

民用飞机维修中碳化钨涂层的修理

韩天时^{1,2,*}, 姚卫星¹

1. 南京航空航天大学, 南京 210016
2. 上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241

摘要: [目的] 为建立某型国产支线飞机结构大部件表面碳化钨涂层的修理程序, 实现对钛合金结构件表面涂层的修复, 降低飞机维修成本。[方法] 根据大部件生产过程中超音速火焰喷涂(HVOF)碳化钨涂层的施工方法, 结合国际自动机工程师学会(SAE)的碳化钨涂层喷涂标准, 初步梳理了碳化钨涂层修理的技术要求和 workflows。[结果] 明确了碳化钨涂层修复前的准备条件, 介绍了喷涂的工艺要求和涂层特性, 并详细说明了喷涂后的测试分类和测试要求。[结论] 为后续碳化钨涂层修复在民用飞机结构大部件维修中的应用奠定了基础。

关键词: 支线飞机; 结构大部件; 钛合金; 碳化钨涂层; 超音速火焰喷涂; 维修

中图分类号: TG147.45; V267+.47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-227X(2026)04-0101-07

Repair of tungsten carbide coatings in civil aircraft maintenance

HAN Tianshi^{1,2,*}, YAO Weixing¹

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
2. COMAC Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China

Abstract: [Objective] To establish a repair procedure for tungsten carbide coatings on the surface of a major structural component of a domestic regional aircraft, enabling the restoration of coatings on the damaged titanium alloy structures and reducing the aircraft maintenance costs. [Method] Based on the high-velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spraying process used for tungsten carbide coatings during the production of major structural components, and in accordance with the relevant standards of the SAE International, the technical requirements and process flow for the repair of tungsten carbide coatings were preliminarily compiled. [Result] The preparation conditions before repair of tungsten carbide coating were clarified, the spraying process requirements and coating characteristics were introduced, and the post-spray testing categories and requirements were described in detail. [Conclusion] This work lays a foundation for the subsequent application of tungsten carbide coating repair in the maintenance of major structural components of civil aircraft.

Keywords: regional aircraft; major structural component; titanium alloy; tungsten carbide coating; high-velocity oxy-fuel thermal spraying; repair

钛合金具有许多优良特性, 主要体现在比强度高、硬度高、弹性模量低等方面, 对于降低飞机结构自重、提高结构效率和可靠性具有非常重要的作用。国外先进民用飞机上钛合金使用量可达到15%左右, 大幅提高了飞机的运营经济性^[1]。但是钛合金表面硬度低、耐磨性差, 为了提高钛合金的耐磨性, 有效利用其优良性能, 需要对钛合金表面进行处理。

碳化钨是金属陶瓷中硬度最高的碳化物, 具有优良的耐磨性, 已广泛应用于钛合金表面高耐磨涂层的制备^[2-3]。钛合金表面碳化钨涂层的制备方法主要包括喷焊、喷涂^[4]、激光熔覆^[5-6]、等离子熔覆^[7]等, 针对民用飞机钛合金结构大部件, 主要采用超音速火焰喷涂碳化钨的加工工艺, 在保证喷涂厚度均匀、涂层附着性强、零件整体外形差符合要求的前提下, 实现结构大部件表面涂层的大面积高效制备^[8-9]。

在民用飞机的使用过程中, 经常会出现钛合金表面碳化钨涂层损伤的情况。这种损伤一方面会破坏涂层完整性, 降低结构件的耐磨性, 另一方面会导致结构件外形出现缺陷, 影响结构功能的实现。因此, 如果能制定合理的钛合金结构件表面碳化钨涂层的修理程序, 实现对结构件表面受损的碳化钨涂层的修复, 可避免钛合金结构大部件的整体报废, 极大地降低结构件的修理费用、缩短飞机停机时间, 对提升国产民用飞机的运营经济性、降低维修成本具有非常重要的意义。本文根据飞机零部件制造过程中所采用的超音速

收稿日期: 2025-08-07 **修回日期:** 2025-12-04

通信作者: 韩天时(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为民用飞机结构大部件表面涂层损伤维修。

引用格式: 韩天时, 姚卫星. 民用飞机维修中碳化钨涂层的修理[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 101-107.

HAN T S, YAO W X. Repair of tungsten carbide coatings in civil aircraft maintenance [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 101-107.

火焰喷涂碳化钨的标准工艺过程^[10-11]，并结合民用航空维修行业的涂层修理经验，明确了碳化钨涂层修理的工艺流程，介绍了修理过程中的技术要求和施工方法，并对质量控制、涂层检验要求、修理效果评估及修理文件管理要求进行了详细说明。

1 涂层修理流程定义

1.1 碳化钨涂层修理要求

针对飞机结构大部件表面碳化钨涂层的损伤，应首先去除结构大部件表面残余的碳化钨涂层，以便对结构件基体材料的损伤情况进行检查，确保基体材料外形完整、无裂纹，保证修复后的结构件能恢复原有功能。针对钛合金基体材料，通常采用渗透检查的方法来确认基体材料无损伤。待基体材料通过外形检查和渗透检查，在没有表面损伤或材料缺失，且外形符合设计要求的情况下，才可以开展碳化钨涂层的重新喷涂修理工作。

图1为某型国产支线飞机缝翼滑轨表面出现的涂层损伤，该损伤既导致了基体材料的裸露和磨损，又造成了滑轨表面不光滑，影响其与支撑滚轮之间的运动接触，需要进行维修才可继续使用。



图1 碳化钨涂层损伤一例

Figure 1 Illustration of a damaged tungsten carbide coating

碳化钨涂层修理需要严格按照修理工作流程开展，修理方案要经过飞机主制造商和民用飞机适航监管单位的批准后才可实施，以保证修理结果符合结构大部件的初始设计要求。修理过程中任何工艺、材料的变更，也必须经过飞机主制造商的工程分析，确认变更对涂层质量的影响可接受，并经过民用飞机适航监管单位的批准后才可实施。钛合金结构大部件表面碳化钨涂层修理的一般流程如图2所示。

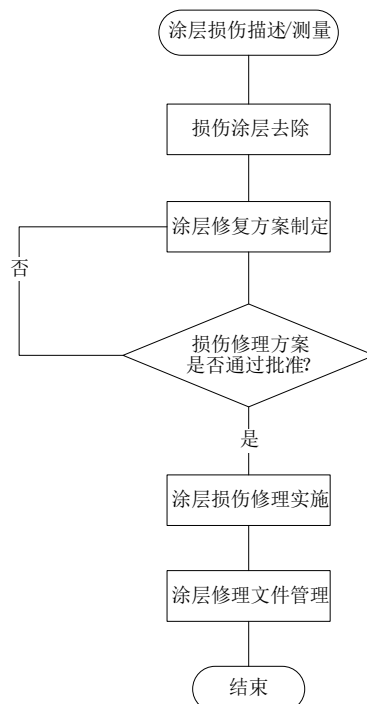


图2 涂层修理流程

Figure 2 Coating repair process

1.2 碳化钨涂层修理程序制定

1.2.1 碳化钨涂层去除要求

飞机结构件表面碳化钨涂层受损后需要进行去除,以便开展基体材料的损伤检查和后续的碳化钨涂层再次喷涂。碳化钨涂层去除后应保证不影响零件基体材料表面的粗糙度,不出现凹坑、材料变脆、外形尺寸变化等问题。目前针对碳化钨涂层的去除主要包括机械打磨去除和溶剂去除两种方法。由于碳化钨涂层具有较高的耐磨损性能,因此机械打磨的方法效率较低,仅适用于局部区域的涂层去除。如果需要去除整个结构件上的碳化钨涂层,常使用溶剂去除的方法^[12]。行业常用的溶剂主要有两种:一种是碳酸钠-酒石酸溶剂,使用温度为43~88℃;另一种是熔盐,使用温度为371~427℃。

1.2.2 喷丸处理要求

如果零件基体材料通过了渗透检测,但在去除原有碳化钨涂层时选用了高温的熔盐方法,或者在损伤检查和处理时进行了打磨且打磨量超过初始喷丸压应力层深度的10%,在再次喷涂碳化钨涂层前,考虑到基体材料表面的喷丸压痕可能已经受损,一般要求对钛合金表面进行再次喷丸处理,以降低表面的压应力,提高疲劳强度和抵抗压力腐蚀裂纹的能力,恢复初始的设计要求。钛合金喷丸处理一般选用铸钢弹丸材料,喷丸强度和覆盖率按初始设计要求制定,喷丸后钛合金基体材料的温度应控制在149℃以下。常规的喷丸采用铸钢弹丸,弹丸直径为0.71 mm,弹丸强度(阿尔门A型试片)为0.20 mm,压应力深度为0.18 mm,覆盖率为全覆盖。

1.2.3 喷涂设备和涂层粉末要求

喷涂设备和涂层粉末的选择与控制对于保证碳化钨涂层的喷涂质量至关重要,喷涂设备和计量设备应处于有效的校验状态,碳化钨粉末应妥善储存,并标明粉末类型、制造商、批次号等信息。

1.2.3.1 喷枪

超音速火焰喷涂设备一般通过煤油和高压氧气燃烧来产生高速的气流,用以将涂层材料加热至熔化或者塑性状态,然后将涂层材料传送至需要喷涂的施工区域。喷枪需要由计算机控制,并且配有调节煤油和氧气压力、流量的自动装置。喷枪需要安装在自动控制的装置上,以保证在涂层沉积过程中可以保持恒定的工作距离和遍历率,或者保持在一个固定的位置,由自动装置带动零件保持在恒定的工作距离。

1.2.3.2 表具

压力表需要提供最低±1.5%满量程精度,流量表需要提供最低±2%满量程精度,温度表需要提供最低±1℃精度。

1.2.3.3 送粉系统

送粉系统需要配有计量设备,可实现向喷枪提供经过计量的、稳定的粉末流量。运载粉末的气体为氩气或者氮气。

1.2.3.4 材料

煤油和氧气的采购规范需要符合常规的工业标准要求,并经过工程分析和批准。碳化钨-钴粉末需要满足AMS7881 *Tungsten Carbide-Cobalt Powder, Agglomerated and Sintered* 或者AMS7882 *Tungsten Carbide-Cobalt Chrome Powder, Agglomerated and Sintered* 规范要求。所有的碳化钨粉末需要处于干燥状态,具有流动性且均匀混合。

1.2.4 喷涂前准备工作

在喷涂碳化钨涂层前需要做好零件的表面准备工作,以保证后续涂层可以均匀地附着在零件表面,避免零件表面的油污、外来物等杂质影响喷涂效果。另外,应根据图纸要求对无需喷涂的区域进行遮挡。

1.2.4.1 清洁

待喷涂表面需要进行彻底的清洁,去除油液、润滑脂、污物、漆层及其他外来物,并在喷涂前4 h内完成最终清洁。清洁程序不能造成待喷涂表面变脆、凹陷,或者表面损伤。

1.2.4.2 遮挡

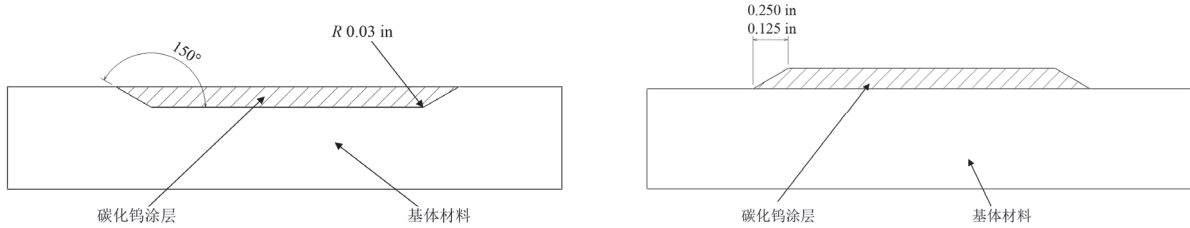
零件上不需要喷涂涂层的区域需要采用合适的方法(如贴上热反射胶带)进行保护。

1.2.4.3 表面条件

清洁之后禁止用手直接接触钛合金零件，如需移动零件，可佩戴合成纤维手套或棉布手套。

1.2.4.4 表面外形要求

喷涂前需要对零件外形进行处理，以保证喷涂效果，典型的零件外形和涂层厚度要求如图3所示。



注：1 in ≈ 2.54 cm。

图3 零件外形和涂层厚度要求

Figure 3 Requirements of the part profile and the coating thickness

1.2.5 喷涂工作要求

碳化钨涂层的喷涂工作应按照标准的工艺要求和顺序进行，以保证涂层品质。气体流量和压力、送粉率、喷涂距离，以及沉积率、遍历速率等参数需要保持与零件的初始设计值一致，从而保证喷涂达到要求的涂层效果。待喷涂表面需要进行预热，以去除湿气。钛合金基体材料的表面温度不能超过 149℃。预热可以通过喷枪或者其他适合的方法实现，并对温度进行监控。

涂层材料应当以足够的厚度沉积在零件的涂覆表面，以保证后续可达到特定的尺寸要求，应注意以下几点：

- 1) 涂层需要覆盖全部指定的区域。除非另有规定，涂层区域边界的允许公差为 0 mm 至+3.18 mm。
- 2) 若在零件非规定喷涂区域进行喷涂，也要按照规定喷涂区域的要求进行准备和处理，并满足涂层附着力要求。

3) 喷涂角度必须保持在 $(90 \pm 5)^\circ$ 的范围。对于圆柱形的零件，角度测量参考圆柱的中心轴线。如果设计规定的喷涂角度小于 85° ，则所有的测试样件必须按照与零件同样的角度进行喷涂，并执行所有的机械性能要求测试。

4) 喷涂的连续性。喷涂沉积过程必须连续，除非需要进行涂层厚度测量，或为保证零件低于最高允许温度所进行的冷却操作。

5) 基材温度。钛合金基体材料在喷涂过程中的最高温度不能超过 149℃。温度检测位置必须在靠近喷涂遍历区域边缘的基体材料处或者在涂层上。

6) 涂层厚度。为保证涂层在后续进行打磨加工后仍满足设计的尺寸要求，一般要留有一定的余量，钛合金基体材料平面上涂层的初始涂层厚度和成品涂层厚度见表1。

表1 涂层厚度要求

Table 1 Coating thickness specification

涂层状态	最小涂层厚度/mm	最大涂层厚度/mm
初始	0.13	0.38
成品	0.08	0.25

2 涂层修理质量控制

2.1 喷涂过程监控

碳化钨涂层喷涂过程中可按需设置过程监控，通过过程监控可在涂层喷涂过程中对关键环节进行控制，保证喷涂的施工质量。同时，若设置了过程监控，则可申请减少后续涂层验收的检查项目，降低周期性检验频率，有利于提高修理效率，缩减喷涂成本。喷涂过程监控有以下几点要求。

2.1.1 监控设备要求

过程监控必须配备可以对颗粒速度、颗粒温度、火焰羽流形状进行周期性监控的诊断设备，设备能够记录每一个监控参数，且当任意一个监控参数超出范围时可以通知操作者。

2.1.2 过程监控程序

过程监控程序必须针对每一个零件,明确需要监控的设备和参数项目,以及在喷涂过程中需要监控的参数范围。监控的每个参数都必须基于初始工艺要求来确定允许的限制和范围,并且每个过程监控程序,以及后续的更改,都需要经过工程分析和批准。

2.1.3 检验项目简化

如果对喷涂过程进行了过程监控,且相关的监控参数均在限制范围内,则验收检查中包含的弯曲测试、硬度测试、微观结构检查和残余应力测定可转移到周期性检查中执行,不要求每批次都进行检查,对应的周期性检查频率为每周执行。

2.1.4 参数超出范围

在监控过程中如果任意一个监控参数超出限制范围,检验工作需要退回到整个批次的验收检查阶段,所有已被简化的检验项目必须补做,直到监控参数恢复到规定的限制范围内。

2.2 涂层验收检查

完成零件的碳化钨涂层喷涂后,需要针对与零件采用相同工艺喷涂完成的试验件进行检验,保证涂层均匀地附着在基体材料上,且涂层表面连续,无剥离、碎片、脱落,以及其他影响涂层使用的缺陷。另外,用于测试的试验件必须与整个批次的零件构型一致,使用相同的设备按照同样的工艺在同一个生产周期内进行涂层喷涂,确保能够代表整个批次零件的喷涂状态。

如果选取的试验件未能通过涂层验收检查,则可再额外选取3个试验件进行检查,如仍有试验件未通过涂层验收检查,则整个批次的零件都应被拒收,并记录相关检测结果。针对被拒收的零件,可结合未通过的测试项目对同一批次的其他零件进行逐一检查,不合格的零件需去除涂层后再喷涂。对于经过涂层再次喷涂的零件,应该在该零件的修理记录中声明,告知零件的使用单位,以便后续的质量控制和跟踪。

2.2.1 附着力

2.2.1.1 弯曲测试

试验件尺寸近似为 $1.3\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 76\text{ mm}$,其中一面喷涂有碳化钨涂层,涂层厚度 $0.075 \sim 0.127\text{ mm}$ 。试验件需要沿着一个大约 13 mm 直径的棒材进行弯曲测试,并且让有涂层的一面在弯曲处的外侧,弯曲以大约 $10(^{\circ})/s$ 的速率进行,试验件必须弯曲成 90° 的永久变形。对涂层进行目视检查,不能出现涂层和基体材料分离的情况,仅出现在试验件边缘的涂层裂纹和小的分离可以接受。

2.2.1.2 结合强度

试验件尺寸近似为直径 25 mm 、长 51 mm 的棒材,在表面喷涂有碳化钨涂层,涂层厚度 $0.2 \sim 0.3\text{ mm}$ 。结合强度检验按照 ASTM C633 *Adhesion or Cohesive Strength of Flame Sprayed Coatings* 进行测试,结合强度应满足初始设计要求。

2.2.2 涂层硬度

试验件尺寸近似为 $1.3\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,其中一面喷涂碳化钨涂层,厚度最小为 0.23 mm 。涂层硬度检验必须按照 ASTM E384 *Microindentation Hardness of Materials* 进行,涂层硬度为最少10个均匀间隔点的测量硬度平均值,且涂层硬度应满足初始设计要求。

2.2.3 微观结构

试验件尺寸近似为 $1.3\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,其中一面喷涂碳化钨涂层,厚度最小为 0.23 mm 。试验件金相制备必须按照 ASTM E1920 *Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings* 执行,对准备好的试验件横截面进行检查,涂层不能出现裂纹和分层。按照 ASTM E1245 *Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis* 标准,使用 $380 \sim 520$ 倍数的放大装置对试验件横截面进行检查时,孔隙和氧化物必须均匀分布,不均匀区域不超过 1% ,且单个孔隙不超过 0.05 mm ,碳化物必须均匀分布,不存在聚集或者集中;使用 $180 \sim 220$ 倍数的放大装置对试验件横截面进行检查时,不能出现未熔颗粒,涂层和基体材料的交接面沿结合线方向不能有超过长度 0.05 mm 的分离。典型碳化钨涂层微观结构对比见图4。

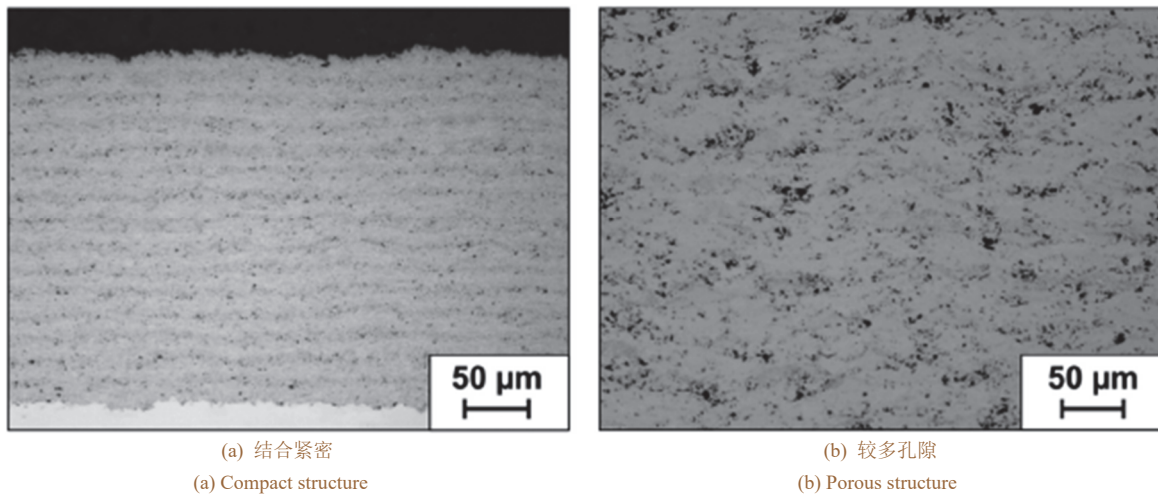


图4 典型的涂层微观结构^[13]
Figure 4 Typical coating microstructures^[13]

2.2.4 残余应力

通过对标准的阿尔门 N 型试片,按照与喷涂零件相同的工艺进行制备和喷涂的方式来评估涂层的残余应力。阿尔门试片应按照 SAE J442 *Test Strip, Holder and Gage for Shot Peening* 的规定在横向位置上通过 4 个螺钉进行固定,以保证在涂层沉积过程中保持平整。通过测量阿尔门试片在喷涂前后的弧高差来确定涂层压应力。针对喷涂厚度为 (0.13 ± 0.025) mm 的碳化钨涂层,阿尔门 N 型试片弧高的可接受标准一般为 0.076 ~ 0.300 mm,具体的残余应力应满足初始设计要求。

2.2.5 涂层厚度

零件的碳化钨涂层厚度通过直接的尺寸检查方法来确定,厚度测量仪器的最低分辨率应不超过测量值的 1/10,或者使用经过工程分析和批准的其他测量方法。成品零件的最低碳化钨涂层厚度应满足初始设计要求,非必须喷涂区域的碳化钨涂层厚度不受最低厚度要求限制。

2.3 涂层打磨处理

涂层喷涂完毕,需要根据零件图纸中的外形和粗糙度要求对涂层进行打磨,保证喷涂后的零件外形符合图纸要求,尤其是对于飞机缝翼滑轨等具有结构功能的运动部件,需要重点保证关键外形参数和表面粗糙度要求。对于打磨后的外形检查,可通过卡板等方式进行。如仅是单件维修,为降低卡板的制作费用,可考虑使用三维扫描和外形偏差对比的方法进行零件的外形检查。针对碳化钨涂层,可采用金刚石砂轮对外形进行打磨,具体要求如下:

- 1) 对砂轮进行清洁,并确保砂轮旋转平衡。
- 2) 根据零件表面的粗糙度要求,选择合适的砂轮目数。
- 3) 在打磨过程中,保证砂轮工作面有良好的连续供给的切削液。
- 4) 控制砂轮在零件表面的移动速率,一般为 12.19 ~ 15.24 m/min,过快会造成涂层脱落,并对基体材料造成热损伤。
- 5) 涂层经过打磨满足外形要求后,需要对零件烘干和去除湿气,可使用加热零件或者烘箱烘干的方法,温度一般控制在 38 ~ 93 °C。

2.4 涂层修理文件管理

碳化钨涂层修理的记录文件应按照相关适航监管单位的要求进行管理。涂层修理记录中应包含零件在喷涂前准备过程、喷涂实施过程和涂层验收检查过程中可能影响喷涂质量的关键参数,并可支持按此记录复现整个涂层修理过程。涂层修理记录文件必须存档保存,具体内容见表 2。

3 结语

本文建立了国产支线飞机钛合金结构大部件表面碳化钨涂层的修理流程,明确涂层修理过程中的工作程序和操作要求。

表 2 涂层修理记录
Table 2 Coating repair record

零件信息	零件号 基体材料 涂层设计要求	涂层数据	要求的涂层厚度 喷涂前/后零件尺寸 预热温度 喷涂时间
涂层去除	涂层去除溶剂 溶剂温度	施工操作信息	零件移动速率 喷枪移动速率 喷枪到零件的距离
喷枪	制造厂家、型号 喷嘴尺寸		
送粉系统	运载气体 送粉流量	质量保证	附着力 涂层硬度 微观结构 残余应力
碳化钨粉末	粉末标准 粉末供应商、批次号		

飞机钛合金结构大部件制造过程中使用的碳化钨喷涂技术可应用于飞机修理过程，但应根据受损的碳化钨涂层状态、维修单位的工艺条件等进行综合考虑，制定适合的喷涂工艺要求。

钛合金结构大部件涂层修理方案应经过工程分析和批准，并针对修理后的碳化钨涂层制定完整的验收检查方案，确保经过维修后的零件可满足初始设计要求。

维修过程需要进行完整记录，尤其是属于飞机主要构件(PSE)的钛合金结构大部件，涂层维修文件需要长期存档管理。

参考文献:

[1] 原国森, 宛利鹏, 韩艳艳. 钛合金的应用进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (4): 13-16.
YUAN G S, YAN L P, HAN Y Y. Application progress of titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (4): 13-16.

[2] 杨雨晨, 吴静, 袁福河. 超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层及其耐微动磨损性能[J]. 材料研究与应用, 2025, 19 (2): 308-313.
YANG Y C, WU J, YUAN F H. HVOF sprayed WC-10Co4Cr coating and its fretting wear resistant properties [J]. Materials Research and Application, 2025, 19 (2): 308-313.

[3] 姬寿长, 李争显, 李京龙, 等. 钛表面厚碳化钨涂层研究进展[J]. 钛工业进展, 2018, 35 (6): 20-25.
JI S C, LI Z X, LI J L, et al. Research status quo of thick WC coating on titanium alloy surface [J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35 (6): 20-25.

[4] 宰红斌, 刘浩宇, 常雷雷, 等. 金具表面超音速火焰喷涂 WC 涂层的显微组织和性能[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (6): 96-102.
ZAI H B, LIU H Y, CHANG L L, et al. Microstructure and properties of HVOF-sprayed WC coatings on metal fittings [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (6): 96-102.

[5] 李楠, 张吉庆. 激光熔覆原位自生碳化钨陶瓷涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (2): 127-129, 133.
LI N, ZHANG J Q. Study on in-situ synthesis WC ceramic coating by laser cladding [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (2): 127-129, 133.

[6] 韩纪鹏, 赵德刚, 刘国祥, 等. 激光熔覆涂层对高锰钢耐磨性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2024, 18 (1): 157-165.
HAN J P, ZHAO D G, LIU G X, et al. Influence of laser cladding coating on wear resistance property of high Mn steel [J]. Materials Research and Application, 2024, 18 (1): 157-165.

[7] 彭凯, 王斌, 苗晓军, 等. 高压开关用液压机构阀杆等离子熔覆工艺研究[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (1): 16-22.
PENG K, WANG B, MIAO X J, et al. Plasma cladding of hydraulic valve stem for high-voltage switch [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (1): 16-22.

[8] 姬寿长, 李争显, 陈丹, 等. 超音速火焰喷涂碳化钨技术及应用现状[J]. 榆林学院学报, 2021, 31 (6): 1-10.
JI S C, LI Z X, CHEN D, et al. HVOF sprayed tungsten carbide coatings and their application [J]. Journal of Yulin University, 2021, 31 (6): 1-10.

[9] 徐国, 郑卫刚. 超音速火焰喷涂在活塞环表面改性中的应用探究[J]. 热加工工艺, 2014, 43 (14): 167-168.
XU G, ZHENG W G. Research on application of HVOF in surface modification of piston ring [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (14): 167-168.

[10] 郭初阳, 廖发海, 陈哲, 等. 钛合金零件表面超音速火焰喷涂碳化钨工艺控制[J]. 新技术新工艺, 2018 (7): 60-63.
GUO C Y, LIAO F H, CHEN Z, et al. Process control of high velocity oxy-fuel tungsten carbide on titanium alloy's surface [J]. New Technology & New Process, 2018 (7): 60-63.

[11] AMS B Finishes Processes and Fluids Committee. Application of Tungsten Carbide Coatings on Ultra High Strength Steels High Velocity Oxygen/Fuel Process: AMS2448 [S]. Warrendale: SAE International, 2020.

[12] 李晗晔, 江冶, 刘志强. 化学法去除碳化钨-钴涂层的工艺[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34 (5): 269-271.
LI H Y, GANG Y, LIU Z Q. Removal of tungsten carbide-cobalt coating by chemical method [J]. Electroplating & Finishing, 2015, 34 (5): 269-271.

[13] BAUMANN I, HAGEN L, TILLMANN W, et al. Process characteristics, particle behavior and coating properties during HVOF spraying of conventional, fine and nanostructured WC-12Co powders [J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 405: 126716.

【编辑:温靖邦】