

激光熔覆 $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ 多相涂层耐蚀性和耐磨性研究

徐金涛^{1,2,3} 李安^{1,2,3} 刘栋^{1,2,3} 王华明^{1,2,3}

¹北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室,北京 100191

²国防科技工业激光增材制造技术研究应用中心,北京 100191

³大型整体金属构件激光直接制造教育部工程研究中心,北京 100191

摘要 以高纯 Cr、Ni、Si 粉末为原料,采用激光熔覆技术在奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 表面原位合成制备金属硅化物涂层,分析涂层微观组织结构并测量其显微硬度。采用阳极极化方法评价涂层在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学耐蚀性。在室温滑动干磨条件下评价其耐磨性,以失重表征耐磨性。利用光学显微镜(OM),扫描电子显微镜(SEM)等手段从显微角度研究涂层的失效行为。结果表明,涂层具有致密的微观多相结构,以 Cr_3Si 二元金属硅化物为硬质增强相,以 Ni 基固溶体 γ 相为塑性增韧基体相。涂层表现出更高的显微硬度。在 3.5% NaCl 溶液中涂层形成抗点蚀性能优异的钝化膜,使其具有优异的电化学耐蚀性能。在室温滑动干磨条件下涂层拥有更小的失重以及更稳定的摩擦系数,能够与对磨副 GCr15 发生更少的粘着,从而表现出优异的耐磨性。

关键词 激光技术;激光熔覆;原位合成;耐蚀性;耐磨性

中图分类号 TG144 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303006

Research on Corrosion Resistance and Wear Resistance of Laser Cladding $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ Multi-Phase Coating

Xu Jintao^{1,2,3} Li An^{1,2,3} Liu Dong^{1,2,3} Wang Huaming^{1,2,3}

¹National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China

²Key Laboratory of Aerospace Advanced Materials and Performance, Beijing 100191, China

³Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing for Large Metallic Components, Beijing 100191, China

Abstract The $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ multi-phase intermetallic coating on a substrate of austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti is *in situ* synthesized by laser cladding technique to investigate the microstructure and surface properties. Electrochemical corrosion resistance is examined by anodic polarization in the 3.5% (mass fraction) NaCl solution. Wear resistance is evaluated through mass loss of specimens in room-temperature dry sliding wear experiments. The micro failure mechanisms are investigated by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and other test measurements. Results indicate that the laser cladding coating has a multi-phase microstructure. The hard phase Cr_3Si is distributed in the Ni-base solid solution (γ) matrix, contributing to the higher micro-hardness. In the 3.5% NaCl solution, the passive film forms spontaneously on the surface of the coating exhibiting excellent pitting corrosion resistance. The laser cladding coating exhibits better wear resistance for the less mass loss and the lower friction coefficient.

Key words laser technique; laser cladding; *in situ* synthesized; corrosion; wear

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 160.3900

收稿日期: 2015-10-21; 收到修改稿日期: 2015-11-23

基金项目: 北京市科技计划课题(D141100004114001)

作者简介: 徐金涛(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆涂层方面的研究。E-mail: buaa060606@126.com

导师简介: 王华明(1962—),男,博士,教授,主要从事激光增材制造技术方面的研究。

E-mail: wanghm@buaa.edu.cn(通信联系人)

1 引言

钢铁材料在人类生产制造活动中具有非常重要的地位,而常温腐蚀和磨损是造成钢铁材料表面失效的重要原因,每年都会造成大量的经济损失^[1-4],因此对钢铁材料进行表面改性具有重大意义。激光熔覆涂层技术因其制备的涂层具有快凝的组织特征,冶金结合的涂层界面,成分和厚度可控性高,热影响区小等优势,是一种重要的表面改性技术^[5-11]。

金属硅化物由于原子间结合力较强,因而具有熔点高,高温蠕变强度高,高温抗氧化性能好和化学稳定性好等优点,可以作为一种重要的结构材料使用^[12-15]。 Cr_3Si 作为一种典型的二元金属硅化物,不仅具有一般金属硅化物的优异性能,还便于通过加入增韧相形成多相结构改善其固有的脆性问题,故而可以作为一种理想的涂层材料,这已经取得了一定的进展^[16-18]。Tang等^[12]的研究表明激光熔化沉积制备含金属硅化物及增韧相多相结构的合金具有优异的常温耐磨性。但通过激光熔覆原位合成金属硅化物的方法在不锈钢表面制备多相结构涂层,以此改善钢铁材料表面的耐蚀性和耐磨性的研究还鲜有报道。因此,本文在不锈钢1Cr18Ni9Ti表面采用激光熔覆的方法,原位合成了 $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ 多相涂层。通过电化学分析和滑动干磨实验分别评价其耐蚀性和耐磨性,并通过显微形貌观察分析了涂层常温条件下的高耐蚀性、高耐磨性的机理。

2 实验方法

2.1 实验原料

高纯Cr、Ni、Si粉末,纯度为99.98%,粒径约为45 μm ,北京兴荣源有限公司生产;奥氏体不锈钢1Cr18Ni9Ti,其尺寸为40 mm×50 mm×12 mm,上海日夕金属制品有限公司生产。

2.2 涂层制备

将高纯Cr、Ni、Si粉末,以质量分数为38.75%Cr-50%Ni-11.25%Si的配比充分混合后作为涂层原料。选用奥氏体不锈钢1Cr18Ni9Ti作为基体材料,表面先后经过打磨和丙酮清洗处理。将上述混合粉末均匀铺在处理后的奥氏体不锈钢1Cr18Ni9Ti表面,平均厚度约为2 mm。采用 CO_2 激光加工系统(型号GS-TFL-8000,输出功率为8 kW),在氧含量低于100 ppm的氩气环境中通过选区熔化的方式进行激光熔覆实验。激光熔覆工艺参数:输出功率为3.3 kW,束斑直径为6 mm,激光扫面速度为600 mm/min,搭接率为0.5。

2.3 显微结构组织分析

激光熔覆制备的涂层试样经打磨抛光后选用 $\text{HNO}_3:\text{HCl}=1:3$ 配比的腐蚀液进行腐蚀以观察金相,采用配有图像分析软件SiscIAS6.0的光学显微镜(OM,型号Olympus BX51M)和扫描电子显微镜(SEM,型号Apollo 300)来观测涂层微观组织结构;采用X射线衍射仪(XRD,型号Rigaku D/max 2500)和能量色散谱仪(EDS)确定涂层的相组成;采用显微硬度设备测量(型号HAZ-1000)沿材料纵向的显微硬度分布,载荷为500 g,加载时间为10 s。

2.4 电化学测试

电化学试样测试表面尺寸为10 mm×10 mm,表面经5000#砂纸打磨平整。通过CHI660C电化学分析测试仪器测量阳极极化曲线,以标准三电极电化学单元为手段,采用饱和甘汞电极为参比电极、铂电极为对电极。测量环境为室温下的质量分数为3.5%的NaCl溶液。

2.5 室温滑动干磨测试

在布鲁特UMT-2综合试验机上进行室温滑动干磨测试,以1Cr18Ni9Ti为对照试样,试样尺寸16 mm×9.6 mm×6.3 mm,对磨副为经过淬火和低温回火(硬度HRC63)的GCr15钢,试样均采用丙酮清洗干净并测量初重;在常温下,法向载荷为50 N,转速为100 r/min,相对滑动速度为0.183 m/s,试验时间为60 min,总滑动行程660 m,试验机自动记录磨损过程中系数-时间的变化曲线,以感量为0.1 mg的电子天平测量待测试样、对磨副原始重量以及磨损后的质量,用质量损失作为评价耐磨性的指标。通过SEM观察磨损后的表面并分析行为机理。

3 实验结果

3.1 显微组织分析

如图1所示为激光熔覆涂层与基体界面的SEM照片,表明涂层与基体呈冶金结合,结合紧密,无明显裂

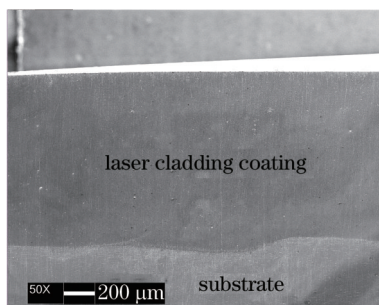


图1 涂层与基体界面的SEM微观照片

Fig.1 SEM micrograph showing cross-section of coating

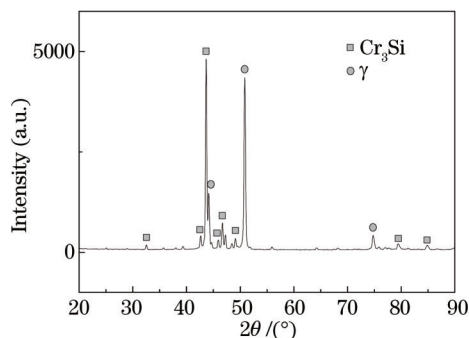


图2 激光熔覆 Cr₃Si/γ涂层的X射线衍射分析结果

Fig.2 XRD pattern of laser cladding Cr₃Si/γ coating

纹,涂层厚度约为1.13 mm。

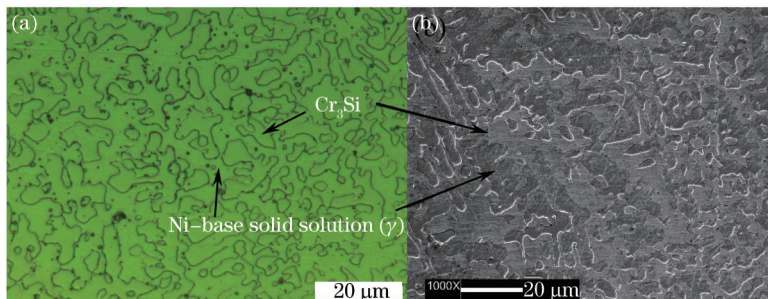


图3 激光熔覆 Cr₃Si/γ涂层的显微组织照片。(a) 光学显微照片;(b) 扫描电子显微照片

Fig.3 Micrographs showing microstructure of the laser cladding Cr₃Si/γcoating. (a) OM micrograph; (b) SEM micrograph

表1 激光熔覆涂层各相组成的能谱分析结果

Table 1 EDS analysis results of the Cr₃Si, γ phases in the laser cladding coating

	Cr	Ni	Si
Cr ₃ Si /%	71.6	3.6	25.4
γ /%	43.2	45.2	11.6

XRD结果分析如图2所示,通过激光熔覆技术在奥氏体不锈钢1Cr18Ni9Ti表面原位合成的金属硅化物涂层具有以金属硅化物 Cr₃Si和 Ni基固溶体γ相的两相结构。如图3所示,激光熔覆涂层的显微组织形貌由两相构成:初生的树枝晶和枝晶间组织。表1中的EDS分析数据表明初生的树枝晶为金属硅化物 Cr₃Si,枝晶间组织为 Ni基固溶体γ相。涂层显微组织表明金属硅化物 Cr₃Si相体积分数约为46%,Ni基固溶体γ相体积分数约为54%。Cr、Ni、Si元素的熔点分别为1857℃,1453℃和1410℃,熔点比较接近因而液态金属可以在熔池中产生强对流,凝固后的微观组织细小致密均匀,无气孔和裂纹。

3.2 显微硬度分析

图4(a)为涂层及不锈钢基体的显微硬度纵向变化,激光熔覆涂层拥有更高的硬度,主要原因是熔池的非平衡快速凝固以及涂层中含有的硬度较高的 Cr₃Si硬质相。图4(b)为激光熔覆涂层显微硬度测试压痕OM照片,表明测试时涂层几乎无明显裂纹萌生,压痕四角及棱边光滑。这说明材料还具备良好的塑性,这是由于硬质相均匀分布在塑性较好的 Ni基固溶体γ相中,γ相的塑性变形可以一定程度上释放裂纹尖端的应力集中,有效阻止裂纹的扩展。

3.3 电化学腐蚀耐蚀性

图5为室温条件下,3.5%(质量分数) NaCl溶液中奥氏体不锈钢1Cr18Ni9Ti以及激光熔覆涂层的阳极极化曲线(SCE:标准饱和甘汞电极),由于没有明显的活性钝化转变区,说明两种材料都可以在该溶液中发生自发钝化。但激光熔覆涂层的破裂电位(E_b)约为0.800 V,远远高于1Cr18Ni9Ti的破裂电位(约为0.360 V),这表明激光熔覆涂层在3.5% NaCl溶液中拥有更好的耐蚀性能。

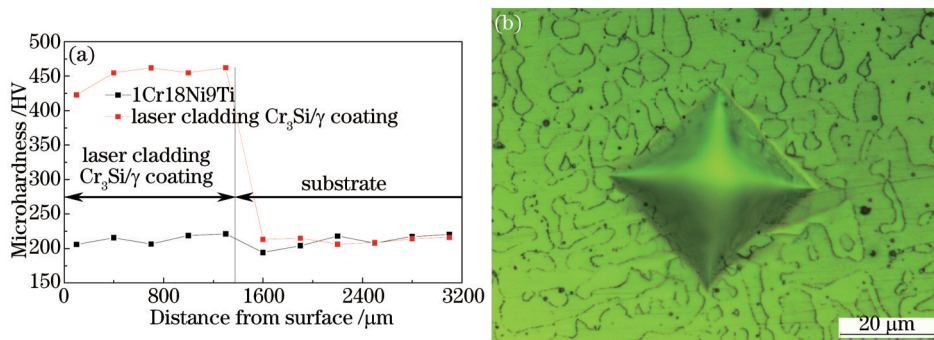


图4 (a) 不锈钢1Cr18Ni9Ti和激光熔覆Cr₃Si/γ涂层的纵向显微硬度变化分析示意图;
(b) 激光熔覆涂层显微硬度测试压痕OM照片

Fig.4 (a) Micro-hardness profiles of laser cladding Cr₃Si/γ coating and the substrate; (b) OM micrograph showing Micro-hardness indentation morphology of laser cladding Cr₃Si/γ coating

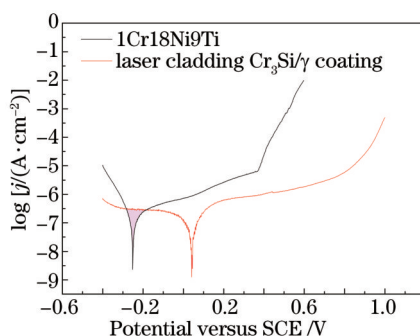


图5 扫描速度为5 mV/s时,不锈钢1Cr18Ni9Ti和激光熔覆Cr₃Si/γ涂层在3.5% NaCl溶液中的阳极极化曲线

Fig.5 Anodic polarization curves of stainless steel and laser cladding Cr₃Si/γ coating in 3.5% NaCl solution at a scanning rate of 5 mV/s

图6是两种试样在3.5% NaCl溶液中阳极极化后的表面腐蚀状况的显微照片。在图6(a)和(b)中,不锈钢1Cr18Ni9Ti试样表面出现严重点蚀,点蚀坑半径约80 μm。而在图6(c)和(d)的激光熔覆涂层的表面几乎没有出现局部腐蚀,这表明激光熔覆涂层拥有更好的耐蚀性能。

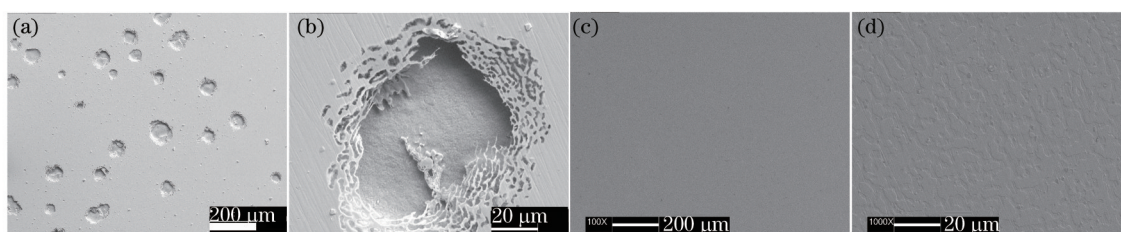


图6 各试样在3.5% NaCl溶液中完成阳极极化曲线测试后表面的不同倍率SEM显微照片。(a) 不锈钢1Cr18Ni9Ti,100倍;
(b) 不锈钢1Cr18Ni9Ti,1000倍; (c) 激光熔覆Cr₃Si/γ涂层,100倍; (d) 激光熔覆Cr₃Si/γ涂层, 1000倍

Fig.6 Surface morphologies of 1Cr18Ni9T and laser cladding Cr₃Si/γ coating after anodic potentiodynamic polarization in 3.5% NaCl solution.

(a) 1Cr18Ni9Ti, ×100; (b) 1Cr18Ni9Ti, ×1000; (c) laser cladding Cr₃Si/γ coating, ×100; (d) laser cladding Cr₃Si/γ coating, ×1000

激光熔覆涂层表现出更好的耐蚀性是因为金属硅化物表面会生成稳定并具有高自我修复能力的钝化膜^[19],能够有效阻止试样被腐蚀。金属硅化物生成的钝化膜含有Cr₂O₃和Si的氧化物,属于P型半导体。P型半导体与N型半导体相比,不易吸附Cl⁻离子,减少Cl⁻离子对腐蚀的促进作用,微小的点蚀坑难以生成,因而具有更好的抗点蚀性能^[20-21]。而1Cr18Ni9Ti生成的钝化膜点蚀敏感性高,使得许多微小的点蚀坑逐渐长大连成一片所形成巨大点蚀坑。

激光熔覆涂层采取原位合成方式制备,其两相结构拥有更强的相间结合力,结合更为紧密,能够有效阻止活性高的Cl⁻离子渗入、吸附于相界,从而大大降低了相界上的腐蚀。

金属硅化物Cr₃Si有较强的原子间结合力,同时具有金属键和共价键的性质,因此Cr₃Si本身具有很高的化学稳定性和耐蚀性。出现了图6(d)中的微观形貌是因为Ni基固溶体γ相拥有更低的相间电位,会作为阴

极牺牲而保护 Cr_3Si 硬质相,但是这两相之间有着相似的化学组成,因而不会导致相间电位过大而减弱激光熔覆涂层的耐蚀性。

3.4 室温滑动干磨耐磨性

图 7 是不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和激光熔覆涂层及其对应磨副的磨损质量损失示意图。图 7(a)表明激光熔覆涂层拥有更小的质量损失,约为不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的质量损失的 7.14%。图 7(b)表明涂层对应的对磨副的质量损失也同比更小,约为另一对磨副的质量损失的 3.33%。这表明相同条件下,激光熔覆涂层具有更优异的耐磨性能,能有效减少磨损现象。

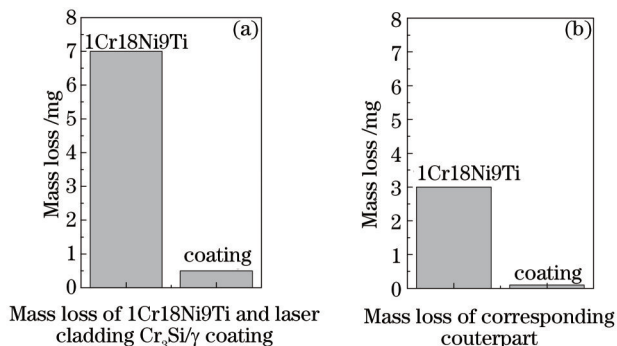


图 7 (a) 不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和激光熔覆 $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ 涂层试样失重对比分析; (b) 两种试样所对应的对磨副的失重对比分析

Fig.7 (a) Mass loss of 1Cr18Ni9Ti and laser cladding $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ coating; (b) mass loss of the corresponding counterparts

图 8 所示为不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和激光熔覆涂层磨损表面 SEM 显微照片,可见不锈钢 1Cr18Ni9Ti 磨损表面塑性变形严重,磨损面积大,粘着特征明显,出现很深的犁沟,且布满磨屑脱落的痕迹;而激光熔覆涂层磨损表面较为光滑,划痕浅且磨损面积小,无明显粘着痕迹。这表明激光熔覆涂层磨损过程中无粘着现象,产生磨屑较少,表现出优异的耐磨性。

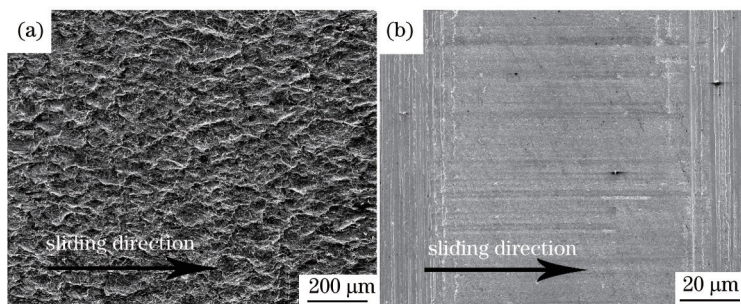


图 8 摩擦磨损实验后试样磨损表面的 SEM 显微照片。(a) 不锈钢 1Cr18Ni9Ti; (b) 激光熔覆 $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ 涂层

Fig.8 Morphologies of the worn surfaces after wear test. (a) 1Cr18Ni9Ti; (b) laser cladding $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ coating

图 9 所示为两张材料产生的磨屑 SEM 显微照片,不锈钢 1Cr18Ni9Ti 产生的磨屑形状不规则,表面粗糙,粒径分布很不均匀,大大加强了磨损。而激光熔覆涂层所产生的磨屑则呈现棒状,直径在 $15\ \mu\text{m}$ 左右,表面相对较为光滑,这种形貌对于磨损的促进作用较小,因而提高了激光熔覆涂层的耐磨性。

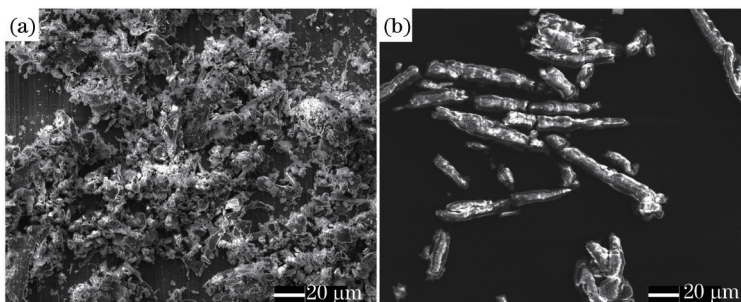


图 9 摩擦磨损实验中所产生磨屑的 SEM 显微照片。(a) 不锈钢 1Cr18Ni9Ti; (b) 激光熔覆 $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ 涂层

Fig.9 SEM morphologies of the wear debris during the wear test. (a) 1Cr18Ni9Ti; (b) laser cladding $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ coating

如图 10 是两种材料在滑动干磨中表现出的摩擦系数,1Cr18Ni9Ti 的摩擦系数波动性很大,而且随着磨损的进行摩擦系数快速增加再缓慢降低,而激光熔覆涂层则表现出更低且平稳的摩擦系数,没有发生摩擦系数的快速增加,这说明激光熔覆涂层在滑动中更为稳定,摩擦系数较低。

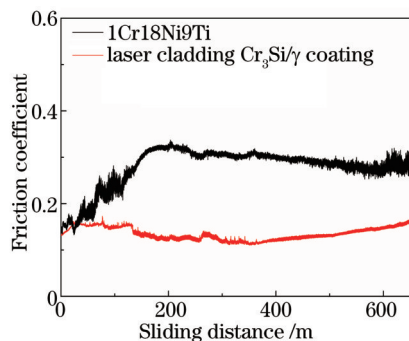


图 10 不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和激光熔覆 $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ 涂层的表面摩擦系数变化分析

Fig.10 Friction coefficient of 1Cr18Ni9Ti and laser cladding $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ coating

激光熔覆涂层表现出高耐磨性有多方面原因。首先,由于 1Cr18Ni9Ti 与 GCr15 都是富 Fe 材料,成分与结构类似,在磨损过程中会发生较为严重的粘着行为,增加 1Cr18Ni9Ti 和对磨副的相互磨损。激光熔覆涂层的两相结构与 GCr15 的微观结构完全不同。金属硅化物原子间结合力高,结合键中的共价键成分使材料具有优异的耐磨料磨损和粘着磨损性能,表现出优异的金属粘着抗力,大大减少磨损过程中的粘着。其次,硬度较低的 Ni 基固溶体 γ 相首先被磨损,使得高硬度的硬质相 Cr_3Si 直接暴露在对磨面上,有效阻止磨损的进一步发生。再次,原位合成的制备方式使得涂层微观缺陷和夹杂大大减少,有效提高了相间结合力,熔池的非平衡快速凝固过程使得组织细小均匀,提高表面强度^[22]。最后,强韧性较好的 γ 相可以牢固支撑 Cr_3Si 硬质相,阻碍裂纹扩展和材料的剥落,有效抑制微裂纹的产生和扩展。因此,激光熔覆涂层可以表现出更高的耐磨性。

激光熔覆涂层可以表现出更低更稳定的摩擦系数,主要是由于涂层优异的金属粘着抗力,大大减少磨损过程中的粘着,故而与不锈钢 1Cr18Ni9Ti 相比可以表现出更低的摩擦系数。此外在磨损过程中,产生的表面光滑、呈棒状的磨屑可能一定程度上起到滚动摩擦代替滑动摩擦的效果,有利于降低摩擦系数。激光熔覆涂层与不锈钢 1Cr18Ni9Ti 所表现出的摩擦系数的绝对数值均不高,这可能与仪器及其参数设置有关。

4 结 论

1) 通过激光熔覆的方式制备能得到 $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma$ 多相涂层,具有以金属硅化物 Cr_3Si 为增强相、以 Ni 基固溶体 γ 相为基体的多相结构。

2) 激光熔覆金属硅化物涂层由于生成稳定的钝化膜使得涂层在 3.5% NaCl 溶液中表现出更高的破裂电位,比传统的不锈钢 1Cr18Ni9Ti 拥有更优异的耐蚀性以及抗点蚀性能。

3) 激光熔覆金属硅化物涂层由于独特的多相结构以及更高的表面强度,使得它比 1Cr18Ni9Ti 拥有更优异的耐磨性能,从而表现出更低且更稳定的摩擦系数。

参 考 文 献

- 1 Sun Rong. Study on Cathodic Oxygen Reduction Reaction at Steel in Seawater[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
孙 蓉. 海水中钢铁材料上阴极氧气还原反应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- 2 Li Xiaogang, Dong Chaofang, Gao Jin, *et al.*. The scientific research and data-sharing network of steels atmosphere corrosion in China [J]. Metal World, 2010, 4: 1-8.
李晓刚, 董超芳, 高 瑾, 等. 中国钢铁材料大气腐蚀科学研究和数据共享网络建设[J]. 金属世界, 2010, 4: 1-8.
- 3 Wei Minxian. Oxidation Wear and Mild-to-Severe Wear Transition of Ferrous Alloy under Severe Condition[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
魏敏先. 严酷工况下钢铁材料的氧化磨损及轻微—严重磨损转变[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- 4 Zhang Yongzhen, Zhu Jun, Liu Weimin, *et al.*. Investigation of topographical characteristics and tribological behavior of compacted graphite iron in sliding against 40Cr steel under different dry sliding conditions[J]. Tribology, 2001, 21(1): 37-41.

- 张永振, 朱 均, 刘维民, 等. 不同滑动干摩擦条件下钢/铁摩擦副的摩擦磨损性能与表面形貌特征研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(1): 37-41.
- 5 Liu Shunhong. Laser Materials Processing[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011.
刘顺洪. 激光制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- 6 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida, *et al.*. Research development of nanostructured coatings prepared by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1698-1709.
王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光表面熔覆制备纳米结构涂层的研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1698-1709.
- 7 Feng Shurong, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Wear resistance of laser clad hard particles reinforce intermetallic composite coating on TA15 alloy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0203002.
冯淑容, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203002.
- 8 He Xiangming, Liu Xiubo, Yang Maosheng, *et al.*. Elevated temperature tribological behaviors of laser cladding nickel-based composite coating on austenitic stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0903007.
何祥明, 刘秀波, 杨茂盛, 等. 奥氏体不锈钢激光熔覆镍基复合涂层高温磨损行为[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0903007.
- 9 Zhang Xianhu, Chao Mingju, Liang Erjun, *et al.*. In-situ synthesis of TiC-ZrC particulate reinforced Ni-based composite coatings by cladding[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 998-1004.
张现虎, 晁明举, 梁二军, 等. 激光熔覆原位生成 TiC-ZrC 颗粒增强镍基复合涂层[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 998-1004.
- 10 Liu Xiaopeng, Zhang Peilei, Lu Yunlong, *et al.*. Study on tribological properties of Ni-based silicide coating on copper by laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0906005.
刘晓鹏, 张培磊, 卢云龙, 等. 纯铜表面激光熔覆 Ni 基硅化物涂层摩擦学性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0906005.
- 11 Li Min, Huang Jian, Zhu Yanyan, *et al.*. Effect of BN content on microstructure evolution and wear property of in situ Ti/(TiB+TiN) hybrid composite coating by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903001.
李 敏, 黄 坚, 朱彦彦, 等. BN 含量对激光熔覆 TiB+TiN 复合涂层显微组织和摩擦性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903001.
- 12 Tang H B, Fang Y L, Wang H M. Microstructure and dry sliding wear resistance of a Cr13Ni5Si2 ternary metal silicide alloy[J]. Acta Materialia, 2004, 52(7): 1773-1783.
- 13 Cruse T A, Newkirk J W. Evaluation of methods to produce tough Cr3Si based composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 1997, 239-240: 410-418.
- 14 Zhang Liqiang, Wang Huaming. Microstructure and high-temperature sliding wear resistance of a Cr3Si/Cr13Ni5Si2 intermetallic alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(5): 512-514.
张立强, 王华明. Cr3Si/Cr13Ni5Si2 金属间化合物合金组织与高温滑动磨损性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(5): 512-514.
- 15 Yu Pengcheng, Liu Xiubo, Lu Xiaolong, *et al.*. Study on tribology and high-temperature oxidation resistance of laser cladding composite coatings on Ti6Al4V alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1003004.
余鹏程, 刘秀波, 陆小龙, 等. Ti6Al4V 合金激光熔覆复合涂层的摩擦学和高温抗氧化性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003004.
- 16 Wang H M, Duan G. Wear and corrosion behavior of laser clad Cr3Si reinforced intermetallic composite coatings[J]. Intermetallics, 2003, 11(8): 755-762.
- 17 Jian Lina, Zhang Lingyun, Yu Rongli, *et al.*. Microstructure and wear resistance of laser clad Cr13Ni5Si2-based metal silicide coating on titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(6): 936-939.
菅丽娜, 张凌云, 于荣莉, 等. 钛合金表面激光熔敷 Cr13Ni5Si2 基金属硅化物涂层组织与耐磨性[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(6): 936-939.
- 18 Zhang Weiping, Lu Donghua, Yu Juanjuan, *et al.*. Application of zirconia toughening mechanism on laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103008.
张维平, 路董华, 余娟娟, 等. 氧化锆增韧机制在激光熔覆技术中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103008.
- 19 Yuan L, Wang H M. Corrosion behaviors of a γ -toughened Cr13Ni5Si2/Cr3Ni5Si2 multi-phase ternary metal silicide alloy in NaCl solution [J]. Electrochimica Acta, 2008, 54(2): 421-429.
- 20 Gray J J, Orme C A. Electrochemical impedance spectroscopy study of the passive films of alloy 22 in low pH nitrate and chloride environments[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(7): 2370-2375.
- 21 Kocijan A, Donik Č, Jenko M. Electrochemical and XPS studies of the passive film formed on stainless steels in borate buffer and chloride solutions[J]. Corrosion Science, 2007, 49(5): 2083-2098.
- 22 Wu Y, Wang A H, Zhang Z, *et al.*. Wear resistance of in situ synthesized titanium compound coatings produced by laser alloying technique [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258: 711-715.