

# H13 钢等离子堆焊 Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 覆层的 磨损及热疲劳性能

刘清阳<sup>1,2</sup>, 王华君<sup>1,2</sup>, 洪峰<sup>3</sup>, 朱春东<sup>1,2</sup>, 王哲涵<sup>1,2</sup>

- (1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430070;
2. 武汉理工大学湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心, 湖北武汉 430070;
3. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070)

**摘要:**采用等离子堆焊技术在 H13 钢基体表面上制备了 Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 堆焊覆层,研究了覆层的磨损行为和热疲劳性能。在 600 °C 下销盘试验的结果表明,镍基碳化铬复合覆层的耐磨性是 Ni60A 堆焊覆层的 2.8 倍和基材 H13 钢的 11.6 倍。镍基覆层可以显著降低 H13 钢的摩擦因数,加入碳化铬则会削弱覆层的摩擦性能。随着磨损的进行,主要磨损机理从氧化磨损演变为磨粒磨损和粘着磨损。在 800 °C 到室温下的热疲劳测试结果表明,镍基碳化铬复合覆层在 48 个热循环后疲劳裂纹达到 200 μm,早于镍基覆层的 62 次。这说明高温氧化促进热疲劳裂纹的产生。碳化铬增强相从镍基上剥离,导致镍基复合覆层热疲劳性能下降。

**关键词:**碳化铬;粉末等离子堆焊;磨损;热疲劳

中图分类号: TG115.5 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2020)10-0175-06

## Wear and thermal fatigue properties of Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating prepared by PTA welding on H13 steel

Liu Qingyang<sup>1,2</sup>, Wang Huajun<sup>1,2</sup>, Hong Feng<sup>3</sup>, Zhu Chundong<sup>1,2</sup>, Wang Zhehan<sup>1,2</sup>

- (1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;
2. Hubei Engineering Research Center for Green Precision Material Forming, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;
3. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

**Abstract:** Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> surfacing coating was prepared on the surface of H13 steel by plasma transferred arc welding (PTA) technology, and its wear behavior and thermal fatigue properties were investigated. The results of pin-on-disk wear tests at 600 °C show that the wear resistance of the Ni-based Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-reinforced coating, is 2.8 times of that non-reinforced, and 11.6 times of that of the H13 steel. The nickel-based coating can significantly reduce the friction coefficient of H13 steel, and the addition of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> will weaken the friction performance of the coating. The main wear mechanism evolves from oxidative wear to abrasive wear and adhesive wear as the wear progresses. The results of thermal fatigue test at 800 °C to room temperature show that the fatigue crack reaches 200 μm after 48 thermal cycles for the Ni-based Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-reinforced coating, earlier than after 62 cycles for the non-reinforced Ni-based coating. High temperature oxidation promotes the initiation of thermal fatigue cracks. The Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> reinforcing phase is peeled off from the Ni-based substrate, resulting in a decrease in thermal fatigue properties.

**Keywords:** chromium carbide; powder plasma transferred arc welding; wear; thermal fatigue

热锻模的工作环境恶劣,长期在高温环境中承受较大的机械载荷和冷热载荷,这将导致热锻模型腔表面产生高温软化、热疲劳裂纹、高温磨损以及塑性变形等破坏失效<sup>[1-2]</sup>,限制了热锻模的使用寿命。采用表面工程的方法改善热锻模具表面性能,对于延长热锻模具寿命具有明显效果。在工程实际中应用较多的有

热喷涂、激光熔覆和表面堆焊技术,此外还有 CVD、PVD、渗碳、渗硼、氮碳共渗以及盐浴处理等改进方法<sup>[3-5]</sup>。由等离子堆焊技术得到覆层效率高,覆层与基材冶金结合良好,粘结强度高,可以提供良好的高温磨损和高温冲击性能。同时粉末具有可设计性,受到锻压界广泛的关注<sup>[6-8]</sup>。镍基合金在中高温环境下具有优异的抗氧化性和良好的相稳定性,在延长热锻模的使用寿命方面具有很大的优势。向覆层基体中添加 WC、SiC 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 等碳化物增强相是一种重要的强化方法,WC 具有很高的熔点,其密度远大于 Ni,容易出现沉底引发气孔和微裂纹<sup>[9]</sup>。SiC 作为 Ni 基覆层的增强相,等离子堆焊过程中烧损严重,包覆粉的制备工

收稿日期:2020-03-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51475346,51875427);武汉理工大学优秀学位论文培育项目(2017-YS-006)

作者简介:刘清阳(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为热锻模梯度覆层性能改良、粉末冶金自润滑模具,E-mail: 376368471@qq.com。

通讯作者:洪峰,讲师,硕士,E-mail: hongf@whut.edu.cn

DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2020.10.034

艺复杂、成本较高<sup>[10]</sup>。牛龙飞等<sup>[11]</sup>制备了镍基碳化铬复合覆层,研究了覆层的组织和硬度,结果表明,该覆层具有均匀的内部组织,并且与 H13 钢冶金良好结合。除了对堆焊层的配方设计、堆焊工艺优化以及堆焊层的常温力学性能表征方面进行研究,学者们也着眼于覆层的磨损性能和热疲劳的研究,Chen 等<sup>[12]</sup>通过转弧等离子堆焊工艺在 AISI304L 不锈钢上堆焊了镍基覆层,并分析了其微观组织和磨损性能。Wang 等<sup>[13]</sup>研究了添加合金元素对铁基堆焊层磨损性能的影响。热疲劳方面,Imran 等<sup>[14]</sup>认为,与直接涂覆的 H13 工具钢试样相比,缓冲层对耐热疲劳性具有良好的影响。刘栋等<sup>[15]</sup>研究了不同制备工艺对镍基合金覆层耐热疲劳性能的影响,李爱农等<sup>[16]</sup>探讨了在 H13 钢表面等离子堆焊 GH2135 的热疲劳性能。

然而,针对添加碳化物增强相后的堆焊覆层磨损和热疲劳性能的相关报道鲜有提及。作为进一步表征热锻模具表面覆层性能的重要部分,本文研究了 H13 钢表面等离子堆焊 Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合覆层的

磨损行为和热疲劳性能。

## 1 试验材料及方法

堆焊试验采用镍基合金 Ni60A 作为覆层基体,镍基碳化铬堆焊层则选择 70% Ni60A + 30% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>。其中 Ni60A 化学成分(质量分数,%)为 0.5~1.1C、3.0~4.5B、3.5~5.0Si、15~20Cr、0~5Fe,余量为 Ni;Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (质量分数,%)为 12~13C、85~86Cr,余量为 Si。选用粒度为 45~105 μm 的 Ni60A 粉末,粒度 15~45 μm 的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉末,按照 7:3 的质量分数配比,高能球磨机混粉均匀。堆焊基板选用热作模具钢 H13 钢,尺寸为 200 mm × 100 mm × 20 mm。

堆焊前,将粉末在 200 °C 下烘干 1 h。打磨基材 H13 钢板表面,除去氧化皮和污渍,置入 300 °C 箱式电阻炉里预热 1 h。焊接所用设备为 LU-F400-B400-CNC 型数控多功能型粉末等离子堆焊机。焊后将基体迅速放入 400 °C 电阻炉中缓冷至室温,清理去除焊道表面的氧化皮。堆焊工艺参数见表 1。

表 1 镍基合金和镍基碳化铬等离子堆焊工艺参数

Table 1 Plasma transferred arc welding parameters of the Ni-based alloy and the Ni-based Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-reinforced alloy

合金	转弧电流/A	送粉速度/(g·min <sup>-1</sup> )	焊枪移动速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	摆幅/mm	摆动频率/(次·min <sup>-1</sup> )	喷距/mm
Ni60A	70	10	50	12	30	8
Ni60A + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	80	10	50	12	30	9

图 1 所示为 Ni60A 等离子喷焊焊层宏观形貌,焊层厚度为 2~4 mm,焊道宽度为 30 mm,焊层表面光滑,无堆焊裂纹,能够满足力学性能要求。利用线切割机对堆焊层进行取样,金相试样沿垂直焊缝方向,大小为 10 mm × 10 mm × 5 mm。研磨表面,选择氧化铬和肥皂水作为抛光剂,在 XQ-1 型金相试样镶嵌机上进行镶嵌。基材和堆焊层材料使用不同的腐蚀方法,用棉签蘸 4% 硝酸酒精溶液将 H13 钢基体腐蚀 3~5 s,在 4% 硝酸溶液中侵蚀堆焊覆层 15~20 s,酒精清洗完吹干备用。

采用维氏硬度计 HVT-1000 进行表面硬度的测试,载荷砝码为 200 g。摩擦磨损试验在自制的 SP-X 型 CNC 高温摩擦磨损试验机上进行。接触形式为销盘式。选择用于锻件的中碳合金钢 40Cr 作为盘,热处理状态为淬火回火处理状态,显微硬度为 362 HV0.2。盘厚度 8 mm,中心有直径 φ8.5 mm 的定位孔。销与盘的接触面为直径 φ5 mm 的圆,磨痕半径 20 mm。测试温度 600 °C,加载砝码 20 kg,转速 0.125 m/s,时间 30 min,以模拟热锻模具的重锻和干滑摩擦工作状态。试验前后,用酒精将销试样和对磨盘清洗干净,称重 3 次并取其平均值,计算销试样的磨损量。磨损形貌观察以及

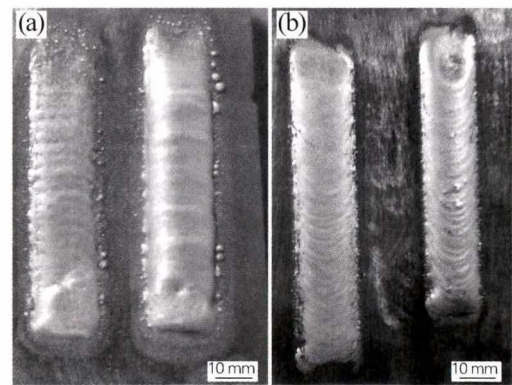


图 1 两种粉末的焊道宏观形貌

(a) 镍基合金;(b) 镍基碳化铬

Fig. 1 Macrographs of surfacing weld

bead of the two kinds of powders

(a) nickel base alloy; (b) Ni-based Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-reinforced alloy

能谱分析在 JXA-8230/INCAX-ACT 型电子探针显微分析仪及 JSM-IT300 型扫描电镜上进行。

热疲劳性能的测试在自制的热疲劳测试设备上<sup>[16]</sup>进行。使用线切割机预制 2 mm 宽、60°V 形裂纹和圆钩孔。将箱式电阻炉加热到设定温度(800 °C)。设置

炉内保持时间 150 s,再将其在循环冷水中冷却 5 s,以完成冷热循环。用稀盐酸溶液洗涤表面并超声清洗,电镜下测量热疲劳裂纹长度,绘制出热疲劳裂纹长度和循环次数的关系曲线。裂纹尖端的微观结构和元素成分通过电子探针显微分析仪/能谱分析仪进行。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 覆层的高温磨损性能

3 种材料的高温摩擦因数如图 1(a)所示。H13 钢的摩擦因数在 0.366 ~ 0.461 之间波动,平均值为 0.424。Ni 基覆层的摩擦因数在 0.331 和 0.371 之间波动,平均摩擦因数为 0.358。Ni 基碳化铬复合覆层的摩擦因数在 0.382 ~ 0.474 之间波动,平均值为 0.427。镍基粉末堆焊覆层可以显著改善 H13 钢的摩擦性能,但碳化铬的加入对覆层的摩擦性能有一定削弱。随着磨损的进行,由于 H13 钢属于合金工具钢,与对磨盘 40Cr 材质相近,发生粘着现象严重,因此摩擦因数趋于增大。镍基合金堆焊层则相反,抗粘着磨损较强,其摩擦因数初始值比较小,且随着磨损的进行逐渐减小;Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>覆层的摩擦因数经历了先增大后减小的过程,最后小于 H13 钢。分析是由于添加了碳化铬,硬颗粒分布在覆层表面上,导致在摩擦磨损的初始阶

段处于较高水平。之后磨损减轻,摩擦因数下降达到一个相对稳定值。

如图 2(b)所示,在 H13 钢磨损表面有明显的磨屑分层,粘附了许多小磨粒,这些磨粒呈块状和圆盘状,表面有较深的犁沟和剥落坑。图 2(c)是 Ni 基无增强相覆层的磨损表面,分层现象有明显改善,表面上犁沟较浅,仍有颗粒状和块状磨粒粘附。镍基碳化铬复合覆层的磨损表面磨粒被压实,刮痕最少,有更多光滑的层状物质吸附在表面上,应为釉质层(图 2(d))。所有磨损表面都出现了磨粒磨损特征的犁沟状磨痕,与摩擦方向一致。这是由于随着磨损的进行,摩擦材料被氧化形成氧化凸台,由于氧化物与基体的结合力较弱,从基体上剥落,破裂并吸附在摩擦副的表面,对摩擦材料有微切削作用,形成了犁沟。而表面吸附的颗粒和块状物是粘着磨损的典型特征。因此判断,Ni60A 合金和 Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>堆焊覆层磨损机制在初期主要是氧化磨损,之后转变成磨粒磨损和粘着磨损为主。

销试样的磨损质量损失见表 2。H13 钢销的磨损质量损失为 0.0151 g。两个表面覆层销的磨损质量损失相对较小,镍基堆焊层的磨损量为 0.0036 g,Ni 基碳化铬堆焊层的磨损最小,质量损失为 Ni 基非增强覆

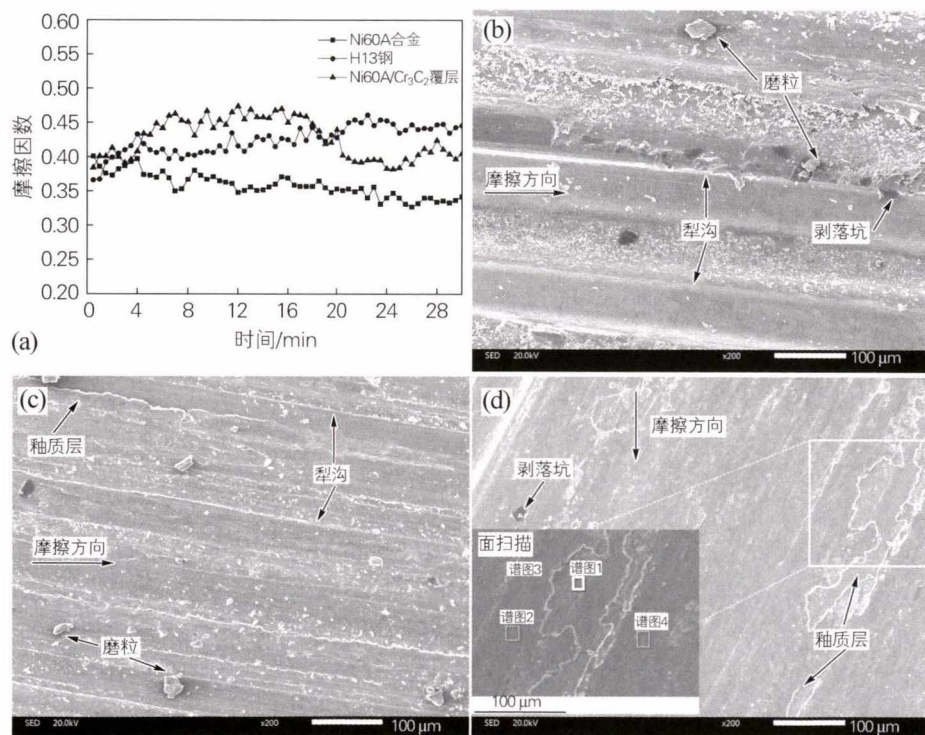


图 2 3 种试样的高温摩擦曲线和磨损形貌

(a) 摩擦因数;(b) H13 钢磨损形貌;(c) 镍基覆层磨损形貌;(d) 镍基碳化铬覆层磨损形貌

Fig. 2 High-temperature friction curves and wear morphologies of the three specimens

(a) friction coefficient; (b) wear morphology of H13 steel; (c) wear morphology of Ni60A coating; (d) wear morphology of Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating

层的36.1%,约为H13钢的8.6%。这表明,镍基碳化铬复合覆层在600℃时的高温耐磨性是H13钢的11.6倍,并且耐磨性比镍基合金覆层提高了2.8倍。H13钢在高温和持续磨损试验下会软化,硬度和强度降低,更容易因磨粒切削而脱落。覆层Ni60为高温合金,在试验条件下其硬度仍保持较高水平,摩擦损耗少。此外,高温氧化还会加剧材料的磨损。对镍基碳化铬复合覆层的磨损表面进行EDS面扫分析。光滑的层状物质(谱图1处)元素组成(质量分数,下同)为63.73% Fe、33.55% O和2.72% Cr,Fe含量明显大于其他部分,这部分应该来自盘试样,在高温对磨过程中,盘上的Fe和销上的Cr、Ni被氧化并压实,形成坚硬而光滑的釉层从而提高了材料的耐磨性。犁沟处的元素成分(谱图3)为18.17% Ni、29.98% Fe、18.17% O和13.15% Cr,剩余为Si,是复合覆层上的镍基合金部分。磨损最轻的谱图4处为Cr元素,质量分数达到35.15%,是覆层中碳化铬聚集的地方,耐磨性能得到进一步提升。

表2 销试样磨损质量损失  
Table 2 Wear mass loss of the pin specimen

试样	H13 钢	镍基堆焊层	镍基碳化铬层
磨损前/g	10.0702	10.4102	10.4423
磨损后/g	10.0551	10.4066	10.4410
磨损量/g	0.0151	0.0036	0.0013

## 2.2 疲劳裂纹的宏观形貌和产生机理

两种覆层的热疲劳裂纹长度和循环次数的关系见图3。镍基碳化铬堆焊层在循环48次后其疲劳裂纹长度达到200 μm;而镍基堆焊层在循环62次后裂纹长度才达到200 μm。这说明镍基堆焊层较镍基碳化铬堆焊层具有更好的抗裂纹萌生能力。在经过120次热疲劳循环后,镍基堆焊层的疲劳裂纹总长度为1348.5 μm,比镍基碳化铬堆焊层裂纹长度短518 μm。镍基堆焊层裂纹萌生后平均扩展速度为每次19.8 μm,镍基碳化铬堆焊层的平均速度为每次23.1 μm,这说明添加了碳化铬,镍基堆焊层的萌生热裂纹更快,扩展速度也加快。

图4为镍基碳化铬堆焊层的疲劳裂纹形貌。图4(a)为裂纹萌生阶段,热疲劳裂纹萌生多在材料应力集中处。图4(b)中在主裂纹侧边产生了二次裂纹,二次裂纹以一定角度不断延伸,逐步形成了网状裂纹,如图4(c)所示。图4(d)为热疲劳裂纹延伸末端,裂纹周围出现较多氧化物空洞。这表明热疲劳裂纹在材料的薄弱处萌生,沿着一定方向延伸,逐步形成网状裂纹。

从图4(d)中可以看出,在热疲劳裂纹的末端分布着许多氧化孔,能谱分析结果见表3。裂纹端1和2

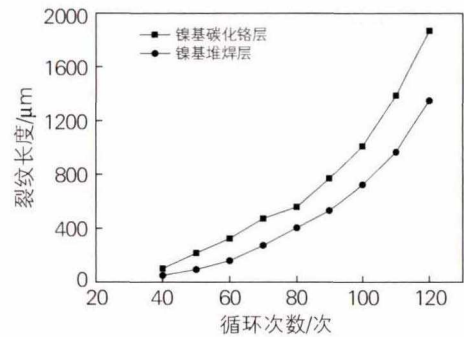


图3 试验覆层的热疲劳裂纹长度和循环次数曲线  
Fig. 3 Curves of thermal fatigue crack length and number of circles of the tested coatings

点中的氧元素含量超过2%,主要含有Ni、Cr和Fe。远离裂纹的3和4点几乎没有O元素。在热疲劳试验中,高温会使焊缝中的合金元素被氧化。由于焊缝中的合金元素主要是Ni和Cr,因此这两种元素具有一定的抗氧化性,但是反复的热循环和较高的温度会加剧氧化作用,因此合金元素仍被氧化。所得的氧化物附着在基材表面上。由于氧化物与γ-Ni基体之间的热膨胀系数差异较大,因此会产生较大的应力,从而导致氧化物与基体分离。随着热循环的进行,氧化程度加深,并且形成大量的氧化物孔洞。这些孔洞逐渐连接形成热疲劳裂纹,热裂纹沿氧化孔洞连续延伸。

表3 镍基碳化铬堆焊层热疲劳裂纹末端元素含量  
Table 3 Element content at fatigue crack end of the Ni-based Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> surfacing coating

谱图	C	O	Si	Cr	Fe	Ni
1		2.05	6.48	4.27	16.23	70.97
2	1.00	2.11	3.90	12.48	17.22	63.30
3		0.31	3.40	18.46	19.39	58.44
4		0.00	1.45	50.13	17.78	30.63

与Ni60合金堆焊层的组织相比,Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>堆焊层中的γ固溶体晶粒更细小,分布更加均匀,析出的强化相碳化物和硼化物的颗粒数量更多,同时Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>也有助于形成更多的碳化物颗粒<sup>[11]</sup>。这些增强相主要分布在晶界处,且随着温度的迅速循环,碳化铬颗粒与γ-Ni基体均会产生热膨胀和冷收缩,碳化物的膨胀系数与基体的膨胀系数相差较大(800℃下Ni60为18×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>,Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>为10.3×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)。碳化物抵抗激冷激热的能力比较差,在高温时会聚集长大,和基体晶粒的变形不协调,因此在两者之间的界面上产生交变拉应力,诱发晶界的薄弱处(夹杂及孔洞处)产生微裂纹,微裂纹处的碳化铬颗粒将从基体上脱落,使得裂纹沿着碳化铬与γ-Ni之间的晶界迅速扩展,导致热疲劳裂纹萌发早于

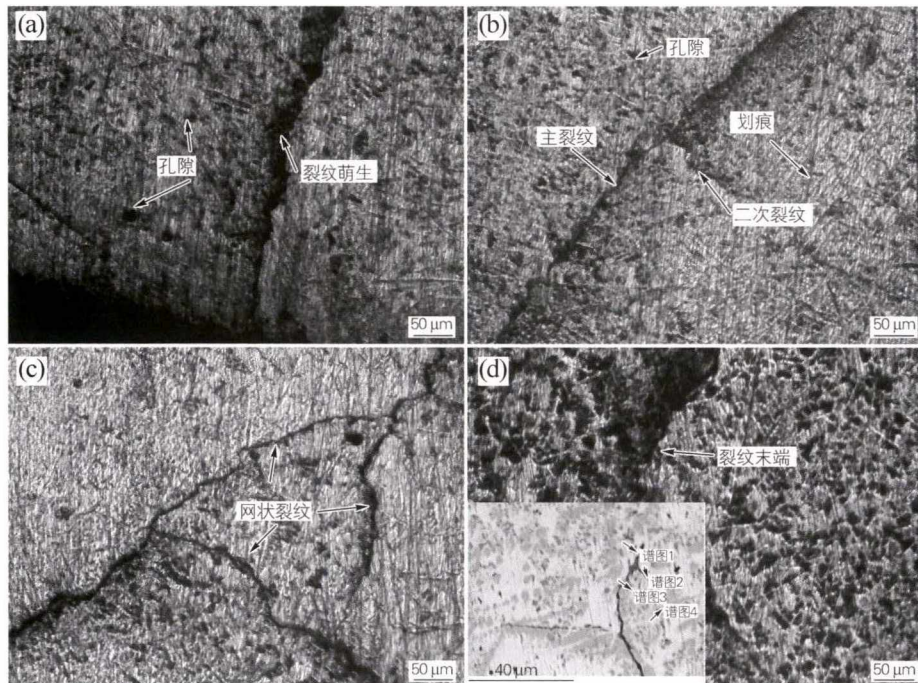


图 4 镍基碳化铬堆焊层的疲劳裂纹形貌

(a) 裂纹萌生;(b)二次裂纹;(c)网状裂纹;(d)裂纹末端

Fig. 4 Fatigue crack morphologies of the Ni-based Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> surfacing coating

(a) crack initiation; (b) secondary crack; (c) reticular crack; (d) crack end

Ni60A 合金堆焊层,其裂纹延伸速度也更快。

### 3 结论

1) Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>堆焊覆层的耐磨性是 Ni60A 堆焊覆层的 2.8 倍,是基材 H13 钢的 11.6 倍。镍基覆层可以显著降低 H13 钢的摩擦因数,加入碳化铬则会削弱覆层的摩擦性能,但仍优于基材。磨损初期主要是氧化磨损,之后转变成磨粒磨损和粘着磨损为主。

2) 添加了增强相 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Ni60A 复合堆焊层萌生热疲劳裂纹更快,裂纹扩展速度也加快。

3) 高温氧化形成大量的氧化孔洞,这些孔洞逐渐连接形成热疲劳裂纹,裂纹沿着氧化孔洞继续扩展,逐渐形成二次裂纹和网状裂纹。Ni60A/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合覆层含有更多的碳化物增强相,微裂纹处的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 颗粒从基体上脱落,导致其热疲劳性能下降。

#### 参考文献:

- [1] Kang J H, Park I W, Jae J S, et al. A study on die wear model of warm and hot forgings[J]. Metals and Materials, 1998, 4(3): 477-483.
- [2] Ebara R. Fatigue crack initiation and propagation behavior of forging die steels[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(5): 830-840.
- [3] Almeida V B, Takano E H, Mazzaro I, et al. Evaluation of Ni-Al coatings processed by plasma transferred arc[J]. Surface Engineering, 2013, 27(4): 266-271.
- [4] Navinšek B, Panjan P, Gorenjak F. Improvement of hot forging

manufacturing with PVD and DUPLEX coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 137(2/3): 255-264.

- [5] Wu P, Zhou C Z, Tang X N. Microstructural characterization and wear behavior of laser clad nickel-based and tungsten carbide composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166(1): 84-88.
- [6] Tosun G. Coating of AISI 1010 steel by Ni-WC using plasma transferred arc process[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(4): 3271-3277.
- [7] Reinaldo P R, D' Oliveira A S C M. NiCrSiB coatings deposited by plasma transferred arc on different steel substrates [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(2): 590-597.
- [8] Gurumoorthy K, Kamaraj M, Rao K P, et al. Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 456(1/2): 11-19.
- [9] Liyanage T, Fisher G, Gerlich A P. Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries[J]. Wear, 2012, 274-275(3): 345-354.
- [10] He P, Huang S, Huang Z, et al. Carbide reinforced Ni-Cr-B-Si-C composite coating on 4Cr5MoSiV1 steel by comprehensive plasma melt injection method[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 266: 134-145.
- [11] 牛龙飞, 洪峰, 王华君, 等. 碳化铬对 H13 钢镍基等离子弧堆焊覆层组织与硬度的影响[J]. 焊接技术, 2018, 47(6): 12-15. Niu Longfei, Hong Feng, Wang Huajun, et al. Effect of chromium carbide on microstructure and hardness of H13 steel nickel based plasma surfacing[J]. Welding Technology, 2018, 47(6): 12-15.
- [12] Chen Guoqing, Fu Xuesong, Wei Yanhui. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228(6): 276-282.

# 氧化镧添加剂和盐浴共渗温度对 TC4 钛合金硼氧共渗组织与性能的影响

刘阳光<sup>1</sup>, 许晓静<sup>1</sup>, 宋振华<sup>1</sup>, 汪洋<sup>2</sup>, 朱亮亮<sup>2</sup>, 朱劲松<sup>3</sup>

(1. 江苏大学 先进制造与现代装备技术工程研究院, 江苏 镇江 212013;

2. 江苏汤臣汽车零部件有限公司, 江苏 南通 226534; 3. 南亚奥里斯特机械有限公司, 江苏 南通 226600)

**摘要:**采用 OM、SEM、XRD、EDS、维氏硬度计以及摩擦试验机等分析手段研究了氧化镧添加剂和共渗温度对盐浴硼氧共渗试样组织与性能的影响。结果表明,共渗层厚度随着 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量的增加先增大后减小,当 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量为 3% 时,共渗层厚度达最大值(32.74 μm);与低温(950 ℃)相比,高温(1000 ℃)时盐浴共渗层具有较好的表面,较高的共渗层厚度(34.19 μm),较高表面硬度(1211 HV0.2),较大界面结合力(87.36 N)和更低的摩擦因数(0.28)。通过将温度对共渗过程的影响和试验结果分析得出:高温 1000 ℃ 盐浴硼氧共渗试验更有研究价值。

**关键词:**氧化镧;盐浴渗硼;TC4 钛合金;界面结合力;摩擦磨损性能

中图分类号: TG178 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2020)10-0180-07

## Effect of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additive and salt bath temperature on oxygen-boronized microstructure and properties of TC4 titanium alloy

Liu Yangguang<sup>1</sup>, Xu Xiaojing<sup>1</sup>, Song Zhenhua<sup>1</sup>, Wang Yang<sup>2</sup>, Zhu Liangliang<sup>2</sup>, Zhu Jinsong<sup>3</sup>

(1. Institute of Advanced Manufacturing and Modern Equipment Technology, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. Jiangsu Tangchen Auto Parts Co., Ltd., Nantong Jiangsu 226534, China;

3. South Asia ORESTE Machinery Co., Ltd., Nantong Jiangsu 226600, China)

**Abstract:** Effect of lanthanum oxide (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) additive and salt bath temperature on microstructure and properties of oxygen-boronized specimens were studied by means of OM, SEM, XRD, EDS, Vickers hardness tester and friction tester. The results show that the thickness of the oxygen-boronized layer increases first and then decreases with the increase of the amount of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. When the content of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is 3%, the thickness of the layer reaches the maximum value (32.74 μm). Compared with that obtained at the low temperature (950 ℃), at high temperature (1000 ℃) the layer has a better surface, with higher thickness (34.19 μm), higher surface hardness (1211 HV0.2), larger interfacial bonding force (87.36 N), and lower friction coefficient (0.28). By analyzing the influence of temperature on the process of boronizing and the test results, it is concluded that the salt bath boronizing test with lanthanum oxide additive at 1000 ℃ is more valuable.

**Keywords:** lanthanum oxide; salt bath boronizing; TC4 titanium alloy; interface bonding force; friction and wear resistance

收稿日期: 2020-03-16

基金项目: 江苏省重大成果转化项目(2016126)

作者简介: 刘阳光(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为钛合金及其复合材料, E-mail: 553242061@qq.com。通讯作者: 许晓静,教授,博导, E-mail: xjxu67@126.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2020.10.035

钛及钛合金因其诸多优异性能而广泛用于航空航天、汽车制造、生物医学等国民经济领域,且 TC4 钛合金是最常用的钛合金<sup>[1-2]</sup>。但是,钛合金“与生俱来”的表面硬度低等先天性缺陷,严重阻碍了其应用<sup>[3-4]</sup>。热浸渡技术表面渗硼、渗氧处理均可以改善钛合金的

[13] Wang Xinhong, Han Fang, Liu Xuemei, et al. Microstructure and wear properties of the Fe-Ti-V-Mo-C hardfacing alloy [J]. Wear, 2008, 265(5/6): 583-589.

[14] Imran M Khalid, Masood S H, Brandt Milan, et al. Thermal fatigue behavior of direct metal deposited H13 tool steel coating on copper alloy substrate [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2572-2250.

[15] 刘栋,李晓娟,刘哲,等. 不同制备工艺对镍基合金涂层耐热疲劳性能的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44(3): 159-166.

Liu Dong, Li Xiaojuan, Liu Zhe, et al. Influence of different preparing processes on thermal fatigue resistance of Ni-based alloy coatings [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(3): 159-166.

[16] 李爱农,游志涛,王华君,等. GH2135 合金粉末等离子弧覆层组织及其热疲劳性能 [J]. 焊接技术, 2018, 47(4): 49-53.

Li Ainong, You Zhitao, Wang Huajun, et al. Microstructure and thermal fatigue properties of plasma cladding layer using GH2135 alloy powder [J]. Welding Technology, 2018, 47(4): 49-53.