

## 300M 钢超音速火焰喷涂 WC 涂层工艺分析

## Process Analysis of 300M Steel WC Coatings by High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spraying

中航飞机起落架有限责任公司 张智慧

**[摘要]** 针对典型的起落架 300M 钢材料,开展了 WC 超音速火焰喷涂涂层的工艺技术研究,在工艺过程中对喷枪进行了清理调控,测试分析了涂层结合强度、涂层过渡区等,优化了喷涂工艺,降低了涂层的返修率,有效地提升了涂层的质量。

**关键词:** 超音速火焰喷涂(HVOF) 结合强度 涂层过渡区

**[ABSTRACT]** The principle and process of high velocity oxygen fuel thermal spraying is introduced. After cleaning spray gun, anchoring strength and transition region of WC coatings are analyzed. The results show that the repair rate is reduced, and the quality of WC coatings is improved.

**Keywords:** High velocity oxygen fuel thermal spraying (HVOF) Anchoring strength Coating transition region

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.135

在众多低合金超高强度钢种类中,300M 钢属于铬-镍-钼系合金,是一种中碳超高强度钢,具有很好的淬透性、塑性、韧性、抗疲劳及断裂性能。经过多年的研究发展,300M 钢作为一种成熟的超高强度钢材料,在现代飞机起落架上获得了广泛应用,是当前世界上强度最高、综合性能最好的飞机起落架用钢<sup>[1-2]</sup>。起落架表面的涂层结构,既具有耐磨损的效果,又起到了腐蚀防护的作用,因此,在起落架制造过程中表面防护涂层的制备是关键技术之一。

超音速火焰喷涂是 20 世纪 80 年代出现的一种新型高能火焰喷涂方法,它是继等离子喷涂后热喷涂工业最具创造性的进展。其涂层是由无数变形的粉末粒子互相交错而呈波浪状堆迭在一起的层状组织结构,或者说涂层由熔融状粉末粒子撞击后的扁平状变形粒子组成。该技术具有焰流速度快、涂层致密性好、结合强度

高、耐磨性好等优点,在航天、航空、冶金、机械、医疗等行业中已得到广泛应用。

近年来,随着超音速火焰喷涂零件的增加,暴露出各种技术质量问题,使喷涂零件返修率大大增加。针对 WC 涂层,本文主要研究了超音速火焰喷涂工艺技术方法及其性能,以提高涂层质量,为零件的生产制造提供技术支撑和积累经验。

## 1 工艺试验

试验材料为 300M 钢,主要针对  $\phi 200\text{mm} \times 300\text{mm}$  环形试件进行喷涂工艺研究;预先制备尺寸为  $76\text{mm} \times 25\text{mm}$ 、厚度为 1.3mm 的弯曲试件(同时满足金相试验)以及  $\phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$  的结合强度试件。本研究采用超音速火焰喷涂设备为 Sulzer metor 控制系统+W-s600 型喷枪。

采用丙酮或酒精对试样、试件进行清洗,并进行喷砂处理,以保证其表面质量。为了降低界面位置温度梯度,喷涂前对表面进行低于 177℃ 的预热处理。对于回转体钢制零件,在喷涂过程中喷枪(焰流中心线)与旋转零件表面保持  $90^\circ \pm 5^\circ$ 。通过工艺优化试验,确定的工艺参数如表 1 所示。

喷涂后试件的宏观照片如图 1 所示,在光照度大于 300lx (即不小于 40W 日光灯距检验台面在 500mm 范围内)进行目视检查,发现喷涂层外观均匀、连续,与基体结合良好。涂层的厚度为 35~60 $\mu\text{m}$ 。

## 2 涂层性能测试分析

### 2.1 弯曲试验

绕直径为 13~13.5mm 的棒进行弯曲试验,喷涂层向外,弯曲速度约为 15°/s,试件应弯曲成 180°;目视检查弯曲部位,未出现喷涂层剥落或喷涂层与基体分离,见图 2。

### 2.2 显微组织分析

表1 工艺参数

氧气流量 / (L·min <sup>-1</sup> )	煤油流量 / (L·min <sup>-1</sup> )	氮气流量 / (L·min <sup>-1</sup> )	送粉气流量 / (L·min <sup>-1</sup> )	送粉盘送粉百分率 / %	喷涂距离 / mm	喷枪移动距离 / mm
710~720	11~15	4.4~4.5	5.6~5.8	20~22	100~120	20~25

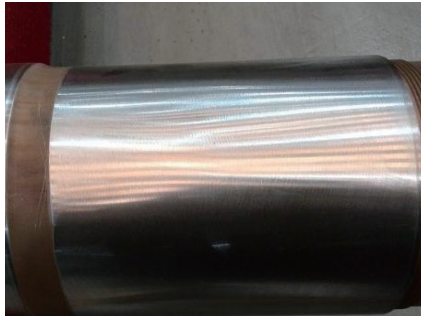


图1 喷涂试样宏观照片

Fig.1 Macrograph of sprayed sample

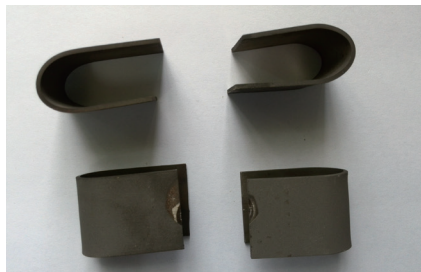


图2 弯曲后的试样

Fig.2 Bent sample

在弯曲试验中未破坏部位垂直于喷涂层方向,从喷涂层向基体切割制备金相试样。观察分析,WC 涂层氧化物含量低于 1%,并未出现大于  $80\mu\text{m}$  的孔洞。WC 涂层孔隙率低于 1%,无未熔颗粒。WC 涂层中碳化物分布均匀、无条带或团聚。采用硬度计测试的涂层硬度大于 950 HV300。

### 2.3 结合强度

将已喷涂的试样与未喷涂的试样用胶粘剂粘接,接触面连接时应将试棒对接直。溢出的胶黏剂应采用丙酮或丁酮去除。胶黏剂应在  $(160 \pm 5)^\circ\text{C}$  下固化至少 2h。多余的胶黏剂应在固化后采用 260 粒度的氧化铝砂纸打磨去除。采用型号 RGM-4100 的电子万能试验机,确保试验夹具的中线与试棒的中线一致,加载速率为  $3.4\text{mm}/\text{min}$ ,每个试样的结合强度应大于 70MPa。测试结果表明:试样的结合强度均值为 80MPa,见图 3。

综合分析,300M 钢表面超音速火焰喷涂的 WC 涂层综合性能良好。但在生产过程中影响工艺稳定性的因素制约了超音速火焰喷涂 WC 涂层质量的提高,下面

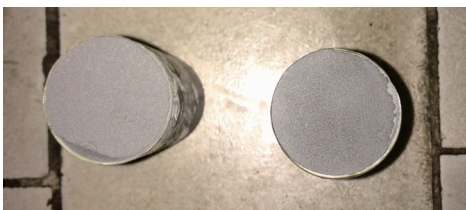


图3 加载后的试样

Fig.3 Loaded sample

将加以分析。

## 3 分析讨论

### 3.1 前处理

喷涂表面的清理主要采用氧化铝干吹砂的方式。喷涂表面粗糙度对喷涂层的结合强度影响较大。随着表面粗糙度的增大,喷涂层的结合强度将提高,一般应控制在  $R_a 3.0\mu\text{m}$  以上为宜。

为保证喷涂层的结合强度,最大限度减少喷涂层沿交界处的剥离,采取下列措施:

(1) 吹砂风压 0.4~0.6MPa,吹砂距离 110~150mm,工装旋转速度 100~130r/min;喷砂枪速度为 700~800 mm/min,粒度 100~150 目。

(2) 对于吹砂时重复使用的砂粒,控制 2 周内量取相同体积未使用的新砂和正在使用的旧砂分别称重,若旧砂重量超出新砂重量 20%,则对旧砂进行更换。

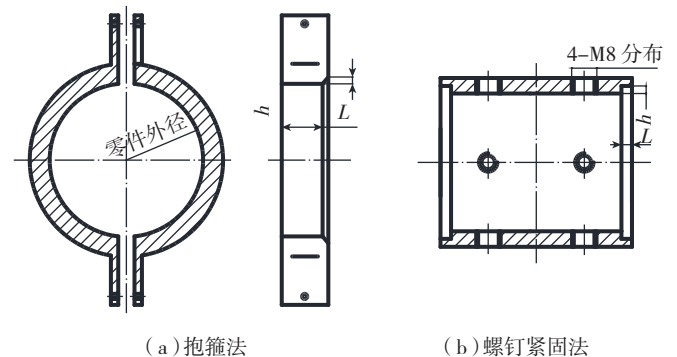
(3) 将喷砂区域适当大于喷涂区域 1~2mm,确保喷涂层过渡区能与已粗化的基体有效结合。

### 3.2 装夹与保护

喷涂的过程中,零件处于高速旋转状态,非喷涂面的屏蔽工装必须保证不能沿轴向、径向移动。稍有移动,高速流动的砂流和近  $3000^\circ\text{C}$  的火焰会对喷涂层带来破坏性的影响。

HVOF 的屏蔽方法有机械屏蔽和胶带屏蔽。因胶带无法实现连续均匀扩散的涂层过渡区,且只能用于辅助屏蔽。所以,目前生产中以机械屏蔽方法为主。屏蔽工装的设计过程中,应充分考虑零件外形、旋转状态及焰流运行轨迹。对于圆柱状零件主要采取如下两种方法进行屏蔽保护,如图 4 所示。

这类工装设计应注意  $h$  和  $L$  的尺寸,如果  $h$  和  $L$  的尺寸选择过大,会导致涂层扩展区域增加;如果  $h$  和  $L$  的尺寸选择太小,涂层无法扩展,形成堆积。大量试验表明: $h$  最好选择 2~3mm,  $L$  最好选择 1.5~2.5mm;以确



(a) 抱箍法

(b) 螺钉紧固法

图4 圆柱状零件的屏蔽工装

Fig.4 Shielding tooling of cylinder parts

保形成合理的过渡区。

对于带“键槽”的筒状零件,结合喷涂面的结构特点设计“凸台挡圈”屏蔽工装,如图5所示。

此类工装对尺寸公差的要求极其严格,屏蔽工装与喷涂面应紧密配合,防止喷涂层喷入键槽内;其屏蔽工装及工装边缘上积聚的喷涂层应及时去除,它将改变涂层的过渡。

### 3.3 喷涂过程

由于喷枪长期使用,其内部的喷嘴及燃烧室会产生积瘤,影响喷涂层质量:即过短的时间清理,会引起成本

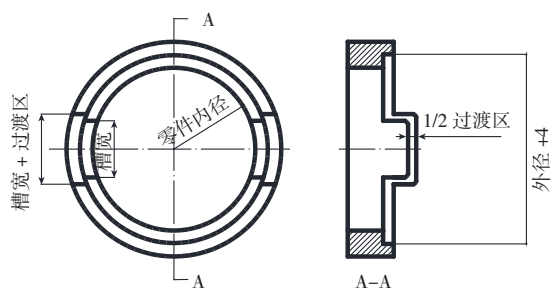


图5 带“键槽”筒状零件的屏蔽工装  
Fig.5 Shielding tooling of cylinder parts with keyway

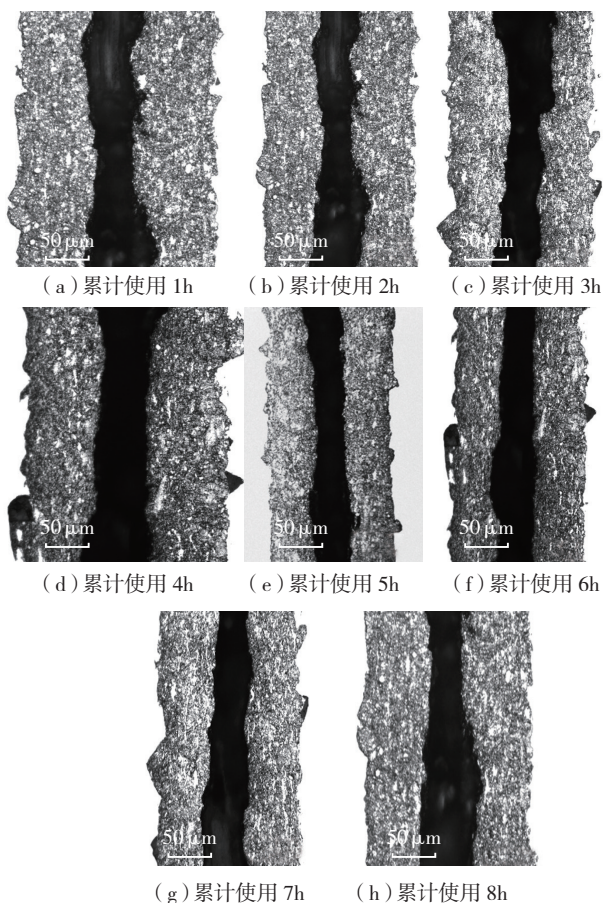


图6 不同累计工作时间内涂层的金相图  
Fig.6 Metallurgical diagram of coating under different accumulated using time

的增加;而过长的时间清理会影响喷涂层质量。为了保证工艺和生产的质量,本文针对喷枪清理时间对涂层结合性能影响进行了研究。

在累积工作 1h、2h、3h、4h、5h、6h、7h、8h 等不同情况进行工艺试验,采用 OLYMPUS BX41M 金相显微镜观察分析涂层形貌,如图6所示。

累积使用时间达到 8h 后,其结合强度达到工艺要求的下限,应对喷嘴及燃烧室进行清理。在生产中应控制喷枪累积使用时间为 7~9h 之间,有利于提高 HVOF 喷涂层质量。

另外,喷涂参数对质量有着重要的影响,如氧气流量、送粉气流量和喷涂距离等。通过工艺试验,优化工艺参数,可大幅度提高 HVOF 喷涂层质量。

## 4 结论

- (1) 在 300M 钢表面进行了超音速火焰喷涂 WC 工艺研究,获得了良好的组织、弯曲及结合强度。
- (2) 提高 HVOF 喷涂层质量的方法有很多,一是通过保证前处理质量,确保待喷零件表面质量;二是通过优化非喷涂面的屏蔽工装,实现屏蔽区的有效屏蔽和过渡区的合理过渡;三是有效控制 HVOF 过程,设备进行及时清理,固化喷涂参数,保证 HVOF 喷涂层质量。

### 参考文献

[1] 袁培柏. 300M 钢制飞机起落架零件的真空淬火. 金属热处理, 1991(10):29-33.  
[2] 张慧萍,王崇勋,杜煦. 飞机起落架用 300M 超高强度钢发展及研究现状. 哈尔滨理工大学学报, 2011,16(6):73-76.

(责编 李丹)

(上接第 134 页)

证孔的精度。

## 3 结束语

通过以上实例,不但解决了结构复杂的插耳式门铰链孔的孔径、同轴度以及位置度的技术难点,也节约了成本,从风动工具的选择上节省了近 18 万元人民币。在保证质量的情况下,节省成本,提高效率。根据以上工艺方案,不但成功解决了此类问题的技术难点,也为其他项目相似问题的解决提供经验和借鉴。

### 参考文献

[1] 常兴,庞学慧,胡满红. 航空工程材料加工技术. 太原: 中北大学出版社, 2000, 10-11.  
[2] 冯之敬. 机械制造工程原理. 北京: 清华大学出版社, 1999, 25-26.

(责编 李丹)