

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20171030001

激光熔覆 CoNiCrAlY 高温合金格栅的高速刮削性能

张 阳^{1,2}, 黄传兵², 骆丽杰¹, 兰 昊², 李建保¹, 张伟刚²

(1. 海南大学 材料与化工学院, 海口 570228; 2. 中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 采用光纤激光同轴送粉技术制备了 CoNiCrAlY 高温合金格栅结构熔覆层, 采用模拟飞机发动机叶尖高速刮削试验机研究了熔覆层的刮削性能。采用扫描电子显微镜、三维数字显微镜、激光共聚焦显微镜、显微硬度计等对合金格栅的微观结构和力学性能进行了分析测试。结果表明: 研制的熔覆层具有致密的微观组织, 物相组成与前驱粉末基本一致; 熔覆层的维氏显微硬度值为 $(357 \pm 20) \text{HV}_{0.2}$; $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后的熔覆层与处理前的组织结构无太大区别, 维氏显微硬度值为 $(345 \pm 20) \text{HV}_{0.2}$; 在相同刮削实验参数条件下, 间距 2、3 和 4 mm 格栅结构的磨损量差别较大, 其中 3 mm 格栅结构及其对磨的叶片的质量损失都最小, 且摩擦振动较小, 表明间距为 3 mm 格栅结构的可刮削性能优于间距为 2 mm 和 4 mm 格栅结构。

关键词: 激光熔覆; 格栅结构; 刮削性能; 高温合金

中图分类号: TG174.44; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0165-07

High-speed Scrapping Properties of Grid-structured CoNiCrAlY Superalloy by Laser Cladding

ZHANG Yang^{1,2}, HUANG Chuan-bing², LUO Li-jie¹, LAN Hao², LI Jian-bao¹, ZHANG Wei-gang²

(1. Materials and Chemical Engineering, Hainan University, Haikou 570228; 2. State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100190)

Abstract: Grid-structured CoNiCrAlY superalloy were fabricated by coaxial laser cladding. The scrapping properties was studied by aircraft engine blade tip high-speed rubbing test. Correspondingly, microstructures and mechanical properties were characterized by using electron scanning microscopy, 3D digital microscopy, lasers scanning confocal microscopy, a micro-hardness tester, respectively. Results show that the laser-cladding coating exhibits a dense organizational structure and fundamentally consistent phase composition with its precursor powder. The average Vickers hardness of the laser-cladding coating is $(357 \pm 20) \text{HV}_{0.2}$. There is no significant differences between the laser-cladding coating treated at $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ and the laser cladding. The average Vickers hardness of the laser-cladding coating is $(345 \pm 20) \text{HV}_{0.2}$. At the same testing condition, the wear loss of different grid structures fluctuates significantly. The minimum wear loss and vibration are found in 3 mm grid-structure against its blade, indicating a better high-speed scrapping property to that of 2 mm and 4 mm.

Keywords: laser cladding; grid-structure; high-speed scrapping property; superalloy

0 引 言

为提高飞机发动机的性能, 必须减小发动机机匣与叶尖之间的间隙, 以降低气流的径向损

失, 从而提高发动机的热机效率并降低油耗。为此需要在发动机气路密封配副中引入热喷涂可磨耗封严涂层^[1-2]。可磨耗封严涂层由多种不同成分

收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2018-03-21

网络出版日期: 2018-03-27 15:32; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180327.1532.004.html>

通讯作者: 张伟刚 (1968—), 男 (汉), 研究员, 博士; 研究方向: 高温复合材料与涂层; E-mail: wg Zhang@ipe.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51471159)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51471159)

引文格式: 张阳, 黄传兵, 骆丽杰, 等. 激光熔覆 CoNiCrAlY 高温合金格栅的高速刮削性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 165-171.

ZHANG Y, HUANG C B, LUO L J, et al. High-speed scrapping properties of grid-structured CoNiCrAlY superalloy by laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 165-171.

的材料组成, 包括金属相和非金属相, 并且具有多孔结构, 表面粗糙。这种较大比表面多孔结构虽然能够保证涂层具有良好可磨耗性, 但同时也会大幅度降低涂层的耐腐蚀性能和抗氧化性能^[3]。

目前制备高温封严主要是用热喷涂的方法制备多孔的涂层, 涂层结合强度低, 抗氧化性差; 或是将蜂窝结构采用钎焊的方法制备到涡轮环上, 重量大, 工艺复杂。激光熔覆^[4]是一种在基体上通过激光使粉末快速熔化从而形成致密熔覆层, 并实现和基体冶金结合的凝固过程。通过激光熔覆技术制造高温合金格栅结构, 可以在保持整体涂层具有较大空隙率的同时, 保持合金相结构的致密性, 有望解决传统热喷涂技术制造多孔可磨耗封严涂层的根本缺陷。

激光制造的优点在于激光能量密度高, 热影响区小, 热变形小, 精确细致, 易于实现自动化加工。激光光束集中, 光斑大小可调, 因此可以制造精细可控的结构。与热喷涂方法相比, 激光功率的可调节性, 使得基材的稀释率可控在较低的范围; 激光熔覆层与基材间的结合为冶金结合, 有良好的工艺性能; 熔覆层组织致密均匀, 可显著提高工件表面的硬度, 提高耐磨、耐腐蚀及抗疲劳等性能。激光制造目前已在航空航天、生物医药、汽车制造业, 建筑, 高精尖零件的修复等行业获得广泛应用^[5-8]。

CoNiCrAlY 涂层具有良好的高温耐摩擦磨损以及抗氧化性能^[9], 广泛应用于航空航天、石化钢铁等领域。激光熔覆 CoNiCrAlY 涂层在 20 世纪 80 年代已有学者开始探索研究激光对 CoNiCrAlY 表面的影响^[10], 从最初对送粉率^[11], 激光功率^[12-13], 扫描速度^[14-15]等激光参数的优化到现在通过激光熔覆的方法制备 CoNiCrAlY 使熔覆层在抗氧化性能^[16]、抗冲蚀性能有进一步提升。与等离子喷涂相比, 激光熔覆制备 CoNiCrAlY 涂层结合强度高, 结构更精细, 组织更加致密, 在高温领域有广阔的应用前景。

目前国内外的研究主要集中在格栅结构对气密性的影响^[17-19]。在使役过程中, 格栅结构与发动机叶片的摩擦是不可避免的。文中采用激光熔覆的方法制备结构可控、多变、轻质的 CoNiCrAlY 格栅结构熔覆层, 系统考察其高速刮削性能, 探索其在高温密封、摩擦领域的应用。

1 试 验

基体材料为 304 不锈钢, 试样尺寸为 60 mm×40 mm×8 mm。激光熔覆前基体表面用 GS-943 型喷砂机进行喷砂预处理, 喷砂颗粒为棕刚玉, 然后用乙醇超声清洗 5 min 并进行干燥处理, 获得清洁、具有一定粗糙度的表面。熔覆粉末材料为 CoNiCrAlY 合金粉 (如图 1 所示) 其组成为 37Co-31.5Ni-25.5Cr-5.5Al-0.5Y, 粒径 30~74 μm, 流动性 16 s/50 g, 松装密度为 4.1 g/cm³。

激光器固定于机械手上, 在控制器上设定 ABB 机械手的运行轨迹, 采用激光同轴送粉的方式进行不同格栅结构的制备, 以氩气作为熔覆过程中的保护气体, 工艺参数如表 1 所示。最终制备间距为 2、3 和 4 mm, 角度为 30°的格栅结构熔覆层。

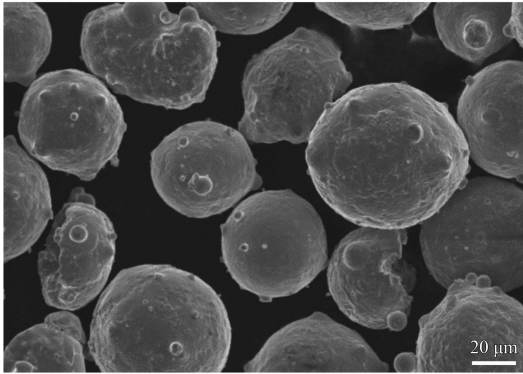


图 1 CoNiCrAlY 粉末的扫描电镜形貌
Fig.1 SEM image of the CoNiCrAlY powder

表 1 激光熔覆过程中的主要工艺参数
Table 1 Main parameters of the laser cladding process

Parameter	Value
Power / W	250
Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	10
Gas flow / (L·min ⁻¹)	2.4
Circle number / circle	10
Powder feeding / (g·min ⁻¹)	6.5

制备的熔覆层结构用 600 号砂纸磨平, 然后用无水乙醇超声清洗并干燥后, 在自行研制的高速刮削实验机 (图 2) 上进行刮削实验。叶尖固定于转盘上, 以设定线速度 $V_x=100$ m/s 逆时针转动, 转盘以进给速度 $V_f=0.005$ mm/s 向格栅结构方向移动, 进给时间 $t=4$ s, 对磨叶片为 A、B、C, 形状大小相同, 材料都为 GH4169。

采用 HX-1000TM 型显微硬度计 (200 g, 15 s)

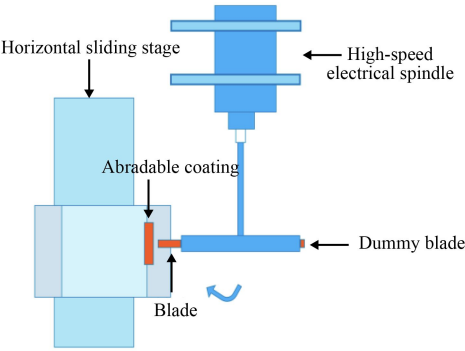


图 2 飞机发动机叶尖高速刮削模拟试验机原理图

Fig.2 Schematic diagram of the used high-speed rubbing test machine for aircraft engine

测量熔覆层和叶片的表面硬度, 采用精度为 0.1 mg 电子天平测量叶片和格栅结构熔覆层的质量变化, 采用 X'Pert PRO X 射线衍射仪对粉体和激光熔覆后的涂层进行物相分析 (Cu K α 为射线源 $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$, 加速电压 40 kV, 电流 40 mA, $2\theta=10^{\circ}\sim90^{\circ}$), 采用 JSM-7001F 型电子显微镜 (SEM) 观察格栅结构熔覆层的表面形貌和叶片的磨痕表面形貌, 采用 Hirox RH-2000 三维数字显微镜对叶尖的表面轮廓进行测量, 采用 Sensofar S-neox 共聚焦显微镜测量磨痕表面深度。

2 结果与讨论

2.1 CoNiCrAlY 格栅熔覆层的结构

图 3 是采用激光同轴送粉制备的不同间距格栅结构熔覆层的形貌。从图 3 可以看出格栅结构都是以角度为 30° 的菱形为最小单元, 菱形在格栅结构熔覆层的对边间距分别为 2、3 和 4 mm, 壁厚为 0.9 mm, 高度 1.5 mm。经测试, CoNiCrAlY 格栅结构的维氏显微硬度平均值 $(357\pm20)\ \text{HV}_{0.2}$ 。

图 4 是 CoNiCrAlY 粉末和熔覆层表面的 XRD 相结构分析。从结果可知, 粉末和结构的物相是一致的, 为 CoNiCrAlY。未观察到氧化物的特征峰位, 表明激光熔覆过程中粉末未发生明显

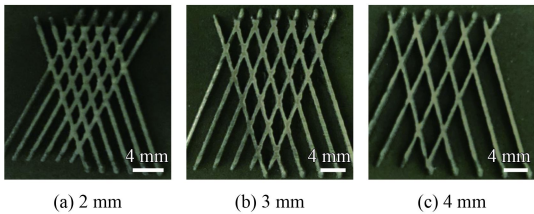


图 3 不同间距格栅结构熔覆层

Fig.3 Grid-structured CoNiCrAlY coatings with different distance

的氧化。相比热喷涂 CoNiCrAlY 涂层所具有的片层状结构^[20], 格栅结构激光熔覆层的组织结构致密, 无孔隙且无明显分层现象 (如图 5 所示)。将格栅熔覆层进行 $1\ 000\ ^{\circ}\text{C}$ 热处理, 处理后的维氏显微硬度平均值 $(345\pm20)\ \text{HV}_{0.2}$, 表面有些许氧化物 NiCo_2O_4 产生, 与处理前无太大差别, 组织结构也没有发生明显的变化 (如图 6 所示)。

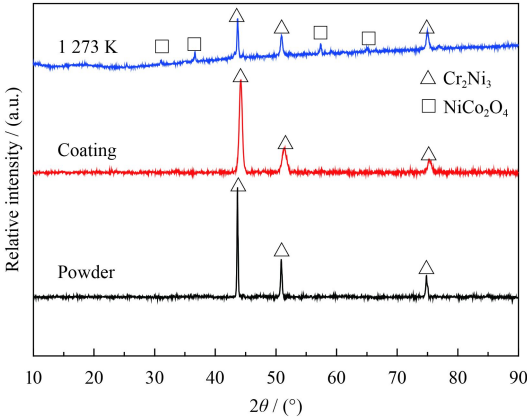


图 4 CoNiCrAlY 粉末和格栅结构熔覆层的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of CoNiCrAlY powder and the laser-cladding coating

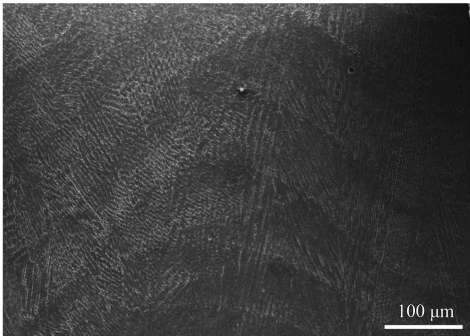


图 5 格栅熔覆层横截面形貌

Fig.5 Cross-sectional morphology of the laser-cladding coating



图 6 $1\ 000\ ^{\circ}\text{C}$ 热处理后的格栅熔覆层横截面形貌

Fig.6 Cross-sectional morphology of the coating after $1\ 000\ ^{\circ}\text{C}$ heat treatment

2.2 CoNiCrAlY 格栅结构的可刮削性

在刮削过程中，格栅结构的间距不同而与其对摩的叶尖是相同的，在这种情况下刮削区域的作用面积是不同的，最后导致不同熔覆层的质量损失量与叶尖的质量损失量出现了差异。理论情况下对摩的面积越小，质量损失量也越小，但在实际情况中，由间距不同引起受力大小，叶尖和熔覆层表面形貌的差异。

表 2 是不同格栅结构熔覆层和对摩叶片刮削时的质量变化。从表 2 可以看出，在相同试验参数条件下，间距为 4 mm 格栅结构熔覆层的质量损失为 7.3 mg。显著大于间距为 2 mm 和 3 mm 熔覆层的质量损失。对摩叶片的质量损失 A>C>B。根据刘凤伟^[21]的研究进展，在高速刮削实验中用磨损质量损失的比值 N 作为评判格栅结构熔覆层可刮削性的指标，其表达式如下：

$$N = \frac{\Delta m_a}{\Delta m_b}$$

(1)

其中 Δm_a 为格栅结构熔覆层的质量磨损量，mg； Δm_b 为叶片的质量磨损量，mg。 N 值越大，说明格栅结构熔覆层相对于叶片的磨损量越大。4 mm 熔覆层的 N 值为 10.42，是 3 种结构中最大的。单一从 N 值来看，其可刮削性较好，是 3 种格栅结构熔覆层中最易刮削的。

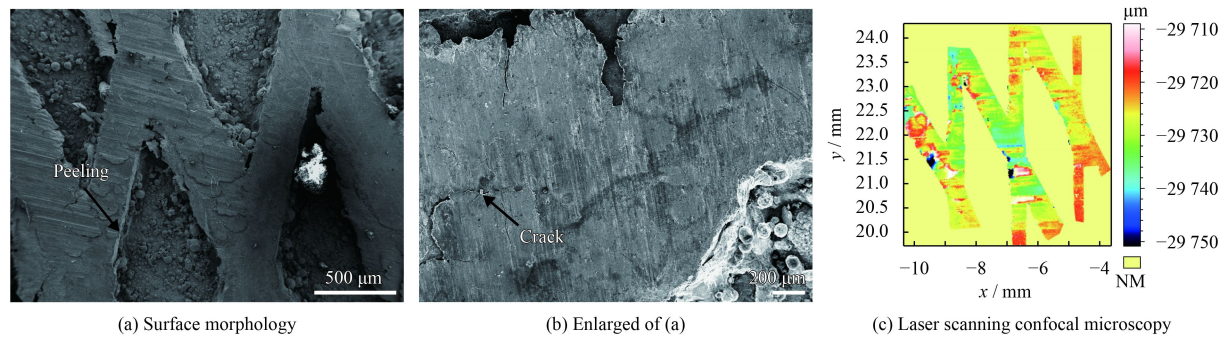


图 7 2 mm 格栅结构熔覆层磨损后表面形貌

Fig.7 Surface morphologies of grid-structured coating with 2 mm distance

图 8 是 3 mm 格栅结构熔覆层进行刮削实验后的表面形貌。可以看出，熔覆层中心的表面出现了犁沟和凸起的片层，边缘处由于塑性挤压而产生了大量的毛刺飞边。对比图 7 可以发现，3 mm 格栅结构熔覆层剥落的面积比较少，由于平行表面裂纹更容易传播，在拉-压循环应力的作用下，形成翘曲的片层。叶片与格栅结构熔覆层对摩，

表 2 不同格栅结构熔覆层高速刮削试验结果

Table 2 High-speed rubbing test results of different coating				
Coating	Blade	Δm_a / mg	Δm_b / mg	$\Delta m_a / \Delta m_b$
2 mm	A	5.2	0.9	5.77
3 mm	B	5.0	0.6	8.33
4 mm	C	7.3	0.7	10.42

2.3 刮削后熔覆层的表面形貌

图 7 是 2 mm 格栅结构熔覆层进行刮削实验后的表面形貌。从图 7 可以明显观察到格栅结构熔覆层发生了较大的挤压变形，边缘区域形成了毛刺，刮削过后格栅结构熔覆层表面出现了裂纹、剥落等现象。叶片与格栅结构刚开始高速对摩时，叶片和格栅结构熔覆层两者接触挤压，由于硬度差异 (叶片的维氏硬度 $(266 \pm 15) \text{HV}_{0.2}$) 及剪切应力等原因，从而导致了微裂纹的产生 (图 7(b))。刮削过程中，剧烈的摩擦会产生大量的摩擦热，这些热量使格栅结构熔覆层表面发生了一定程度的软化，与此同时边缘区域受到拉应力的作用，微裂纹在拉应力的作用下开始扩展，边缘区域先形成了片状剥落^[21]。磨痕中心区域受到压应力的作用，裂纹扩展较慢，所以剥落的方向是由边缘区域向磨痕中心区域发展的 (图 7(a))。激光共聚焦显微镜测得最大的凹陷高度为 23.61 μm，从图 7(c) 颜色的分布可以看出磨痕表面是不平整的。

在剪切力作用下，格栅结构熔覆层表面细小孔洞 (图 8(b)) 被拉伸，经过多次的摩擦，微裂纹在一定长度内扩展，孔洞的边缘发生了翘曲。随着裂纹的延伸，凸起的片层形成了大面积的剥落。激光共聚焦测得最大凹陷高度为 13.29 μm。同图 7(c) 相比，图 8(c) 中磨痕的表面轮廓较为平整一些。

图 9 是 4 mm 格栅结构熔覆层表面的形貌。

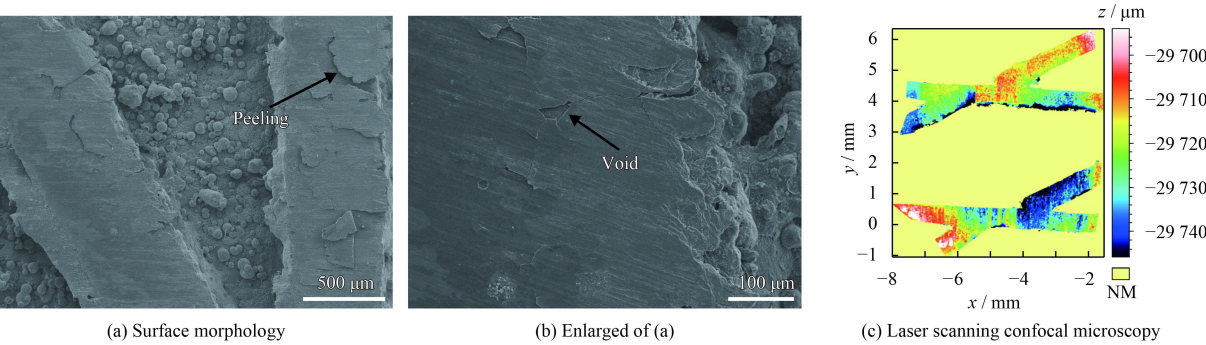


图 8 3 mm 格栅结构熔覆层磨损后表面貌

Fig.8 Surface morphologies of grid-structured coating with 3 mm distance

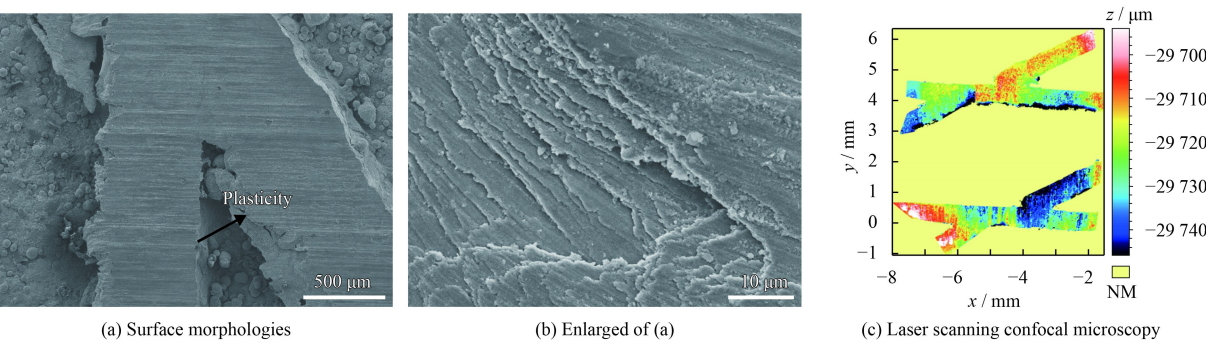


图 9 4 mm 格栅结构熔覆层磨损后表面形貌

Fig.9 Surface morphologies of grid-structured coating with 4 mm distance

图 9 中磨痕表面出现沿摩擦方向的犁沟，熔覆层边缘处出现了飞边，观察不到凸起的片层。受到反复的剪切力的作用，发生挤压变形以及切削磨损，使得熔覆层边缘出现了整齐的阶梯状结构，磨损机制主要为切削磨损。激光共聚焦测得磨痕的最大凹陷深度为 21.87 μm，图 9(c)与图 8(c) 相比，表面的高度差较大。

图 10 是高速刮削实验机所测得的叶片和格栅结构熔覆层对摩的法向力-时间曲线。格栅结构熔覆层的间距不同，刮削过程中摩擦剧烈的程度也不同，因而导致了法向力波动的幅度也不同。从图 10 可以看出 2 mm 和 4 mm 格栅结构熔覆层刮削时的法向力波动比 3 mm 的波动大。法向力的波动和摩擦力二者的关系为摩擦越剧烈，法向力的波动越大。试验所得法向力-时间曲线与激光共聚焦显微镜测的结果是相符的。法向力的波动大，摩擦也相对较剧烈，因而磨痕表面的高度差较大，表面的平整度较差 (图 7(a) 和图 9(c))，叶片的表面轮廓较粗糙。法向力的波动小，熔覆层磨痕表面高度差较小，表面的平整度也较好 (图 8(c))，叶片的表面轮廓较光滑。

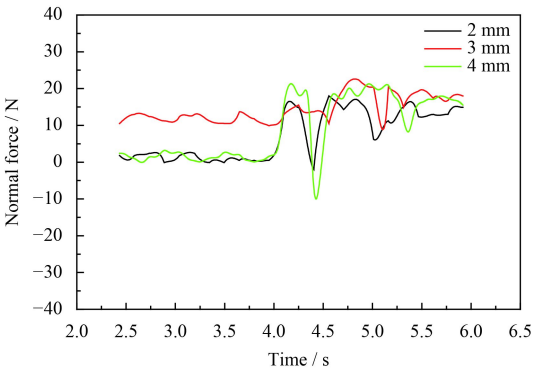


图 10 叶片和格栅结构熔覆层对摩的法向力-时间曲线

Fig.10 Normal force-time curves of blade interacts with grid-structured coating

2.4 刮削前后叶片的表面形貌

刮削前后叶尖的轮廓曲线如图 11 所示。在摩擦过程中由于结构的不同，导致了磨损的不同。叶片 B 磨损比叶片 A，C 的磨损小，轮廓曲线较平，叶片 A 磨损最为严重，最大磨损深度达到 32.5 μm。从图 11 可以看出，叶片上有些区域的高度超过了原始叶片的高度，原因是摩擦的过程中发生了塑性变形、挤压造成了一定程度的黏着。B 叶片在刮削过程中长度损失小，质量损失也最小，表面

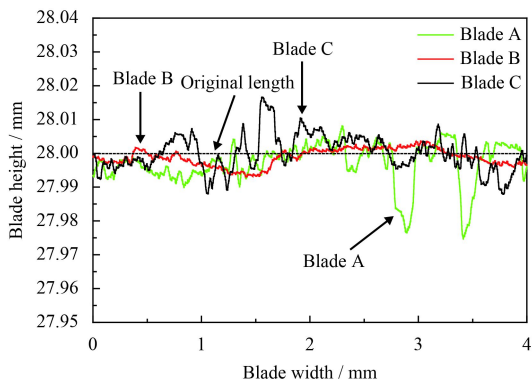


图 11 刮削前后叶尖的轮廓曲线

Fig.11 Profilogram of blade tips before and after rubbing test

粗糙度小,所以单方面通过叶片的分析,可得出 3 mm 格栅结构熔覆层可能更适合刮削。

在相同的试验条件下,结构不同,在摩擦过

程中受到的力的作用也不同,最后导致了叶片的磨损出现了差异。单一从叶片轮廓曲线并不能做出更准确的评价^[22],因此对叶尖的表面形貌进行了分析。图 12 是 3 种不同结构所对应的刮削叶片表面的磨损形貌,可以看出 3 个叶片都发生了明显的犁削、塑性流动等现象。A 和 C 叶片的表面粗糙,能明显的观察到表面有颗粒状物质出现而且伴随有裂纹的出现, B 叶片的表面颗粒状物质和裂纹相对少很多。

分析发现,叶片叶尖的轮廓曲线也与法向力-时间曲线相符,法向力的波动小,刮削过程中摩擦磨损剧烈程度较小,叶尖的轮廓曲线波动亦小;相反法向力的波动大,刮削过程中摩擦磨损剧烈程度较大,叶尖的轮廓曲线波动亦大。

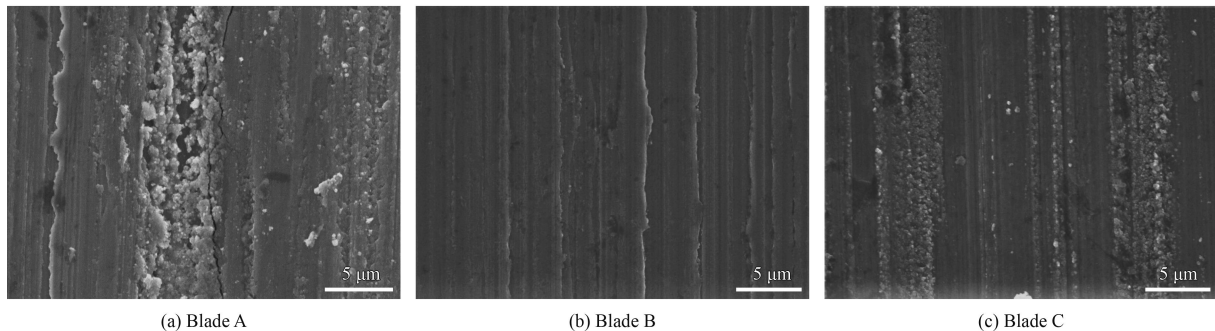


图 12 不同叶片的表面磨损形貌

Fig.12 Worn surface morphologies of different blades

3 结 论

该研究采用激光同轴送粉技术制备了 3 种不同的 CoNiCoAlY 格栅结构熔覆层,主要考察了其在高速刮削条件下的性能。

通过研究格栅结构熔覆层和叶片高速刮擦后的表面形貌、质量损失以及刮削过程作用力变化,4 mm 的结构 N 值比 2 mm 和 3 mm 结构大,但 3 mm 结构的刮削后的最大凹陷深度小,叶尖表面形貌较为光滑,所受到的法向力波动较小,综合得出 3 mm 格栅结构的可刮削性能较 2 mm 和 4 mm 结构要好。研究结果为研发新型飞机发动机高压涡轮叶尖封严结构提供技术支持。

参考文献

[1] RAJENDRAN R. Gas turbine coatings-an overview[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 26: 355-369.

[2] JOHNSTON R E. Mechanical characterisation of AlSi-hBN, NiCrAl-Bentonite, and NiCrAl-Bentonite-hBN freestanding abrasable coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(10): 3268-3273.

[3] XU C, DU L, YANG B, et al. The effect of Al content on the galvanic corrosion behaviour of coupled Ni/graphite and Ni-Al coatings[J]. Corrosion Science, 2011, 53(6): 2066-2074.

[4] COSTA S E, SHIOMI M, OSAKADA K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12): 1459-1468.

[5] 李秋歌,林鑫,王杏华,等.激光增材修复 K465 高温合金裂纹控制研究[J].稀有金属材料与工程,2017,46(4):955-960.

LI Q G, L X, WANG X H, et al. Research on cracking control of laser additive repaired K465 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(4): 955-960 (in Chinese).

[6] DONG S X, XU B S, WANG Z J, et al. Laser remanufacturing technology and its applications[C]. Proceedings of Lasers

- in Material Processing and Manufacturing III, Beijing, SPIE, 2007: 380-385.
- [7] PROEBSTLE M, NEUMEIER S, HOPFENMUELLER J, et al. Superior creep strength of a nickel-based superalloy produced by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 674: 299-307.
- [8] ZIETALA M, DUREJKO T, POLANSKI M, et al. The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 677: 1-10.
- [9] DOOLABI D S, RAHIMPOUR M R, ALIZADEH M, et al. Effect of high vacuum heat treatment on microstructure and cyclic oxidation resistance of HVOF-CoNiCrAlY coatings[J]. Vacuum, 2017, 135: 22-33.
- [10] BOONE D H, GOWARD W D, MOORE P G. Structure of laser-treated M-Cr-Al-Y coatings[J]. Thin Solid Films, 1981, 84(1): 74-74.
- [11] 黄延禄, 李建国, 梁工英, 等. 送粉激光熔覆中送粉速率对激光束与粉末流相互作用的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(10): 1520-1523.
- HUANG Y L, LI J G, LIANG G Y, et al. Effect of powder feeding rate on interaction between laser beam and powder stream in laser laser cladding process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(10): 1520-1523 (in Chinese).
- [12] 李刚, 黄大文, 夏元良, 等. 激光熔覆功率对熔覆合金组织性能的影响[J]. 应用激光, 1999(5): 327.
- LI G, HUANG D W, XIA Y L, et al. Effects of laser powder on structure properties of laser cladding[J]. Applied Laser, 1999(5): 327 (in Chinese).
- [13] 邓德伟, 孙晋华, 王鑫林, 等. 激光功率对激光熔覆镍基合金涂层组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2016, 40(1): 20-25.
- DENG D W, SUN J H, WANG X L, et al. Laser power effect on microstructure and property of laser cladding nickel based alloy coating[J]. Chinese Journal of Metal Materials, 2016, 40(1): 20-25 (in Chinese).
- [14] 洪永昌. 激光重熔扫描速度对 Co 基金属堆焊层组织及耐磨性的影响[J]. 中国机械工程, 2004, 15(20): 1876-1879.
- HONG Y C. Effects of scanning speeds on microstructure and wear ability of Co-based hard face layer in laser remelting[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(20): 1876-1879 (in Chinese).
- [15] GU H, DAI Y, WANG H, et al. Effect of scanning velocity on femtosecond laser-induced periodic surface structures on HgCdTe crystal[J]. Applied Surface Science, 2017, 425: 307-313.
- [16] PEREIRA J C, ZAMBRANO J C, TOBAR M J, et al. High temperature oxidation behavior of laser cladding MCrAlY coatings on austenitic stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270: 243-248.
- [17] 江路毅, 刘网扣, 张兆鹤, 等. 高低齿汽封与蜂窝汽封及孔式阻尼汽封密封性能的比较[J]. 动力工程学报, 2012, 32(7): 508-512.
- JIANG L Y, LIU W K, ZHANG Z H, et al. Comparison of seal performance among stepped labyrinth, honeycomb and hole-pattern damper seal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(7): 508-512 (in Chinese).
- [18] XUAN H, ZHANG N, LU B, et al. Investigation of high-speed abrasion behavior of an abradable seal rubber in aero-engine fan application[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1615-1623.
- [19] DELEBARRE. Tribological characterization of a labyrinth-abradable interaction in a turbo engine application[J]. Wear, 2017, 370: 29-38.
- [20] 欧阳家虎, 段佳林, 刘占国. 等离子喷涂 CoNiCrAlY 涂层的高温氧化行为[C]. 第十次全国热处理大会, 天津, 2011: 607-612.
- OUYANG J H, DUAN J L, et al. High temperature oxidation behavior of CoNiCrAlY coatings prepared by APS[C]. Tenth National Conference on Heat Treatment, TianJin, CHTS, 2011: 607-612 (in Chinese).
- [21] 刘凤伟, 高祺洋, 李曙, 等. NiCrW-BN 气路封严涂层的可刮削性评价[J]. 材料研究学报, 2010(4): 406-410.
- LIU S W, GAO S Y, LI S, et al. Abradability evaluation of NiCrW-BN gas path seal coating[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010(4): 406-410 (in Chinese).
- [22] STRINGER J, MARSHALL M B. High speed wear testing of an abradable coating[J]. Wear, 2012, 294: 257-263.

(责任编辑: 陈茜)