

热锻模具钢表面熔覆 CoCrFeNiBWSi_x 涂层 组织及力学性能研究

张志明¹, 刘玉欣^{2*}, 舒凤远³, 张雄波³, 邓加³, 崔娟³

(1. 大亚湾核电运营管理有限责任公司, 广东 深圳 518100; 2. 陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 3. 中山大学 化学工程与技术学院, 广东 珠海 519082)

摘要: **目的** 针对 H13 热锻模具钢在锻压过程中容易出现由硬度不够、疲劳失效和磨损损坏所导致的生产隐患, 改善其表面性能。**方法** 选用在 Co-06 钴基合金熔覆粉末基础上对 Si 含量做调整后的自配粉末作为熔覆材料, 利用金相、SEM、XRD 等分析手段对各熔覆层的组织进行研究, 使用 TH701 自动转塔数显微硬度计进行熔覆层微观硬度测量, 使用 HT-1000 型摩擦磨损试验机进行熔覆层表面摩擦磨损试验, 以探究 Si 含量变化对熔覆层组织形貌、物相结构及力学性能的影响。**结果** Co06-Si8 与 Co06-Si12 的熔覆层结合区较窄, 稀释率较低。熔覆层结合区的 Fe 元素含量较高, 组织形貌显现出非晶特征。Si 元素在覆层中的主要存在形式是 Fe_2Si 和 Fe_3Si , 出现了非晶相特征宽晕峰。Co06-Si8 和 Co06-Si12 的覆层硬度较高, 磨损形式有磨粒磨损和黏着磨损。**结论** 该研究为锻压加工生产中 H13 热锻模具钢的应用提供了新的解决方案。

关键词: 激光熔覆; 钴基合金; 涂层微观组织; 高温摩擦磨损

中图分类号: TG139; TH16 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)03-0120-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.014

Microstructure and Mechanical Properties of CoCrFeNiBWSi_x Coating on Hot Forging Die Steel

ZHANG Zhiming¹, LIU Yuxin^{2*}, SHU Fengyuan³, ZHANG Xiongbo³, DENG Jia³, CUI Juan³

(1. Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518100, China; 2. National Defense Key Laboratory of Equipment Remanufacturing Technology, Army Armored Forces Academy, Beijing 100072, China; 3. School of Chemical Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Guangdong Zhuhai 519082, China)

ABSTRACT: The work aims to deal with production hazards of H13 steel caused by insufficient hardness, fatigue failure and wear damage during forging and to improve its surface properties. Self-prepared powder with Si content adjusted on the basis of Co-06 cobalt alloy cladding powder was used as the cladding material. Metalloscope, SEM, XRD, EDS and other analytical

收稿日期: 2024-12-24; 修订日期: 2025-02-07

Received: 2024-12-24; Revised: 2025-02-07

基金项目: 山西省科技合作交流项目-区域合作项目 (202204041101035); 广东省基础与应用基础研究基金 (2024A1515011062)

Fund: Shanxi Science and Technology Cooperation and Exchange Project-Regional Cooperation Project (202204041101035); Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2024A1515011062)

引文格式: 张志明, 刘玉欣, 舒凤远, 等. 热锻模具钢表面熔覆 CoCrFeNiBWSi_x 涂层组织及力学性能研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 120-126.

ZHANG Zhiming, LIU Yuxin, SHU Fengyuan, et al. Microstructure and Mechanical Properties of CoCrFeNiBWSi_x Coating on Hot Forging Die Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 120-126.

*通信作者 (Corresponding author)

tools were used to study the organization of each cladding layer; A TH701 automatic turret digital microhardness tester was used to measure the microhardness of the cladding layer; An HT-1000 type friction wear tester was used to conduct surface friction and wear tests of the cladding layer, to determine the effect of silicon content changes on the microstructure and mechanical properties of the cladding layer. The results showed that the binding zone of the cladding layer with 8% and 12% Si content was narrow and the dilution rate was low. The Fe content in the bonding zone of the cladding layer was high, and the microstructure was amorphous. The main forms of Si elements in the coating were Fe₂Si and Fe₃Si, and there was a wide halo peak with amorphous phase characteristics. The cladding layer with 8% and 12% Si content had high hardness. The wear forms were abrasive wear and adhesive wear. This research provides a new solution for the application of H13 hot forging die steel in forging production.

KEY WORDS: laser cladding; cobalt-based alloy; coating microstructure; high temperature friction and wear

H13 钢作为一种空冷硬化的热作模具钢, 凭借着较高的服役温度、优越的力学性能和低廉的造价, 一直以来受到工业界的青睐。H13 钢最常用的是不同型号种类的锻造、挤压和压铸的热作模具钢^[1-2]。然而在锻压加工过程中, 长时间的高温环境和冲击压力也会使 H13 模具钢面临硬度不够高、疲劳失效和磨损损坏等问题, 最终导致生产效率的降低和成本的提高。为了提高 H13 热作模具钢在锻造过程中的耐磨损性和耐高温性能, 表面改性已经成为目前最有效的方法^[3-4]。

表面改性的技术通常包括堆焊、热喷涂、电镀和激光熔覆等技术, 其中激光熔覆技术在近年来逐渐成为研究热点。激光熔覆主要的优势在于, 明显提升待修复材料的综合力学和耐腐蚀性能, 可灵活调整待添加的材料体系, 修复层与基体材料可以实现良好的冶金结合和工艺操作简单等^[5]。

在表面改性领域, 由于熔覆层特殊的结构特征, 使其产生了优异的性能。Liang 等^[6]研究发现, 铝硅合金表面经过激光熔覆得到的 Ni-Cr-Al 涂层的组织和耐磨性能与涂层中非晶含量联系紧密, 激光熔覆涂层中非晶体的含量越多, 涂层表面的硬度和耐磨性也就相应的提高, 这归因于从基体中脱落的颗粒减少。Wang 等^[7]也在研究中指出, 非晶体和晶体结构同时存在对于涂层的力学性能有积极影响。武晓雷等^[8]研究发现, 在 45 钢基体上激光熔覆的 Fe₅₇Co₈Ni₈Zr₁₀Si₄B₁₃ 非晶复合涂层, 非晶表层的硬度呈梯度变化, 涂层在王水及 HF 溶液中均呈现出极强的耐腐蚀性, 这为非晶相提升涂层的耐腐蚀性能提供了有力的证明。Wang 等^[9]在 Ti 基体上激光熔覆 Zr 基非晶复合涂层, 发现所得非晶涂层具有超高的硬度和耐磨性。

在采用激光熔覆工艺后, 除了熔覆工艺的调节以外, 对于制备熔覆涂层材料的选择也极为关键。目前, 用作制备非晶-纳米晶涂层的合金体系主要有 Fe 基、

Ni 基、Co 基等非晶合金体系。其中, Co 基粉末凭借其优异的耐磨、耐腐蚀和耐高温等特点, 在工业生产领域和科学研究中颇为重要。Co 基合金的主体为金属 Co, 与 Ni、C、Ti、Mn 等金属中的 1 种或多种按比例混合而成。Co 基合金具有优秀的润滑性, 熔覆过程生成新的相熔点远低于碳化物, Co 元素由于熔点较低通常率先熔化, 在冷却过程中它又容易和其他元素结合生成提升涂层性能的合金固溶体^[10]。虽然 Si 含量不多但对合金的微观结构、性能及耐腐蚀性有很大作用。Liu 等^[11]在 304 钢表面熔覆出不同 Si 含量的 AlCoCrFeNiSi_x 涂层, 发现 Si 元素会导致严重的晶格畸变和明显的晶粒细化, 涂层的显微硬度随着 Si 元素含量的增加而提高。此外, Si 元素的存在还能大大提高涂层的耐磨性能。

本文利用激光熔覆技术在 H13 热作模具钢表面激光熔覆 Co 基合金粉, 系统研究了不同 Si 元素含量的 Co 基合金涂层的微观组织结构, 性能和耐磨损性能产生的影响, 并试图探究熔覆粉末中 Si 含量和形成覆层后组织中非晶相的比例之间的关系, 以便在熔覆时获得更好性能的覆层, 对 Co 基合金的表面熔覆粉末的成分配比作出帮助或改善。

1 试验

试验采用尺寸为 100 mm×80 mm×100 mm 的 H13 钢 (4CrMoSiV) 为基体材料, H13 钢的主要化学成分及其组成见表 1。熔覆前, 使用磨抛机打磨待加工表面, 以去除表面的铁锈和氧化膜, 并用丙酮和无水乙醇擦拭表面去除油污, 最后放在烘干机中进行烘干 1 h 待用。熔覆材料采用 Co 基 (Co06) 合金粉末和分别添加了质量分数为 4%、8%、12%、16% Si 元素的 Co06 粉末 (Si4、Si8、Si12、Si16), 其化学成分及配比见表 2。

表 1 H13 钢化学成分 (质量分数, %)

Tab.1 Chemical compositions of H13 steel (mass fraction, %)

C	Cr	V	Si	Mo	Mn	S	P
0.32~0.42	4.75~5.5	0.8~1.2	0.8~1.2	1.1~1.75	0.2~0.5	0.03	0.03

表2 不同含量 Si 元素的钴基合金粉末化学成分及配比 (质量分数, %)

Tab.2 Chemical composition and ratio of cobalt-based alloy powder with different Si contents (mass fraction, %)

样品	Co	Ni	W	Si	B	Fe	Cr
Co06	44	10	5	4	3	2	32
Co06-Si4	42.30	9.61	4.80	8	2.88	1.92	30.76
Co06-Si8	40.74	9.25	4.62	12	2.77	1.85	29.62
Co06-Si12	39.28	8.92	4.46	16	2.67	1.78	28.57
Co06-Si16	37.93	8.62	4.31	20	2.58	1.72	27.58

采用 QYS-5200MB 行星磨, 将不同 Si 含量的 Co 基合金粉末充分搅拌, 在真空研磨瓶中球磨 3 h, 确保粉末的均匀性。激光熔覆采用预置粉末法, 将混合后的粉末平铺在基体 H13 钢表面, 使用 RH-700 型数控 YAG 激光金属熔覆系统进行多道激光熔覆。激光熔覆的工艺参数: 扫描速度为 100 mm/s, 激光功率为 350 W, 频率为 4 Hz, 脉宽为 8 ms。铺粉厚度为 100 μm , 熔覆面积为 15 mm \times 60 mm。

将制备好的覆层试样用线切割机沿着纵向切成 10 mm \times 10 mm \times 5 mm 的试样, 对试样进行冷镶样、粗磨细磨、抛光和 30 s 的王水腐蚀之后, 利用金相显微镜观察表面和截面的宏观形貌。为进一步观察熔覆层的微观组织, 使用场发射扫描电子显微镜 (MERLIN Compact) 观察其截面, 使用 X 射线衍射仪 (D/max2500) 分析涂层上表面的主要物相组成。为进一步表征熔覆层的微观结构, 使用透射电子显微镜观察超微观结构, 采用显微硬度计 (TH701) 进行显

微硬度测试, 利用高温摩擦磨损试验机 (HT1000) 在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下进行摩擦磨损试验。

2 结果与分析

2.1 微观形貌及结构

添加了不同含量 Si 元素 (Si4、Si8、Si12、Si16) 的 Co06 合金涂层底部和顶部的截面形貌如图 1 和图 2 所示。可以明显观察到整个涂层大致分为 3 层, 分别是熔覆层、结合区和基体 (或热影响区)。从涂层底部结合区的形貌可以看出, 腐蚀较为严重, 可看到熔合线附近的树枝晶出现, 树枝晶的晶粒大小也有一定的差异, Si8 和 Si12 涂层存在一个较明显的晶粒细化。在熔合线下部区域还可以发现微凸, 经分析可知, 出现的微凸区域, 铁元素质量分数达到 90% 以上, 可以推测是铁元素的富集。还可看到熔覆层中部非晶相及晶化相互交错, 顶部区域出现了大块非晶区。

从图 1 可以看出, 涂层底部组织主要以胞状的树枝晶为主。这是由于涂层在冷却过程中, 沿着垂直于结合界面方向的热量散失速度最快, 所以枝晶呈现出较为明显的方向性。激光熔覆由于其快热快冷的工艺特点, 得到的涂层中不仅包含树枝晶和少量的金属化合物, 还含有能显著影响其性能的非晶体组织。

从图 2 可以看出, 不同 Si 含量的涂层顶部均包含大量无序的非晶相结构。这是由于顶部与空气中的热量交换极为迅速, 致使涂层顶部形成了大块的非晶

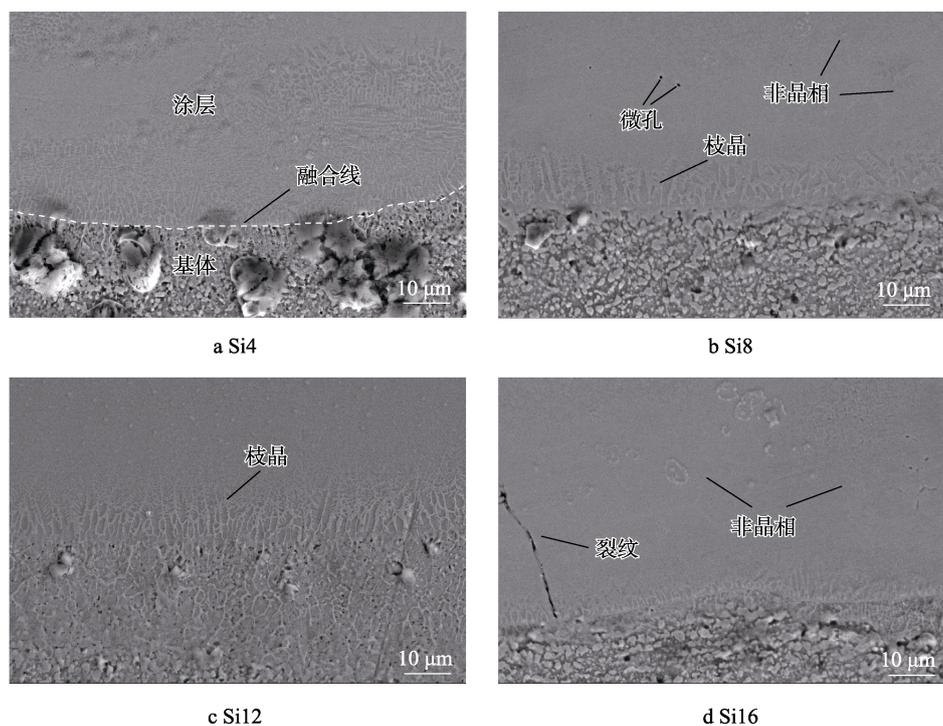


图1 不同 Si 含量激光熔覆层底部微观形貌

Fig.1 Bottom micromorphologies of laser cladding layers with different Si contents

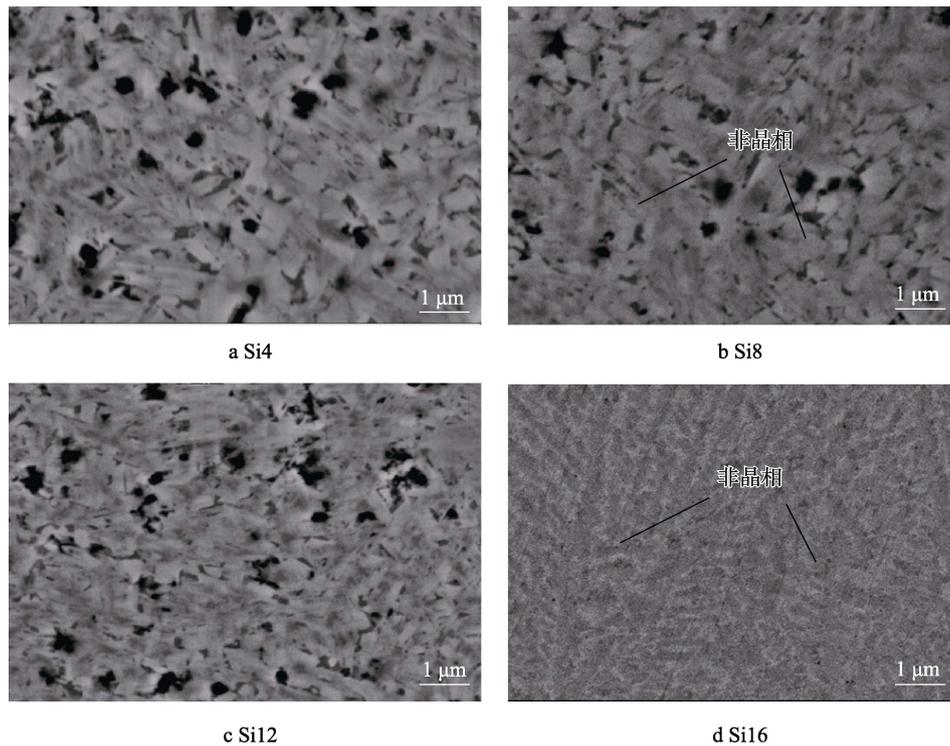


图 2 不同含量 Si 元素激光熔覆层顶部微观形貌
Fig.2 Top micromorphologies of laser cladding layers with different Si contents

区域, 这在后续的 XRD 测试结果中也能得到验证。

由图 3 的 XRD 测试结果可以看出, 不添加 Si 元素的 Co06 合金涂层主要由 FeNi₃ 和 γ -Co 构成。添加 Si 元素的涂层中包含 FeNi₃、 γ -Co、Fe₂Si 和 Fe₃Si 等金属间化合物。由于在 44°附近“馒头峰”的出现, 证实了非晶相的存在。随着 Si 元素含量的增加, FeNi₃、 γ -Co 的衍射峰强度不断降低, 而 Fe₂Si 和 Fe₃Si 的衍射峰强度不断增大, 这在 Si4 和 Si16 的图谱中较为明显。这也反映了随着 Si 元素含量的增多, Si 元素直接在熔池中参与反应, 并生成了大量含 Si 的金属间化合物。Si16 涂层的 TEM 明像场照片如图 4 所示, 可以发现, 黑色非晶相附近存在大量含有 Si 元素的圆形析出颗粒, 这与 XRD 测试结果基本一致。

2.2 显微硬度分析

从图 5 可以看出, 从涂层的顶部到基体, 平均显微硬度都是逐渐降低的, 合金涂层区域的显微硬度 (1 400HV) 是明显高于结合区 (900HV) 和基体部分 (500HV), 这源于合金涂层中各种合金元素的固溶强化效应^[12]。Co06 涂层的硬度变化较为平缓, 这种均匀的变化归因于 Co06 涂层均匀的微观结构。

随 Si 元素含量的升高, 涂层的平均显微硬度也呈现出逐渐上升的特征。Si8 和 Si12 涂层的硬度较高, Si4 和 Si16 的硬度较低。其中, Si8 的整体硬度最高, 是由于 Si8 涂层中存在的 Fe₂Si 和 Fe₃Si 等硬质相起到的强化作用。此外, 涂层的激光熔覆成形较好, 细化

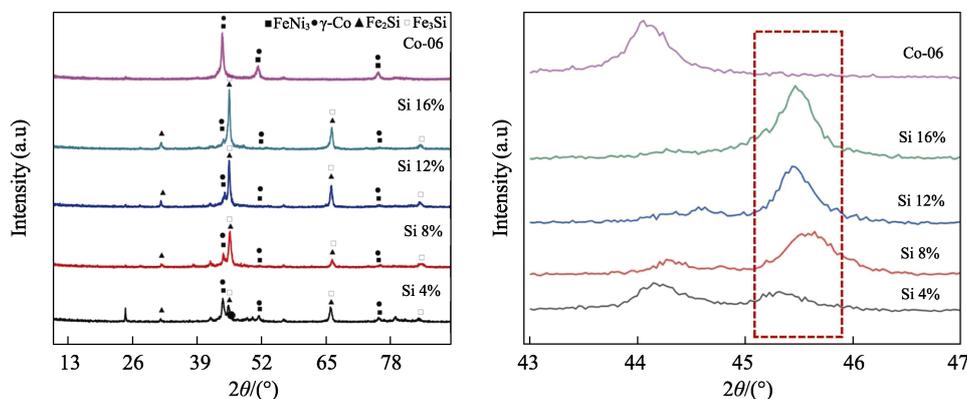


图 3 不同 Si 含量激光熔覆层 XRD 图谱
Fig.3 XRD pattern of laser cladding layers with different Si contents

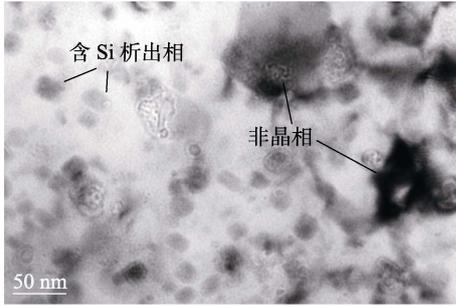


图4 Si16涂层的TEM照片
Fig.4 TEM photo of Si16 coating

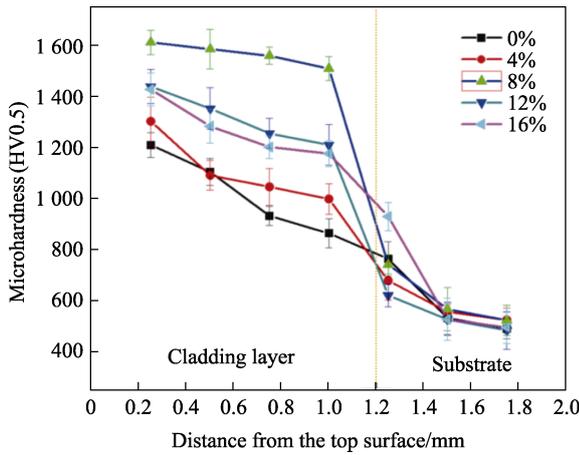


图5 不同Si含量涂层显微硬度分布
Fig.5 Relationship between microhardness and Si content of powder laser cladding layer with different Si contents

的晶粒起到了强化作用,以及没有明显的裂纹气孔等缺陷,也是其硬度显著提升的原因。尽管 Si16 拥有更多的硬质相,但是过多的硬质相会导致其脆性增加从而导致涂层的开裂,缺陷的增多不利于硬度的提

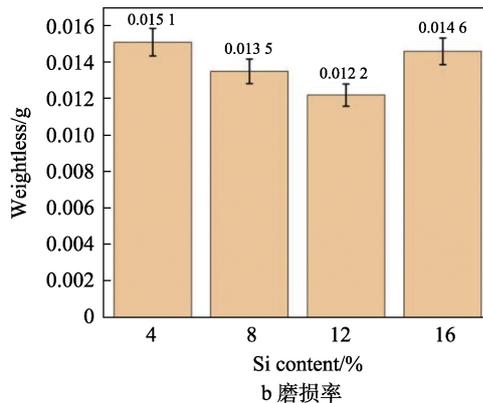
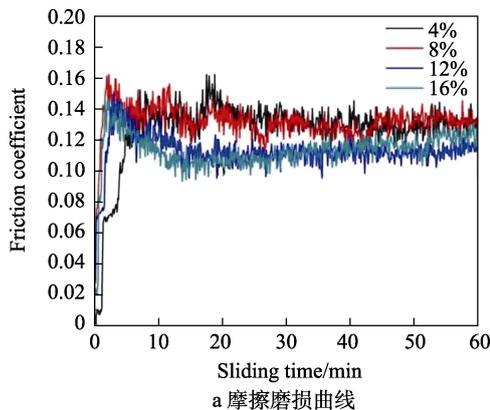


图6 不同Si含量涂层的摩擦磨损系数和磨损率
Fig.6 Friction and wear test result of friction and wear curve wear rates: a) friction and wear curve; b) wear rates

不同 Si 元素含量涂层的磨痕 SEM 形貌如图 7 所示。可以观察到犁沟,但较为浅和轻,产生的塑性变形不大。在图 7a、c、d 中均能观察到磨屑的堆积和少量的剥落坑,表明其主要磨损机制是磨粒磨损与黏

升。在笔者之前的工作中,也发现非晶相的存在有利于涂层显微硬度的提高^[13]。

2.3 摩擦磨损性能

由图 6a 可知,试样的摩擦因数曲线大致可以分为 3 个阶段。首先,摩擦因数会保持在较小范围波动,这可能是保护膜和吸附膜起的润滑作用,但是会在短时间内不断提高,这是由于相对滚动产生的摩擦力,会破坏涂层表面的保护膜。其次是摩擦因数缓慢下降阶段,然后进入到稳定阶段。在此阶段,由于磨屑滑落以及氧化且磨屑的产生和溢出基本达到平衡,摩擦因数才不会出现较大的起伏变化^[14]。通过对比不同 Si 含量涂层的摩擦因数 (f) 也可以发现, $f_{Si4} > f_{Si8} > f_{Si16} > f_{Si12}$, 摩擦因数越低,往往代表着更好的耐磨性能。

磨损试验完成后,将磨损试样用超声波清洗机清洗,再用脱脂棉球沾取丙酮擦拭后烘干,使用天秤测量试样的磨损质量损失。根据公式 $W = \frac{\Delta m}{\rho F D}$ 计算出磨损率 W ,其中 Δm 为样品磨损后损失的质量, ρ 为样品的密度, F 为摩擦作用力, D 为滑动距离。根据质量损失绘制柱状图,如图 6b 所示。4 组不同 Si 含量的涂层的磨损质量损失变化不大, Si4 质量损失最大,达到 0.0151 g,质量损失最小的为 Si12,为 0.0122 g。从微观硬度分析可知,熔覆层顶部整体硬度较高,但由于 Fe_2Si 、 Fe_3Si 等 Si 含量较高的硬质相增多之后,涂层硬度增强的同时脆性也同步增大。因此,在摩擦磨损这个很激烈的过程中,熔覆层与对磨的 ZrO_2 小球产生强烈碰撞,犁削作用相比其他 Si 含量成分的覆层较为明显,产生了金属剥落,质量损失因此较高。

着磨损^[15]。剥落碎片的出现,是由于硬度较高的 ZrO_2 小球对磨损表面会产生犁削效果。这些现象则是因为涂层整体硬度相比于基体 H13 钢较高,且熔覆层中存在一些微凸出于基体的 Fe_2Si 、 Fe_3Si 、 $FeNi_3$ 等硬质

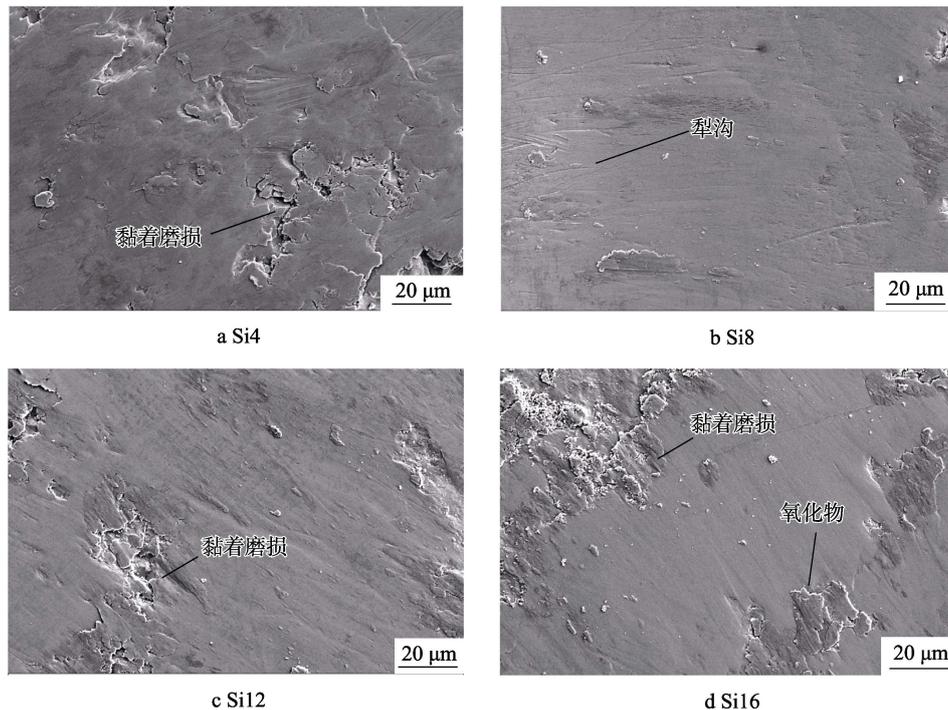


图 7 不同 Si 含量涂层的磨痕 SEM 形貌

Fig.7 SEM images of wear mark morphology of cladding layer with different Si contents

耐磨相受到的压力更大, 因此更加容易被压变形乃至于破损。同时, 硬质相在磨粒划过时, 很难产生较深的沟槽, 颗粒本身就容易在过程中发生破碎与剥落, 剥落颗粒更加难对表层造成明显的划痕。

3 结论

1) Co06 和添加了不同含量 Si 的 Co06 合金粉末, 在热锻模具钢表面经过激光熔覆后, 所得合金涂层成形性较好, 实现了较好的冶金结合, 证明了激光熔覆表面改性的可行性。

2) 热锻模具钢表面钴基合金涂层微观形貌主要由内靠近熔池底部的胞状树枝晶和顶部非晶区组成。涂层顶部由于激光熔覆极高的冷却速率, 形成大量的非晶区。非晶区和底部细化的树枝晶对涂层的硬度和耐磨性都存在影响。

3) 热锻模具钢表面钴基合金涂层主要由 FeNi₃、 γ -Co、Fe₂Si 及 Fe₃Si 和大量的非晶相构成。其中, FeNi₃、 γ -Co 相可以在所有覆层中找到, 增加 Si 含量后, 覆涂层中含 Si 的金属间化合物明显增多。Fe₂Si、Fe₃Si 等硬质相是提高涂层的硬度和耐磨性能的关键因素, 同时也是 Si 元素在覆层中的主要存在形式。

4) 由显微硬度分析可得, 各个热锻模具钢表面钴基合金涂层由于存在固溶强化效应, 较母材硬度大大提高。其中, 涂层 Si8 和 Si12 硬度较高, Si8 涂层的整体硬度最高, 熔覆层与基体间的硬度差异也最大。

5) 热锻模具钢表面涂层的磨损质量损失并不剧烈, 其中质量损失最大的为 Si4, 最小的质量损失为 Si12。微观形貌显示, 磨损形式主要是轻微的磨粒磨损和一定程度的黏着磨损。根据摩擦因数的分析, 在 Si 含量增加后, 熔覆层表面的硬度有所提高, 摩擦因数相应降低。

参考文献:

- [1] 王鹏, 张杰江, 胡亚民. H13 钢的应用现状[J]. 模具制造, 2007, 7(12): 1-7.
WANG P, ZHANG J J, HU Y M. The Application of H13 Steel[J]. Die & Mould Manufacture, 2007, 7(12): 1-7.
- [2] 蔡滨, 任忠恕. H13 钢热作模具及其应用前景[J]. 锻压机械, 1990, 25(3): 3-7.
CAI B, REN Z S. H13 Steel Hot Working Die and Its Application Prospect[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 1990, 25(3): 3-7.
- [3] 陈辉辉, 施国春. 对 4Cr₅MoSiV1 热挤压模具钢加工工艺的研究[J]. 模具工业, 2004, 30(4): 54-57.
CHEN H H, SHI G C. Research of the Technologies for Processing the 4Cr₅MoSiV1 Steel Used for Hot Extruding Dies[J]. Die & Mould Industry, 2004, 30(4): 54-57.
- [4] 曹光明. H13 热作模具钢的表面热处理[J]. 特殊钢, 2005, 26(1): 34-37.
CAO G M. Surface Heat Treatment to Hot-Work Die Steel H13[J]. Special Steel, 2005, 26(1): 34-37.
- [5] 高绪杰, 郭娜娜, 朱光明, 等. 激光熔覆制备高熔合金

- 涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 107-117.
- GAO X J, GUO N N, ZHU G M, et al. Research Status of High-Entropy Alloys Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 107-117.
- [6] LIANG G Y, SU J Y. The Microstructure and Tribological Characteristics of Laser-Clad Ni-Cr-Al Coatings on Aluminium Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 290: 207-212.
- [7] WANG Q Q, BAI X D, SUN B, et al. Influence of Si on Tribological Behavior of Laser Cladded Fe-Based Amorphous/Crystalline Composite Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126570.
- [8] 武晓雷, 洪友士. 激光熔覆大厚度 Fe57Co8Ni8Zr10-Si4B13 非晶表层及其微结构研究[J]. 金属学报, 2000(12): 1244-1247.
- WU X L, HONG Y S. Thick amorphous Fe57Co8Ni8Zr-10Si4B13 coating prepared by laser clad and its microstructure[J]. ACTA METALLURGICA SINICA, 2000, 12: 1244-1247.
- [9] WANG Y F, LI G, WANG C S, et al. Microstructure and Properties of Laser Clad Zr-Based Alloy Coatings on Ti Substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 176: 284-289.
- [10] ZHANG J J, REN B, ZHAO R F, et al. Effect of Co on the Microstructure and Oxidation Behavior of $\text{Co}_x\text{CrCuFeMnNi}$ High Entropy Alloy Powders[J]. Micron, 2021, 142: 102995.
- [11] LIU H, SUN S F, ZHANG T, et al. Effect of Si Addition on Microstructure and Wear Behavior of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126522.
- [12] HUANG L, WANG X J, JIA F C, et al. Effect of Si Element on Phase Transformation and Mechanical Properties for FeCoCrNiSix High Entropy Alloys[J]. Materials Letters, 2021, 282: 128809.
- [13] SHU F Y, ZHANG B L, LIU T, et al. Effects of Laser Power on Microstructure and Properties of Laser Cladded CoCrBFeNiSi High-Entropy Alloy Amorphous Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 667-675.
- [14] ZHU Z X, LIU X B, LIU Y F, et al. Effects of Cu/Si on the Microstructure and Tribological Properties of FeCoCrNi High Entropy Alloy Coating by Laser Cladding[J]. Wear, 2023, 512: 204533.
- [15] SHU F Y, ZHANG X B, WANG H P, et al. Research on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of $(\text{Co}_{34}\text{Fe}_8\text{Cr}_{29}\text{Ni}_8\text{Si}_7)_{100-x}\text{B}_x$ High Entropy Alloy Coating[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2024, 33(5): 1630-1642.