

粉末压片冷等静压处理对高温合金 NiCoCrAlY 熔覆涂层结合界面的影响

许瑞华^{1,2} 黎向锋^{1,2} 左敦稳¹ 王宏宇³ 柳振平¹ 李建忠¹

¹ 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016
² 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016
³ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用激光熔覆技术基于压片预置式法在高温合金基体上制备 NiCoCrAlY 熔覆涂层, 分析讨论粉末压片冷等静压处理对其熔覆涂层结合界面的影响。研究表明, 粉末压片冷等静压处理后熔覆试样的宏观形貌更加完整连续, 同时能够改善熔覆涂层与基体结合界面间的裂纹现象。对其机理进一步分析可知: 冷等静压处理后的粉末压片的厚度变薄, 致密度增加, 熔覆所需要的激光比能增加, 从而提高了熔覆层结合界面的质量。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 冷等静压; 高温合金; 结合界面

中图分类号 TG174.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.111401

Effect of Squashing by Cold Isostatic Pressing on Bonding Interface between NiCoCrAlY Coating and High Temperature Alloy

Xu Ruihua^{1,2} Li Xiangfeng^{1,2} Zuo Dunwen¹ Wang Hongyu³
Liu Zhenping¹ Li Jianzhong¹

¹ College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
² Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing, Jiangsu 210016, China
³ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract Based on the method of squashing presetting on the high temperature alloy to prepare NiCoCrAlY coating by laser cladding, the influence of squashing treated by cold isostatic pressing on the bonding interface is discussed. The research shows that macroscopic morphology of layers with pretreatment is complete and continuous and the phenomena of cracks in the coating interface are eliminated or reduced. With further study of mechanism, it is found that the thickness of the squashing decreased while the density and laser specific energy required for laser cladding increase, which are beneficial to the quality of interfacial morphologies of laser cladding.

Key words laser technique; laser cladding; cold isostatic pressing; high temperature alloy; bonding interface

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.3170

1 引言

镍基高温合金因具有优良的耐高温氧化、耐腐蚀和耐磨损等性能, 广泛应用于航空制造领域中, 是制造各类发动机热端部件的主体材料^[1-2]。随着这些热端部件服役温度的不断提高, 通常引入热障涂层以进一

收稿日期: 2013-05-22; **收到修改稿日期**: 2013-07-02; **网络出版日期**: 2013-09-10

基金项目: 航空科学基金(2010ZE52056)、江苏省精密与微细制造技术重点实验室基金、江苏省自然科学基金(BK2011479)

作者简介: 许瑞华(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事涂层及功能表面方面的研究。E-mail: xuruihuahappy@163.com

导师简介: 黎向锋(1971—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事表面工程、智能加工、精密加工及生物制造等方面研究。

E-mail: fxli@nuaa.edu.cn(通信联系人)

步提高其高温防护性能,其中 NiCoCrAlY 涂层因其优越的综合性能而成为金属粘结层体系的首选合金^[3-5]。目前制备 NiCoCrAlY 涂层的方式有激光熔覆、等离子喷涂、物理气相沉积等,其中激光熔覆技术因具有能量高、效率高、加工无污染等优点而备受关注^[6-7]。粉末压片预置式激光熔覆不但避免了传统粉末预置式中粘结剂法产生的气孔缺陷和同轴送粉中因粉末过细产生的粉管堵塞问题,还具有粉末利用率高、无粉尘污染等优点,从而成为新型粉末熔覆研究首选的预置方式^[8]。NiCoCrAlY 熔覆涂层和高温合金基体间因熔覆过程中的热应力产生裂纹、气孔等缺陷,导致涂层容易剥落,从而影响涂层性能^[9-10]。本文对 NiCoCrAlY 粉末压片先进行冷等静压处理再进行激光熔覆,旨在减少其结合界面处的缺陷。将粉末压片熔覆前先进行冷等静压处理,不仅能保持其原来形状,而且可以提高其致密度;但是单独使用冷等静压的时候,其包套的制造比较困难。

2 试样制备以及实验方法

实验采用压片预置式手段在镍基高温合金 GH4033 上进行激光熔覆自熔性粉末 NiCoCrAlY(质量百分数为 Cr 18.64, Al 3.39, Co 2.6, C 0.55, Y 1.00, Ni 余量;其平均粒径为 75 μm)制备高温防护粘结涂层。基体试样尺寸为 30 mm \times 6 mm \times 4 mm。NiCoCrAlY 粉末片采用 FW-4A 型压片机压制成型,其厚度为 4 mm。为了提高粘结层与基体试样的结合强度,将基体进行去油除锈清洗,对基体待熔覆表面进行喷砂前处理,喷砂磨料为 120 目(120 μm)的棕刚玉。将压制成型的 NiCoCrAlY 粉末片固定在基体试样上,采用冷等静压机在 50 MPa 的压力下保压 5 min。随后,在氦气氛围下采用 NEL-2400T 型 CO₂ 激光加工系统进行激光熔覆,其激光热源分布呈高斯型,工艺流程如图 1 所示。对熔覆试样进行线切割,采用 MITUTOYO 三丰工具显微镜观察其横截面形貌。采用对比实验研究粉末压片前处理对高温合金 NiCoCrAlY 涂层结合界面的影响,对比试样处理如表 1 所示。

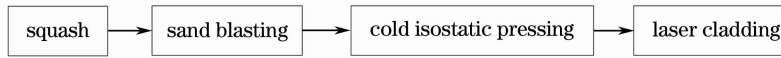


图 1 制备预置片前处理熔覆试样的工艺流程

Fig. 1 Process of preparing squashing with pretreatment

表 1 试样处理方式的对比

Table 1 Comparison of treatment of samples

Number	Substrate	Connection mode of squashing	Optimized cladding technology			Specific laser energy $W = P/VD / (\text{kW} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$
			Laser power P / kW	Scanning speed $V / (\text{mm}/\text{min})$	Spot diameter D / mm	
Sample1	None	None	1	300	2	1×10^5
Sample2	Sand blasting	Cold isostatic pressing	1.6	120	2	4×10^5

3 实验结果与分析

3.1 熔覆涂层

图 2 为不同处理的 NiCoCrAlY 涂层的宏观形貌。从图 2(a)中可以观察到粉末压片未经过前处理的 NiCoCrAlY 涂层表面宏观形貌不完整,且粉末片未完全熔化,形成泪珠状球体,极易脱落;图 2(b)中粉末压片经过前处理的 NiCoCrAlY 熔覆涂层表面平坦,熔池的表观形貌质量连续且完整,未出现宏观裂纹,同时涂层对基体表观形貌影响较小,为后续加工提供了有利的条件。

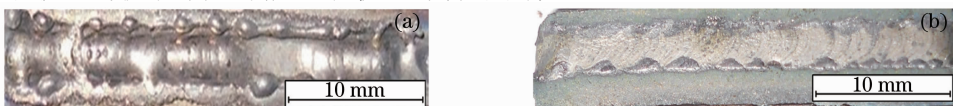


图 2 熔覆涂层宏观形貌对比。(a) 试样 1; (b) 试样 2

Fig. 2 Comparison of macroscopic morphology of coatings by laser cladding. (a) Sample 1; (b) sample 2

将熔覆试样沿垂直方向进行线切割,经过研磨-抛光-腐蚀之后观察其横截面形貌,如图3所示。

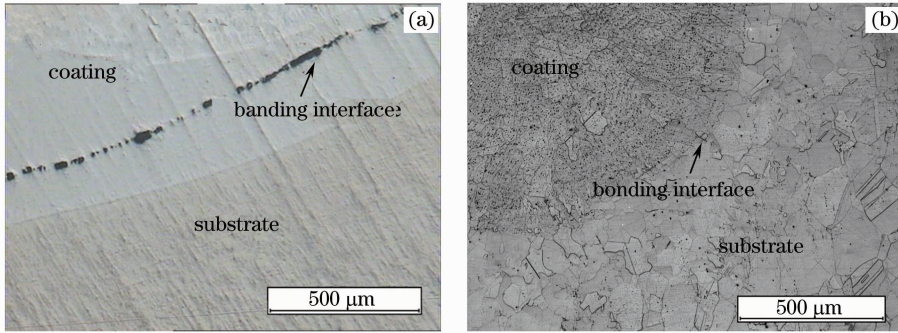


图3 熔覆涂层的横截面形貌。(a) 试样1; (b) 试样2

Fig. 3 Cross-section morphology of coatings. (a) Sample 1; (b) sample 2

图3(a)为熔覆试样1的微观形貌,其中上部分为熔覆区,下部分为基体,可以看出:未经前处理试样的涂层与基体结合处出现裂纹,涂层与基体结合强度不高,未形成良好的冶金结合。从图3(b)可以看出粉末压片冷等静压处理后熔覆试样涂层与基体间的结合界面处完好,其中熔覆层的底部的为柱状晶,上层为胞状晶^[11]。由此可知:粉末压片冷等静压处理工艺可以极大地改善熔覆涂层与基体的冶金结合。

3.2 影响因素分析

对实验过程进行分析,可以获知粉末压片冷等静压处理之后以下几个因素发生了变化,从而改善了熔覆涂层与高温合金基体结合界面的质量。

3.2.1 基体粗糙度

在试样2中的待熔覆基体表面进行喷砂处理,图4(b)是试样2基体表面粗糙度的曲线图,从图中可以看出喷砂处理的基体表面凹凸不平,采用NanoMap-500LS三维接触式表面轮廓仪进行测量,获得其粗糙度 $R_{a2} = 1.3646 \mu\text{m}$;图4(a)为试样1基体表面粗糙度曲线图,其试样无任何处理,表面平整,粗糙度 $R_{a1} = 0.6345 \mu\text{m}$ 。分析可得:磨料在压缩空气的动力下对基体表面进行了高速撞击和磨削,使得基体表面获得了一定的清洁度和粗糙度^[12]。喷砂使基体材料表面粗糙化,增大了微观表面积,从而使得涂层附着力增强,提高了基体和预置粉末压片之间的结合强度。

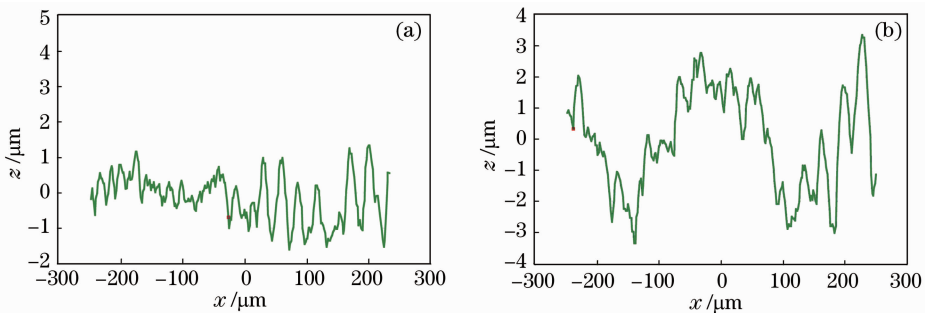


图4 基体喷砂前后的粗糙度曲线。(a) 试样1(未喷砂); (b) 试样2(喷砂)

Fig. 4 Roughness curves of substrate (a) before and (b) after grit-blasting treatment

3.2.2 粉末片致密度

如图5(b)所示为冷等静压处理后粉末片的工具显微镜图,从图中发现其粉末片颗粒的凝聚度提高,同时其厚度变薄,厚度由压制成型的0.4 mm减少为0.29 mm。粉体颗粒结构紧凑,紧密相连^[13-14]。

在激光熔覆过程中,激光能量的传递使得预置粉末压片快速熔化和冷却凝固,通过液相流体的流动使得粉末片与基体之间的空隙得到填充,而压制粉末片的致密度影响着激光能量的吸收。在冷等静压处理之后,预置粉末片的致密度较大,因此在粉末片由固相转化为液相时,对液相的流动性提出较高的要求。但是在快速熔化凝固冷却的条件下,液相的流动受到限制,导致涂层与基体中气体以及残渣无法逃逸或是沉积使得涂层产生气孔以及裂纹^[15]。经过冷等静压处理的粉末片厚度变薄,粉末片中的气孔空间变小或者消失,使得

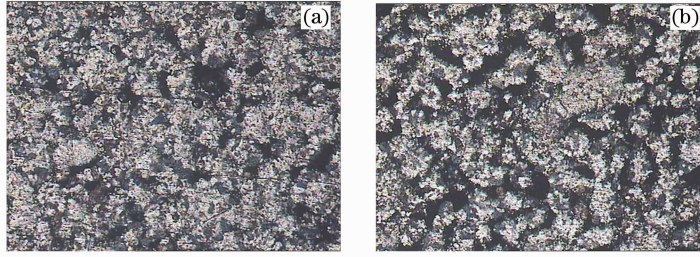


图5 粉末片的工具显微镜图(100 \times)。(a) 压片机压制的粉末片；(b) 冷等静压处理后的粉末片

Fig. 5 Graph by tool microscope of squashing (100 \times). (a) Squashing by tablet machine; (b) squashing treated by cold isostatic pressing

粉末片的致密度提高,减少了液相流动过程中的迁移距离,空气收缩所需要的推动力也变小,同时预置粉末片与基体材料之间的接触热阻减小,能量传递损失减小,使得涂层与基体可以形成良好的冶金结合。

3.2.3 激光熔覆工艺参数

采用正交试验对经过前处理试样的激光熔覆工艺参数进行研究,可得当激光功率为 1.6 kW、扫描速度为 120 mm/min、光斑直径为 2 mm 时所形成的涂层宏观形貌相对最好;同时制备未经前处理试样涂层的最佳工艺参数为激光功率 1 kW、扫描速度 300 mm/min、光斑直径 2 mm^[16-18]。结合表 1 可得试样前处理后所需的激光比能提高了 3 倍,说明前处理使试样的相关物理性能发生了很大变化。图 6 是前处理前后试样粘结层界面的初始形态示意图,从图 6(b)可得前处理之后粉末颗粒致密度提高但粉末片表层的平整度降低,因此使得粉体颗粒完全熔化需要更多的能量,所需的激光比能大幅度提高。激光比能越大,材料获得的热量越多,粉末片和基体材料越容易熔化形成冶金结合;激光比能过小则会导致其无法完全熔化。

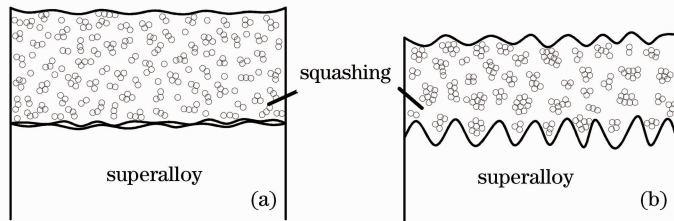


图6 试样和粉末压片结合界面的初始形态示意图。(a) 试样 1；(b) 试样 2

Fig. 6 Schematic of bonding interfacial morphologies of samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

4 结 论

粉末压片冷等静压处理能够提高高温合金 NiCoCrAlY 熔覆涂层结合界面的结合质量。在冷等静压处理之前对基体待熔覆表面进行喷砂处理,基体表面粗糙度增加,活性增加,对提高基体与粘结层的结合强度有较大的影响。冷等静压处理后的压片致密度增加,熔覆能量提高,此时粉体颗粒熔化迁移距离减小,涂层与基体间结合界面处的裂纹减少。

参 考 文 献

- Guo Jianting. Materials Science and Engineering for Superalloy[M]. Beijing: Science Press, 2010.
郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- Zhi Xiang, Zhao Jianfeng, Cai Jun. Effect of process parameters on forming quality of fusion zone in laser cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 101403.
智翔, 赵剑峰, 蔡军. 激光熔覆修复工艺参数对熔合区成形质量的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101403.
- Liu Chunbo, Lin Feng, Jiang Xianliang. Current state and future development of thermal barrier coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(1): 1-13.
刘纯波, 林峰, 蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 1-13.
- Xu Hui bin, Gong Sheng kai, Liu Fushun. Recent development in materials design of thermal barrier coatings for gas turbine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7-12.

- 徐惠彬, 官声凯, 刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 7-12.
- 5 Yang Yongqiang, Tian Nailiang. Laser cladding of high temperature alloys and their application[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(8): 632-636.
- 杨永强, 田乃良. 激光熔覆高温合金及其应用[J]. 中国激光, 1995, 22(8): 632-636.
- 6 Bai Ruijin, Zhang Liguo. Turbine blade repair and its market analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, (12): 37-40.
- 白瑞金, 张利国. 涡轮叶片修复及其市场分析[J]. 航空制造技术, 2002, (12): 37-40.
- 7 Xu Songhua, Xiao Yang, Li Jian. Organization property researches of the laser repair technology in the helicopter engine turbine oriented implement[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2311-2316.
- 徐松华, 肖阳, 李健. 直升机发动机涡轮导向器激光修复组织性能研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2311-2316.
- 8 Yuan Qinglong, Feng Xudong, Cao Jingjing, *et al.*. Research on microstructure of Ni-based alloy coating by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2116-2120.
- 袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2116-2120.
- 9 A G Evans, D R Mumm, J W Hutchinson, *et al.*. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings[J]. Progress of Materials Science, 2001, 46(5): 505-553.
- 10 T Xu, S Faulhaber, C Mercer, *et al.*. Observations and analyses of failure mechanisms in thermal barrier systems with two phase bond coats based on NiCoCrAlY[J]. Acta Materialia, 2004, 52(6): 1439-1450.
- 11 Gao Xuesong, Tian Zongjun, Huang Yinhui, *et al.*. Microstructure and anti-oxidation of MCrAlY coating by high-frequency induction aided laser cladding[J]. J Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(1): 37-42.
- 高雪松, 田宗军, 黄因慧, 等. 高频感应辅助激光熔覆 MCrAlY 涂层的微观组织及其抗氧化性能[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 37-42.
- 12 Hao Jianjun, Li Huiping, Ma Yuejin, *et al.*. Experimental investigation on repairing iron cast parts with grit-blasting pretreatment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, (4): 120-122.
- 郝建军, 李会平, 马跃进, 等. 喷砂预处理在铸铁零件修复中的应用研究[J]. 农业机械学报, 2003, (4): 120-122.
- 13 C Lin, S Lin. Effects of granule size and distribution on the cold isostatic pressed alumina[J]. J Mater Process Technol, 2008, 201(1-3): 657-661.
- 14 H G Kim, J W Lee, K T Kim. The effect of a rubber mold on densification and deformation of a metal powder compact during cold isostatic pressing[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 318(1-2): 174-182.
- 15 Wang Hongyu, Zuo Dunwen, Lu Yingyan, *et al.*. Originate mechanism and prevent process of substrate cracks in laser cladding MCrAlY coatings on nickel-based superalloy[J]. J Aeronautical Materials, 2008, 28(6): 57-60.
- 王宏宇, 左敦稳, 陆英艳, 等. 镍基合金激光熔覆 MCrAlY 涂层基体裂纹的成因与控制[J]. 航空材料学报, 2008, 28(6): 57-60.
- 16 Q Meng, L Geng, D Ni. Laser cladding NiCoCrAlY coating on Ti-6Al-4V[J]. Mater Lett, 2005, 59(22): 2774-2777.
- 17 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296-301.
- 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- 18 Zhong Rutao, Xiong Zheng. Research on continuous/pulse laser cladding superalloy K403[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 852-857.
- 钟如涛, 熊征. 连续/脉冲 CO₂ 激光熔覆高温合金 K403[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 852-857.