

MCrAlYs 高温封严涂层制备工艺的优化及其性能

杨伟华

(北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 采用真空等离子喷涂与大气等离子喷涂的复合方法在 K77 基体材料表面制备出具有三层结构的 MCrAlYs 高温封严涂层, 分别测量了涂层的金相组织、结合强度、表面洛氏硬度(HR15Y)以及抗粒子冲刷能力等性能。研究结果表明: 喷涂功率是影响高温封严涂层性能的关键因素, 喷涂功率高, 粒子熔化好、涂层结合好、抗粒子冲刷性能相对较高; 但是喷涂功率过高, 涂层表面洛氏硬度相对较高, 使用过程中, 涂层易对转子叶片造成磨损伤害。因此选择合适的喷涂功率以在涂层结合效果与表面硬度之间建立一个平衡是高温封严涂层应用的关键。研究发现: 在试验范围内, 31 kW 为最合适的喷涂功率。

关键词: 高温封严涂层; 粒子冲刷; 表面洛氏硬度

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)06-0068-05

Optimization of the Preparation Technique of MCrAlYs High Temperature Seal Coating and Its Performance

YANG Wei-hua

(National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Process, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024)

Abstract: Three-layer MCrAlYs high temperature seal coatings were prepared on K77 alloy by low pressure plasma spray (LPPS) and air plasma spray (APS). Its metallographic structure, bonding strength, surface rockwell hardness(HR15Y) and anti-particle-blast performance were tested. The results show that the spray power is the key factor of the coating performance. The higher the spray power is, the better the particles melted. Therefore, the coatings will have higher bonding strength and better anti-particle-blast. However, if the power is too high, the coatings' surface hardness will change into higher value and do more damages to blades. As a result, the points to find a suitable power to keep a balance between the bonding strength and the surface hardness for applications. It is found that 31 kW is better for the coatings in the test range.

Key words: high temperature seal coatings; anti-particle-blast; surface rockwell hardness

0 引 言

新一代飞机要求具有超音速巡航、非常规机动性、低环境污染、低油耗、低全寿命成本等性能, 这些性能主要依靠提高航空发动机性能来实现^[1-2]。转动叶片和机匣间隙与航空发动机的性能密切相关: 典型发动机高压涡轮径向间隙增加 0.025 mm, 燃油消耗率将会增加大约 0.1%, 而排气温度将会增加 1 °C^[3]; 如果压气机径向间隙

增加 0.076 mm, 单位耗油率约增大 1%^[4]。另外, 叶尖间隙与叶高之比每增加 0.01, 会引起压气机或涡轮效率降低约 0.8%~1.2%; 会使双转子涡轮风扇发动机的耗油率增加 2%, 涡轮轴发动机的耗油率增加约 1.5%^[5]。压气机的运转间隙过大, 它的气动特性可能在发动机加速时遭到破坏, 并引起喘阵^[6]。因此降低转动叶片与机匣间隙, 将提高航空发动机的性能。

收稿日期: 2012-08-27; 修回日期: 2012-11-15

作者简介: 杨伟华(1976—), 男(汉), 河北迁安人, 高级工程师, 硕士; 研究方向: 表面工程

网络出版日期: 2012-11-28 16:21; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20121128.1621.011.html>

引文格式: 杨伟华. MCrAlYs 高温封严涂层制备工艺的优化及其性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 26(6): 68-72.

在发动机的压气机或涡轮机的机匣上制备可磨耗封严涂层,能够减小这一间隙,从而提高航空发动机的性能。理想的封严涂层应既有足够的结合强度以抵抗高速气流和粒子的冲刷性能,同时也要具有较低的表面硬度以降低损伤转子叶片的可能。

采用热喷涂方法将金属或陶瓷材料熔化并加速撞击工件基体表面形成孔隙可调涂层,该涂层能够满足上述可磨耗封严涂层的要求,同时具有涂层结构设计灵活、生产工艺便捷、成本低廉、可重现性高的特点,因此热喷涂封严涂层广泛应用于先进航空发动机的高温封严部位^[7-8]。热喷涂封严涂层原理如图 1 所示^[9]。

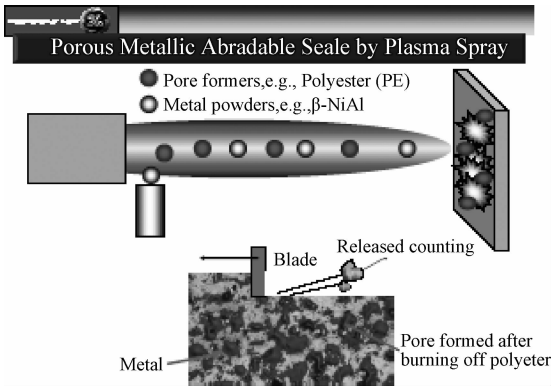


图 1 热喷涂封严涂层及其工作原理^[9]

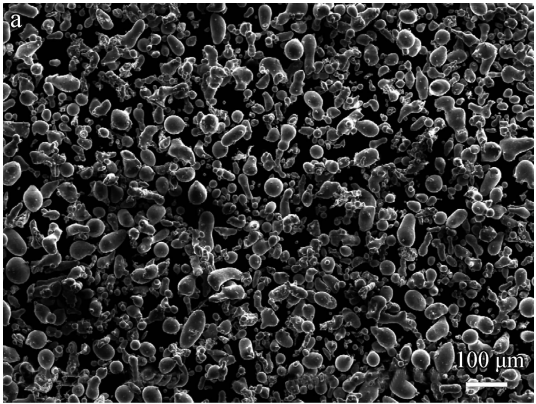
Fig. 1 Thermal spray seal coating and its working principle^[9]

文中针对航空发动机可磨耗封严的需求,制备了 NiCoCrAlY 基高温封严涂层,测试了在试验条件下涂层抗粒子气流冲刷的能力,分析了高温封严涂层抗粒子冲刷性能与喷涂功率之间的关系,提出了高温封严涂层性能的控制方法。

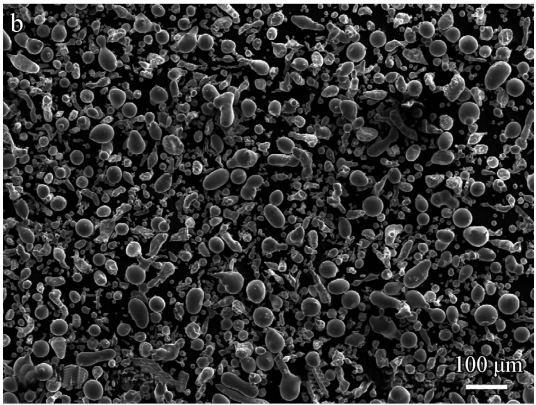
1 试验方法与表征

1.1 原材料

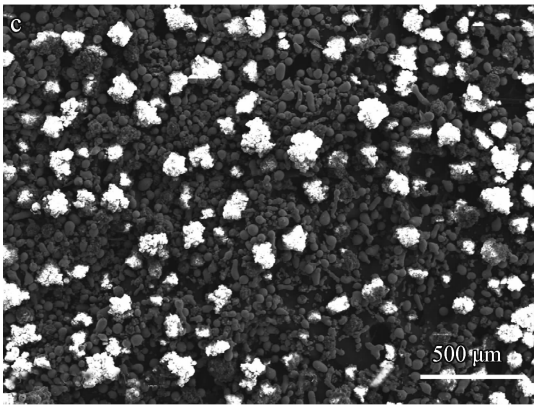
试验基体材料选择 K77 高温合金,尺寸分别为 20 mm×10 mm×5 mm,Φ 25 mm×7.7 mm 和 Φ 54 mm×6 mm;粘结底层粉末材料 F1 为 DGNiCoCrAlY 与焊料(质量分数为 12%~18%)的混合物,粒度 10~50 μm;中间层粉末 F2 是 DGNiCoCrAlY 与焊料(质量分数为 40%~50%)的混合物,粒度 10~80 μm;面层粉末 F3 为 DGNiCoCrAlY 和造孔剂(质量分数为 10~15%)的混合物。各种粉末形貌如图 2 所示。



(a) F1: for bonding coating



(b) F2: for middle coating



(c) F3: for top coating

图 2 原始粉末的形貌

Fig. 2 Morphologies of raw powder

1.2 涂层的制备方法

在 K77 的基体上,采用真空等离子喷涂(ZDP-1700)、大气等离子喷涂(APS3000)和真空钎焊(SWS30)的方法制备了高温封严涂层,粘结底层与中间层喷涂完毕后一起进行真空钎焊处理;面层喷涂完毕后,用箱式电阻炉在 500 ℃ 热处理,去除造孔剂。涂层具体结构如图 3 所示,具体工艺参数如表 1 所示。

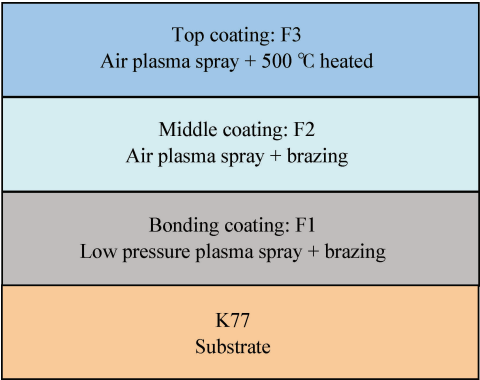


图 3 涂层的结构
Fig. 3 Structure of the coatings

表 1 喷涂参数

Table 1 Spray parameters of the coatings

Coatings	Equipments	Parameters
Bonding coating	ZDP-1700 (LPPS)	Vacuum; 5~10 kPa; Ar; 40 L/min; H ₂ : 12 L/min; power 35~40 kW; standoff: 270 ~ 300 mm; powder rate: 40 ~ 50 g/min; carrier: 10 L/min; thickness: 0.13~0.18 mm
	SWS30 (Brazing furnace)	Brazing with middle coating 1 000~1 100 °C for 15~20 min, cool to 550 °C in furnace, to room temperature in furnace. Ar: 50 L/min; H ₂ : 9 L/min; power: 32~35 kW; standoff: 90~100 mm; powder rater: 50 ~ 60 g/min carrier: 10 L/min; nozzle: GH; thickness: 0.25 ~ 0.30 mm
Middle coating	APS3000 (APS)	Brazing with bonding coating 1 000~1100 °C for 15~20 min, cool to 550 °C in furnace, to room temperature in furnace. Ar: 60 L/min; H ₂ : 9 L/min; power, P; standoff: 100 ~ 110 mm; powder rate: 40 ~ 60 g/min, carrier: 10 L/min; nozzle: GH; thickness: 2.4~2.6 mm
Top coating	APS3000 (APS)	

Note: P is 36 kW, 31 kW, or 25 kW; named 1#, 2#, 3#

1.3 涂层性能表征

1.3.1 涂层组织

高温封严涂层的抗粒子冲刷性能主要取决

于涂层的组织结构。涂层粒子变形是否充分、孔隙分布是否均匀将最终决定抗冲刷性能的好坏。因此采用扫描电镜(JSM-6510)对涂层组织进行观察。

1.3.2 涂层结合强度

涂层结合强度反映了涂层与基体的完整性,依据航空工业标准 HB5476-91 对涂层的结合强度进行了测量,如图 4 所示:

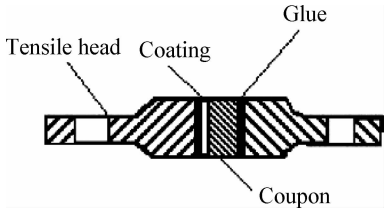


图 4 结合强度测量方法示意
Fig. 4 Diagram of the bonding strength test

1.3.3 抗粒子冲刷性能

抗粒子冲刷测试是反映高温封严涂层在发动机工况下,抗高速气流冲刷状态的一种方法。具体试验条件如下:采用 0.2~0.3 MPa 的压缩空气将 0.3 mm 的棕刚玉砂粒吹向涂层表面,入射角保持在(90°±15°),吹砂枪喷嘴到涂层的距离控制在 70~80 mm,记录作用时间与涂层损失厚度之间的关系,作用后样品厚度以冲刷坑中心为准。

1.3.4 涂层表面洛氏硬度

表面洛氏硬度是衡量高温封严涂层使用效果的有效手段,数值越高,越容易损伤转子。文中采用表面洛氏硬度(HR15Y)对其进行表征,即采用 15 kg 的载荷将直径 12.7 mm 的钢球作用于涂层表面,计算并记录相应的硬度值。涂层表面洛氏硬度 HR15Y 小于 85 时,涂层与转子叶片匹配较好,当高于此值时则容易损伤叶片。

2 结果与讨论

2.1 微观组织与结合强度分析

试验获得的涂层的组织均呈现出典型的层状结构,如图 5 所示,符合热喷涂工艺的“抛锚作用”机理,涂层与基体间通过变形粒子相互连接起来,形成机械结合。在变形粒子间不可避免的形成孔隙,经过测量,涂层孔隙率分别为 37.4%、30.1%和 26.3%;为进一步分析涂层的组织结

构,采用扫描电镜观察了涂层的表面形貌,如图 6 所示。由图 6 可以发现随着功率的增加粒子变形更加充分,表面形貌更加平整。

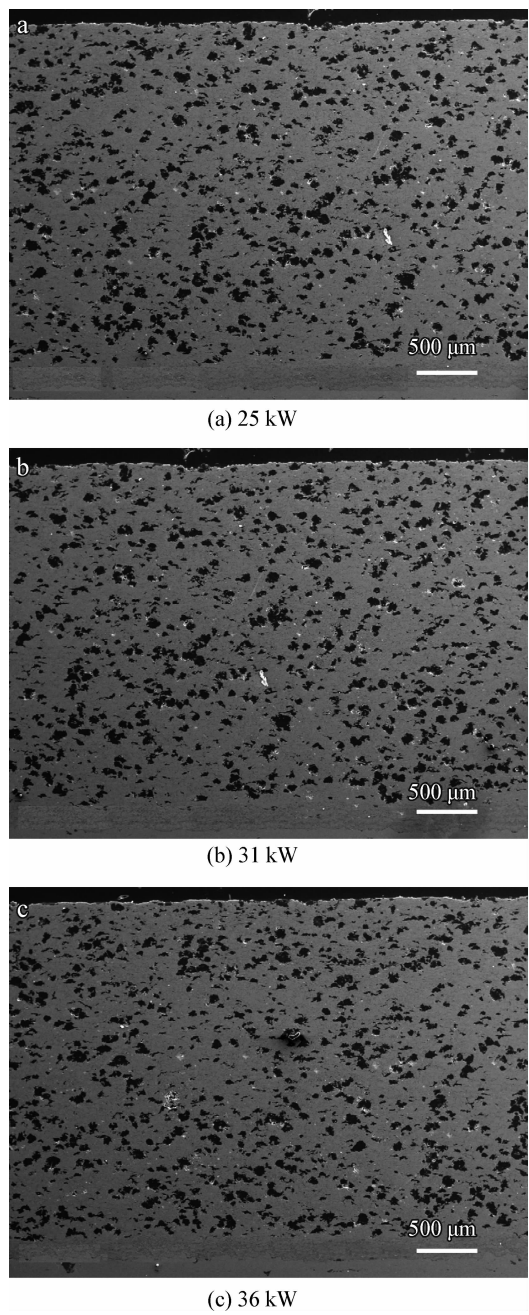


图 5 典型涂层的截面组织结构
Fig. 5 Metallographies of the section of the coatings

涂层的结合强度测量结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着功率增加涂层的结合强度逐级增加,当功率为 25 kW,31 kW 和 36 kW 时,结合强度分别为 4.18 MPa,6.70 MPa 和 8.15 MPa。这说明功率越大,粒子间结合越好,涂层越不容易被拉脱。

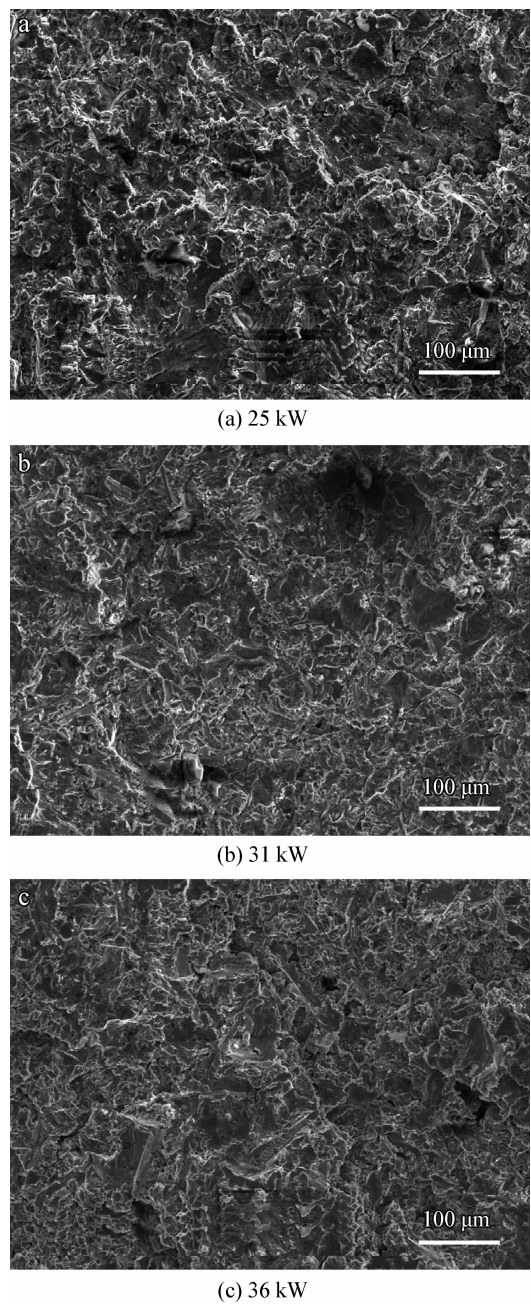


图 6 典型涂层的表面组织结构
Fig. 6 Morphologies of the surface of the coatings

2.2 抗粒子冲刷性能

抗粒子冲刷试验的测试结果如图 8 所示。采用 25 kW 的喷涂功率获得的涂层经过粒子冲刷 20 s 后,涂层损失的厚度迅速增加,达到 2.82 mm/min,随后又出现放缓的趋势;而采用 31 kW 和 36 kW 的高喷涂功率时,涂层厚度损失速度基本一致,约为 0.3 mm/min,只是前者在起始阶段损失更快,说明其粒子间结合效果不如后者好,与结合强度测试结果吻合。

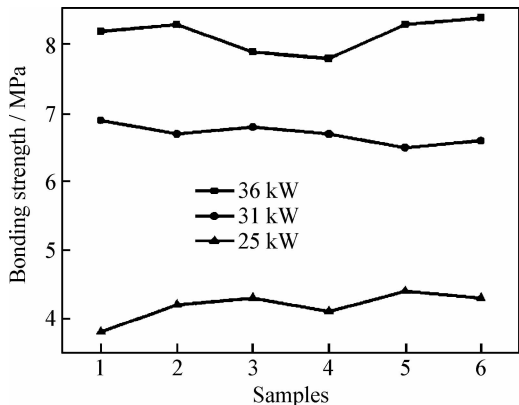


图 7 涂层的结合强度

Fig. 7 Bonding strength of the coatings

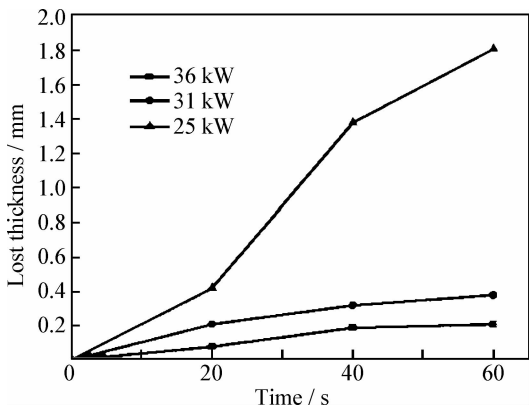


图 8 涂层抗粒子冲刷测试结果

Fig. 8 Anti-particle-blast testing results of different coatings

2.3 表面洛氏硬度

涂层表面洛氏硬度的测量结果如图 9 所示。由图可以看出,随着功率增加涂层的表面洛氏硬度 HR15Y 逐渐增加,25,31 和 36 kW 时,分别为 72.6,81.6 和 88.6。这说明变形粒子结合越好,其表面硬度越大,对转子造成损害的能力越强。当采用 36 kW 时,涂层硬度大 HR15Y85,将容易损害转子叶片,因此喷涂功率采用 31 kW,将获得硬度适合应用情况,且涂层结合更好的组织。

3 结 论

采用真空等离子喷涂与大气等离子喷涂的复合方法制备了三层 MCrAlY 高温封严涂层,并对涂层进行了性能测试和分析,研究结果如下:

(1) 涂层在喷涂功率为 25, 31 和 36 kW 时均可以形成。高功率下,涂层结合强度和表面洛氏硬度分别可以达到 8.15 MPa 和 HR15Y 88.6,此时涂层抗粒子冲刷能力也最强,厚度损失速度

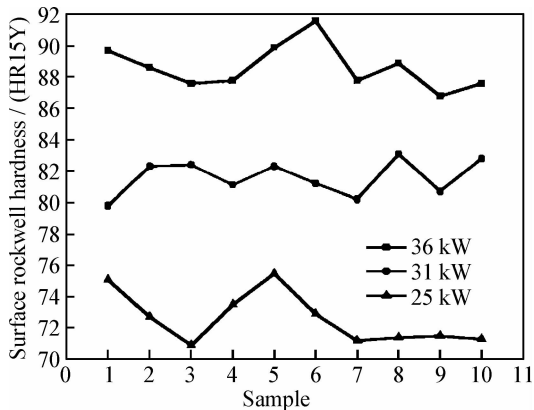


图 9 涂层的表面洛氏硬度

Fig. 9 Surface rockwell hardness of different coatings

约为 0.3 mm/min;

(2) 喷涂功率是高温封严涂层抗粒子冲刷性能的关键因素,喷涂功率高、粒子熔化好、结合强度高、抗粒子冲刷性能相对较高,反之则较差;

(3) 尽管高喷涂功率能够获得抗粒子冲刷效果好的涂层,但是其表面洛氏硬度相对较高,在使用过程中易对转子叶片造成磨损伤害。因此选择合适的喷涂功率,在涂层结合效果与表面硬度之间建立一个平衡,是高温封严涂层应用的关键。研究结果表明 31 kW 是较合适的喷涂功率。

参考文献

- [1] 张加圣, 王海涛, 万小朋. 第四代战斗机性能指标概述 [J]. 航空制造技术, 2008(16): 66-68.
- [2] 李成功, 傅恒志, 于翹, 等. 航空航天材料(第一版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [3] 岂兴明, 朴英, 祝剑虹, 等. 某型航空发动机高压涡轮叶顶间隙三维数值分析 [J]. 航空动力学报, 2008(5): 904-906.
- [4] 杨贵铭, 王明富, 王廉士. 涡桨 6 发动机叶尖间隙的控制技术 [J]. 航空工程与维修, 1994(9): 23-24.
- [6] 王薇, 张琦, 黄予勋. 发动机封严涂层的研究进展 [J]. 航空工程与维修, 1996(11): 3-4.
- [7] 陈礼顺. 喷涂高温封严涂层对航空发动机性能的影响 [J]. 新工艺·新技术·新设备, 2002(10): 66-68.
- [8] 田晔, 张淑婷, 马江虹, 等. 可磨耗封严涂层发展及应用 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2006(s): 96-99.
- [9] Raymond E Chupp. Development of higher temperature abradable seals for industrial gas turbines. [J/OL]. NASA/CP-2004-212963(V1).

作者地址: 北京市朝阳区八里桥东军庄 1 号 100024
Tel: (010) 8570 1493
E-mail: junioryang@sina.com