

WC-17Co 粉末尺寸对粒子飞行状态与涂层性能的影响分析

刘延宽, 王志平, 丁坤英

(中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

摘要: 目的 提高碳化钨涂层的性能。方法 运用 Fluent 软件进行超音速火焰喷涂焰流的仿真模拟, 得出喷涂距离-焰流速度、喷涂距离-焰流温度曲线。采用粒子飞行监测仪对三组不同粒度(粒子平均直径分别为 21.72、32.92、42.56 μm) WC-17Co 粉末在超音速火焰喷涂过程中的飞行状态进行监测, 并得出喷涂距离-速度、喷涂距离-温度曲线, 揭示喷涂过程中焰流速度、温度对粒子速度和温度的影响。通过扫描电镜观察分析不同粒度 WC-17Co 粉末撞击镍 718 合金基体后的扁平化程度, 测量不同粒度 WC-17Co 涂层的孔隙率, 比较涂层致密度的差异, 同时采用压痕法测量涂层的硬度。结果 WC-17Co 粒子飞行速度和温度随喷涂距离的增加呈先增大后减小的趋势, 且粒子飞行速度和温度随粉末粒径的增大而减小, 根据粉末粒径的不同, 其速度峰值在 690~810 m/s 之间变化, 温度峰值在 1890~2050 $^{\circ}\text{C}$ 之间变化。直径越小的粒子撞击基体后的扁平率越高, 扁平率在 1.94~2.35 之间。WC-17Co 涂层的孔隙率随粒子直径的增大而升高, 涂层的硬度与孔隙率成反比, 涂层努氏硬度在 1072~1284HK 之间。结论 超音速火焰喷涂过程中, 碳化钨粉末的飞行速度和温度呈先增大后减小的趋势, 且飞行速度和温度与粒子直径大小成反比。碳化钨涂层的致密度与硬度随粒子直径的增大而减小。

关键词: 超音速火焰喷涂; 碳化钨-17 钴; 焰流特性; 粒子飞行状态; 涂层; 孔隙率; 努氏硬度

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)06-0076-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.012

Effect of Particle Size on the In-flight Characteristics and the WC-17Co Coating Properties

LIU Yan-kuan, WANG Zhi-ping, DING Kun-ying

(Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve WC-coating properties. **Methods** Fluent software was used to simulate the flame of the high velocity oxygen fuel (HVOF), curves of distance-velocity and distance-temperature of flame were obtained, HVOF in-flight characteristics of WC-17Co powder in 3 different sizes (with average diameters of 21.72 μm , 32.92 μm , 42.56 μm , respectively) was monitored using spray watch, curves of distance-velocity and distance-temperature of WC-17Co powder were obtained, and the effect of flame velocity and temperature on the velocity and temperature of WC-17Co particles was revealed.

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-05-20

Received: 2016-01-22; Revised: 2016-05-20

基金项目: 工信部重大专项资助项目(2011ZX04014-21); 中央高校基金资助项目(ZXB2011A005)

Fund: Supported by MIIT Major Special Funded Project (2011ZX04014-21) and Central Universities Fund Funded Project (ZXB2011A005)

作者简介: 刘延宽(1988—), 男, 研究实习员, 研究方向为材料表面加工工程。

Biography: LIU Yan-kuan(1988—), Male, Master, Research assistant, Research focus: material surface processing engineering.

The splatting and flattening ratio of WC-17Co powder was studied using SEM, the coating porosity of different powder sizes was measured and the compactness was compared, meanwhile, the coatings' hardness was measured using indentation method. **Results** The WC-17Co powder's velocity and temperature increased first and then decreased along with the spray distance, the velocity and temperature values decreased with increasing particle size, depending on different particle sizes, the peak velocity varied from 690 m/s to 810 m/s and the peak temperature ranged from 1890 °C to 2050 °C; smaller particles had a higher flattening ratio after the impact on nickel alloy base, and the ratio varied from 1.94 to 2.35; WC-17Co coating porosity increased with increasing particle size, nevertheless, the Knoop hardness decreased, with values between 1072HK to 1284HK. **Conclusion** The WC-17Co powder's velocity and temperature increased first and then decreased during the process of HVOF, and were negatively correlated to the particle diameter; the compactness and Knoop hardness decreased along with the increase of particle diameter.

KEY WORDS: HVOF; WC-17Co; flow characteristic; particle in-flight characteristic; coating; porosity; Knoop hardness

WC-Co 超音速火焰喷涂 (High Velocity Oxygen Fuel) 技术是近些年来世界上许多发达国家都致力于研究和发展的项目, 在飞机制造过程中, 超音速火焰喷涂技术被广泛应用于发动机转轴、叶片等结构部件和起落架等承重部件上^[1-3], 其在航空领域有着广泛的应用和良好的发展前景。超音速火焰喷涂具有较高的焰流速度和适中的焰流温度, 因此实现了动能与热能的良好结合^[4-6]。超音速火焰喷涂过程中碳化钨粒子在飞行过程中的速度和温度直接影响涂层的特性^[7]。陶凯等^[8]进行了超音速火焰喷涂颗粒行为的数值模拟研究, 该研究模拟了颗粒尺寸对飞行过程中粒子速度和温度的影响, 为理论上优化喷涂参数提供了支持。李长久等^[9-10]研究了碳化钨颗粒尺寸对超音速火焰喷涂涂层形成的影响, 以及喷涂前后碳化钨颗粒尺寸的变化和碳化钨尺寸与扁平粒子厚度之间的关系。Picas 等^[11]研究了喷涂工艺中氧气/燃油比对碳化钨涂层特性的影响。

国内外研究主要通过数值模拟、改善喷涂工艺等方法来探讨涂层的性能, 而对于碳化钨颗粒尺寸对飞行过程中粒子速度和温度的影响, 以及所制备涂层的性能方面鲜有报道。本文选取直径范围在 15~45 μm 之间的碳化钨粉末, 通过筛选出三种大

小不同的粒子, 重点研究讨论了碳化钨粉末粒子的尺寸在喷涂过程中对粒子飞行的速度和温度的影响, 以及所制备的涂层性能的差异。

1 试验

1.1 试验材料的选取

本试验选取美国 Tafa 公司生产的 WC-17Co 粉末, 手工筛选出三种不同粒径的粉末颗粒, 直径大小分别为 15~28、28~38、38~45 μm。粉末的基本性能如表 1 所示。

表 1 三种 WC-17Co 粉末的基本性能指标

Tab.1 Characteristics of three kinds of WC-17Co powders

类别	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	直径 $D/\mu m$	平均直径 $D'/\mu m$
1-型	12.82	15~28	21.72
2-型	12.85	28~38	32.92
3-型	12.87	38~45	42.56

图 1 所示为粉末颗粒的微观结构照 (SEM), 可以看出碳化钨粉末颗粒近似为球状或椭球状, 且颗粒大小均匀。

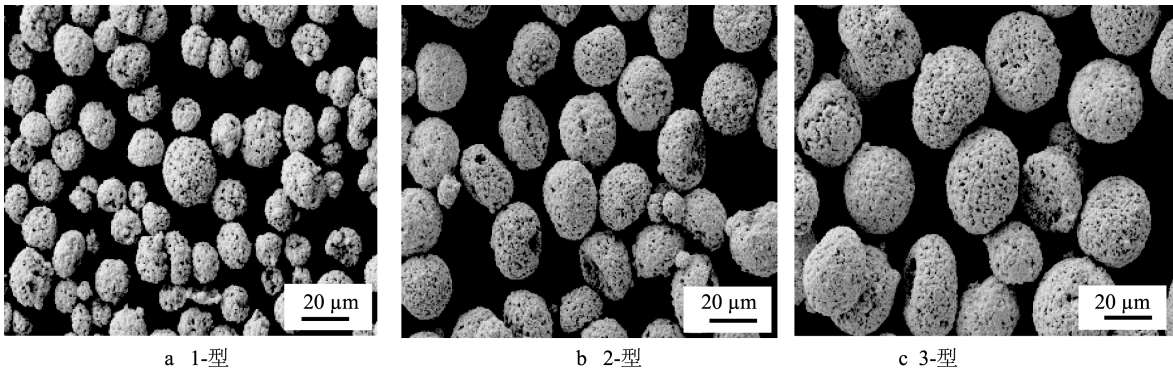


图 1 三种 WC-17Co 粉末扫描电镜形貌
Fig.1 SEM micrographs of WC-17Co powders: a) type-1, b) type-2, c) type-3

1.2 喷涂及监测设备

喷涂设备选用美国 TAFE 公司生产的 JP5000 型液体燃料-氧气超音速火焰喷涂系统。为了保证准确平稳地控制喷涂距离和速度,选用美国 ABB 公司生产的 2400M 型六轴自动机械手进行喷涂。喷涂参数为:氧气流量 1850 m³/h,煤油流量 23.5 L/h,送粉率 65 g/min,喷涂距离 380 mm,喷枪移动速度 350 mm/s。

通过粒子飞行监测仪 (SprayWatch) 监测不同直径粒子的飞行速度与温度,将传感器探头放置于喷涂火焰侧方 250 mm 处,在距离喷枪口 0~400 mm 之间每隔 50 mm 测量一次。

1.3 微观组织结构分析

利用捷克 FEI 公司生产的 Quanta FEG250 型热物发射扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观组织观察,观察分析不同直径粒子撞击基体后的铺展程度与冲击效果,同时观察不同直径粒子所制备碳化钨涂层的致密度。利用 HVS-1000 型显微硬度仪测量涂层的显微硬度,载荷为 2.94 N,加载时间为 20 s。

2 结果与分析

2.1 喷涂焰流特性的模拟分析

在 Fluent 软件的基础上,进行超音速火焰喷涂焰流的模拟分析,得到喷涂距离-焰流速度、喷涂距离-焰流温度曲线,如图 2—3 所示。

本试验研究的焰流属于高雷诺数的湍流,在数值模拟中应用 $k-\varepsilon$ 双方程模型求出流体相湍流黏性

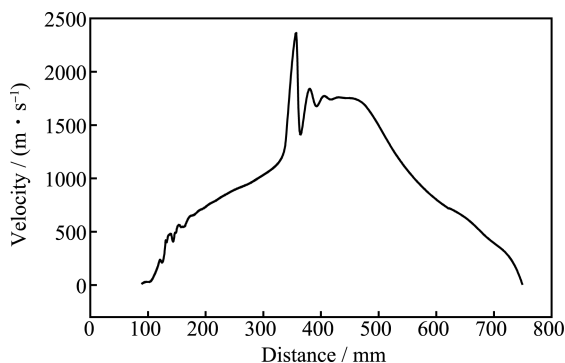


图 2 焰流速度与喷涂距离关系图

Fig.2 Relationship between flame velocity and spray distance

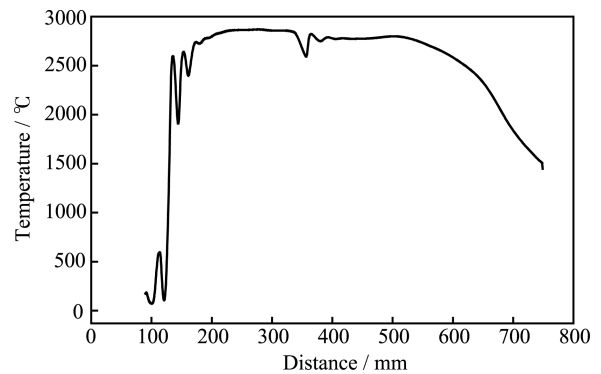


图 3 焰流温度与喷涂距离关系图

Fig.3 Relationship between flame temperature and spray distance

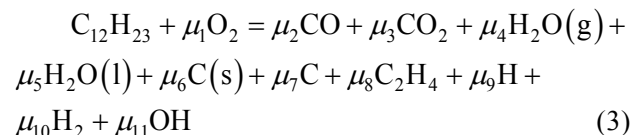
系数, $k-\varepsilon$ 双方程如下:

$$\frac{\partial(\rho U_x K)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y K)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z K)}{\partial z} = \gamma_k \left(\frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z \varepsilon)}{\partial z} = \gamma_\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

公式(1)为湍流能量耗散方程,公式(2)为湍流能量耗散率方程,其中 K 为湍动能, ε 为湍流能量的黏性耗散^[12], U_x 、 U_y 、 U_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度矢量。

燃烧则采用非预混燃烧模型,模型中对反应的假设为:



公式(3)中反应物的系数取决于燃烧室压力的大小。非预混燃烧不存在点燃问题,化学反应可以在燃烧室内直接进行^[13]。

2.2 粒子尺寸对飞行速度的影响

根据粒子飞行监测仪所监测的实验数据,得出碳化钨粉末飞行速度与飞行距离之间的关系,如图 4 所示。粒子在距离喷枪口 0~400 mm 之间的运动可划分为两大部分:前半部分的加速阶段和后半部分的减速阶段。粒子飞行前半段的速度远小于焰流速度,焰流运动产生的拖拽力使粒子处于加速运动状态,速度增大;随着飞行距离的增加,焰流的速

度逐渐降低,拖拽力减小,粒子处于减速运动状态,速度减小。粒子速度的最大值出现在距离枪口 200~300 mm 之间。

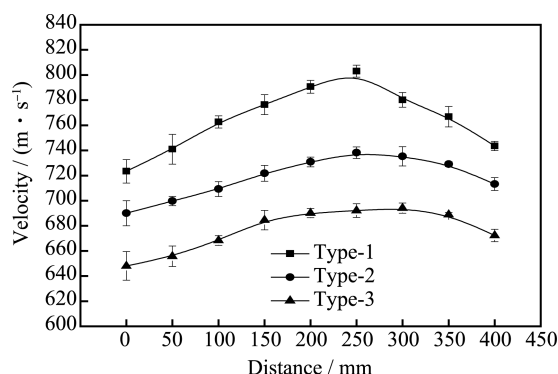


图 4 三种粉末的速度与喷涂距离关系图

Fig.4 Relationship between particle velocity of the three kinds of powder and spray distance

同时,不同直径的粒子在飞行过程中的速度不同。1-型碳化钨粉末直径最小,质量最小,所拥有的运动惯性也最小,进而速度曲线的变化较为明显,表现为升速快、降速快的特点。虽然其在喷射过程中容易获得较高的速度,最大速度可达到 810 m/s,但是速度不容易保持。相反,3-型碳化钨粉末直径最大,质量最大,所拥有的运动惯性也最大,进而速度曲线的变化较为平缓,表现为升速慢、降速慢的特点。相比于 1-型粉末,其速度的最大值较小,最大值为 690 m/s。

2.3 粒子尺寸对温度的影响

根据粒子飞行监测仪所监测的实验数据,得出碳化钨粉末温度与飞行距离之间的关系,如图 5 所示。三种不同的碳化钨粉末在飞行过程中的温度变化均表现为先升温后降温的趋势,这是因为在飞行的前半段,粒子温度远小于焰流温度,粒子表现为升温,随着飞行距离的增加,焰流温度逐渐降低,粒子开始降温。粒子温度的最大值出现在距离枪口

100~150 mm 之间。

同时,不同直径的粒子在飞行过程中的温度不同。其温度随着粒子直径的增加而减小。在相同的喷涂距离下,1-型碳化钨粉末温度最高,最大值可达 2050 °C,且其温度变化快,表现为升温快、降温快的特点。相反,3-型碳化钨粉末温度最低,最大值为 1890 °C,且其温度变化缓慢,表现为升温慢、降温慢的特点。这是因为对于密度、比热均相同的碳化钨粉末,其温度的变化与其粒子直径大小成反比,直径更小的粒子在超音速火焰喷涂的过程中表现为温度变化快、温度最大值高的特点。

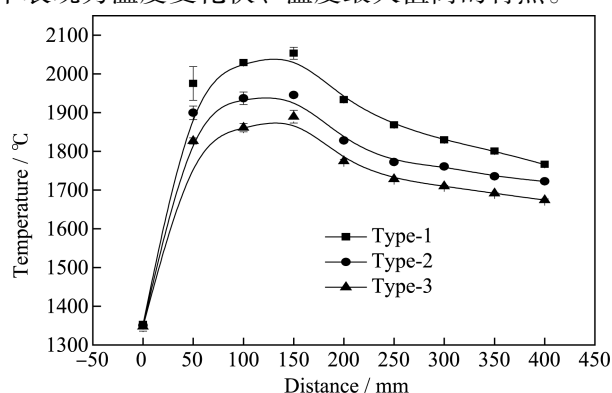


图 5 三种粉末的温度与喷涂距离关系图

Fig.5 Relation between particle temperature of the three kinds of powder and spray distance

2.4 粉末对基体冲击状态的分析

超音速火焰喷涂涂层的形成过程可以概括为喷涂材料进入高温高速焰流中被加热到熔化或半熔化状态,以较高的速度和适中的温度喷射到经过预处理的基体表面上相互碰撞后,喷涂熔滴发生变形、高速淬冷、凝固以及和基体产生结合的过程^[14]。喷涂材料与基体表面的碰撞直接决定了涂层残余应力的的大小,因此,有必要对喷涂粒子对基体的冲击进行研究,寻找优化涂层性能的有效方法。

图 6 为扫描电镜下三种类型粉末冲击基体后的

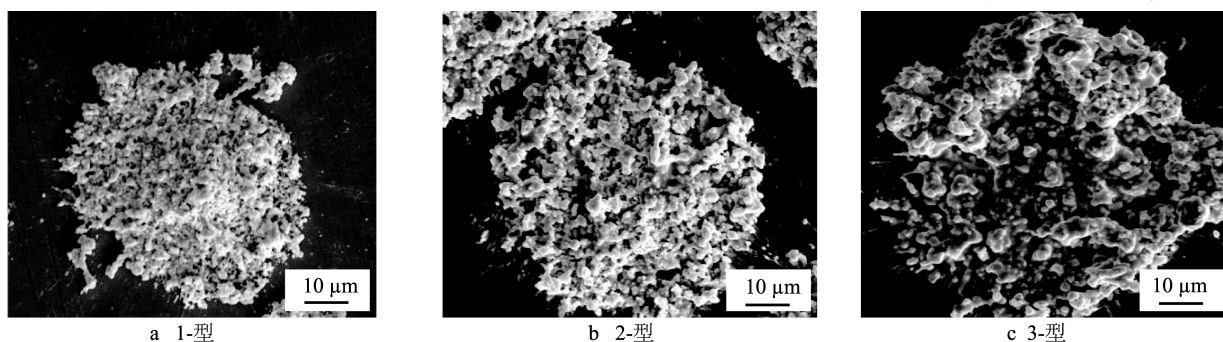


图 6 三种粉末的冲击形貌

Fig.6 SEM images for impacted splats of WC-17Co powders: a) type-1, b) type-2, c) type-3

铺展形貌,碳化钨粉末颗粒冲击基体平面后形成圆盘形扁平粒子。

运用材料显微镜图像处理软件测量三种粉末的原始直径 D 与扁平粒子直径 d , 均取平均值, 同时计算体现粒子扁平化程度的比值 $\xi=d/D$, 如表 2 所示。

表 2 三种粉末原始直径 D 、扁平粒子直径 d 与扁平率 ξ
Tab.2 Feedstock diameter, splat diameter and flattening ratio of WC-17Co powders

类别	原始直径 $D/\mu\text{m}$	扁平直径 $d/\mu\text{m}$	ξ
1-型	21.72	51.03	2.35
2-型	32.92	67.36	2.05
3-型	42.56	82.40	1.94

1-型粉末粒子原始直径最小, 其冲击基体后所形成的扁平化粒子直径也最小; 3-型粉末粒子原始直径最大, 其冲击基体后所形成的扁平化粒子直径也最大。由此可见, WC-17Co 粉末冲击基体后所形成的扁平粒子的尺寸依赖于原始粉末尺寸。 d/D 值在一定程度上体现了 WC-17Co 粉末冲击基体后的扁平化程度, 1-型粉末的扁平化程度为 2.35, 2-型粉末的扁平化程度为 2.05, 3-型粉末的扁平化程度为 1.94。WC-17Co 粉末冲击基体后的扁平化程度与粒子直径大小成反比, 粒子直径越大, 扁平化程度越低。

在实际喷涂过程中, 粒子在撞击基体后会产生一个迅速降温冷却的过程。3-型粉末由于粒子直径大, 在基体表面铺展、扁平化所需时间长, 导致其在整个过程中温度变化差异大, 随着温度的下降, 粒子黏度系数增大, 不能完全铺展, 因此其扁平化率最低。相反, 1-型粉末由于直径最小, 初始温度最高, 扁平化率也最高。

2.5 粒子直径对涂层致密度与硬度的影响

利用粒度不同的 WC-17Co 粉末制备的涂层孔隙率、致密度及涂层硬度等基本力学性能有所差异^[15],

如表 3 所示。

表 3 三种涂层的孔隙率与努氏硬度
Tab.3 Porosity and Knoop hardness of WC-17Co coatings

类别	孔隙率 $\delta/\%$	努氏硬度 (HK)
1-型	0.22	1284
2-型	0.95	1188
3-型	1.16	1072

图 7 为扫描电镜观察到的三种不同粒度 WC-17Co 粉末制备超音速火焰喷涂涂层的致密度情况。三种涂层的孔隙率测量结果分别为 1-型 0.22%, 2-型 0.95%, 3-型 1.16%。由此可见, 1-型粉末粒度最小, 在喷涂沉积过程中粒子扁平化程度高, 粒子间填充效果较好, 制备的涂层孔隙率低, 具有较高的致密度。相反, 3-型粉末粒度最大, 在喷涂沉积过程中粒子扁平化程度低, 粒子间填充效果较差, 制备的涂层孔隙率高, 具有较低的致密度。涂层的致密度在一定程度上影响了涂层的硬度。

如图 8 所示, 运用压痕法测量不同直径粒子涂层的努氏硬度^[16]。努氏硬度计算公式为:

$$\text{HK} = 1.451 \frac{F}{a^2} \quad (4)$$

其中, $F=2.94 \text{ N}$, 作用时间为 20 s, a 为压痕长对角线的长度。测量结果取统计值。

可见, 涂层的致密度影响涂层的硬度等基本物理性能。高致密度的涂层具有较高的硬度, 低致密度的涂层具有较低的硬度。涂层的性能是由喷涂粉末粒子的飞行状态所决定的, 1-型粉末冲击基体前的运动动量较小, 冲击基体后扁平化程度高, 形成的涂层具有较高的致密度, 涂层的硬度较高; 3-型粉末冲击基体前的运动动量较大, 冲击基体后扁平化程度低, 形成的涂层具有较低的致密度, 涂层的硬度较低。

在工程应用中, 高硬度涂层具有较高的耐磨性能, 而低硬度涂层抗弯折性能较好。因此, 涂层硬

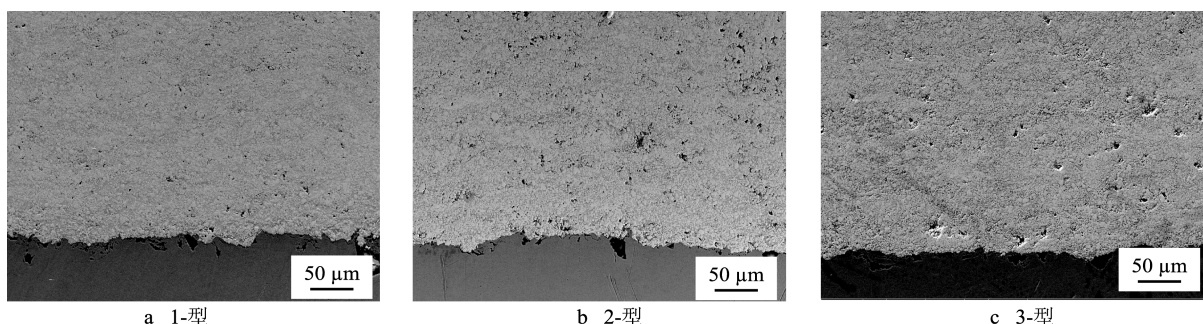


图 7 三种涂层的显微结构

Fig.7 SEM micrographs of WC-17Co coatings: a) type-1, b) type-2, c) type-3

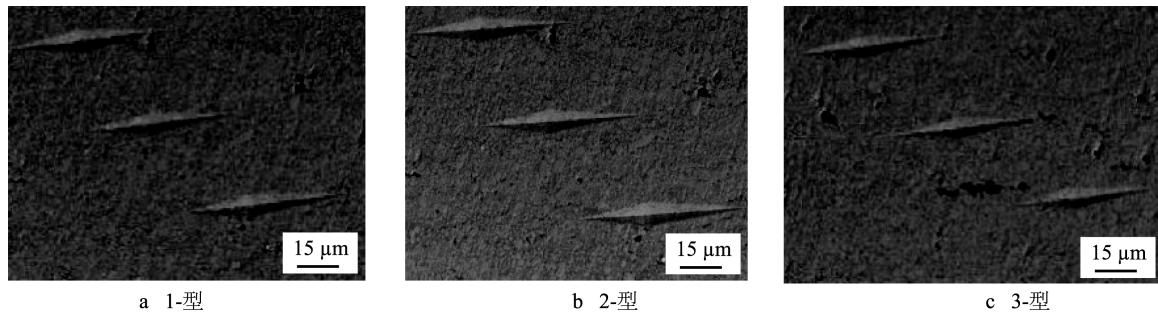


图8 测量三种涂层的努氏硬度

Fig.8 Knoop indentation in WC-17Co coatings: a) type-1, b) type-2, c) type-3

度与弹性模量等力学性能的大小并不能完全说明涂层性能的优异,在实际应用中,应根据涂层不同的应用与需求进行工艺的优化,寻找最佳的制备方案。

3 结论

1) HVOF 喷涂过程中碳化钨粉末粒子的速度与温度在飞行过程中表现为先增大后减小的趋势,这与喷涂过程中焰流气体的速度和温度变化有关。

2) 不同粒度的碳化钨粉末粒子在 HVOF 喷涂过程中飞行速度和温度不同,碳化钨粉末的飞行速度与温度随着粒子直径的增大而减小。

3) 相同工艺条件下,碳化钨粒子的直径大小与撞击基体后粒子的扁平化程度成反比。

4) 碳化钨涂层的致密度随着粒子直径的增大而减小,碳化钨涂层的硬度随着粒子直径的增大而减小。

参考文献

- [1] 王永兵, 刘湘, 祁文军, 等. 热喷涂技术的发展和应[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(7):52—55.
WANG Yong-bing, LIU Xiang, QI Wen-hui, et al. Development and Application of Thermal Spray Technology [J]. Electroplating & Finishing, 2007, 26(7):52—55.
- [2] 付俊波, 周世魁. 热喷涂技术在航空发动机零部件及其维修中的应用[J]. 失效分析与预防, 2006, 1(2): 61—64.
FU Jun-bo, ZHOU Shi-kui. Application of the Thermal Spraying Technology in Aeroengine Part and its Service [J]. Failure Analysis and Prevention, 2006, 1(2): 61—64.
- [3] 陈礼顺, 张斌, 蔡元钢. 热喷涂涂层在航空发动机上的应用及发展[J]. 航空制造技术, 2011(11): 34—37.
CHEN Li-shun, ZHANG Bin, CAI Yuan-gang. Application and Development of Thermal Spray Coating in Aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(11): 34—37.
- [4] CHRISTOFIDES P D. Control of an HVOF Thermal Spray Process[J]. Model-Based Control of Particulate Processes, 2002, 14: 163—189.
- [5] 解永杰, 牛二武, 曹晓明. 超音速火焰喷涂技术的发展与特点[J]. 天津冶金, 2004, 120(2):32—34.
XIE Yong-jie, NIU Er-wu, CAO Xiao-ming. Development and Characteristics of HVOF spray[J]. Tianjin Metallurgy, 2004, 120(2):32—34.
- [6] 杨辉, 李长久. 超音速火焰喷涂的火焰速度特性[J]. 中国表面工程, 1998, 11(2): 37—39.
YANG Hui, LI Chang-jiu. Characteristics of the Flame Velocity of Supersonic Flame Spraying[J]. China Surface Engineering, 1998, 11(2): 37—39.
- [7] BOBZIN K, KOPP N, WARDA T, et al. Particle In-Flight and Coating Properties of Fe-based Feedstock Materials Sprayed with Modern Thermal Spray Systems [J]. Journal of Thermal Spray Technology, September 28, 2012.
- [8] 陶凯, 崔华, 周香林, 等. 超音速火焰(HVOF)喷涂过程中颗粒行为数值模拟的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(4): 112—116.
TAO Kai, CUI Hua, ZHOU Xiang-lin, et al. Development of Modeling of Particle Behavior during HVOF Spray Process[J]. Materials Review, 2006, 20(4): 112—116.
- [9] 李长久, 大森明, 原田康夫. 碳化钨颗粒尺寸对超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层形成的影响[J]. 中国表面工程, 1997(2): 22—28.
LI Chang-jiu, Omori A, Harada Y. Effect of wc Particle Size on the Formation of HVOF Spray WC-Co Coating[J]. China Surface Engineering, 1997(2): 22—28.
- [10] TABBARA H, Gu S. Numerical Study of Semi-molten Droplet Impingement[J]. Material Science and Processing, 2011, 104(4): 1011—1019.
- [11] PICAS J A, PUNSET M, BAILE M T, et al. Effect of Oxygen/Fuel Ratio on the In-flight Particle Parameters and Properties of HVOF WC-CoCr Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(4): 364—368.
- [12] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
GUO Lie-jin. Two and Multi-phase Flow Mechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.
- [13] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
ZHOU Li-xing. Theory and Numerical Simulation of Turbulence Gas-particle Two-phase Flow and Combustion[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [14] BUDINSKI K G. Surface Engineering for Wear Resistance[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1988:219.
- [15] 王志平, 程涛涛, 丁坤英. 颗粒致密度对 WC-10Co-4Cr 涂层性能的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 63—68.
WANG Zhi-ping, CHENG Tao-tao, DING Kun-ying. Effect of Particle-density on the Performance of WC-10Co-4Cr Coating[J]. Journal of Mechanical Engineering 2011, 47(24): 63—68.
- [16] LIMA R S, KRÜGER S E, LAMOUCHE G, et al. Elastic Modulus Measurements via Laser-Ultrasonic and Knoop Indentation Techniques in Thermally Sprayed Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005, 14(1): 52—60.