

等离子堆焊双送粉制备 Ni60A/WC 复合涂层的组织与性能

马朝阳, 汪选国, 江欣谕, 谢冰, 王华君

(武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 将外置送粉系统与等离子堆焊设备相结合, 建立双送粉通道, 在不同外置 WC 送粉量下, 在 H13 钢上制备 Ni60A/WC 复合涂层, 并与内置单送粉 Ni60A/WC 涂层进行对比。采用微观形貌观察、XRD 分析、显微硬度和热疲劳测试对涂层进行了评估。结果表明, 双送粉在外部 WC 送粉量大于 6 g/min 时, 制备涂层中 WC 颗粒均匀分布。采用两种方式制备的涂层物相均为 γ -(Fe, Ni) 固溶体、 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 、 Cr_3C_2 和 $\text{Cr}_4\text{Ni}_{15}\text{W}$ 。双送粉制备的涂层硬度比单送粉高, 随着 WC 外送粉量的增加, 硬度也随之提高。两种方式制备涂层在热疲劳试验后均有裂纹产生, 热疲劳裂纹集中于涂层的熔合线及 WC 颗粒周围, 随着 WC 外送粉量的增加, 涂层中出现的裂纹随之增加。综合对比, 双送粉在 WC 外送粉量为 8 g/min 时, 涂层整体性能最佳。

关键词: 等离子堆焊; 双送粉; Ni60A/WC 复合涂层; 物相; 硬度; 热疲劳性

中图分类号: TG455 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2025)10-0271-05

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2025.10.044

Microstructure and properties of Ni60A/WC composite coating fabricated by plasma surfacing with dual-powder feeding

Ma Chaoyang, Wang Xuanguo, Jiang Xinyu, Xie Bing, Wang Huajun

(School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: An external powder feeding system was combined with plasma surfacing equipment to establish a dual powder feeding channel. Under different external WC powder feeding rates, Ni60A/WC composite coatings were prepared on H13 steel, and compared with the Ni60A/WC coatings prepared by the built-in single powder feeding method. The coatings were evaluated by means of microscopic morphology observation, XRD analysis, microhardness test and thermal fatigue test. The results show that when the external WC powder feeding rate of the dual powder feeding system exceeds 6 g/min, the WC particles in the prepared coating are uniformly distributed. The phases of the coatings prepared by the two methods are all γ -(Fe, Ni) solid solution, Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , Cr_3C_2 and $\text{Cr}_4\text{Ni}_{15}\text{W}$. The hardness of the coating prepared by the dual powder feeding method is higher than that prepared by the single powder feeding method, and as the external WC powder feeding rate increases, the hardness also increases accordingly. Cracks occur in the coatings prepared by both methods after the thermal fatigue test. The thermal fatigue cracks are concentrated at the fusion lines of the coatings and around the WC particles, and as the external WC powder feeding rate increases, the number of cracks appearing in the coatings increases accordingly. Comprehensive comparison shows that when the external powder feeding rate of the dual powder feeding system is 8 g/min, the overall performance of the coating is the best.

Keywords: plasma surfacing; dual powder feeding; Ni60A/WC composite coating; phase composition; hardness; thermal fatigue resistance

热锻模具在高温、复杂应力等恶劣工作条件下易发生磨损、热疲劳、塑性变形等多种失效形式^[1-3], 严重限制了其使用寿命, 进而增加了生产成本并影响产品质量。现阶段, 我国热锻模具的平均寿命仅为发达国家的一半, 因此提升热锻模具的性能与寿命是行业迫切的需求^[4-5]。

等离子堆焊技术作为一种高效的表面强化技术, 已广泛应用于机械制造、模具修复等领域^[6-7]。然而, 传统的单送粉堆焊技术在制备复合增强涂层时存在许多问题, 例如强化颗粒(如 WC)因高温熔化和密度差异而沉积在涂层底部, 导致其分布不均匀, 无法充分发挥性能优势; 低熔点陶瓷粉末在高温等离子弧柱中的

收稿日期: 2025-05-09 修订日期: 2025-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51475346)

作者简介: 马朝阳(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为热锻模具涂层性能改良, E-mail: zhaoyangma2022@163.com。通信作者: 王华君, 副教授, 博士, E-mail: wanghuajunhb@163.com

引文格式: 马朝阳, 汪选国, 江欣谕, 等. 等离子堆焊双送粉制备 Ni60A/WC 复合涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2025, 50(10): 271-275.

Ma Chaoyang, Wang Xuanguo, Jiang Xinyu, et al. Microstructure and properties of Ni60A/WC composite coating fabricated by plasma surfacing with dual-powder feeding [J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(10): 271-275.

烧损问题进一步降低了材料的利用效率^[8]。等离子双送粉在一定程度上可以解决粉末烧损严重、粉末沉底的问题。蒋延涛^[9]研究了等离子双送粉 WC 颗粒增强铁基耐磨涂层的工艺及性能,结果表明,制备的涂层中存在大量的 WC 颗粒,同时涂层组织中 WC 颗粒均匀分布,并在 WC 颗粒的周围发现了白亮色细条状的碳化物,涂层表面宏观观察中没有发现明显缺陷,涂层的成形性良好。李连颖等^[10]研究了后送粉角度对等离子喷焊 WC 颗粒增强 Ni 基涂层组织的影响,发现与工件表面呈 30°角送粉时涂层效果最好,WC 颗粒均匀分布于涂层中,WC 没有经历大量的熔解,涂层表面得到 WC、W₂C、Cr₇C₃ 和 Fe₇C₃ 等物相,并且从熔合线到涂层顶部的硬度值呈逐渐增大的趋势。Guo 等^[11]研究了等离子熔注制备 SiC 增强涂层的组织与耐磨性能,结果表明,通过等离子熔注向基体注入细颗粒的 SiC 和粗颗粒的 SiC,均提高了涂层的硬度。

为解决上述问题,本研究将外置送粉装置与传统等离子堆焊机组合,形成双送粉通道,在热锻模具钢表面制备 Ni60A/WC 复合涂层。该研究有效缓解了 WC 颗粒在涂层内分布不均的难题,同时避免了粉末烧损,提升了涂层的整体性能。以上研究在理论上丰富了等离子堆焊技术的研究体系,在实践中为模具行业的表面强化提供了可行的技术解决方案。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验基体材料为某公司提供的 H13 钢,牌号为 4Cr5MoSiV1,合金粉末为 Ni60A、WC 和 Ni60A + 30% WC,粉末粒度均为 83.8 ~ 187.5 μm。基体及 Ni60A 粉末的化学成分如表 1 所示。

表 1 H13 钢和 Ni60A 合金粉末的化学成分
(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the H13 steel and the Ni60A alloy powder (mass fraction, %)

材料	C	Cr	Si	Mo	V	Mn	B	Ni	Fe
H13	0.39	5.13	1.00	1.43	1.00	0.35			余量
Ni60A	0.5 ~ 1.1	15 ~ 20	3.5 ~ 5.5				3.0 ~ 4.5	余量	≤5

1.2 涂层制备方法

单送粉方式是将 Ni60A + 30% WC 粉末采用等离子堆焊机内置送粉装置进行送粉,送粉量为 20 g/min。双送粉方式中,WC 粉末采用外送粉器送粉,Ni60A 粉

末采用等离子堆焊机内置送粉装置进行送粉。外送粉管的送粉角度为 30°,外送粉管与焊枪行进路线所形成的平面垂直于工作台,图 1 为双送粉工艺和送粉装置结构示意图。设置总送粉量为 20 g/min,设计对照试验,双送粉中改变外送粉器的送粉量,分别为 4、6、8、10 g/min,对应的等离子堆焊机内置送粉量分别为 16、14、12、10 g/min。表 2 为等离子堆焊工艺参数。

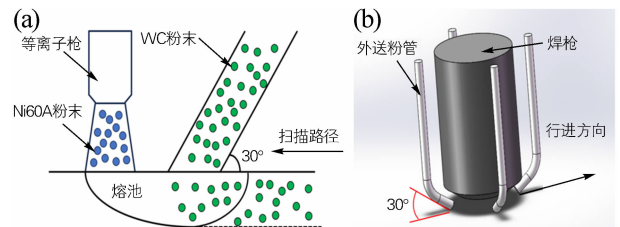


图 1 双送粉工艺(a)及装置(b)示意图
Fig. 1 Schematic diagram of dual powder feeding(a) and equipment(b)

表 2 等离子堆焊工艺参数

Table 2 Parameters of plasma surfacing process

电流/ A	电压/ V	焊枪移动 速度/ (mm · min ⁻¹)	摆幅/ mm	外送粉气 流量/ (L · min ⁻¹)	内送粉气 流量/ (L · min ⁻¹)	焊距/ mm
100	500	20	7	3.5	4	10

1.3 试验检测方法

涂层制备后,利用电火花线切割加工 10 mm × 10 mm × 10 mm 的试样,依次采用 80、200、400、600、800 和 1000 号砂纸进行机械打磨,随后抛光至镜面。经无水乙醇超声清洗并风干后备用。采用 JSM-IT800 场发射扫描电镜观察涂层截面形貌;通过 Empyrean 型 X 射线衍射仪对比分析单送粉与双送粉工艺下涂层的物相组成;采用 HVS-1000 型显微硬度计沿涂层-基体界面法线方向以 0.25 mm 为间隔从涂层表面向基体打点(加载载荷 500 g),绘制硬度梯度分布曲线;热疲劳试验时设置保温炉工作温度为 600 °C(升温速率为 6 °C/min),将试样执行以下操作:放入炉中的保温 60 s,迅速浸入室温(25 °C)水浴冷却 5 s。重复该操作步骤直至完成 100 次循环,循环结束后,对试样截面进行显微组织观察。

2 试验结果与讨论

2.1 形貌及物相分析

图 2 为单送粉与双送粉工艺制备 Ni60A/WC 复合涂层的表面形貌。由图 2 可见,单送粉涂层中 WC 颗粒主要沉淀于涂层的底部,涂层中部和顶部无完整的

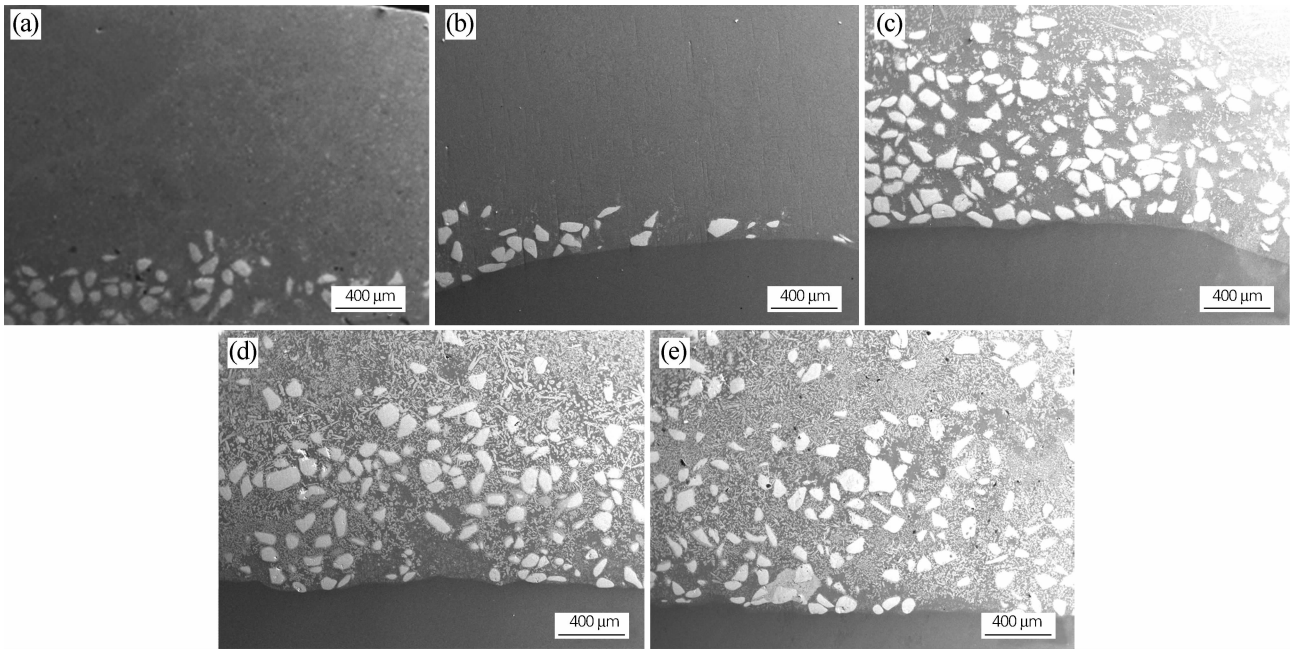


图 2 等离子堆焊 Ni60A/WC 复合涂层的截面形貌

(a) 单送粉; (b~d) 双送粉; (b) 4 g/min; (c) 6 g/min; (d) 8 g/min; (e) 10 g/min

Fig. 2 Sectional morphologies of the Ni60A/WC composite coating by plasma surfacing

(a) single powder feeding; (b-d) dual powder feeding; (b) 4 g/min; (c) 6 g/min; (d) 8 g/min; (e) 10 g/min

WC 颗粒分布,从整体来看,涂层的表面平整光滑,无气孔存在。相比之下,在 WC 总送粉量相同的情况下,采用双送粉工艺,当外送粉量为 4 g/min 时,在涂层上层和中层均没有完整的 WC 颗粒(见图 2(b));当外送粉量大于 4 g/min 时,涂层上层和中层出现 WC 颗粒,随着外送粉量的增加,WC 在涂层中的含量增加,分布更加均匀(见图 2(c~e))。且因镍基粉末在 WC 和基体 H13 钢之间起到了过渡的作用,有利于涂层底部与基体的良好结合,避免了气孔、裂纹等缺陷的产生。另外,涂层表面由于温度高、冷却速度慢、WC 分解、WC 颗粒密度大、等离子冲击力等原因,WC 含量相对较少,中、底部含量相对较多,但总体 WC 颗粒的分布密度比单送粉要大。上述分析表明,等离子双送粉方式可以改善 WC 颗粒沉底的问题,并且可以通过调整外送粉量使涂层性能更加均匀。在外送粉量为 8 g/min 和 10 g/min 时,WC 颗粒分布均匀性较好,强化效果显著。

2.2 XRD 分析

图 3 为 Ni60A/WC 复合涂层的 XRD 图谱。由图 3 可见,单送粉制备的涂层与双送粉制备的涂层物相基本相同。高温条件下部分小尺寸的 WC 及 WC 棱角边缘部位分解出的 W、C 元素与熔池中的其他元素相互作用,冷却后生成了涂层的组成相(如 Cr_7C_3 、 $Cr_{23}C_6$ 和

$Cr_4Ni_{15}W$ 等)。两种送粉方式制备的涂层除了原本已有的 WC 之外,都含有 $\gamma-(Fe, Ni)$ 固溶体,这是组成涂层的基本物相,也有 Cr_7C_3 、 $Cr_{23}C_6$ 和 Cr_3C_2 碳化物,这些硬质相对涂层起到强化的作用,还有金属间化合物,例如 $Cr_4Ni_{15}W$ 。

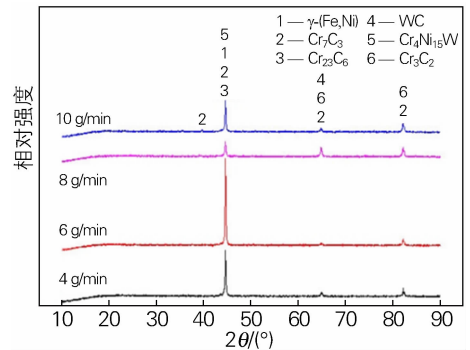


图 3 等离子堆焊 Ni60A/WC 复合涂层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of the Ni60A/WC composite coating by plasma surfacing

2.3 显微硬度分析

显微硬度试验可以在一定程度上直观反映出涂层中 WC 的分布状态。图 4 为 Ni60A/WC 复合涂层的硬度梯度曲线,从涂层表面以间距 0.25 mm 沿熔合线垂直方向依次打点。从图 4 可见,5 条曲线在基体附近的硬度值比较相近。熔合线附近的母材由于受到等离

子弧柱的快速加热和冷却,产生了淬硬区,因此熔合线附近的硬度值高于基体的硬度值。熔合线附近硬度波动主要是由于 WC 含量差异引起的局部元素扩散,进而导致晶格畸变加剧和硬质相(如 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6)分布差异,并且 γ -(Fe, Ni) 固溶体的固溶强化程度也受扩散元素(W、C)的影响。由于单送粉涂层中 WC 颗粒主要沉淀于涂层的底部,因此单送粉试样在熔合线附近的硬度比双送粉高,在涂层区域的硬度比双送粉低。对比单送粉涂层和双送粉涂层发现,双送粉涂层表面硬度值波动较大,表明涂层表面有 WC 颗粒存在。随着外送粉量的增加,涂层的硬度整体相对依次增大,可见硬度与表面 WC 颗粒的数量和分布密切相关,随着外送粉量的增加,进入熔池的 WC 颗粒数量也随之增加,导致堆焊涂层中的 WC 颗粒密度较高,表面硬度增大。当外送粉量增加到 8 g/min 以上时,表面硬度显著增加,原因是送粉量达到一定阈值(8 g/min)后,进入熔池的 WC 颗粒数量大幅增加,WC 颗粒在涂层中的分布密度高,极大地提升了涂层的表面硬度。

2.4 热疲劳分析

图 5 为 Ni60A/WC 复合涂层热疲劳试验后的截面微观形貌。100 次热循环后,在单送粉涂层的底部沿熔合线有一条较粗的裂纹贯穿 WC 颗粒(见图 5(a)),在裂纹附近存在较多的氧化物(见图 5(b))。熔合线

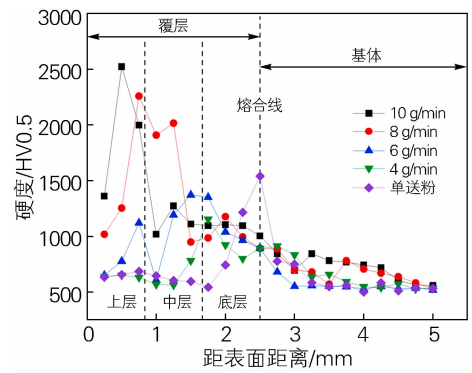


图 4 等离子堆焊 Ni60A/WC 复合涂层的硬度梯度
Fig. 4 Hardness gradient of the Ni60A/WC composite coating by plasma surfacing

部位是涂层和基体的结合部位,两者属于不同的材料,膨胀系数不同,在快速加热和冷却时产生了热应力作用。单送粉涂层中 WC 颗粒沉底现象严重,大部分 WC 颗粒分布于熔合线部位,由于 WC 自身硬度高,脆性大,并且在熔合线处存在较大的残余应力,当熔合线处出现裂纹后,裂纹易沿着脆性区域扩展,因此熔合线周边的 WC 颗粒产生开裂,并且裂纹贯穿 WC 沿熔合线方向延伸。

双送粉工艺下,外送粉量为 4 g/min 时,热疲劳试验后涂层中裂纹数量较少,分布较为孤立,裂纹主要沿着熔合线附近产生(见图 5(c));外送粉量为

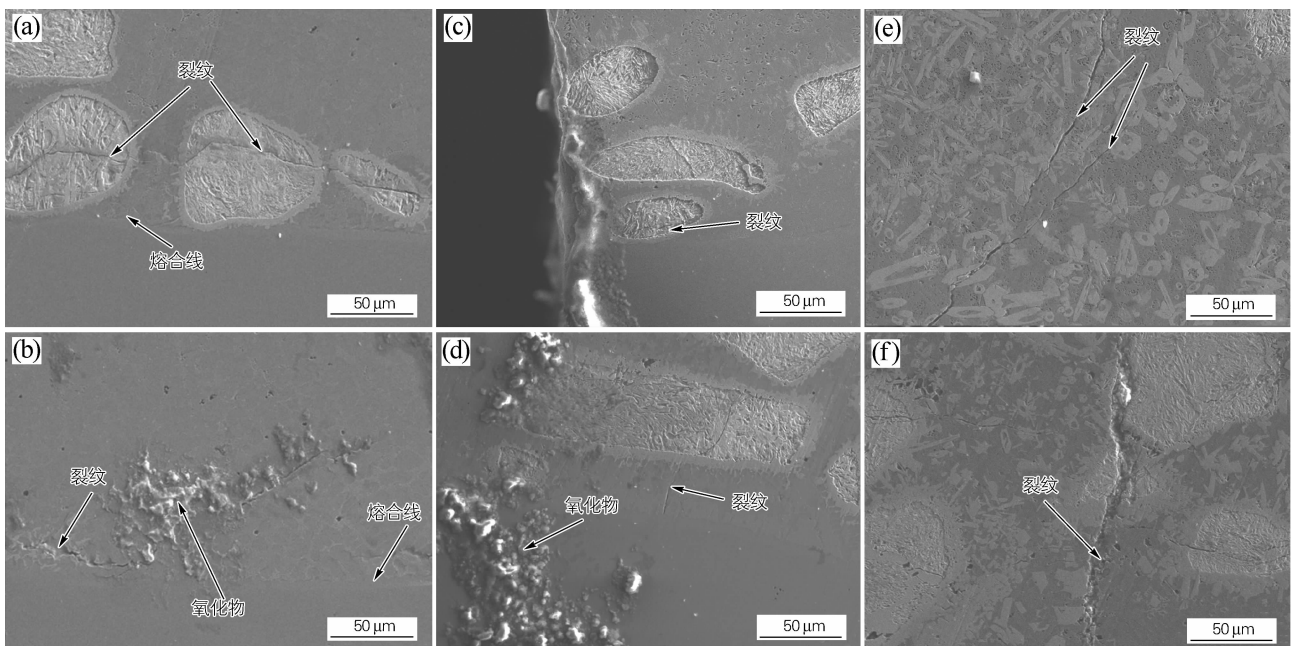


图 5 等离子堆焊 Ni60A/WC 复合涂层热疲劳试验后的截面形貌
(a,b)单送粉;(c-f)双送粉;(c)4 g/min;(d)6 g/min;(e)8 g/min;(f)10 g/min

Fig. 5 Sectional morphologies of the Ni60A/WC composite coating by plasma surfacing after thermal fatigue test
(a,b) single powder feeding; (c-f) dual powder feeding; (c) 4 g/min; (d) 6 g/min; (e) 8 g/min; (f) 10 g/min

6 g/min 时,热疲劳试验后涂层中裂纹数量有所增加,并且在靠近熔合线部位有不同程度的氧化,氧化物分布在裂纹周边,对裂纹的扩展起到了促进作用(见图 5(d));外送粉量 8 g/min 时,热疲劳试验后涂层中裂纹进一步增多,且呈现更加密集分布,裂纹多为贯穿性,热疲劳加剧,微观结构较为均匀,但裂纹沿晶界和微缺陷扩展明显(见图 5(e));外送粉量 10 g/min 时,热疲劳试验后涂层中裂纹密度达到最大,且熔合线区域裂纹扩展最为严重,裂纹交叉连接,抗热疲劳性能减弱(见图 5(f))。上述分析表明,随着外送粉量增多,双送粉涂层中出现的裂纹数量及长度明显增多,这是因为涂层中 WC 颗粒的增加使热循环过程中产生的热应力部位增多,对裂纹的扩展起到了促进作用。同时由于 WC 颗粒导热性差,涂层发生快速加热和冷却时,WC 颗粒的内部和表面存在较大的温度差异,因此内外变形不一致导致应力产生,WC 颗粒发生开裂。双送粉涂层中裂纹也是在熔合线处萌发,裂纹的扩展方向朝向邻近的 WC 颗粒,并贯穿 WC 颗粒。

3 结论

1) 单送粉方式制备的 Ni60A/WC 复合涂层,WC 颗粒分布于涂层底部熔合线部位,中上层未发现 WC 颗粒;双送粉方式下,WC 外送粉量大于 4 g/min 时,在涂层上层和中层均有完整的 WC 颗粒,随着外送粉量的增加,WC 在涂层中的分布更加均匀。

2) 等离子堆焊单送粉和双送粉方式制备的 Ni60A/WC 复合涂层物相均为 WC、 γ -(Fe, Ni) 固溶体、 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 、 Cr_3C_2 和 $\text{Cr}_4\text{Ni}_{15}\text{W}$ 。

3) 单送粉制备的涂层在熔合线部位的硬度比双送粉高,在涂层表面部位的硬度比双送粉低。双送粉制备的涂层整体硬度比单送粉的高,随着外送粉量的增加,双送粉涂层硬度逐步提高。

4) 经 100 次热疲劳试验后,单送粉涂层和双送粉涂层均有裂纹的产生,且主要集中于靠近熔合线附近。并且双送粉涂层中裂纹的数量和密度随着 WC 外送粉量的增加而增加。

5) 综合对比,采用双送粉工艺,在外送粉量为 8 g/min 时,涂层整体性能最好,WC 颗粒分布均匀,硬度相比于单送粉显著提升,热疲劳性能较好。

参考文献:

[1] 樊明强,赵英利,王超,等. 国内热锻模具钢的发展现状[J].

河北冶金, 2024(5): 9-13.

Fan Mingqiang, Zhao Yingli, Wang Chao, et al. The development status of hot forging die steel in China[J]. Hebei Metallurgy, 2024(5): 9-13.

[2] 肖宜仰,刘宗江,王超,等. 高端机胀断连杆模具寿命提升研究与应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2023, 58(2): 97-99.

Xiao Yiyang, Liu Zongjiang, Wang Chao, et al. Research and application on improving the service life of expansion and fracture connecting rod die for high-end machine[J]. China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology, 2023, 58(2): 97-99.

[3] Gronostajski Z, Kaszuba M, Polak S, et al. The failure mechanisms of hot forging dies[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 657: 147-160.

[4] 杨程,张金虎,彭迎娇,等. 不同表面处理下 H13 钢的高温摩擦磨损行为[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(4): 162-169.

Yang Cheng, Zhang Jinhu, Peng Yingjiao, et al. High temperature friction and wear behaviors of H13 steel with different surface treatments[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(4): 162-169.

[5] Valleti K, Miryalkar P, Ramakrishna M. Efficacy of TiCrN/DLC coatings for service life enhancement of stamping dies[J]. Vacuum, 2023, 217: 112534.

[6] 邓德伟,葛言柳,田鑫,等. 等离子堆焊球形碳化钨颗粒增强镍基金堆焊层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2012, 37(11): 64-68.

Deng Dewei, Ge Yanliu, Tian Xin, et al. Microstructure and mechanical properties of nickel-based hardfaced coating reinforced by spherical tungsten carbides by PTAW[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(11): 64-68.

[7] Zhang Le, Xiong Jiankun, Li Yang, et al. Elucidating friction properties and strengthening mechanisms of Ni-based surfacing layer containing 9R phase[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 468: 129751.

[8] 龙军峰,孙智富,叶靖,等. 等离子喷焊镍基金碳化钨复合涂层[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2009, 23(10): 46-49.

Long Junfeng, Sun Zhifu, Ye Jing, et al. Study on plasma spray welding of Ni-Based alloy WC composite coatings[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2009, 23(10): 46-49.

[9] 蒋延涛. WC 颗粒增强铁基耐磨熔覆层工艺研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

[10] 李连颖,杜晓东,宋自力,等. 后送粉角度对等离子喷焊 WC 颗粒增强 Ni 基涂层组织的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(4): 57-60.

Li Lianying, Du Xiaodong, Song Zili, et al. Effect of back feeding angle on the structure of WC particles reinforced Ni-based coating by plasma spray welding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(4): 57-60.

[11] Guo Mianhuan, Liu Aiguo, Zhao Minhai, et al. Microstructure and wear resistance of low carbon steel surface strengthened by plasma melt injection of SiC particles[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(16): 4041-4046.