

# 爆炸喷涂 WC-Co 涂层结合强度的测量方法及喷涂工艺研究

Method of Adhesion Strength and Spray Techniques of  
Detonation Gun Sprayed WC-Co Coatings

唐建新, 米青田, 张爱斌, 陈建平  
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

TANG Jian-xin, MI Qing-tian, ZHANG Ai-bin, CHEN Jian-pin  
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 设计了一种新的测量方法用于测量爆炸喷涂涂层与基体的结合强度。从理论上分析了这种方法拉伸面的临界尺寸。实验结果表明, 对国产喷枪尺寸设计为 2mm 左右是合适的, 爆炸喷涂涂层与基体的结合强度最高可达 143MPa。为避免喷涂过程中金属 Co 的损失, 获得较好的显微形貌, 爆炸气体中  $C_2H_2$  需要过量,  $O_2/C_2H_2$  (摩尔比) 为 1.5 左右较合适。

**关键词:** 爆炸喷涂; 结合强度; WC-Co

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 04-0034-03

**Abstract:** A new method has been introduced to measure the adhesion strength of the d-gun sprayed WC-Co coatings. The pulling critical size has been analyzed. The experiments show that the pulling critical size is about 2mm for detonation-spraying gun made in China and the adhesion strength for WC-Co coating is as high as 143MPa. It has indicated that the value of  $O_2/C_2H_2$  mol ratio must be 1.5 in order to avoid the oxidation of Co during spraying and obtain good microstructure.

**Key words:** detonation spraying; adhesion strength; WC-Co

通过爆炸喷涂工艺获得的涂层具有高的结合强度, 高的致密度, 高的硬度。同时由于喷涂过程为脉冲式, 工件的温度不超过 200℃, 因此被广泛用于飞机发动机的零部件上。尽管国内开展爆炸喷涂的研究工作已经有二十多年的历史, 但仍采用传统的胶粘拉伸的方法对涂层与基体的结合强度进行测量。由于爆炸喷涂 WC-Co 涂层与基体的结合强度远远大于胶粘剂的抗拉强度, 因此一直没有获得涂层与基体结合强度的真实数据, 甚至航空标准中仅规定了 WC-Co 的结合强度大于 65MPa<sup>[1]</sup>, 该值仅代表了使用的 E-7 胶的抗拉强度。

本工作设计了一种新的涂层与基体结合强度的测量方法, 并对爆炸喷涂 WC-Co 涂层的喷涂工艺进行了研究。

## 1 理论分析

图 1 给出了新的涂层与基体结合强度测量方法的示意图, 在实际的测量过程为减少拉伸过程中的摩擦力, 将拉伸销由柱形改为锥形。经过试验, 确定了锥度为 15°

在没有粘结剂的条件下, 拉伸时拉伸销从支撑圈中拔除, 需要克服的力有涂层与基体的结合力和涂层发生剪切断裂所需要的力, 下面从理论上进行分析:

设涂层与基体的结合强度为  $\sigma_1$ , 拉伸销喷涂涂层一侧的半径为  $r$ , 则要使涂层和基体脱离所需要的拉力  $F_1$  为:

$$F_1 = \sigma_1 \times \pi r^2 \quad (1)$$

设涂层的剪切强度为  $\sigma_2$ , 在相同半径条件下, 涂层发生剪切断裂所需要的力  $F_2$  可表示为:

$$F_2 = \sigma_2 \times 2\pi r \times h \quad (2)$$

其中  $h$  为涂层的厚度。

为获得涂层与基体的结合强度需要满足如下条件:

$$F_2 > F_1 \quad (3)$$

如图 2 所示, 拉伸销喷涂端面的半径值应小于某一固定值  $r_1$ 。由于拉伸销与支撑圈是机械配合, 造成涂层缺陷, 导致涂层很容易在拉伸销边缘开裂, 假设  $\sigma_2$  的值在 100~200MPa 的范围内, 涂层厚度  $h$  为 0.3mm,

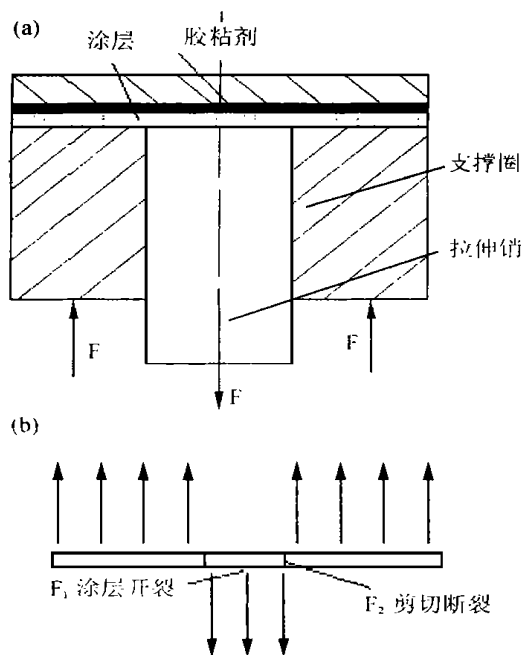


图 1 涂层结合强度测量方法示意图

(a) 拉伸方法; (b) 涂层受力分析

Fig. 1 Schematic diagram of measurement of adhesion strength

根据工厂的要求涂层的结合强度为 120MPa, 此时计算出  $r_1$  的值为 0.5mm, 考虑到 120MPa 为涂层结合强度的下限, 随着涂层与基体结合强度的提高,  $r_1$  的数值会更小, 其结果导致机加工的难度和数据的离散性加大, 在实际过程中的可行性下降。

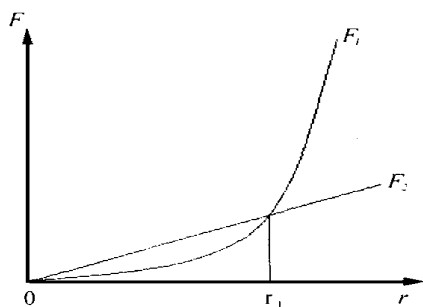


图 2 在没有粘结剂的条件下拉伸过程的受力分析

Fig. 2 Analysis of strength during pulling without adhesive

为达到较大的  $r_1$  值, 需要增加  $F_2$  的值。解决的方法是将涂层通过粘结剂粘在另外的拉伸工件上。此时  $F_2$  可表示为  $F_3$ :

$$F_3 = \sigma_2 \times 2\pi r \times h + \sigma_3 \times \pi r^2 \quad (4)$$

其中  $\sigma_3$  为粘结剂的抗拉强度。

为获得涂层与基体的结合强度需要满足如下条件:

$$F_3 > F_1 \quad (5)$$

图 3 给出了此条件下的受力示意图, 由于粘结剂的作用, 拉伸销喷涂涂层端面的半径临界值由  $r_1$  增加到  $r_2$ 。

选用的粘结剂为 E-7 胶,  $\sigma_3$  为 70MPa, 经计算得到  $r_2$  的值为 1.2mm, 可以满足机加工的要求。

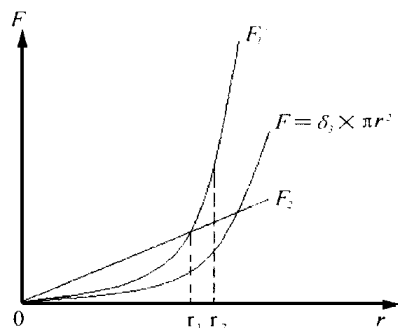


图 3 有粘结剂的条件下拉伸过程的受力分析

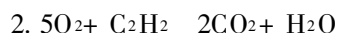
Fig. 3 Analysis of strength during pulling used adhesive

## 2 实验方法

按文献 [2] 的要求加工不同断面尺寸的拉伸试样, 具体尺寸如表 1 所示。基体材料为 1Cr18Ni9Ti, 用汽油和丙酮进行清洗, 用 20-30 目的刚玉砂在 60 磅/英寸<sup>2</sup> 的空气压力下吹砂。调整爆炸喷涂工艺参数至最佳, 进行喷涂, 喷涂材料为自贡产的 WC-12Co, 颗粒度为 200-325 目, 爆炸喷枪是国产设备。利用普通拉伸实验机进行拉伸。通过金相显微镜对涂层相貌进行观察。

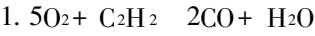
## 3 实验结果与讨论

图 4 是不同  $O_2/C_2H_2$  比条件下得到涂层的金相照片。爆炸喷涂是通过  $O_2/C_2H_2$  点火爆炸产生的爆轰波对粉末进行加热、加速, 使其喷涂到工件表面上<sup>[3]</sup>。在  $O_2/C_2H_2$  比为 2.5 时发生如下反应:



由于加热后的粉末在喷涂到工件表面上需要在空气中飞行一段时间, 在  $O_2/C_2H_2$  比为 2.5 时, 空气中的氧气会直接和 WC-12Co 中的粘结相金属 Co 发生化学反应, 减少了 Co 含量, 结果导致涂层的孔隙率增加。图 4a 有较多的气孔正是如此。

在  $O_2/C_2H_2$  比为 1.5 时可能发生如下反应:



或存在没有反应完全的  $\text{C}_2\text{H}_2$ , 加热的粉末在空气中飞行时,  $\text{CO}$  和  $\text{C}_2\text{H}_2$  将首先与  $\text{O}_2$  发生反应, 减少金属

$\text{Co}$  的损耗, 由于金属含量的增加, 最终导致涂层的的孔隙率比高氧条件下低, 如图 4b 所示。

表1给出了在  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  比为 1.5 时不同拉伸销

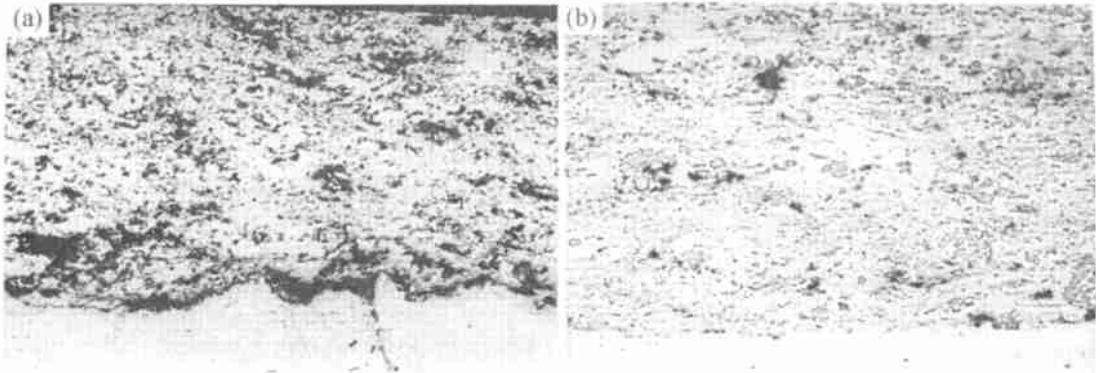


图 4 不同  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  条件下 WC-12Co 涂层显微形貌  $\times 200$   
(a)  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  为 2.5; (b)  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  为 1.5

Fig. 4 Microstructure of WC-12Co coatings in the condition of different value of  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  ratio

表 1 不同拉伸面积试样的结合强度 (试样锥度为  $15^\circ$ )  
Table 1 Adhesion strengths of different pulling area  
(the angle of prick is  $15^\circ$ )

试样编号	涂层厚度 $h/\text{mm}$	F 试样尺寸 $r/\text{mm}$	结合强度 $\sigma/\text{MPa}$	断面情况
A1	0.33	17.96	65.50	胶开
A2	0.42	17.76	63.50	胶开
A3	0.37	17.92	65.35	胶开
A4	0.29	17.90	66.54	胶开
A5	0.27	17.88	78.27	胶开
B1	0.32	11.96	75.00	部分胶开
B2	0.40	11.98	80.50	部分胶开
B3	0.28	11.76	61.00	胶开
B4	0.28	11.78	75.60	胶开
B5	0.27	12.00	76.50	部分胶开
C1	0.33	4.90	73.10	部分胶开
C2	0.34	4.86	71.30	部分胶开
C3	0.29	4.86	75.05	部分胶开
C4	0.32	4.80	72.08	部分胶开
C5	0.26	4.84	80.00	部分胶开
D1	0.29	2.06	143.90	涂层/基体开
D2	0.28	1.96	101.80	涂层/基体开
D3	0.29	2.02	123.40	涂层/基体开
D4	0.34	1.96	113.00	涂层/基体开
D5	0.37	2.98	113.40	涂层/基体开

开过渡到涂层与基体开, 说明  $r_2$  的值大于 2mm, 因此将断面尺寸  $r$  设计为 2mm 是合适的。

4 结论

(1) 设计了一种新的测量方法用于测量爆炸喷涂涂层与基体的结合强度, 该方法突破了传统方法中结合强度必须小于胶粘剂抗拉强度的限制。

(2) 从理论上分析了这种方法拉伸面的临界尺寸, 对国产喷枪尺寸设计为 2mm 左右是合适的, 爆炸喷涂涂层与基体的结合强度最高可达 143MPa。

(3) 为避免喷涂过程中金属  $\text{Co}$  的损失, 爆炸气体中  $\text{C}_2\text{H}_2$  需要过量,  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  (摩尔比) 为 1.5 左右较合适。

参考文献

[1] 米青田, 窦立军等. 爆炸喷涂碳化钨、碳化铬耐磨涂层质量检验 [S]. HB 7627-1998.  
[2] 唐建新, 张爱斌等. 测量涂层结合强度的方法和用于测量的试样 [P]. 发明专利: 00107205.6.  
[3] 唐建新, 张爱斌等. 爆炸喷涂工艺原理分析 [J]. 材料工程, 2000 增刊: 40-43.

断面尺寸条件下得到的拉伸强度。可以看出, 断面尺寸为 12mm 和 18mm 时有胶开的现象, 其原因如下:  $F_2$  与半径呈线形变化, 而  $\sigma_3 \times \pi r^2$  的值增加较快, 导致  $\sigma_3 \times \pi r^2 > F_2$ , 此时获得的数值为 E-7 胶的抗拉强度。随着端面尺寸的减少到 2mm, 涂层开裂逐渐从胶

收稿日期: 2000-09-19; 修订日期: 2001-02-19  
作者简介: 唐建新 (1968-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事表面防护, 爆炸喷涂方面的研究, 联系地址: 北京 81 信箱 15 分箱 (100095)。  
本文编辑: 李海霞