

激光熔覆 NiAl-SiC 复合涂层的组织与摩擦性能

吴王平*, 刘剑文, 王辉, 王晓杰

常州大学机械工程学院, 江苏 常州 213164

摘要 采用激光熔覆技术,在 1Cr17Ni2 钢表面制备了不同含量 SiC 的 NiAl-SiC 复合涂层,研究分析了熔覆层的物相、微观组织结构、化学成分和摩擦性能。结果表明,熔覆层主要包含 AlFe_{0.23}Ni_{0.77} 和 AlNi 物相;NiAl-SiC 复合涂层中存在微裂纹、空隙及脱落等缺陷;SiC 质量分数为 3% 的熔覆层和基体的平均摩擦系数分别为 0.731 和 1.260,熔覆层的耐磨性优于基体的。

关键词 激光技术;激光熔覆;NiAl-SiC;涂层;显微组织;摩擦性能

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091406

Microstructure and Tribological Performance of NiAl-SiC Composite Coating by Laser Cladding

Wu Wangping*, Liu Jianwen, Wang Hui, Wang Xiaojie

School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China

Abstract The NiAl-SiC composite coatings with different SiC contents are prepared on the surfaces of 1Cr17Ni2 steels by the laser cladding technique, and the phases, microstructures, chemical compositions and friction properties of the cladding layers are investigated. The results show that the cladding layers mainly contain AlFe_{0.23}Ni_{0.77} and AlNi phases. The NiAl-SiC composite coatings have some defects, such as micro cracks, voids and falling off. The average friction coefficients of the cladding layer with a SiC mass fraction of 3% and the substrate are 0.731 and 1.260, respectively, indicating that the wear resistance property of the cladding layer is superior to that of the substrate.

Key words laser technique; laser cladding; NiAl-SiC; coating; microstructure; friction property

OCIS codes 140.3390; 160.6990; 310.3840

1 引言

激光熔覆技术利用高能量密度激光束将同步送入或预置于基体表面的合金粉末连同基材表面的薄层一起熔化,使涂层材料与基体实现冶金结合^[1-2]。激光熔覆技术具有以下优势与特点^[2]:基体产生的热影响区较小,工件变形较小;熔覆层与基体可实现冶金结合;熔覆层晶粒细小,结构致密,硬度较高,耐磨、抗腐蚀性能优异;可以选择性局部细微修复,有效降低修复成本;粉末材料体系适应性较高。

激光熔覆技术制备的熔覆层主要为氧化物和碳化物颗粒改性复合涂层。通过添加氧化物颗粒能提

高基体的耐磨性、耐腐蚀性和抗热冲击性及机械性能;掺杂碳化物颗粒不仅可以起到增强相的作用,而且可以细化晶粒尺寸,提高基体的耐磨性、耐腐蚀性和机械性能。Al₂O₃、ZrO₂、TiO₂ 等氧化物陶瓷粉末具有优良的抗高温氧化、隔热、耐磨和耐蚀性能,是重要的激光熔覆材料^[3]。采用激光熔覆技术,在不锈钢和其他合金表面能够制备 Al-Al₂O₃、Al₂O₃-TiO₂、CaO-ZrO₂-SiO₂、ZrO₂-Y₂O₃、TiB₂-TiC-Al₂O₃ 等陶瓷涂层^[4-8]。然而,激光熔覆氧化物陶瓷涂层存在脆性高、结合强度低、易产生裂纹等缺陷。在激光烧结冷却过程中,涂层会收缩并导致部分开裂,从而形成缺陷^[9]。另外,添加的碳化物陶瓷粉末

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-03-23; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 2017 年江苏省大学生科技创新基金(2017-03-C-13)、江苏省科技厅产学研前瞻项目(BY2016029-03)、常州大学科研启动基金(ZMF15020070)

* E-mail: wwp3.14@163.com

有 SiC、TiC、WC 等,激光熔覆的碳化物及改性复合涂层主要有 TiC^[10-11]、SiC-SiO₂^[12] 和 SiC-Si^[13] 复合陶瓷涂层,以及 Ni-TiC^[14-15]、Ni-TiC-C^[16]、Fe-TiC^[17]、NiCrAl-TiC^[18]、TiC-CNTs^[19] 和 Ni-WC^[20-24] 等。SiC 具有较高的熔点,较大的硬度及良好的耐磨性、耐蚀性等特点,且价格低廉,因此, SiC 常被用作材料的增强相。激光熔覆制备 SiC 陶瓷颗粒改性复合涂层的显微硬度得到显著提高,原因是枝晶组织固溶的大量 Cr、Fe、Si 等元素起到了固溶强化的作用,同时, Si、C 与 Cr、Fe 生成的化合物增强相起到第二相强化作用^[25-26]。此外,研究表明,高温条件下,石墨碳基体上的 SiC 涂层表面可以形成一种致密的且与基体结合紧密的 SiO₂ 薄膜,其可以显著提高基体的耐蚀性和抗氧化性^[27]。

庄乔乔等^[28]通过激光熔覆技术,在铜基体上制备了 Ni-Ti-Si 涂层,涂层的硬度约为铜基体的 9.5 倍,且具有优异的耐磨性。李明川等^[29]采用激光熔覆技术,在铜基体上制备了 Ni-Mo-Si 复合涂层,涂

表 1 1Cr17Ni2 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 1Cr17Ni2 steel (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Value	0.11-0.17	≤0.80	≤0.80	16.0-18.0	1.50-2.50	≤0.03	≤0.035

在原始 NiAl 粉末中分别加入质量分数为 3%、9% 和 12% 的 SiC 粉末,通过球磨机搅拌 0.5 h 混合均匀。先将 1Cr17Ni2 基体置于激光扫描工作台,再将球磨的混合粉末与乙醇混合后均匀地涂在砂纸打磨的 1Cr17Ni2 基体表面,厚度为 0.2~0.3 mm。打开激光器调整光斑位置,采用单道激光熔覆方式,扫描时间为 3.5 ms。激光器采用 Nd:YAG 激光发射器,激光熔覆频率为 8 Hz,光斑直径为 3.0 mm,激光功率为 700 W,扫描速率为 600 mm·s⁻¹。采用氮气作为保护气体,防止高温使熔覆层快速氧化。以掺杂 SiC 的质量分数分别为 3%、9% 和 12% 的混合粉末作为熔覆粉末,通过激光熔覆制备得到的试样分别命名为样品 1、样品 2 和样品 3。

经砂纸打磨后的试样熔覆层在抛光机上进行表面抛光处理,最后用乙醇清洗表面并烘干。采用 X 射线衍射仪(XRD)对熔覆层表面进行物相分析;采用质量分数为 5% 的硝酸溶液对试样 2 和试样 3 的抛光截面进行腐蚀,用数字显微镜(OM)对其进行观察分析;通过扫描式电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)对试样的微观组织和化学成分进行分析。

用材料表面性能综合测试仪对熔覆层和基材进行摩擦磨损性能检测,实验前将试样表面磨平后抛

层的硬度比铜基体增大了 15~22 倍,且涂层的断裂韧性和磨损性能有一定的提高。翟建华等^[30]在球墨铸铁 QT450-10 表面激光熔覆了镍基合金,结果表明,熔覆层硬度比基体增大了 1.5 倍,球墨铸铁的强度得到提高。

然而,关于激光熔覆 NiAl-SiC 复合涂层的研究鲜有报道。NiAl 金属间化合物具有密度小、导热性能好、熔点高等特点,且高温时具有良好的抗氧化性,在原子能工业、催化工业以及电子工业领域具有潜在的应用前景。本文以掺杂少量 SiC 的 NiAl 复合粉末作为熔覆材料,采用预置粉末的方式在 1Cr17Ni2 基体表面激光熔覆制备了掺杂不同 SiC 含量的 NiAl-SiC 复合涂层,研究了 NiAl-SiC 复合涂层的微观组织及摩擦性能。

2 实验材料及方法

采用直径为 10 mm 的 1Cr17Ni2 钢作为实验材料,其化学成分见表 1。

光处理。采用球盘往复式磨损,磨球材质为 GCr 钢,直径为 5 mm;实验参数为:1000 g 力传感器,加载载荷 500 g,往复行程 3 mm,采样频率 1 Hz,样品台转速 120 r·min⁻¹,磨损时间 30 min,常温下进行实验。采用 SEM 观察试样表面的磨损形貌,并计算熔覆层的摩擦系数。

3 实验结果与讨论

3.1 原材料分析

NiAl 和 SiC 粉末的 XRD 图谱和 SEM 形貌如图 1 所示。可以看出, NiAl 粉末主要包含了 Al₃Ni₂ 和 Al₃Ni 两物相,不存在其他杂质; NiAl 粉末颗粒呈无规则形状,表面较光滑,颗粒的平均尺寸为 8~10 μm。SiC 粉末的主要成分是 SiC; SiC 粉末颗粒微观结构呈明显不规则形状且边缘有较多毛刺,微观表面较粗糙,颗粒的平均尺寸为 2~5 μm。

3.2 熔覆层的形貌

在激光熔覆的初始阶段,当激光束辐射到烧结区域时,低熔点黏结金属粉末先发生熔化;然后,随着更多液相的形成,原始粉末的刚性骨架发生坍塌;最终,当黏结金属粉末完全熔化时,液相包裹并润湿固相,把未熔化的高熔点粉末粘结起

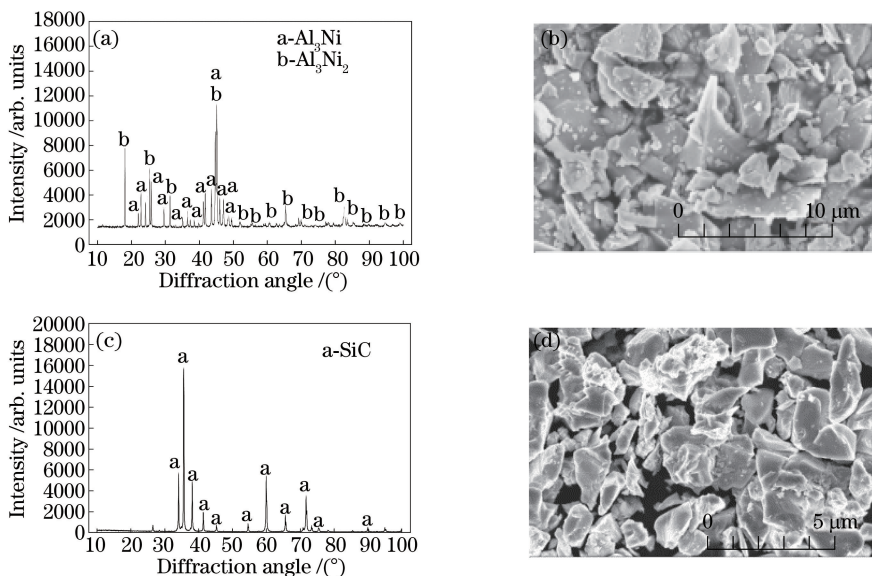


图 1 NiAl 和 SiC 粉末的 XRD 图谱和 SEM 形貌。(a) NiAl, XRD; (b) NiAl, SEM; (c) SiC, XRD; (d) SiC, SEM
 Fig. 1 XRD patterns and SEM images of NiAl and SiC powders. (a) NiAl, XRD; (b) NiAl, SEM; (c) SiC, XRD; (d) SiC, SEM

来成为原型件。

试样 2 和试样 3 熔覆层的宏观形貌如图 2、3 所示。可以看出,试样 2 和试样 3 的熔覆层都有明显的裂纹缺陷,且当 SiC 的含量增大时,熔覆层出现裂纹

的趋势更加显著。同时,可以看出,试样 2 和试样 3 的涂层局部有脱落的现象,这可能是因为激光熔覆过程中扫描速度过快,预置粉末不均匀;也可能是熔覆层与基材的冶金性能差异较大,导致结合性不好。

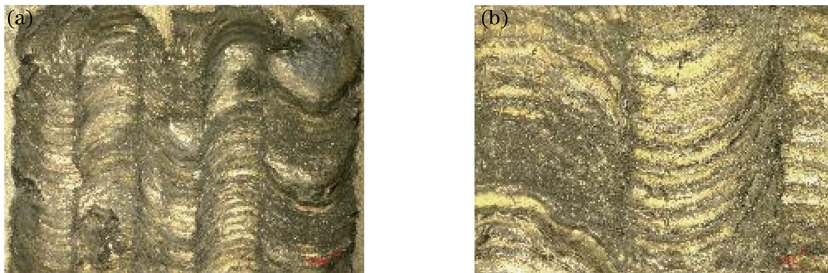


图 2 试样 2 熔覆层的宏观形貌
 Fig. 2 Macro-morphology of cladding layer of sample 2

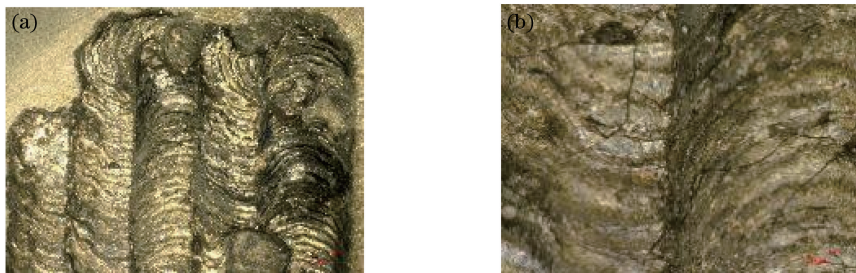


图 3 试样 3 熔覆层的宏观形貌
 Fig. 3 Macro-morphology of cladding layer of sample 3

试样 2 和试样 3 熔覆层横截面的 OM 图像如图 4 所示。可以看出,试样 2 的涂层主要由熔覆层、

界面熔合区、热影响区、搭接区和基板构成,且各区域间结合良好,没有气孔、裂纹等缺陷。在基

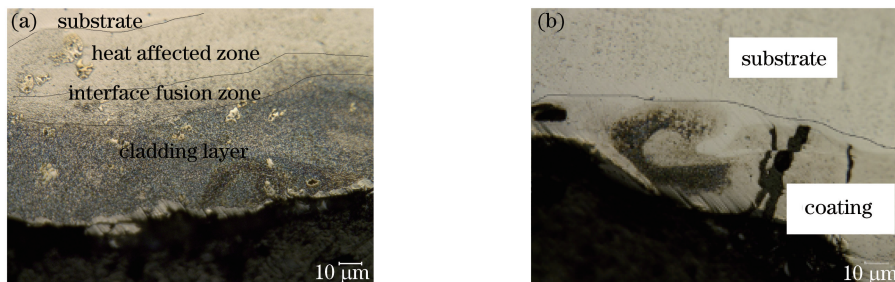


图4 熔覆层横截面的 OM 图像。(a) 试样 2;(b) 试样 3

Fig. 4 OM image of cross section of cladding layer. (a) Sample 2; (b) sample 3

板与熔覆层之间有一条细小的熔合线,称为界面熔合区。界面熔合区清晰,且宽度较小,这是因为在高能量密度激光的瞬间作用下,基板表面快速形成熔池,熔池与母材之间元素含量的差异形成了很大的浓度梯度,合金元素强烈扩散。在快速冷却过程中,过渡层传递热量,熔合区的存在确保了涂层与基板形成良好的冶金结合,界面结合强度得到提高。基板和熔合区之间的区域为热影响区。上一道激光熔覆完成后基板的温度升高,相当于提高了下一道激光熔覆基板的初始温度,对基板进行了预热。随着基板初始温度的升高,基板材料对激光的吸收率也逐渐增大。因此,在相同能量密度激光的作用下,基板可以吸收更多的激光能量,基板表面的温度更高,基板的热影响区域增大。试样 3 的涂层横截面有孔洞和微裂纹出现,且熔覆层厚度不均。在激光作用下,结合区部分基材和熔覆材料在高温下熔化并迅速冷却形成冶金结合,可以明显看到试样 3 熔覆层存在裂纹、空隙及脱落等缺陷,这可能是因为粉末熔化温度和基材温度相差太大,冷却过程中涂层与基

体热膨胀系数的差异导致熔覆层产生了裂纹,也可能是因为激光扫描速度过快,熔覆材料与基材的冶金结合性太差。

3.3 熔覆层的物相

不同试样熔覆层表面的 XRD 图谱如图 5 所示。可以看出,试样 1 熔覆层的主要物相是 $\text{AlFe}_{0.23}\text{Ni}_{0.77}$ 和 AlNi ,且还存在较少的 Ni-Cr-Fe 。试样 2 和试样 3 熔覆层的主要物相是 (Fe, Ni) 、 $\text{AlFe}_{0.23}\text{Ni}_{0.77}$ 和 AlNi ,并含有少量的 Ni-Cr-Fe ;试样 2 熔覆层中的 AlNi 含量略大于试样 3 的。由此可见,随着 SiC 含量的增大,熔覆层中出现了新的物相,而其他物相的含量并未发生明显的变化。 Ni 、 Al 等涂层中的合金元素与基材中的 Fe 、 Cr 发生扩散,由于激光熔覆过程属于快速凝固过程,高能量的激光束照射到涂层后迅速移开,合金涂层被瞬时加热熔化又瞬时凝固结晶,基材表面发生了微熔,同时,各元素在涂层区与基材之间存在较大的浓度梯度,因此,各元素必然要进行互扩散,从而形成冶金结合。

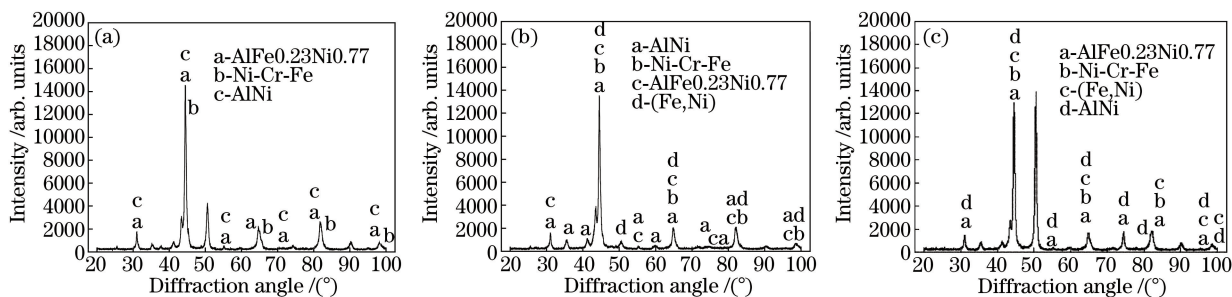


图5 不同试样熔覆层表面的 XRD 图谱。(a) 试样 1;(b) 试样 2;(c) 试样 3

Fig. 5 XRD patterns of cladding layer surfaces of different samples. (a) Sample 1; (b) sample 2; (b) sample 3

不同试样熔覆层的 SEM 形貌和 EDS 能谱如图 6 所示,熔覆层表面的化学成分见表 2。试样 1 熔覆层中 Ni 元素的质量分数大于 50%, Cr 和 Fe 元素的含量均小于 20%,其余元素所占比例较小。试样 2 熔覆层中 Ni 元素的质量分数大于 40%, Cr 、 Fe 和

Al 元素的质量分数略大于 10%,其余元素所占比例相对较小。与试样 1 相比,试样 2 熔覆层中主要元素的含量小于试样 1 的,而一些含量较少的元素所占比例增大,并新增了 Mo 、 Ti 和 F 三种元素,但这三种元素所占比例较小。试样 3 熔覆层中的大部

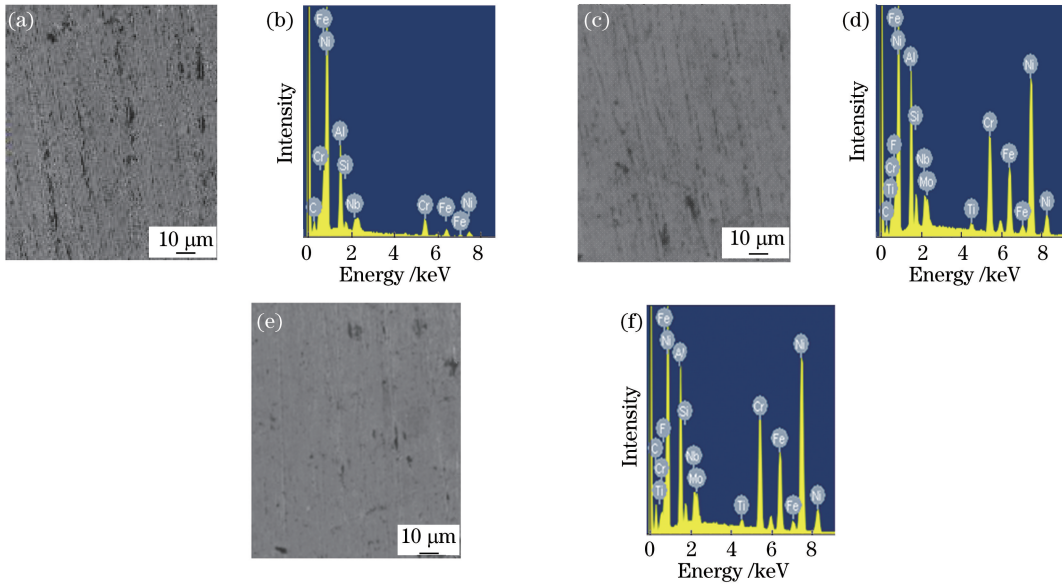


图 6 不同试样熔覆层的 SEM 形貌(左)和 EDS 能谱(右)。(a)(b)试样 1;(c)(d)试样 2;(e)(f)试样 3

Fig. 6 SEM images (left) and EDS spectra (right) of cladding layers of different samples. (a)(b) Sample 1; (c)(d) sample 2; (e)(f) sample 3

表 2 不同试样熔覆层表面的化学成分

Table 2 Chemical compositions of cladding layer surfaces of different samples

Element		C	F	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
Sample 1	Mass fraction /%	2.86	-	6.02	0.56	-	17.58	18.10	52.88	2.00	-
	Atom fraction /%	11.53		10.79	0.97	-	16.37	15.69	43.60	1.04	
Sample 2	Mass fraction /%	6.11	3.55	10.88	2.29	0.66	12.63	11.78	44.29	4.85	2.96
	Atom fraction /%	20.26	7.52	16.22	3.29	0.55	9.77	8.49	30.35	2.10	1.24
Sample 3	Mass fraction /%	14.83	2.89	8.99	1.05	0.62	12.04	11.76	41.47	-	-
	Atom fraction /%	41.35	5.09	11.15	1.26	0.43	7.75	7.05	23.65	-	-

分元素含量与试样 2 的相近,但 C 元素质量分数增大了约 8%,增幅较大。因此,熔覆层的主要组成元素是 Ni、Fe、Cr,此外还有少量的 Al 和 C 元素,说明 NiAl 材料与基材形成了良好的熔融。当熔覆粉末 SiC 的含量增大时,相应的 Ni 含量减小, Si 含量略有增大, C 含量增加较多, Al 含量先增大后减小。

3.4 熔覆层的摩擦性能

磨损是机械零件失效的一种形式,采用激光熔覆技术制备了 NiAl-SiC 复合涂层,以研究其表面摩擦磨损性能。熔覆层及基材的摩擦系数随磨损时间的变化如图 7 所示。可以看出,在初始的摩擦阶段,熔覆层和基材试样的摩擦系数急剧增大且波动较大,这主要是因为待测材料与摩擦副处于磨合磨损阶段;随着时间的不断增加,熔覆层试样很快进入稳定磨损阶段,而基材经过上下波动后才逐渐趋于稳定,可见基材的磨合时间较长。通过计算得出,试样 1 和试样 3 熔覆层的平均摩擦系数分别为 0.731 和 0.745,而基材的平均摩擦系数是 1.260,因此,当熔覆层中 SiC 含量

增大时,熔覆层的摩擦系数有增大的趋势。结合图 4 可知,随着熔覆层中裂纹、空隙等缺陷的出现,熔覆层的摩擦系数也会增大,但相对基材而言,熔覆层的摩擦系数明显减小。其中磨损量可以表征材料的耐磨性,磨损量越小则说明材料的耐磨性越好。

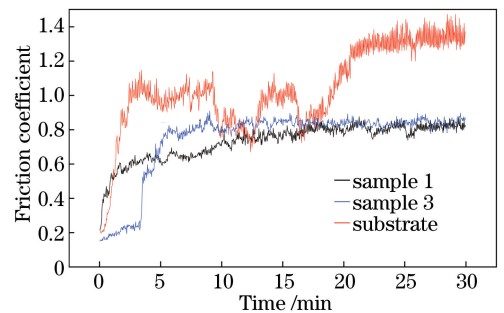


图 7 熔覆层和基材摩擦系数随时间的变化曲线
Fig. 7 Friction coefficient versus time for cladding layer and substrate

不同试样熔覆层及基材表面的磨损形貌如图 8 所示。试样 1 熔覆层中存在部分脱落和凹陷,试样

3 熔覆层中出现较浅的犁沟和小部分凹陷, 基材中磨损表面中间位置出现了深而窄的犁沟。磨损时材料表面被磨损而掉落的硬质合金小颗粒起到了磨粒的作用, 随着摩擦副的往复运动, 在剪切力的作用下表面形成了犁沟。熔覆层的犁沟很浅, 可能是因为

磨损表面的材料出现了移位, 说明磨损表面开始出现粘着磨损的现象, 也可能是由于熔覆层的硬度较基材显著增大, 而熔覆层表面抵抗磨粒磨损的能力会因硬度的增大而增强, 最终导致熔覆层表面的犁沟相对基材较浅。



图 8 不同试样熔覆层及基材表面的磨损形貌。(a) 试样 1; (b) 试样 3; (c) 基材

Fig. 8 Surface wear morphologies of cladding layers and substrates of different samples.

(a) Sample 1; (b) sample 3; (c) substrate

试样 1 熔覆层的磨痕上有部分脱落和凹陷, 磨痕高度差为 $29 \mu\text{m}$; 试样 3 熔覆层的磨痕宽度约为 $465 \mu\text{m}$, 磨痕高度差约为 $6 \mu\text{m}$; 基材的相对磨痕宽度约为 $837 \mu\text{m}$, 磨痕高度差约为 $21 \mu\text{m}$ 。基材的磨损较严重, 而试样 3 熔覆层的耐磨性较好。

4 结 论

采用激光熔覆技术和预置粉末方式, 在 1Cr17Ni2 钢表面制备了 NiAl-SiC 复合涂层, 研究了其微观组织及摩擦性能, 得到以下结论。

1) 复合涂层上存在大量的裂纹、空隙及脱落等缺陷, 且随着 SiC 质量分数的增大, 涂层的缺陷增多。

2) 复合涂层主要由 $\text{AlFe}_{0.23}\text{Ni}_{0.77}$ 和 AlNi 组成, 随着 SiC 质量分数的增大, 复合涂层中出现了新的物相 (Fe, Ni), 其他物相的含量未发生明显变化。

3) 随着 SiC 质量分数的增大, 涂层的摩擦系数有增大的趋势, 且涂层比基材的耐磨性更好。

参 考 文 献

- [1] Wu W P, Wang X J, Wang Z Y, *et al.* Laser cladding ceramic coating [J]. *Journal of Ceramics*, 2017, 38(1): 13-19.
吴王平, 王晓杰, 王智尧, 等. 激光熔覆陶瓷涂层研究 [J]. *陶瓷学报*, 2017, 38(1): 13-19.
- [2] Yang J X, Jin Y P, Zhang N. Application status and future development of laser cladding technology [J]. *Metal Working*, 2016(4): 13-16.

杨胶溪, 靳延鹏, 张宁. 激光熔覆技术的应用现状与未来发展 [J]. *金属加工*, 2016(4): 13-16.

- [3] Shen Y, Guan Y Q, Bai S, *et al.* Development status and prospects of laser cladding technology [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2011(10): 21-24.
沈宇, 关义青, 白松, 等. 激光熔覆技术的发展现状及展望 [J]. *制造技术与机床*, 2011(10): 21-24.
- [4] Wang D S, Tian Z J, Wang S L, *et al.* Microstructural characterization of Al_2O_3 -13wt.% TiO_2 ceramic coatings prepared by squash presetting laser cladding on GH4169 superalloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 254: 195-201.
- [5] Wu D J, Wu N, Yang C, *et al.* Numerical simulation of the preheating effect on temperature gradient in laser cladding Al_2O_3 ceramic [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(10): 2039-2042.
吴东江, 吴楠, 杨策, 等. 预热对 Al_2O_3 陶瓷激光熔覆层温度梯度影响的模拟 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(10): 2039-2042.
- [6] Li H C, Wang D G, Chen C Z, *et al.* Phase composition, microstructure and in vitro bioactivity of laser cladding $\text{CaO-ZrO}_2\text{-SiO}_2$ system coatings on titanium alloy [J]. *Materials Letters*, 2015, 157: 139-142.
- [7] Sun D Y, Hou G Y, Zhang J Y. Improving rolls' thermal shock resistance by laser cladding ZrO_2 -8% Y_2O_3 coating [J]. *Journal of Yanshan University*, 2014, 38(3): 216-220.
孙登月, 侯广义, 张军营. 激光熔覆 ZrO_2 -8% Y_2O_3

- 涂层提高轧辊抗热冲击性能的研究[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(3): 216-220.
- [8] Masanta M, Shariff S M, Choudhury A R. Microstructure and properties of TiB_2 -TiC- Al_2O_3 coating prepared by laser assisted SHS and subsequent cladding with micro-/nano- TiO_2 as precursor constituent [J]. *Materials and Design*, 2016, 90: 307-317.
- [9] Faes M, Valkenaers H, Vogeler F, *et al.* Extrusion-based 3D printing of ceramic components [J]. *Procedia CIRP*, 2015, 28: 76-81.
- [10] Qiu X L. TiC based cermet coating produced by powder feeding laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2006, 35(10): 19-22.
邱小林. 激光熔覆 TiC 金属基陶瓷涂层的研究[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(10): 19-22.
- [11] Du B S, Paital S R, Dahotre N B. Synthesis of TiB_2 -TiC/Fe nano-composite coating by laser surface engineering[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 647-653.
- [12] Lusquiños F, Pou J, Quintero F, *et al.* Laser cladding of SiC/Si composite coating on Si-SiC ceramic substrates [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(9): 1588-1593.
- [13] Dai S, Zuo D W, Fang C, *et al.* Microstructure and properties of laser clad Ni/TiC composite coating[J]. *Machine Building & Automation*, 2014, 43(3): 63-65.
戴晟, 左敦稳, 方淳, 等. 激光熔覆 Ni/TiC 复合涂层组织与性能[J]. *机械制造与自动化*, 2014, 43(3): 63-65.
- [14] Wei Z Y, Wang X H, Liu A M. A nanometer SiC particles reinforced Ni based high temperature oxidation resistance of laser cladding coating [J]. *Hunan Agricultural Machinery*, 2014, 41(7): 94, 96.
韦子运, 汪新衡, 刘安民. 纳米 SiC 颗粒增强 Ni 基激光熔覆涂层高温抗氧化性能的研究[J]. *湖南农机*, 2014, 41(7): 94, 96.
- [15] Chai L S, Wang C S, Han L Y, *et al.* Influence of nano-TiC/C content on microstructure and properties of laser clad Ni-based alloy coatings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1203003.
柴龙顺, 王存山, 韩立影, 等. 纳米 TiC/C 对激光熔覆镍基金属陶瓷涂层组织和性能的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1203003.
- [16] Li Y L, Yi D L, Pan D, *et al.* Study on microstructure of TiC/Fe composite coating prepared with laser clad on Fe substrate [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(6): 142-145.
李养良, 仪登亮, 潘东, 等. 激光熔覆原位合成 TiC 增强 Fe 基复合层组织研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(6): 142-145.
- [17] Li Q, Liu H X, Zhang X W, *et al.* Formation and strengthening mechanism of NiCrAl/TiC coating on Al alloy surface by laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(2): 138-141.
李琦, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 铝合金表面激光熔覆 NiCrAl/TiC 涂层生成和强化机制[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(2): 138-141.
- [18] Savalani M M, Ng C C, Li Q H, *et al.* *In situ* formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(7): 3173-3177.
- [19] Chen D Q, Liu D, Liu Y F, *et al.* Microstructure and fretting wear resistance of γ /TiC composite coating *in situ* fabricated by plasma transferred arc cladding [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 239: 28-33.
- [20] Ma Q S, Li Y J, Wang J, *et al.* Microstructure evolution and growth control of ceramic particles in wide-band laser clad Ni60/WC composite coatings [J]. *Materials & Design*, 2016, 92: 897-905.
- [21] Farahmand P, Liu S, Zhang Z, *et al.* Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La_2O_3 [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(10): 15421-15438.
- [22] Zhou S F, Zeng X Y, Hu Q W, *et al.* Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 1646-1653.
- [23] Zhang Y M, Hua H, Shuai G G, *et al.* Study on cracking behavior of micro-nano WC reinforced Ni-matrix composite coating by laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(24): 154-157.
张艳梅, 华海, 帅歌国, 等. 激光熔覆微纳米 WC 颗粒增强镍基金属陶瓷涂层的裂纹研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(24): 154-157.
- [24] Ma S B, Su B B, Wang X, *et al.* Wear resistance of SiC/Ni composite coating based on laser cladding [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(1): 77-82.
马世榜, 苏彬彬, 王旭, 等. 基于激光熔覆 SiC/Ni 复合涂层的耐磨性[J]. *材料工程*, 2016, 44(1): 77-82.
- [25] Zhang J H, Tian Z J, Zhao J F, *et al.* Analysis on

- micro-structure of nano-SiC laser coating[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(6): 702-705.
- 张建华, 田宗军, 赵剑锋, 等. 纳米 SiC 激光熔覆陶瓷涂层组织结构分析[J]. 光电子 • 激光, 2004, 15(6): 702-705.
- [26] Xu B, Lou B Y, Bai W J, *et al.* Synthesis of SiC/Ni composite coatings by laser cladding and property of erosion resistance [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(1): 147-150.
- 徐斌, 楼白杨, 白万金, 等. 激光熔覆制备 SiC/Ni 基复合涂层及其耐冲蚀性能[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 147-150.
- [27] Yang Y Q, Wen X Z. Microstructure and performance of the SiC/stainless steel composite coating produced by Nd : YAG laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(10): 941-946.
- 杨永强, 文效忠. 激光熔覆 SiC/不锈钢粉末复合涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2000, 27(10): 941-946.
- [28] Zhuang Q Q, Zhang P L, Li M C, *et al.* Microstructures and wear resistance properties of Ni-Ti-Si coatings on copper alloy surface by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1102002.
- 庄乔乔, 张培磊, 李明川, 等. 铜合金表面激光熔覆 Ni-Ti-Si 涂层微观组织及耐磨性能[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102002.
- [29] Li M C, Zhang P L, Zhuang Q Q, *et al.* Microstructure and micromechanics features of Ni-Mo-Si coatings on copper plate surfaces by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202004.
- 李明川, 张培磊, 庄乔乔, 等. 铜板表面激光熔覆 Ni-Mo-Si 涂层的组织和微观力学性能[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202004.
- [30] Zhai J H, Xu H Y, Liu Z J, *et al.* Experimental study on laser cladding of Ni-based alloys on spheroidal graphite cast iron surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101412.
- 翟建华, 许慧印, 刘志杰, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆镍基合金试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101412.