现此时堆焊层的耐磨性比单加钒或钼时更好。

铁基堆焊合金以廉价、性能可调节的特性,在许多领域得到了广泛的应用。一般情况下,向铁基中添加 C、B、Cr、Mo、W、V 等合金元素,能形成高硬度的硬质相,从而使堆焊层具有一定的耐磨性能。不同种类的元素复合对高铬铸铁堆焊层的硬度、耐磨性等性能的提高优于单一元素。堆焊层中的碳、铬、锰和镍以及与焊接金属一起添加的粉末中的碳、铬、锰和镍导致组织为马氏体和奥氏体的混合物,这大大提高了高铬铸铁堆焊层的硬度和耐磨性^[69]。

3 展望

堆焊工艺经历了多年的发展和改进,在堆焊药芯焊丝的

研发、堆焊加工参数优化、技术工艺等方面,都在逐渐地缩小与国外的差距,但是堆焊加工工艺仍存在一些问题需要解决。在堆焊修复时,在起弧、断弧处容易产生缺陷,工艺参数不匹配,不能形成连续的熔池,形成有效的焊缝,工件表面就会出现夹渣、气孔和裂缝等现象^[70]。对于药芯焊丝中合金粉末成分较复杂时,堆焊层的组织结构及最终性能还有待研究。随着表面强化工艺及制造业的快速发展,堆焊工艺发展出一系列新兴工艺技术来补足上述缺陷,为未来堆焊工艺发展提供了一定的方向。

3.1 等离子弧堆焊发展趋势

等离子沉积制造技术是基于等离子堆焊和快速成型技术发展起来的复合制造技术^[71],用等离子沉积制造技术获得的熔覆层具有精细、均匀、致密的组织结构,该技术具有柔性好、加工速度快、对零件的复杂程度几乎没有任何的限制等优点^[72]。同时,它在缩短制造加工周期、节省资源与能源、发挥材料性能、提高精度、降低成本方面有着很大的潜力。

电磁场辅助焊接是近年来发展起来的一种相对较新的焊接技术。外部磁场通常是平行于电弧轴的纵向磁场。纵向磁场可以促进电弧的旋转;电弧柱等离子体射流的径向分布和电弧密度发生变化,从而影响基体材料的熔化和焊缝的形成。外磁场控制的焊接技术已被发现在控制堆焊层的微观结构方面非常有效。

在等离子弧堆焊过程中,引入纵向磁场可以有效地控制硬相的数量和分布,从而提高铁基合金堆焊层的硬度和耐磨性。在一定的磁场强度范围内,电磁搅拌效应既能提高成核率,又能促进晶粒细化^[73]。但是,过大的磁场电流会导致堆焊修复部位的热输入过高,使温度升高更快,熔池的冷却速率也更快,熔池中的金属无法充分沉淀和结晶,导致晶粒无法细化;还会导致等离子体的流动速度超过等离子体流体动力学中的最大流速,使得等离子体的湍动程度增加,从而导致热量传输不均匀,进而引起晶粒粗化等不利影响^[74]。因此,针对不同的工艺参数、材料和堆焊需求,通常通过适当调节磁场的强度来控制等离子体流动速度;选择合适的磁场方向使等离子体在焊接区域呈环状旋涡流动,提供均匀的热输

入和较低的冷却速率;结合多个磁场源和磁场配置,更精确地控制等离子体流动和热输入等方式,以达到最佳的磁场优化配置。

3.2 其他堆焊工艺发展趋势

双钨极氩弧焊技术是一种以常规钨极氩弧焊为基础而发展起来的一种高质量、高效率的新兴焊接技术,它的优点包括电弧电压低、焊接熔深浅、母材稀释率低、焊接效率高。高频复合双钨极氩弧焊是在双钨极氩弧焊技术基础上发展起来的,与双钨极氩弧焊相比,具有更好的焊接表面形状、横向截面对称性,焊缝区具有更小的枝晶组织,且断裂韧窝具有更高的均匀度和致密度^[75]。

电磁搅拌可以降低焊接热的影响,使晶界不那么曲折,相变奥氏体更小。钨极氩弧焊和电磁搅拌结合的工件焊缝比单一钨极氩弧焊的工件焊缝具有更高的缺口抗拉强度和伸长率且焊缝具有致密且相交的枝晶,同时在拉伸试验过程中有更多的奥氏体变形^[76]。

埋弧堆焊较厚的堆焊结构、严重的合金偏析和高稀释率使该技术的应用受到一定的限制。激光熔覆^[77]是一种新兴的快速加热和冷却的环保型表面强化技术,可以获得精细的微晶结构,结合强度高,热影响区小,稀释率低。埋弧堆焊与激光熔覆技术相结合,可实现两种工艺的互补。该复合工艺可以获得精细的微晶结构,且具有结合强度高、热影响区小、稀释率低等特点^[78]。

4 结语

通过堆焊工艺,高铬铸铁堆焊层要获得最佳性能需要选择合适的焊接电流、层间温度、冷却条件等参数并根据需要搭配药芯焊丝。焊接电流的大小、种类和极性、层间温度的高低、冷却条件的选择、药芯焊丝合金粉末成分不同,得到的堆焊层组织与结构都不同,总结如下:

(1) 根据实际工况选择低频脉冲电流、高频脉冲电流或复合脉冲电流堆焊修复磨损的抛丸机叶片表面,有助于促进堆焊层晶粒组织细化,使其共晶组织分布更加均匀,提高堆焊层的耐磨性。

(2) 合理地选择层间温度有助于提高高铬铸铁堆焊层组织中初生碳化物的含量,使组织结构均匀化。

(3) 液氮冷却、水冷、空冷等冷却方式及其复合冷却方式可以改变高铬铸铁堆焊层的凝固组织、合金元素含量、堆焊层初生奥氏体硬度等,合适的冷却方式有助于提高其表面的耐磨性。

(4) 通过在药芯焊丝中加入钒、钨、钛、铌、稀土纳米颗粒等纯合金粉末或混合合金粉末可以改变堆焊层中组织成分,提高堆焊层的韧性、硬度、耐磨性、耐蚀性等性能。

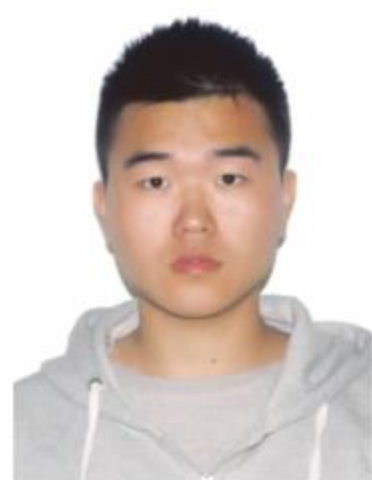
参考文献

- 1 Wang B W, Chen X M, Su Y L, et al. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(5), 6 (in Chinese).
王彬文, 陈先民, 苏运来, 等. *航空学报*, 2021, 42(5), 6.
- 2 Zhang B, Wang X Q, Tian Y J, et al. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30(2), 16 (in Chinese).
张彪, 王晓强, 田英健, 等. *塑性工程学报*, 2023, 30(2), 16.

- 3 Shaw K D. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 463(2), 46.
- 4 Luan X S, Liang Z Q, Zhao W X, et al. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(4), 34 (in Chinese).
栾晓圣, 梁志强, 赵文祥, 等. *机械工程学报*, 2023, 59(4), 34.
- 5 Tian Y, Ma L W, Xi X L. *Materials Reports*, 2023, 37(3), 185 (in Chinese).
田娅, 马立文, 席晓丽. *材料导报*, 2023, 37(3), 185.
- 6 Yu Y Q, Zhou L C, Gong J N, *Surface Technology*, 2022, 51(10), 38 (in Chinese).
俞延庆, 周留成, 宫健恩, 等. *表面技术*, 2022, 51(10), 38.
- 7 Tang W Q, Luo J M, Chen Y H, et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(3), 144 (in Chinese).
唐伟清, 罗军明, 陈宇海, 等. *材料热处理学报*, 2023, 44(3), 144.
- 8 Grabowski A, Sozańska M, Adamiak M, et al. *Applied Surface Science*, 2018, 461, 117.
- 9 Liao Y, Ye C, Cheng G J. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78, 15.
- 10 Wu G, Wang Y, Sun M, et al. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32(1), 12.
- 11 Lao X S, Zhao X F, Liu Y, et al. *Materials Science Forum*, 2020, 990, 73.
- 12 Cui Z D, Zhu J M, Jiang H, et al. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(7), 837 (in Chinese).
崔振铎, 朱家民, 姜辉, 等. *金属学报*, 2022, 58(7), 837.
- 13 Yu J, Cai C, Xie J, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16), 179 (in Chinese).
余杰, 蔡创, 谢佳, 等. *中国激光*, 2022, 49(16), 179.
- 14 Wang K M, Du D, Liu G, et al. *Corrosion Science*, 2020, 176, 108922.
- 15 Günther K, Bergmann J P, Suchodoll D. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 334, 420.
- 16 Zhang H, He J P, Tang L L, et al. *Results in Physics*, 2019, 13, 102259.
- 17 Zhang H, Mei K T, Guo W S, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 13, 102259.
- 18 Vdovin K N, Emelyushin A N, Nefed'ev S P. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, 59, 5.
- 19 Gong M, Dai S J, Wang T. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(2), 20 (in Chinese).
龚淼, 戴士杰, 王涛. *机床与液压*, 2021, 49(2), 20.
- 20 Khamari B K, Dash S S, Karak S K, et al. *Ironmaking & Steelmaking* 2019, 47, 844.
- 21 Singh D K, Sahoo G, Basu R, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36, 281.
- 22 Han J, Han Y Q, Sun Z B, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123, 5.
- 23 Asif H, Shehbaz T, Nawaz K F, et al. *SAGE Journals Home*, 2022, 236, 9.
- 24 Vivas J, Fernández Calvo A I, Aldanondo E, et al. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, 6, 6.
- 25 Tong X, Wu G H, Zhang L, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10, 180.
- 26 Dennison A V, Toncich D J, Masood S. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1997, 13(4), 256.
- 27 Wang Z M, Jiang D H, Wu J W, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60, 503.
- 28 Wang Y J, Liu W H, Wang D Q, et al. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 807, 140894.
- 29 Wang Q M, Tong X, Wu G H, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2023, 869, 144816.
- 30 Praveen P, Kang M, Yarlagadda P. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, 32(2), 196.
- 31 Qin G L, Lei Z, Lin S Y. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, 12(1), 79.
- 32 Fan X C, Qin G L, Jiang Z L, et al. *Journal of Materials Research and*

- Technology, 2023, 22, 17.
- 33 Zhou K, Yu W X, Wang G, et al. *Journal of Materials Science*, 2023, 58, 23.
- 34 Xu T. *Cemented Carbides*, 2011, 28(6), 396 (in Chinese).
徐涛. 硬质合金, 2011, 28(6), 396.
- 35 Lv H Y, Zhou R F, Li L, et al. *Materials*, 2018, 11, 1.
- 36 Liu G Y, Huang J K, Yu X Q, et al. *Materials Reports*, 2022, 36(12), 149 (in Chinese).
刘光银, 黄健康, 于晓全, 等. 材料导报, 2022, 36(12), 149.
- 37 Tong X, Wu G H, Easton M A, et al. *Scripta Mater.* 2022, 215, 114700.
- 38 Han J Y. Study on surfacing technology of ceramic particle reinforced high chromium cast iron composite. Master's Thesis, General Research Institute of Mechanical Sciences, China, 2021 (in Chinese).
韩佳源. 陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料堆焊工艺研究. 硕士学位论文, 机械科学研究总院, 2021.
- 39 Zhang J L, Wei J J, Wei S Z, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23, 131417.
- 40 Dong B L, Cai X Y, Xia Y H, et al. *Additive Manufacturing*, 2021, 48, 102453.
- 41 Wang L Y, Zou J S, Zhu Z Y, et al. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 35(6), 23 (in Chinese).
王凌宇, 邹家生, 朱治愿, 等. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(6), 23.
- 42 Li L, Liu G Y, Wang P Y, et al. *Development and Application of Materials*, 2021, 36(5), 72 (in Chinese).
李利, 刘国元, 王鹏云, 等. 材料开发与应用, 2021, 36(5), 72.
- 43 Hu L, Wang X, Yin X H, et al. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(12), 1767 (in Chinese).
胡磊, 王学, 尹孝辉, 等. 金属学报, 2018, 54(12), 1767.
- 44 Baruah M, Bag S. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 213, 100.
- 45 Desai R S, Bag S. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(2), 264.
- 46 Zhang J L, Wei J J, Wei S Z, et al. *Materials Letters*, 2022, 23, 4105.
- 47 Manvatkar V, De A, Svensson L E, et al. *Scripta Materialia*, 2015, 94, 36.
- 48 Nakarin S, Nuengruetai K, Trinet Y. *Metals*, 2019, 9(2), 244.
- 49 Sun J, He J, Deng D. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(1), 63.
- 50 Huang M Z, Wang S Z, Wang Y M. *Materials Protection*, 2020, 53(8), 96 (in Chinese).
黄梦真, 王守忠, 王玉美. 材料保护, 2020, 53(8), 96.
- 51 Kan C L, Zhang X Y, Zhang X Q, et al. *Hot Working Technology*, 2020, 49(1), 41 (in Chinese).
阚成玲, 张骁勇, 张雪琴, 等. 热加工工艺, 2020, 49(1), 41.
- 52 Zhang J L, Wei J J, Wei S Z, et al. *Tribology International*, 2022, 174, 107732.
- 53 Wang Y, Gou J F, Chu R Q, et al. *Tribology International*, 2016, 103, 102.
- 54 Sapate S G, Rama R A V. *Wear*, 2004, 256, 774.
- 55 Qu Y, Xing J, Zhi X, et al. *Materials Letters*, 2008, 62, 3024.
- 56 Kojola N, Ekerot S, Andersson M, et al. *Ironmak Steelmak*, 2011, 38, 1.
- 57 Wang X L, Wang Y J, Liu L Y, et al. *Shandong Science*, 2021, 34(5), 42 (in Chinese).
王学亮, 王勇杰, 刘立艳, 等. 山东科学, 2021, 34(5), 42.
- 58 An Y J, Liu X Y, Zhu L. *Chinese Rare Earths*, 2020, 41(3), 86 (in Chinese).
安亚君, 刘先阳, 朱利. 稀土, 2020, 41(3), 86.
- 59 Qi X W, Jia Z N, Yang Q X, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205, 5510.
- 60 Zhuang M H, Li X X, Ma Z, et al. *Materials Today Communications*, 2022, 33, 104696.
- 61 Liu A, Guo M, Hu H L. *Surface Engineering*, 2010, 26, 623.
- 62 Bedolla-Jacuinde A, Correa R, Mejia I, et al. *Wear*, 2007, 263, 808.
- 63 Wang X H, Zhang M, Du B S, et al. *Materials Science and Technology-London*, 2010, 26, 935.
- 64 Arian M M, Çimençlu H C, Kayali E S, *Wear*, 2001, 247, 231.
- 65 Gong J X, Ding F, Tang T S, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(7), 17(in Chinese).
龚建勋, 丁芬, 唐天顺, 等. 焊接学报, 2013, 34(7), 17.
- 66 Ding F, Gong J X, Xiao Y F, et al. *Hot Working Technology*, 2013, 42(19), 21 (in Chinese).
丁芬, 龚建勋, 肖逸锋, 等. 热加工工艺, 2013, 42(19), 21.
- 67 Xian L Q, Zhuang M H, Chen C, et al. *Materials Protection*, 2022, 55(10), 64 (in Chinese).
线澜清, 庄明辉, 陈超, 等. 材料保护, 2022, 55(10), 64.
- 68 Liao L T, Wang H Y, Ning J P, et al. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(8), 41 (in Chinese).
廖禄泰, 王海艳, 宁嘉沛, 等. 机电工程技术, 2019, 48(8), 41.
- 69 Buntoeng S, Hein Z O, Salita P, *Wear*, 2019, 424-425, 246.
- 70 Xu Y, Deng H M, Shan X H, et al. *Hot Working Technology*, 2017, 46(15), 194 (in Chinese).
许燕, 邓红敏, 单学海, 等. 热加工工艺, 2017, 46(15), 194.
- 71 Liu Q, Lu B H. *Materials Reports*, 2024, 38(9), 1 (in Chinese).
刘倩, 卢秉恒. 材料导报, 2024, 38(9), 1.
- 72 Deng D W, Chen R, Zhang H C. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7), 106 (in Chinese).
邓德伟, 陈蕊, 张洪潮. 机械工程学报, 2013, 49(7), 106.
- 73 Su Y H, Jiang H W, Qin H, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(4), 85 (in Chinese).
苏允海, 蒋焕文, 秦浩, 等. 焊接学报, 2013, 34(4), 85.
- 74 Liu C, Liu C, Su L. *Surface Engineering*, 2006, 22(3), 173.
- 75 Wu T L, Wang K H, Kong J, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(10), 20 (in Chinese).
吴统立, 王克鸿, 孔见, 等. 焊接学报, 2018, 39(10), 20.
- 76 Sheng L, Dai P, Jing T, et al. *Metals*, 2018, 8, 630.
- 77 Fan P F, Sun W L, Zhang G, et al. *Hot Working Technology*, 2019, 33(22), 3806 (in Chinese).
范鹏飞, 孙文磊, 张冠, 等. 热加工工艺, 2019, 33(22), 3806.
- 78 Han X, Li C, Chen X X, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2022, 439, 128432.

(责任编辑 赖丹)



高吉昌, 2022年6月于济南大学获得工学学士学位。现为济南大学机械工程学院硕士研究生, 在付秀丽教授的指导下进行研究。目前主要研究方向为先进制造技术与装备。



付秀丽, 通信作者, 工学博士, 教授, 博士研究生导师。从事高速高效加工、超声强化改性、高端制造装备研发等方面的研究工作, 主持国家自然科学基金3项, 山东省重大创新工程、新旧动能转换重大、省基金重点项目等项目10余项; 在《中国机械工程学报》、*Advanced Manufacturing Technology* 等国内外学术期刊发表论文70余篇, 其中被SCI、EI收录40余篇, 授权发明专利10余项, 成果获得山东省技术发明奖、省高校优秀科研成果奖等多项奖励。