

热处理对激光熔覆 Fe 基合金涂层组织与耐磨性的影响

杨栋杰¹, 白峭峰², 欧阳昌耀²

(1. 山西机电职业技术学院 材料工程系, 山西 长治 046011;
2. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:采用激光熔覆技术在 50 钢表面制备了马氏体涂层,研究了不同热处理温度对涂层显微组织与耐磨性的影响。结果表明,经过热处理后涂层的物相依然为 α -Fe,与未热处理涂层相比物相未发生改变。1050 $^{\circ}\text{C} \times 30 \text{ min}$ 热处理后涂层的枝晶间出现熔断和聚集,并呈短棒状弥散分布,弥散分布的枝晶间对组织均匀性有一定的促进作用。未热处理涂层的硬度为 57.16 HRC,经过 800 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后硬度降为 42.86 HRC,随着热处理温度的升高,涂层的硬度又呈现出逐渐上升的趋势,1050 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后涂层的硬度达到最高,为 58.12 HRC。1050 $^{\circ}\text{C} \times 30 \text{ min}$ 热处理后涂层的磨损量最低,耐磨性较高。

关键词:热处理;激光熔覆;马氏体涂层;枝晶;耐磨性

中图分类号: TG14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2025)08-0286-06

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2025.08.045

Effect of heat treatment on microstructure and wear resistance of laser cladding Fe-based alloy coating

Yang Dongjie¹, Bai Qiaofeng², Ouyang Changyao²

(1. Department of Materials Engineering, Shanxi Institute of Mechanicle and Electricle Engineering, Changzhi Shanxi 046011, China;
2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: Martensitic coating was fabricated on 50 steel by using laser cladding technology, and the effect of heat treatment temperature on microstructure and wear resistance of the coatings was investigated. The results show that the phase composition of the heat-treated coating remains α -Fe, which does not change compared with the coating without heat treatment. After heat treatment at 1050 $^{\circ}\text{C}$ for 30 min, the dendrites are melted, aggregated, dispersed in short rod, the dispersed dendrites promote the microstructure uniformity to a certain extent. The hardness of the coating without heat treatment is 57.16 HRC, which decreases to 42.86 HRC after heat treatment at 800 $^{\circ}\text{C}$. However, as the heat treatment temperature further increases, the hardness gradually rises, reaching a maximum of 58.12 HRC at 1050 $^{\circ}\text{C}$. The coating heat treated at 1050 $^{\circ}\text{C}$ for 30 min exhibits the lowest wear loss, indicating better wear resistance.

Keywords: heat treatment; laser cladding; martensitic coating; dendrite; wear resistance

激光熔覆技术是一种先进的表面改性技术,该技术利用高能激光束将金属粉末熔凝在基体表面,从而形成良好冶金结合的熔覆层^[1-2]。激光熔覆技术具有材料适用范围广、涂层和基体结合良好等优势,被广泛应用于修复零部件的工业生产中。通过研究发现激光熔覆的涂层微观结构多为典型的枝晶组织特征。如 Zhang 等^[3]在低合金钢 Q345 表面激光熔覆 Fe 基合金涂层,发现 Fe 基合金涂层微观结构主要包括枝晶和晶间片状共晶。Cui 等^[4]采用激光熔覆技术在 42CrMo 钢表面成功制备了不同氧化铈添加量的钴基涂层,发现涂层的上中下区域为不同形貌的枝晶结构特征,涂

层的顶部区域微观结构为等轴晶,中间区域为等轴晶和柱状晶,底部区域为柱状晶。郭一帆等^[5]利用激光熔覆技术在 AISI 1045 钢基体上制备了 FeCoCrNiAl_{0.5}Ti_{0.5}高熵合金涂层,枝晶组织特征为涂层主要的微观结构。金属的组织特征往往和性能有密切的关系,组织特征的差异往往会对涂层相关性能有一定的影响。因此,可考虑通过改变涂层组织以提高性能,而热处理是一种通过控制加热温度、保温时间和冷却方式进而有效改善材料组织结构的手段^[6]。

近年来,随着激光熔覆技术的广泛使用,很多研究者对激光熔覆涂层进行了不同工艺的热处理,旨在通

收稿日期:2025-04-10

修订日期:2025-06-04

基金项目:山西省重点研发计划(201903D121051)

作者简介:杨栋杰(1985—),男,讲师,硕士,主要研究方向为材料加工,E-mail: ydj2005_2006@163.com

引文格式:杨栋杰,白峭峰,欧阳昌耀. 热处理对激光熔覆 Fe 基合金涂层组织与耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(8): 286-291.

Yang Dongjie, Bai Qiaofeng, Ouyang Changyao. Effect of heat treatment on microstructure and wear resistance of laser cladding Fe-based alloy coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(8): 286-291.

过热处理改变涂层组织以进一步改善性能,提高使用寿命等。翁益青等^[7]通过高速激光熔覆技术在27SiMn钢表面制备了不锈钢熔覆层,并对熔覆层进行了900℃×0.5h淬火+500℃×2h回火处理,结果表明,热处理改善了熔覆层的组织,涂层晶粒得到显著细化且分布更加均匀,熔覆层性能得到了提升。秦仁耀等^[8]发现热处理可有效改善激光熔覆高Co-Ni涂层的微观组织与显微硬度,其适宜的热处理温度区间为400~500℃。Du等^[9]采用激光熔覆技术在304不锈钢表面制备了Fe60合金涂层,随后对涂层分别进行了950、1000和1050℃下的正火处理以及在1050℃下进行了固溶处理,结果表明,Fe60合金涂层在1050℃下进行固溶处理后的冲击性能最高。Su等^[10]通过激光熔覆技术在Ti-6Al-4V合金基体上制备了YF₃改性NiTi-Si涂层,研究发现在600℃热处理4h后涂层中NiTi相晶粒长大。

本研究重点探究了不同热处理温度对激光熔覆技术制备的马氏体涂层物相以及组织特征的影响,同时对硬度、耐磨性进行了分析,为激光熔覆涂层的热处理工艺优化和改进提供试验依据。

1 试验材料与方法

使用50钢作为熔覆基体,对基体表面进行打磨抛光,去除锈迹并降低粗糙度以保证熔覆质量。采用光斑直径 $\phi 3$ mm的LDF 3000-60型激光器,搭配同轴送粉器,在机械臂运行下对50钢基体表面进行同步送粉激光熔覆涂层制备。

使用流通性较好的球形Fe基合金粉末,粉末平均粒径约为45 μm ,粉末成分(质量分数,%)为0.17C、17.42Cr、0.2Mn、0.82Si、2.15Ni、1.2Mo,余量Fe。主要熔覆工艺参数为:激光功率2.4 kW,扫描速率1.2 m/min,搭接量2 mm。使用箱式电阻炉对试样进行热处理,设定的热处理温度为800、850、900、950、1000、1050℃,保温30 min后油冷。

使用线切割机床对涂层金属坯料进行分割加工,获得小尺寸(15 mm×15 mm×15 mm)的金属涂层试样块。使用X射线衍射仪(XRD)对物相进行分析,利用扫描电镜(SEM)进行组织观察。使用洛氏硬度计进行表面硬度测试。采用摩擦磨损仪对试样耐磨性进行测试,摩擦方式为室温环境下的球面旋转干摩擦,对磨球为YG6钢。测试参数为:试验力100 N,转速200 r/min,轨迹直径 $\phi 12$ mm,试验时间60 min。使用精密天平测量磨损量,并利用SEM对磨损底部形貌进行表征。

2 试验结果与讨论

2.1 物相与组织

图1为热处理前后激光熔覆涂层的XRD图谱。由图1可知,涂层试样的衍射峰主要在 2θ 为44°、64°、82°附近,通过Jade软件分析,未热处理涂层主要为 α -Fe相,经过热处理的各涂层试样物相依然为 α -Fe,热处理并未改变涂层物相。但热处理后各涂层试样的主峰在衍射角度上有一定的偏移。根据Bragg衍射方程,涂层衍射峰的偏移表明涂层中发生了较为严重的晶格畸变^[11]。

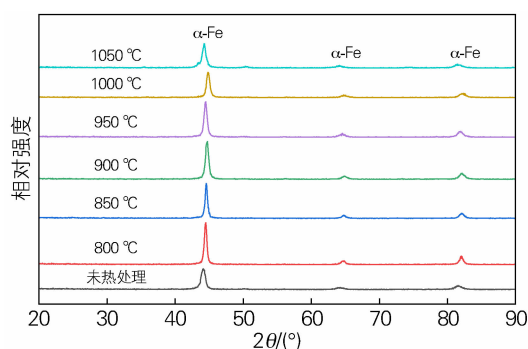


图1 热处理前后激光熔覆涂层的XRD图谱
Fig. 1 XRD patterns of the laser cladding coating before and after heat treatment

图2为热处理前后激光熔覆涂层的显微组织及枝晶间占比和宽度。如图2(a)所示,未热处理涂层为典型的枝晶组织,包括枝晶间(A点)和枝晶内(B点),这是激光熔覆涂层典型的组织特征。王海林等^[12]研究了Ni35及Fe102合金熔覆层,两种熔覆层显微组织也以不同形貌的枝晶组成,包括平面晶、胞状晶、树枝晶、柱状晶及等轴晶。王凯等^[13]研究的激光熔覆FeCrNiCoMn合金涂层也为网状枝晶组织特征。不同类型合金涂层的枝晶间形貌特征呈现差异化分布。连续网状分布的枝晶间对马氏体基体有“隔断”作用,会造成材料微观组织不均匀^[14]。表1为图2中各点的成分分析结果,由表1可以发现,原始涂层中枝晶间主要富含Cr、Fe、C元素,与枝晶内相比,枝晶间的Cr含量较高。Cr元素和C元素会结合生成碳化物,使得枝晶间主要为共晶结构,枝晶内为Fe的固溶体结构^[15]。

经过不同温度热处理后涂层的组织特征均发生改变,其中变化较为明显的是枝晶间。如图2(b)所示,在800℃热处理后涂层枝晶间变得粗大密集,枝晶间占比由未热处理的27.89%增加到36.17%(见图2(h))。枝晶内占比减少,可知该工艺对促进涂层枝晶间的析出粗化有一定的作用。未热处理涂层枝晶间(A点)C含量为38.5%,800℃热处理的涂层枝晶间

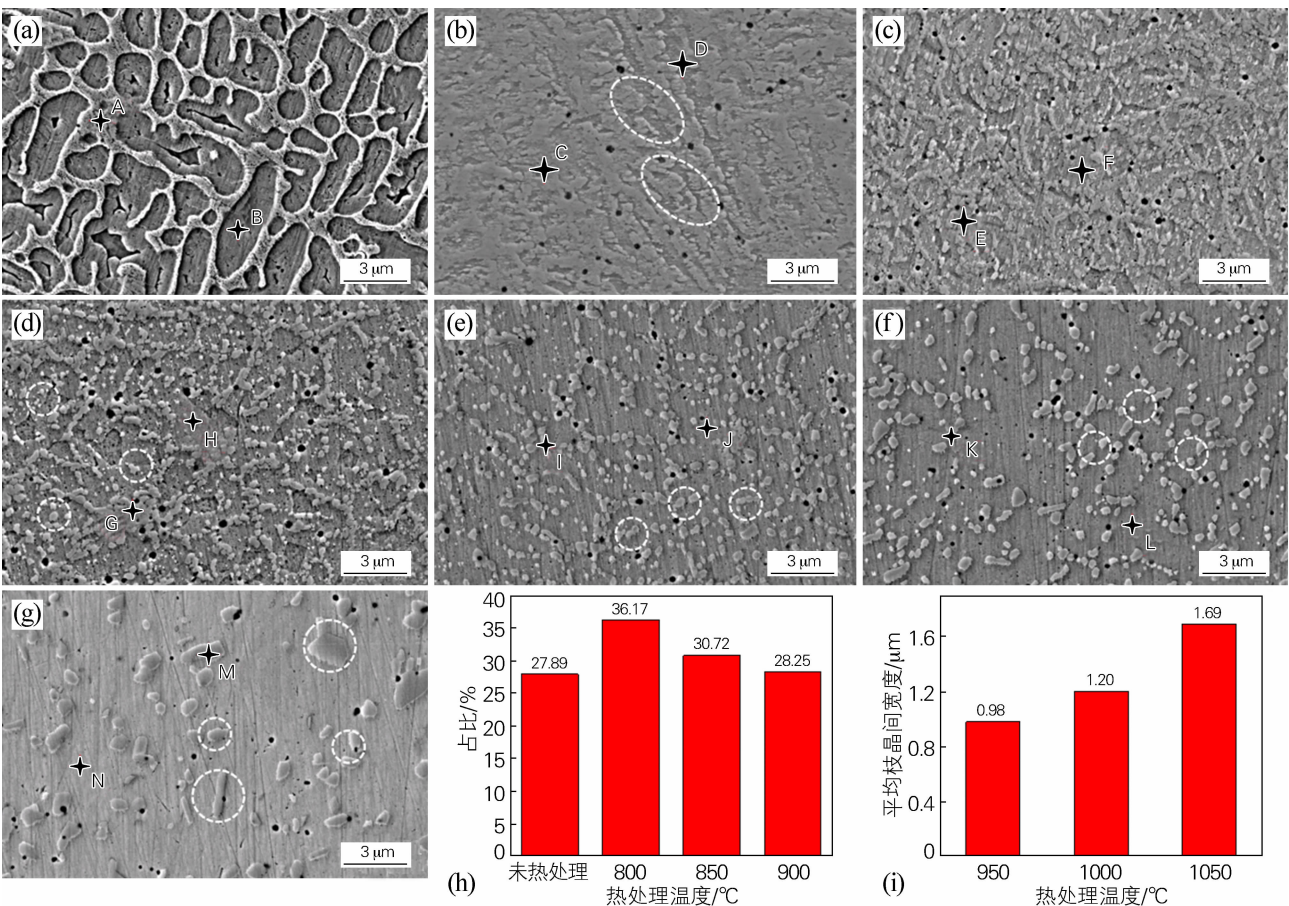


图 2 热处理前后激光熔覆涂层的组织特征
(a) 未热处理; (b) 800 °C; (c) 850 °C; (d) 900 °C; (e) 950 °C; (f) 1000 °C; (g) 1050 °C; (h) 枝晶间占比; (i) 枝晶间宽度
Fig. 2 Microstructural characteristics of the laser cladding coating before and after heat treatment
(a) without heat treatment; (b) 800 °C; (c) 850 °C; (d) 900 °C; (e) 950 °C; (f) 1000 °C; (g) 1050 °C;
(h) interdendritic proportion; (i) interdendritic width

表 1 图 2 中标记点的能谱分析结果(原子分数, %)
Table 1 Energy spectrum analysis results of the marked points in Fig. 2 (atom fraction, %)

热处理温度/℃	测试点	Fe	C	Cr
未热处理	A	44.1	38.5	15.8
	B	46.1	42.8	9.9
800	C	35.7	51.7	11.1
	D	36.8	55.1	6.2
850	E	36.1	49.0	13.6
	F	44.9	44.6	8.6
900	G	34.8	47.3	16.3
	H	44.1	45.9	7.7
950	I	39.2	44.0	14.5
	J	31.6	51.4	15.2
1000	K	25.3	47.3	26.9
	L	42.4	47.5	7.9
1050	M	32.2	47.5	19.4
	N	41.0	48.9	7.4

(C 点)C 含量为 51.7%, 涂层枝晶间 C 含量增加, 由于碳化物充分析出使得枝晶间粗化密集。随着加热温度的升高, 经 850 °C 热处理后的涂层枝晶间占比为 30.72%, 枝晶间也呈现粗化密集。但相对于 800 °C 热处理涂层试样枝晶间密集程度有所减小, 如图 2(b, c) 所示。由图 2(d) 可知, 900 °C 热处理涂层试样枝晶间占比为 28.25%, 相比未热处理涂层发生了小幅度的粗化, 晶间有熔断趋势但未发生聚集, 晶内存在许多细小的析出物。

如图 2(e, f) 所示, 经 950 °C 和 1000 °C 热处理后, 涂层组织形貌变化较大, 枝晶间的连续网状结构消失, 枝晶间明显减少。由图 2(f) 可知, 1000 °C 热处理的涂层枝晶组织发生熔断并且呈现均匀分布。由图 2(g) 可知, 经 1050 °C 热处理的涂层中大部分枝晶间固溶到枝晶内, 部分熔断的颗粒状枝晶间发生移动、团聚并呈短棒状。保温时间一定时, 随着热处理温度从 950 °C 升高到 1050 °C, 枝晶间宽度由 0.98 μm 增长为 1.69 μm

(见图 2(i))。枝晶间弥散、均匀分布可避免出现硬质集中,有利于组织均匀化^[16]。因此,随着加热温度的升高,部分枝晶间开始固溶到马氏体基体内,并发生熔断、聚集,最终呈短棒状和不规则圆形弥散分布。

图 3 为不同温度保温 30 min 后熔覆涂层组织的演变示意图。800 ℃ 热处理后枝晶间发生粗化长大,

900 ℃ 枝晶间粗化程度降低,其中枝晶内析出细小析出物,热处理温度由 800 ℃ 升至 1000 ℃,枝晶间生长程度降低。当热处理温度达到 1000 ℃ 时,枝晶间发生熔断,随着温度进一步升高到 1050 ℃,熔断后弥散分布的枝晶间呈短棒状,弥散分布的枝晶间对组织均匀性有一定的作用。

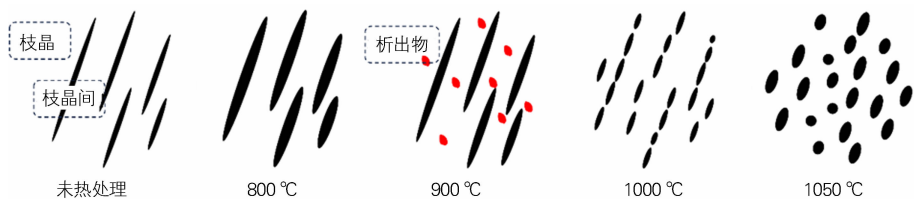


图 3 不同温度保温 30 min 后激光熔覆涂层的组织演变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microstructure evolution of the laser cladding coating heat treated at different temperatures for 30 min

2.2 表面硬度

随机在各涂层试样表面测定 5 个点的洛氏硬度值,取其平均值作为最终硬度,如图 4 所示。未热处理涂层的硬度为 57.16 HRC。800 ℃ 热处理后硬度降为 42.86 HRC。随着热处理温度的升高,试样硬度又呈现逐渐上升的趋势,热处理温度为 1050 ℃ 时,涂层试样硬度达到最高,为 58.12 HRC。结合图 2 组织特征的变化可知,涂层枝晶间在 800 ℃ 粗化,随着热处理温度升高开始细化并出现熔断,熔断后的枝晶间聚集并呈短棒状弥散分布,是涂层硬度变化的主要原因。分析认为,在 950 ~ 1050 ℃ 之间,可溶解枝晶间数量随温度的升高而增多,溶解的枝晶间使由马氏体基体组成的枝晶内得到强化,硬度增加^[17]。

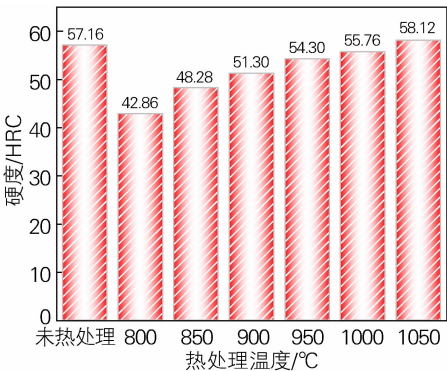


图 4 不同温度热处理后激光熔覆涂层的洛氏硬度
Fig. 4 Rockwell hardness of the laser cladding coating heat treated at different temperatures

2.3 耐磨性

通过组织的变化特征可知,950、1000、1050 ℃ 保温 30 min 涂层试样的枝晶变化较大,其中 1050 ℃ 热处理涂层试样的硬度有提高趋势。为进一步探讨枝晶变化对涂

层试样耐磨性的影响,对试样进行了摩擦磨损试验。

图 5 为热处理前后涂层试样的磨损量,未热处理涂层的枝晶间呈网状分布,这种不均匀的微观结构导致其磨损量较高,达到 0.0333 g。950、1000、1050 ℃ 保温 30 min 后涂层试样磨损量分别为 0.0158、0.0113、0.0072 g,磨损量相较于未热处理涂层分别降低了 52.6%、66.1%、78.4%,磨损量的降低可以反映出试样的耐磨性提高。这是由于热处理后组织中枝晶间部分固溶到枝晶内,使得马氏体基体得到强化,同时,枝晶间发生熔断,并呈短棒状弥散分布,短棒状的枝晶间形成抗磨支架,在固溶强化协同作用下导致涂层耐磨性提升。

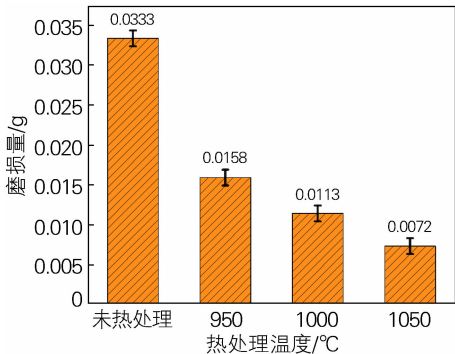


图 5 不同温度热处理后激光熔覆涂层的磨损量
Fig. 5 Wear loss of the laser cladding coating heat treated at different temperatures

激光熔覆涂层试样的磨损底部形貌如图 6 所示。可见未热处理涂层及 950、1000、1050 ℃ 热处理涂层的磨痕宽度分别为 1.870、1.446、1.421、1.345 mm。950、1000、1050 ℃ 热处理涂层试样磨痕宽度相较于未热处理涂层分别减少了 22.7%、24.0%、28.1%,说明涂层试样所遭受的磨损程度有所降低,表现出较好的

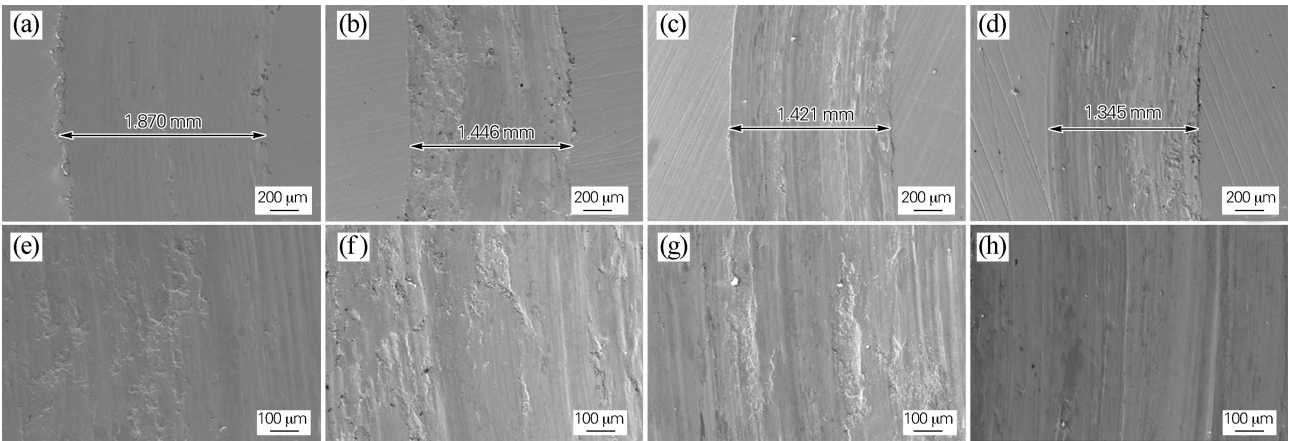


图 6 不同温度热处理后激光熔覆涂层的磨损形貌
Fig. 6 Wear morphologies of the laser cladding coating heat treated at different temperatures
(a,e) 未热处理(without heat treatment); (b,f) 950 ℃; (c,g) 1000 ℃; (d,h) 1050 ℃

耐磨性。结合图 5 可知,1050 ℃热处理试样呈现出较低的磨损量,同时磨损宽度较小,该工艺处理的试样耐磨性较好,磨损程度较轻。

未热处理涂层经过磨球不断地旋转摩擦后(见图 6(e)),涂层出现深度较小的犁沟、剥落,同时存在较为平整的磨粒磨损面。950 ℃、1000 ℃热处理涂层试样(见图 6(f,g))在持续的法向压力以及剪切力作用下,出现许多犁沟、分层以及分层后所形成的凸块,同时一些区域存在着较为平整的磨粒磨损面。可知涂层试样在剧烈摩擦下,摩擦副与试样之间来回不断的运动使得试样磨损底部出现分层现象^[18]、黏着磨损特征同时伴随磨粒磨损,呈现为多种磨损特征共同存在的磨损机制。1050 ℃热处理涂层试样存在较少的犁沟以及磨粒磨损(见图 6(h)),磨粒磨损为均匀磨损所

产生的磨损特征^[19]。涂层试样磨损形貌特征的改变和涂层中枝晶的改变有密切的联系。热处理后,粗大的网状碳化物共晶组织演变成球状和短棒状碳化物共晶组织,显微组织的均匀性增加^[20],在固溶强化的协同作用下使得涂层耐磨性增加。

未热处理涂层和 1050 ℃热处理涂层的磨损机制如图 7 所示。试样在持续的载荷压力以及剪切力作用下,未处理涂层由于枝晶间和枝晶内组织分布不均匀,使得对磨球在摩擦时在枝晶内和枝晶间产生差异性磨损,引发不均匀磨损现象。同时,使得因不均匀磨损凸起部分被剪切力剥离。相比之下,经 1050 ℃热处理的涂层枝晶间和枝晶内分布较为均匀,同时枝晶间减少,使得在磨损过程中形成均匀的磨损抵抗,整体的磨损宽度和深度较小,耐磨性提高。

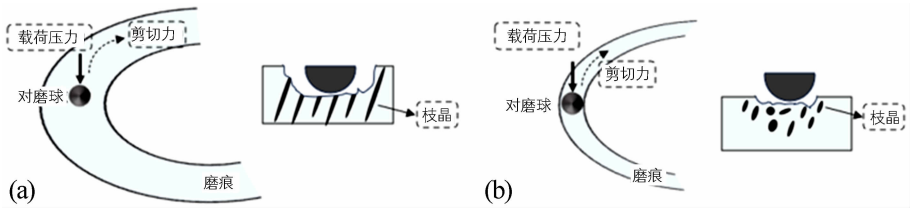


图 7 未热处理(a)及 1050 ℃热处理(b)激光熔覆涂层的磨损机理示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of wear mechanism of the laser cladding coating without heat treatment(a) and heat treated at 1050 ℃(b)

3 结论

1) 对激光熔覆技术制备的马氏体涂层进行了不同温度下保温 30 min 的热处理,热处理后涂层的物相依然为 α-Fe。经过不同热处理后涂层组织特征发生了改变,其中变化较为明显的是枝晶间。

2) 从 800 ℃到 1050 ℃,随着热处理温度的升高,枝晶间生长程度降低。在 1000 ℃热处理时,枝晶间发

生熔断。1050 ℃热处理时枝晶间呈现短棒状弥散分布,弥散分布的枝晶间结构有助于提高组织均匀性。

3) 未热处理涂层硬度为 57.16 HRC,经 800 ℃热处理后涂层硬度降为 42.86 HRC,随着热处理温度的升高,涂层试样硬度逐渐上升,热处理温度为 1050 ℃时,涂层试样硬度达到最高,为 58.12 HRC。1050 ℃× 30 min 热处理涂层试样磨损量相较于未热处理涂层降

低了 78.4%,耐磨性最佳。

参考文献:

- [1] 张好强,刘 豪,刘 印,等. 激光熔覆制备钴基复合涂层研究现状分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 90-98.
Zhang Haoqiang, Liu Hao, Liu Yin, et al. Research status and analysis of Co-based composite coatings prepared by laser cladding[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 90-98.
- [2] Ding L, Hu S S, Quan X M, et al. Effect of VN alloy addition on the microstructure and wear resistance of Co based alloy coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 659: 8-14.
- [3] Zhang Y, Bai P, Li Z, et al. Rapid optimization of iron-based alloy laser cladding process based on orthogonal experiment and machine learning for Q345 [J]. Optics and Laser Technology, 2025, 182: 112086.
- [4] Cui C, Wu M, He R, et al. Effect of CeO₂ addition on grain refinement and mechanical properties of Stellite-6 coating fabricated by laser cladding[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(8): 2621-2634.
- [5] 郭一帆,郭学平,卢冰文,等. 激光熔覆 FeCoCrNiAl_{0.5}Ti_{0.5}高熵合金涂层腐蚀摩擦复合行为[J]. 中国表面工程, 2025, 38(3): 185-198.
Guo Yifan, Guo Xueping, Lu Bingwen, et al. Corrosion-friction behavior of laser cladding FeCoCrNiAl_{0.5}Ti_{0.5} high entropy alloy coating [J]. China Surface Engineering, 2025, 38(3): 185-198.
- [6] 韩渴望,欧阳春生,王 怡,等. 固溶-时效处理对激光熔覆 Co-TiC-WS₂ 涂层组织和摩擦学性能的影响[J/OL]. 润滑与密封, 2025-03-13. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.th.20250312.1530.002>.
Han Kewang, Ouyang Chunsheng, Wang Yi, et al. Effect of solution-aging treatment on microstructure and tribological characteristics of Co-TiC-WS₂ coatings by laser cladding[J]. Lubrication Engineering, 2025-03-13. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.th.20250312.1530.002>.
- [7] 翁益青,薛瑞雷,满 蛟,等. 热处理对高速激光熔覆不锈钢熔覆层组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 276-283.
Weng Yiqing, Xue Ruilei, Man Jiao, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of stainless steel coating by high-speed laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(2): 276-283.
- [8] 秦仁耀,张国会,陈冰清,等. 热处理对激光熔覆高 Co-Ni 钢涂层组织和性能的影响[J]. 科技导报, 2024, 42(22): 93-101.
Qin Renyao, Zhang Guohui, Chen Bingqing, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser clad high Co-Ni steel coating[J]. Science & Technology Review, 2024, 42(22): 93-101.
- [9] Du Y B, Peng Y C, Liang Q, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Fe60 coating by laser cladding on 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 2825-2834.
- [10] Su W, Zhang C, Cui X, et al. Effect of heat and cryogenic treatments on the microstructure and properties of YF3 modified NiTi-Si laser cladding coatings [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 165: 109614.
- [11] 江 迪,张树玲,吴苏瑞,等. 激光熔覆 FeCrCoMn 高熵合金涂层的组织和摩擦学性能[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(11): 1460-1470.
Jiang Di, Zhang Shuling, Wu Surui, et al. Microstructure and tribological properties of laser clad FeCrCoMn high entropy alloy coatings[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(11): 1460-1470.
- [12] 王海林,王金凤. 激光熔覆铁基和镍基合金涂层组织与性能研究[J/OL]. 特种铸造及有色合金, 2025-03-06. <https://doi.org/10.15980/j.tzzz.T20240367>.
Wang Hailin, Wang Jinfeng. Comparative study on microstructure and properties of Fe-based and Ni-based alloy coatings by laser cladding [J/OL]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2025-03-06. <https://doi.org/10.15980/j.tzzz.T20240367>.
- [13] 王 凯,盛颖航,高 鹏,等. 激光熔覆 FeCoCrNiMn 高熵合金涂层的工艺探索[J]. 表面技术, 2025, 54(9): 175-188.
Wang Kai, Sheng Yinghang, Gao Peng, et al. Process exploration of laser cladding FeCoCrNiMn high-entropy alloy coating [J]. Surface Technology, 2025, 54(9): 175-188.
- [14] 何凌欢,李家民,张华炜,等. 热处理对激光熔覆 GX4CrNi13-4 显微组织和力学性能的影响[J]. 核技术, 2024, 47(6): 101-111.
He Linghuan, Li Jiamin, Zhang Huawei, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical property of GX4CrNi13-4 manufactured by laser cladding [J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(6): 101-111.
- [15] 董逸君,王勇刚,李东亚,等. 激光熔覆碳化物增强镍基涂层组织与性能的热处理调控[J]. 焊接学报, 2024, 45(10): 59-68.
Dong Yijun, Wang Yonggang, Li Dongya, et al. Heat treatment tailoring of microstructure and properties of laser cladding carbide reinforced nickel based coatings [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(10): 59-68.
- [16] Fei W, Yu H J, Chen C Z, et al. Effect of process parameters on the microstructure evolution and wear property of the laser cladding coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 692: 989-996.
- [17] 李佩峰. 42CrMo 钢表面激光熔覆层的微观组织及其均匀化处理[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2024.
- [18] 蒋一江,闫献国,陈 峙,等. 磁场深冷处理对 42CrMo 钢耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(1): 91-95.
Jiang Yijiang, Yan Xianguo, Chen Zhi, et al. Effect of magnetic cryogenic treatment on wear resistance of 42CrMo steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(1): 91-95.
- [19] 杨 柳,谢奕心,鞠玉琳,等. 贝氏体等温淬火对 Dievar 热作模具钢高温摩擦磨损性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 85-93.
Yang Liu, Xie Yixin, Ju Yulin, et al. Effect of austempering on high temperature frictional wear property of Dievar hot working die steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(2): 85-93.
- [20] Zhao F, Guo T M, Li Q, et al. Effect of solution aging treatment on microstructure and properties of Fe-0.5C-11Cr corrosion resistant alloy by laser cladding [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 922: 166142.