

涡轮叶片低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层 未熔颗粒尺寸超标研究

黄艳松¹, 曾威², 邓春明²

(1. 中国人民解放军海军装备部, 北京 100070; 2. 广东省科学院新材料研究所, 广东 广州 510650)

摘要: 航空发动机燃烧室、叶片、涡轮外环等热端部件的工作环境恶劣, 除需承受高温环境外, 还需经受高温燃气引起的腐蚀和浸蚀, 因此部件高温防护涂层的应用至关重要。防护涂层不仅能提升部件的耐温能力, 还能延长其服役时间, 进而提高发动机的整体性能。NiCoCrAlYTa 涂层是一种典型的高温防护涂层, 在 1050 °C 下具有良好的服役性能。这是由于 Ta 和 Y 等元素对 Al₂O₃ 氧化膜选择性生成具有促进作用, 使得 NiCoCrAlYTa 涂层在高温下能形成完整的 Al₂O₃ 膜, 从而具有良好抗氧化和抗热腐蚀性能。采用低压等离子喷涂技术, 在高温合金上制备 NiCoCrAlYTa 涂层, 该涂层具有结构致密、元素分布均匀、孔隙率低, 以及能显著提高基体的疲劳极限和出色的高温服役性能等优点, 已成为涡轴发动机热端部件, 特别是涡轮叶片的首选涂层。但是, 低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层存在厚度分布不易调控、未熔颗粒尺寸易超标等问题, 尤其是未熔颗粒会导致涂层性能下降及抗氧化、抗腐蚀能力降低, 使叶片使用寿命缩短。在某型发动机涡轮叶片涂层试制中发生批次性未熔颗粒尺寸超标问题, 以此批次涂层叶片为研究对象, 通过对未熔颗粒形成进行分析、原因排查和复现验证, 确定是真空舱体中的 NiCoCrAlYTa 粉尘在喷涂时进入涂层中, 导致涂层的未熔颗粒尺寸超标。针对问题原因, 通过采取强化转移弧清理, 可有效避免粉尘污染带来的未熔颗粒尺寸超标问题, 获得符合技术质量要求的涂层。该研究为低压等离子喷涂涂层未熔颗粒尺寸超标问题的处置提供了工程经验。

关键词: 涡轴发动机; 涡轮叶片; 高温合金; 高温防护涂层; NiCoCrAlYTa; 低压等离子喷涂; 未熔颗粒; 转移弧清理

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2025)01-0190-06

引文格式: 黄艳松, 曾威, 邓春明. 涡轮叶片低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层未熔颗粒尺寸超标研究[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(1): 190-195.

HUANG Yansong, ZENG Wei, DENG Chunming. Study of Unmolten Particle Size Exceedance in Low Pressure Plasma Sprayed NiCoCrAlYTa Coatings on Turbine Blades[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(1): 190-195.

0 引言

航空发动机涡轮叶片是将高温燃气的能量转变为转子机械功的关键重要零件, 其工作环境恶劣, 除承受着高速旋转产生的巨大离心力、气体压力和振动负荷等外, 还要经受高温燃气引起的腐蚀和浸蚀, 是决定航空发动机寿命的主要关键零件之一^[1-2]。随着航空发动机性能快速提升, 涡轮叶片、导向器等高温部件工作温度越来越高, 尤其是在海洋环境中服役的装备, 对材料的高温力学、抗高温氧化、抗热腐蚀等综合性能提出了更高要求。为解决上述问题, 单靠合金材料本身同时兼顾这些性能是难以实现的, 通过表面涂覆高温防护涂层是一种有效且节能的方法。

航空发动机涡轮叶片对涂层质量有着严格的要

求(如涂层厚度在 60—80 μm 范围内, 涂层孔隙率小于 1%), 尤其是对未熔颗粒尺寸有明确的量化指标要求(涂层内未熔颗粒尺寸不允许超过 5 μm)^[3-8]。这主要是因为未熔颗粒可能会导致涂层/叶片基体界面或涂层内界面分离, 在服役中出现涂层开裂、脱落的风险。为提高航空发动机涡轮转子叶片抗高温氧化能力, 采用低压等离子喷涂工艺在叶片表面喷涂 NiCoCrAlYTa 合金涂层。大量研究表明^[9-14]: 在 MCrAlY 中添加的 Ta 元素可促进形成致密的 TGO 层, 从而有效阻止涂层发生氧化, 在 1050 °C 下可以实现完全抗氧化; 低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层的叶片经扩散处理后, 叶片基体与涂层形成互扩散层, 使涂层与基体发生冶金结合, 不易出现涂层开裂、脱落的风险。

收稿日期: 2024-11-21

作者简介: 黄艳松, 本科, 高级工程师, 研究方向为航空装备设计制造。E-mail: 2594460261@qq.com。

本文以某航空发动机涡轮叶片为研究对象,该叶片基体材料为DZ22B定向凝固镍基高温合金,长时工作温度为1 050 ℃。然而,该航空发动机涡轮叶片试制时,发现首批产品出现涂层未熔颗粒尺寸超标的问题,这严重影响了产品质量和交付进度。因此,对该批次叶片进行了原因排查分析和复现验证,以确定原因,制备出符合技术质量要求的涂层。

1 低压等离子喷涂工艺

低压等离子喷涂又称真空等离子喷涂^[15],是在低压、氩气保护性气氛中进行,以获得高结合强度、高致密涂层的一种工艺方法。较传统的大气等离子喷涂,低压等离子喷涂具有更高速度的等离子焰流,从而获得的涂层结合强度和致密度更高,而在保护性气氛下可以避免沉积过程中金属氧化,获得层间结合更强的金属涂层。低压等离子喷涂工艺的另一个优势是转移弧清理,在此过程中工件作为等离子弧电极可将等离子弧引至其表面,在等离子体的轰击作用下将表面的镶嵌的砂粒和附着的粉末颗粒等污染物质清除干净,以获得清洁表面,从而获得与基体界面结合较强的涂层。

2 低压等离子 NiCoCrAlYTa 涂层的制备

采用低压等离子喷涂设备制备涡轮叶片的 NiCoCrAlYTa 涂层,喷涂1舱装2个转台,每个转台上最大可装6件叶片,即每舱最大可喷涂12件叶片(见图1)。喷涂过程中每个转台会进行公转,同时转台上的每个工位可以进行自转,以保证在叶片表面获得满足设计要求的涂层质量和厚度分布。喷涂涂层材料为 NiCoCrAlYTa 球形粉末,粒径为10—38 μm,由欧瑞康美科公司采用真空气雾化法制备。

NiCoCrAlYTa 粉末形貌图2所示,组成成分列于表1。表2为低压等离子喷涂工艺参数。

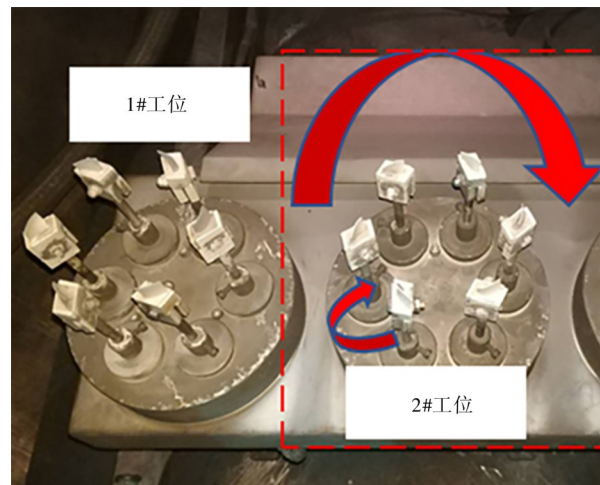


图1 叶片喷涂工位安装示意图

Figure 1 Blades spraying station installation diagram

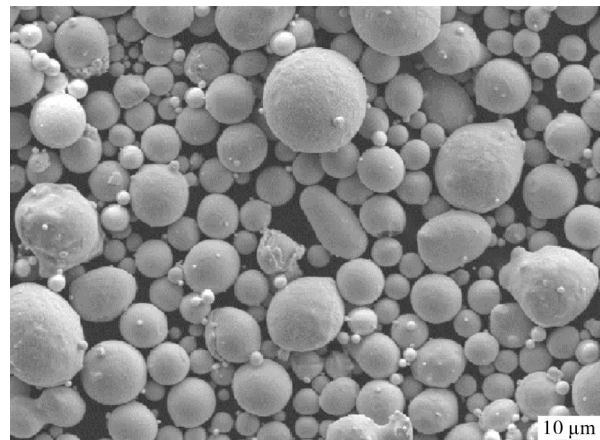


图2 NiCoCrAlYTa 合金粉末形貌图

Figure 2 Morphology of the NiCoCrAlYTa powders

表1 NiCoCrAlYTa 粉末化学成分

Table 1 Composition of the NiCoCrAlYTa powders

元素	Co	Cr	Al	Y	Ta	Ni
含量 w/%	22.0—24.0	19.0—21.0	7.5—8.5	0.4—0.8	3.5—4.5	余量

表2 转移弧和喷涂工艺参数

Table 2 Parameters of the transfer arc sputtering and spraying

参数	工艺	
	转移弧	喷涂
Ar 流量/(L·min ⁻¹)	40—60	50—70
H ₂ 流量/(L·min ⁻¹)	—	7—9
喷枪电流/A	550—580	620—680
转移弧电流/A	25—35	—

喷涂前,依次对1号、2号转台进行转移弧清理,目视检查清理干净后,先喷涂1号转台叶片,再喷涂2号转台叶片。每批首舱为首件检验舱,一般每个

转台装1至2件叶片,喷涂后按规定开展外观质量检查,确定涂层未熔颗粒尺寸、孔隙率及厚度均合格后方可进行批量加工。每批叶片喷涂完成后,随机抽取2件产品进行扩散处理和金相检查,涂层与叶片基体界面应无污染、无分离、有扩散带,否则应成批重新喷涂,合格后才能进行工件扩散处理。

3 涂层中未熔颗粒形成的原因及问题定位分析

3.1 未熔颗粒形成的原因

未熔颗粒是指喷涂过程中在涂层表面沉积形成的球形未熔颗粒。未熔颗粒的形成主要有3种原

因:等离子焰流的热焓值低,当喷枪电流、功率、主气流量等工艺参数导致的等离子焰流热焓值低时,使喷涂粉末未充分熔融即喷涂至工件表面,尤其是粉末中的粗大粒子,从而导致涂层中存在未熔的大颗粒粒子;喷涂距离不合理,当喷涂距离过近时粉末尚未来得及充分熔融即被喷涂至工件表面,导致未熔颗粒尺寸超标,而喷涂距离过远时熔融的粉末在焰流中运行时间较长而重新被冷却,同样可导致涂层中未熔颗粒尺寸超标;舱内存在粉尘污染,在低压等离子喷涂过程中舱内处于低压状态,焰流边缘飘落的散粉呈弥散状态分布于舱内并粘附于零件表面,这类粉末粒子存在涂层中而导致未熔颗粒尺寸超标。

3.2 问题定位分析

涡轮转子叶片首批投产共73件,将首舱喷涂产品编号为1号、2号的两件试样分别装于1号和2号转台,喷涂后按检验规范检查了外观质量,当涂层厚度、空隙率、未熔颗粒尺寸均符合要求时,即通过了首件检验。随后,按工艺规程规定对该批剩余71件进行喷涂,共喷涂6舱。当喷涂完成后,分别抽取3舱2号转台一件叶片(标记为3-2-1)、5舱2号转台一件叶片(标记为5-2-1)进行扩散处理和金相检查。结果表明,除发现两件叶片进气边涂层均出现熔颗粒尺寸超标的问题外,其余项目检查结果均符合规定要求。其中,5-2-1叶片进气边部位涂层的最大未熔颗粒尺寸达 $30\ \mu\text{m}$ (见图3),远超未熔颗粒尺寸 $\leq 5\ \mu\text{m}$ 的规定要求。

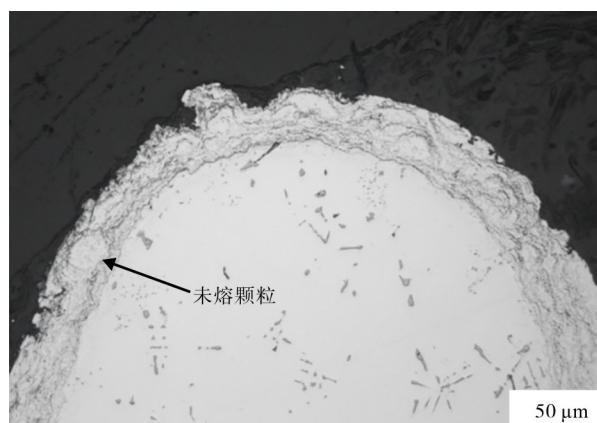


图3 5-2-1叶片涂层未熔颗粒尺寸形貌

Figure 3 Morphology of the unmelting particle in the 5-2-1 blade coating

为解决未熔颗粒尺寸超标问题,补充对同舱次、相邻舱次喷涂的叶片进行100%金相检查。结果表明:3舱次、5舱次1号转台喷涂的12件叶片均未出

现涂层未熔颗粒尺寸超标问题,同样2舱次、4舱次、6舱次共35件叶片也均未出现涂层未熔颗粒尺寸超标问题;但是,3舱次2号转台喷涂的34号和36号及5舱次2号转台喷涂的57号、59号和62号共5件叶片,出现进气边涂层未熔颗粒尺寸超标问题。综上检查结果发现,该问题集中在3号、5号舱次2号转台喷涂的7件叶片,未熔颗粒尺寸超标发生率达29.16%,且超标未熔颗粒均处于进气边,最大的未熔颗粒尺寸达 $30\ \mu\text{m}$ 。

4 原因排查、复现验证及解决措施

4.1 原因排查

为解决低压等离子涂层进气边未熔颗粒尺寸超标问题,从人员资质、所使用材料、设备状态、喷涂工艺、喷涂环境和测试方法6大方面,按照特殊过程开展排查工作。结果表明,涂层中未熔颗粒尺寸超标,与舱内存在粉尘污染有关。当长时连续喷涂时,环境中的粉尘进入涂层中而形成未熔颗粒,尤其是在2号喷涂工位,经历了1号喷涂工位喷涂后,环境中的粉尘较1号喷涂工位喷涂时浓度大,因此出现未熔颗粒的概率也会更高。

图4为未熔颗粒形成示意图。叶片及其工装经一次转移弧后活性增强,容易吸附粉尘,这些吸附粉尘难以通过肉眼观察,二次转移弧如果未执行,则可能导致吸附粉尘得不到有效清理,在等离子工作气体吹动下叶片表面粉尘会形成扬尘,扬尘会在后续喷涂粒子的携带作用下沉积形成熔化不充分的涂层组织。

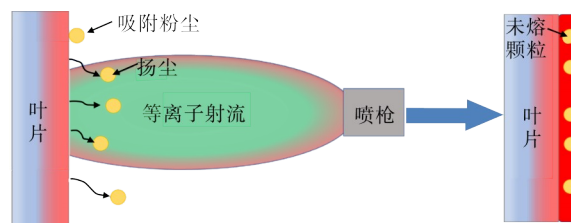


图4 未熔颗粒形成示意图

Figure 4 Schematic diagram of the formation of unmelting particles

4.2 复现验证

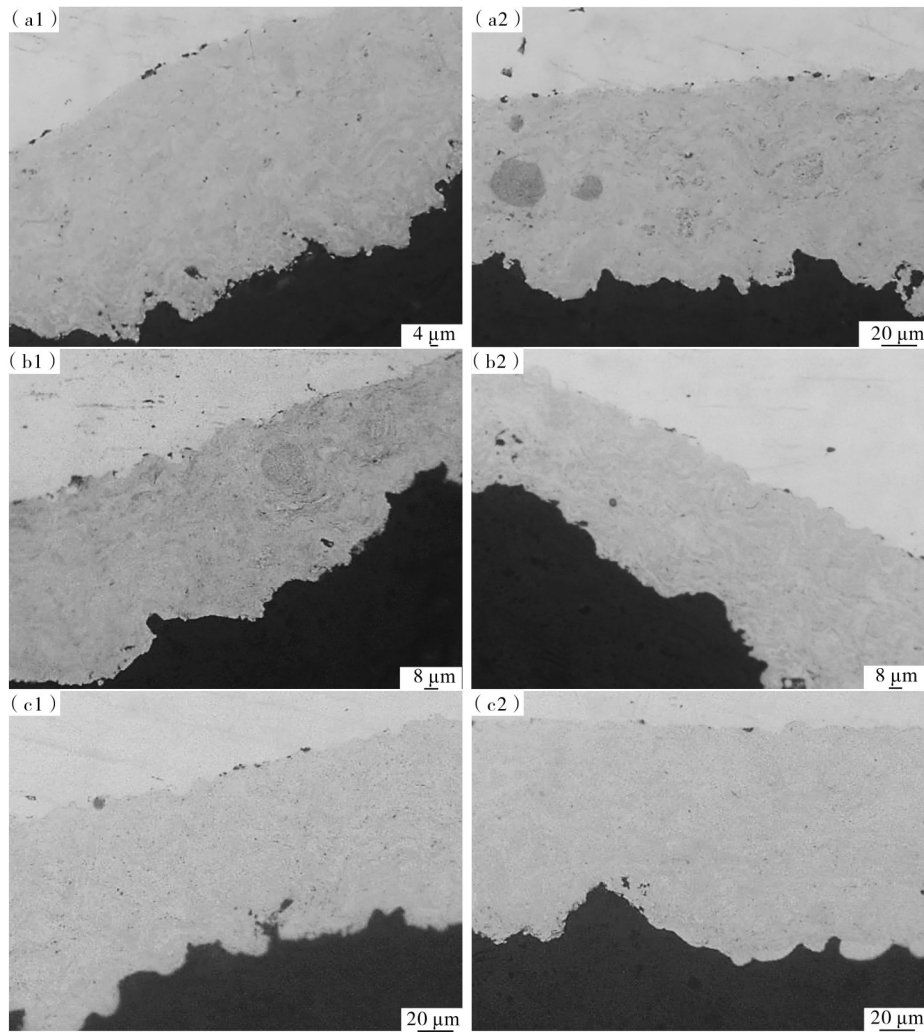
为验证原因排查分析的准确性,制定问题复现验证方案(见表3),分3舱次对36件新叶片进行喷涂试验。其中:第1舱模拟问题叶片按转台顺序进行喷涂,进行1次转移弧清理;第2舱改变转台喷涂顺序,进行1次转移弧清理;第3舱不改变转台喷涂顺序,但进行2次转移弧清理。按各方案完成新叶片喷涂后,对叶片进行100%金相检查,结果如图5

所示。结果表明:1-1组所有6件叶片涂层均未发现尺寸超标未熔颗粒(见图5(a1)),而1-2组有3件叶片涂层发现明显超标未熔颗粒且最大直径为32 μm(见图5(a2));2-1组有4件叶片出现尺寸明

显的超标未熔颗粒且最大直径为29 μm(见图5(b1)),而2-2组所有6件叶片涂层未发现尺寸超标未熔颗粒(见图5(b2));3组共12件叶片涂层均未发现尺寸超标未熔颗粒(见图5(c1)和(c2))。

表3 问题复现验证方案
Table 3 Problem replication validation programme

舱次	各转台安装的叶片编号		验证方法
	1号转台	2号转台	
1	1-1-1#—1-1-6#	1-2-1#—1-2-6#	依次对1号、2号转台进行1次转移弧清理后,先喷涂1号转台,再喷涂2号转台
2	2-1-1#—2-1-6#	2-2-1#—2-2-6#	依次对1号、2号转台进行1次转移弧清理后,先喷涂2号转台,再喷涂1号转台
3	3-1-1#—3-1-6#	3-2-1#—3-2-6#	依次对1号、2号转台进行一次转移弧处理后,先喷涂1号转台,再对2号转台进行第2次转移弧清理,随后喷涂2号转台



(a1)—1-1组叶片;(a2)—1-2组叶片;(b1)—2-1组叶片;(b2)—2-2组叶片;(c1)—3-1组叶片;(c2)—3-2组叶片。
(a1)—1-1 groups of blades;(a2)—1-2 groups of blades;(b1)—2-1 groups of blades;(b2)—2-2 groups of blades;(c1)—3-1 groups of blades;(c2)—3-2 groups of blades.

图5 叶片涂层金相形貌

Figure 5 Metallographic photos of the blades' coatings

复现验证结果表明,通过对2号喷涂工位喷涂前进行充分的2次转移弧处理,可有效地清理叶片

表面粉尘,防止喷涂后涂层未熔颗粒尺寸超标问题出现。说明,前一转台喷涂后需对下一转台进行2

次转移弧处理,以免造成下一转台上叶片涂层未熔颗粒尺寸超标。这一结论也充分证明,涡轮叶片低压等离子喷涂未熔颗粒尺寸超标问题,是由于未对每舱第2个喷涂的转台叶片进行2次转移弧清理,造成叶片表面粉尘无法去除干净所致,问题分析定位准确。

4.3 改进措施

基于以上原因分析和问题复现验证,发现在低压等离子喷涂过程中,随着喷涂时间的延长喷涂环境中粉尘浓度变大,从而导致2号喷涂工位涂层中存在未熔颗粒尺寸超标的问题。因此,针对工程化存在的问题,需要对低压等离子喷涂工艺进一步调整,即在进行2号喷涂工位喷涂前,增加2次转移弧清理后再进行正常喷涂,可有效控制涂层中的未熔颗粒尺寸。

5 结论

航空发动机涡轮叶片长时在高温、高速、高载工况下服役,需在高温合金涡轮叶片表面沉积高温防护涂层,以延长其使用寿命。涡轮叶片对所沉积的涂层质量要求高,除了常规的孔隙率、结合强度等技术指标外,还对涂层中的未熔颗粒尺寸有严格的技术要求。针对在涡轮叶片低压等离子喷涂生产过程中存在的涂层未熔颗粒尺寸超标问题,通过对喷涂过程中的未熔颗粒分析及问题复现验证,确定是因为长时间喷涂过程中低压等离子喷涂腔体中NiCoCrAlYTa粉尘进入涂层中,导致涂层中未熔颗粒尺寸超标。为获得符合技术质量要求的涂层,需在2号喷涂工位喷涂前增加转移弧清理工序,这可有效控制涂层中的未熔颗粒。

参考文献:

[1] 刘长福,邓明.航空发动机结构分析[M].西安:西北工业大学出版社,2006.

- [2] 陈光.航空燃气涡轮发动机结构设计[M].北京:北京航空学院出版社,1988.
- [3] 徐惠彬,宫声凯,周春根.航空发动机高温防护涂层的设计及失效机制研究[M].北京:北京航空航天大学,2004.
- [4] 姚明明,缙英俊,何业东.高温防护涂层研究进展[J].中国粉体技术,2005(3):32-37.
- [5] 李民,程玉贤.航空发动机用高温防护涂层研究进展[J].中国表面工程,2012,25(1):16-21.
- [6] 常伟,纪艳玲,袁文明.航空发动机高温防护涂层技术发展现状与标准需求[J].航空标准化与质量,2013(1):10-13.
- [7] 姬梅梅,朱时珍,马壮.航空航天用金属表面热防护涂层的研究进展[J].表面技术,2021,50(1):253-266.
- [8] 张亮,李晓刚,陈旭.等离子喷涂耐高温抗氧化涂层的研究进展[J].装备环境工程,2006(4):1-6.
- [9] 赵宇,毛熙焯,吕伯文,等.低压等离子喷涂NiCoCrAlYTa涂层的抗燃气热冲击性能研究[J].材料研究与应用,2024,18(1):123-132.
- [10] 蔡汉文,钟兴华,赵华玉,等.NiCoCrAlYTa粘结层与镍基高温合金基体的界面高温互扩散行为[J].有色金属材料与工程,2024,45(2):17-26.
- [11] 王天颖,王长亮,苗小锋,等.真空等离子喷涂NiCoCrAlYTa涂层在1050℃的氧化行为研究[J].失效分析与预防,2023,18(4):222-227.
- [12] YANG H Z, ZOU J P, SHI Q, et al. Analysis of the microstructural evolution and interface diffusion behavior of NiCoCrAlYTa coating in high temperature oxidation[J]. Corrosion Science, 2019, 153: 162-169.
- [13] 李佩,云海涛,姜媛媛,等.单晶高温合金NiCoCrAlYTa涂层高温氧化行为研究[J].热喷涂技术,2020,12(2):36-40.
- [14] 蔡汉文,钟兴华,赵华玉,等.NiCoCrAlYTa粘结层与镍基高温合金基体的界面高温互扩散行为[J].有色金属材料与工程,2024,45(2):17-26.
- [15] 戴达煌,周克崧,袁振海,等.现代材料表面技术科学[M].北京:冶金工业出版社,2004.

Study of Unmolten Particle Size Exceedance in Low Pressure Plasma Sprayed NiCoCrAlYTa Coatings on Turbine Blades

HUANG Yansong¹, ZENG Wei², DENG Chunming²

(1. Department of Naval Equipment, People's Liberation Army, Beijing 100070, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Aero-engine combustion chambers, blades, turbine outer rings and other hot-end components operate in harsh environments. In addition to being subjected to high temperature environments, these components are also subjected to corrosion and leaching caused by high temperature gases, so the application of high temperature protective coatings is critical.

Protective coatings not only improve the temperature resistance of components, but also extend their service life, which in turn improves the overall performance of the engine. NiCoCrAlYTa coating is a typical high-temperature protective coating, demonstrating excellent oxidation and corrosion resistance at 1 050 °C. Since elements such as Ta and Y have a promoting effect on the selective generation of Al₂O₃ oxide film, the NiCoCrAlYTa coating can form a complete Al₂O₃ film at high temperatures, resulting in good oxidation and thermal corrosion resistance. NiCoCrAlYTa coatings prepared on high-temperature alloys using low-pressure plasma spraying technology have the advantages of dense structure, uniform elemental distribution, low porosity, as well as significantly improving the fatigue limit of the substrate and excellent high-temperature service performance, which has become the coating of choice for the hot-end components of turboshaft engines, especially the turbine blades. However, the low-pressure plasma sprayed NiCoCrAlYTa coating has problems such as the thickness distribution is not easy to be regulated and the size of the unmelted particles exceeds the standard. Especially, the unmelted particles will lead to the decrease of coating performance and the reduction of oxidation and corrosion resistance, which will shorten the service life of the blade. The problem of batch size exceedance of unmelted particles occurred in the trial production of a turbine blade coating for a certain type of engine. Through the analysis of the unmolten particles in the spraying process, it is determined by exclusion and reproduction verification that the NiCoCrAlYTa dust in the vacuum chamber enters the coating during spraying, leading to the exceeding of the size of the unmelted particles in the coating. To address the cause of the problem, by adopting enhanced transfer arc cleaning, the problem of exceeding the size of unmelted particles caused by dust contamination can be effectively avoided, and coatings that meet the technical quality requirements can be obtained. This study provides engineering experience for the disposal of low pressure plasma spraying coatings with excessive size of unmelted particles.

Keywords: turboshaft engines; turbine blades; high-temperature alloys; high-temperature protective coatings; NiCoCrAlYTa; low-pressure plasma spraying; unmelted particles; transfer arc cleaning

(学术编辑:常成)