DOI:10.13732/j.issn.1008-5548.2005.04.010

火焰热喷涂方法制备金属粉末的研究

冯拉俊，梁天权，惠　博

（西安理工大学 材料科学与工程学院，陕西 西安　710048）

摘　要：为了研究热喷涂方法制备金属粉末的可能性，用氧乙炔热喷涂方法将Al、Zn和1Cr18Ni9Ti等线材制成金属粉末，采用光透射法测试粉末的粒度及其分布，用SEM观察粉末颗粒的形貌，分析了粉末粒径与喷涂工艺参数的关系。实验结果表明用热喷涂方法制备金属粉末是可行的，制备的粉末最大颗粒直径不超过80 μm，分布范围窄，送丝速度的降低有利于制备较细的金属粉末。

关键词：火焰热喷涂；金属粉末；制备；粒径

中图分类号：TB383　　文献标志码：A

文章编号：1008-5548(2005)04-0028-03

Study of Preparation of Metal Powder by Flame Thermal Spray

FENG La-jun, LIANG Tian-quan, XI Bo

(School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048 China)

Abstract: Linear materials such as Al, Zn and 1Cr18Ni9Ti are made into metal powder by flame thermal spray (FTS) to study the possibility of preparing metal powder by thermal spray. The average diameter and distribution spectrum are analyzed by light-permeating method, and the morphologic appearances of the powders are studied by SEM, and the relationships between the particle size and the parameters of FTS are analyzed. The study shows that preparation of metal powder by FTS is feasible, and maximum diameter of powder is no more than 80μm and there is a narrow granularity spectrum, the reducton of the linear materials sending speed contributes to making much finer metal powder.

Keywords: flame thermal spray; metal powder; preparation; particle size

金属粉末在国民经济各领导中有着广泛而重要的应用[1]，涉及到了材料、化工、医药、食品、航空航天，它成为制造高性能材料和制品以及特殊性能材料的重要手段，并且越来越起着重要的作用。金属粉末的制备方法是多种多样的，主要有冶金法、机械法、还原法、雾化法以及电解法等。这些方法在实际生产过程中一般都存在着制备设备复杂、成本高、环境污染等问题。本文中研究了利用氧乙炔热喷涂方法来制备金属粉末(flame thermal spray，FTS)，使用的生产设备简单、生产场地小、操作简单、成本低廉，所制备的粉末平均粒度较小、分布范围较窄。该项研究为金属粉末的制备找到了一个新的方法，同时也拓宽了热喷涂技术的应用范围。

收稿日期：2004-09-03

第一作者简介：冯拉俊（1957-），男，博士，教授。

1　试验材料和设备

1.1　试验原料

实验原料为工业生产的纯Al丝(φ3 mm)、Zn丝(φ3 mm)和1Cr18Ni9Ti丝(φ2 mm)，以及O_2、C_2H_2，冷却剂为蒸馏水。

1.2　试验设备与仪器

QX-1型线材火焰喷枪(中速和高速)，VFY-3/10型空气压缩机(额定排气压力1.0 MPa)，DGB20003台式干燥箱(功率0.6 kW，最高温度200 ℃)，WID-C301粉末粒度分布测试仪，AMRAY1000B型SEM(功率30 kV)；比重瓶。

1.3　试验参数

参照火焰热喷涂工艺参数，优化得到本次研究的制粉工艺参数，见表1。

表1　喷涂制粉工艺参数

工艺名称	工艺参数
C_2H_2	压力0.1 MPa
O_2	压力0.5 MPa
压缩空气	压力0.6 MPa
Al(φ3 mm)	送丝速度6 m/s
Zn(φ3 mm)	送丝速度6 m/s
1Cr18Ni9Ti(φ2 mm)	送丝速度3 m/s
蒸馏水(冷却剂)	常温
烘干	104 ℃，4 h

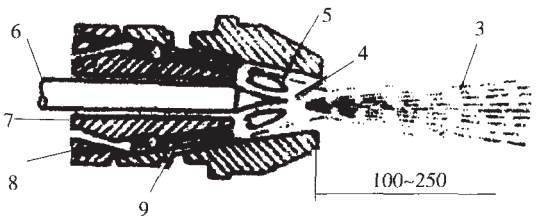
2　FTS法制备金属粉末的基本原理

热喷涂技术是利用各种热源将欲喷涂的固体涂层材料加热至熔化或熔融状态，借助于高速高压气流的雾化效果使其形成微细液滴，喷射沉积到经过预处理的工件表面形成堆积结构涂层的技术[2]。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从喷涂材料进入热源到形成涂层在很短的时间内经历了材料被加热熔化、熔化的材料在高速高压的气流下雾化成为微细液滴、微细的液滴颗粒的喷射飞行、粒子在基体表面的碰撞、变形、凝固及堆积等几个阶段。从上述的热喷涂涂层形成过程中，有金属被雾化阶段，利用这一原理，将被加热至熔化或熔融状态的材料经过雾化后喷射到粉末收集器中，同时设有冷却装置，使被雾化形成的微细液滴颗粒迅速凝固形成粉末，以达到制备粉末的目的。

线材火焰喷涂 (wire flame spray，WFS) 原理如图 1 所示。在喷枪中以氧 - 燃气 (乙炔) 的混合燃烧火焰为热源，枪内送丝驱动机构均匀、连续送入火焰的线材或棒材加热熔化后被喷枪前端的雾化气流 (压缩空气) 雾化成微细的熔滴并形成射流。此时，将微细熔滴的射流喷射到设有冷却装置的粉末收集器中，冷却后形成粉末颗粒。



1—基材，2—涂层，3—喷涂流束，4—熔融材料，5—燃烧气体，6—线材或棒材，7—氧气，8—燃料气，9—雾化气

图 1　线材火焰喷涂基本原理图

该工艺设备投资少、操作简便、易于控制和应用，因此热喷涂方法制备金属粉末的方案是可行的。

3　结果与讨论

3.1　粉末粒度及其分布

用 WJD-C301 粉末粒度分布测试仪测得喷涂方法制得的粉末 Al、Zn 和 1Cr18Ni9Ti 粉末粒度分布和中值直径见表 2，粒度分布曲线如图 2 所示。

表 2　粉末粒度分布　　%

粒度 /μm	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
w (Al)	12.89	28.41	4.84	11.17	8.04	4.25	4.10	26.31
w (Zn)	5.68	16.64	22.39	31.49	23.99	0		
w (1Cr18Ni9Ti)	17.70	16.80	40.91	24.49	0			

由表 2 可知，粉末的粒度小且分布范围比较窄，即粉末颗粒比较均匀，因此其平均直径即中值直径均较小。其中，Al 粉的分布范围较 Zn 和 1Cr18Ni9Ti 粉的稍大，Zn 和 1Cr18Ni9Ti 粉的分布相近；Al 粉的平均直径是 38.37μm，Zn 和 1Cr18Ni9Ti 粉的分别为 29.87μm 和 22.88μm。

由图 2 可直观地看到，3 种金属粉末的粒度分布情况：Zn 和 1Cr18Ni9Ti 粉分布较集中，在 10~30μm 间就占了大部分，Al 粉的分布则分两大集中区即 10~30μm 占 43.62% 和 70~80μm 占 26.31%。总体粉末的最大粒度不超过 80μm。

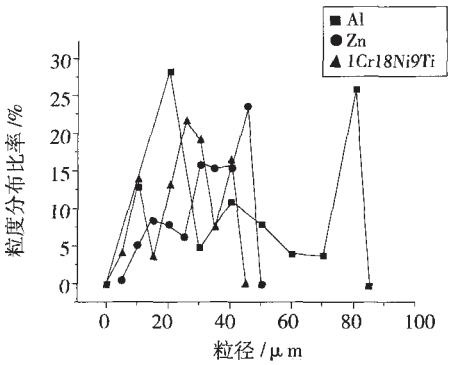


图 2　粉末粒度分布曲线图

对于气雾化粉末的平均粒径 (d_m)，Lubanska[4] 提出了下列经验公式

$$\frac{d_m}{d_{Met\cdot str}} = K\sqrt{\frac{\mu_m}{\mu_g}\cdot\frac{1}{We}\cdot\left(1+\frac{M}{A}\right)}$$

式中，d_m 表示质量中值颗粒直径；$d_{Met\cdot str}$ 表示金属液流直径；μ_m 和 μ_g 分别表示金属液和雾化气体的运动学粘度系数 (动粘度)；M、A 分别表示金属和雾化气体的质量流量；$We = \rho_m v^2 d_{Met\cdot str}/\gamma$ 表示韦伯数 Weber (ρ_m 表示液态金属的密度，v 表示雾化气体冲击液态金属液流的速度，γ 表示表面张力)；K 是经验常数。

由 Lubanska 公式可以看出，在雾化过程中，液态金属流和雾化气体的速度相差越大，则雾化分散液滴的平均直径越小。从能量转化的角度分析[5,6]，认为雾化过程中的雾化气体的动能转化为液态金属的表面能、动能以及其他形式的能量的过程。雾化气体的速度愈大，可供转化反液态金属的表面能量就愈大。但雾化气体的速度也存在一个临界值，若气流流速超过这一临界值，金属液滴表面张力就会增大，造成雾化消耗的能量增大。另一方面，气流流速过大，喷枪走丝速度增大，金属材料在喷嘴处来不及熔化，使得金属材料不能被雾化。其次，气流流速过大，可能将火焰吹灭，使喷枪不能正常工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

喷涂雾化中能够提高雾化效率的主要因素有火焰中心的最高温度、雾化气体的压力和速度。火焰喷枪在氧气和乙炔最佳配比的条件下，焰心温度都在2 500 ℃以上，对于大部分的金属材料已是很大的过热，使得送入喷枪中的金属丝在极短的时间内被加热至熔融状态。与此同时，金属液滴在100~200 m/s[3]的高压高速气流下充分雾化。经计算，从线材金属丝进入喷枪被加热、雾化并冷却成为粉末的整个过程的时间约为20 ms，而温度从2 500 ℃即降到60 ℃左右，粉末的冷却速度高于10^4 K/s。

3.2 粉末颗粒的形状

热喷涂方法制得的粉末的SEM图如图3(a,b,c)所示。从图中可见，Al粉的颗粒形状多为丝状(见图3-a)；1Cr18Ni9Ti粉末的颗粒则近似于椭球形(见图3—b)；Zn粉末则介于它们之间。同时还可以看到1Cr18Ni9Ti粉末颗粒大小比较均匀，而Al粉的相差较大。

(a)Al粉末　(b)Zn粉末　(c)1Cr18Ni9Ti粉末

图3 粉末的SEM图

3.3 粉末的视密度

火焰热喷涂法制得的Al、1Cr18Ni9Ti和Zn粉末的视密度的测量结果为1.51、4.26、4.23 g/cm^3(如表3)。视密度与真实密度呈现出一定的比例关系，基本是真密度的1/2。视密度不仅与粉末的颗粒形状、表面状态有关外，还与粉末原材料的密度有关。粉末的视密度与粉末颗粒的大小有一定的对应关系即视密度越小，粉末颗粒越小。

3.4 粉末粒径与喷涂工艺参数的关系

从表2可知，Al材料制备的粉末粒径较粗，1Cr18Ni9Ti材料制备的粉末粒径则较细，而Zn材料制备的粉末粒径在二者之间。这主要是由于Al、Zn和1Cr18Ni9Ti材料的熔点不同所至的。Zn材料的熔点最低，1Cr18Ni9Ti的最高因此喷涂时将1Cr18Ni9Ti丝的走丝速度降至Zn的一半并且1Cr18Ni9Ti丝的直径选择为φ2mm，而Zn材料的直径选为φ3mm，这使得在同样的热量条件下，要熔化的不锈钢材料的量降低，使不锈钢材料熔化的重量降至Zn材料的67%，熔化体积降至Zn材料的22%，这足以保证了1Cr18Ni9Ti材料充分熔化和雾化。结果发现1Cr18Ni9Ti材料制备的粉末比Zn材料制备的还细。

而Al的熔点比Zn的高，喷涂时采用与Zn材料相同的进丝速度，与Zn材料相比，Al材料不能被充分熔化，因为雾化效果也不好。从SEM照片比较可见，1Cr18Ni9Ti粉末颗粒为球状，Al粉末为丝状(未充分熔化和雾化就被高速气流剪切下来所至)，Zn粉末介于二者之间。在研究过程中若将Zn和Al的送丝速度降至与不锈钢的送丝速度相同，发现可制备出比不锈钢材料更细的粉末。但由于Al、Zn材料在喷枪喷嘴处受热膨胀较大，使得走丝不畅，容易堵塞喷嘴，断丝严重。因此将Zn材料的送丝速度降至低于6 m/s是不现实的。而对于Al材料，走丝速度降至4.5~5 m/s是可行的，可制备出与Zn材料同样粗细的粉末。若将1Cr18Ni9Ti材料的送丝速度选择与Zn同样的送丝速度6 m/s，发现不能制取粉末，不锈钢丝只能被烧红而不能被雾化制取粉末。因此在喷枪温度一定的条件下，走丝速度直接影响着制备粉末粒径的大小。

4 结 论

(1) 研究认为，利用热喷涂方法制备金属粉末是可行的。制备金属粉末最佳的工艺参数为：氧气压力为0.5 MPa，乙炔压力为0.1 MPa，压缩空气压力为0.6 MPa。

(2) 制备的金属粉末最大粒径约为80 μm。Al、Zn和1Cr18Ni9Ti粉末的平均粒径均分别为38.37 μm、29.87 μm和22.78 μm；Al粉末颗粒的形状为丝状，1Cr18Ni9Ti的为球状，Zn介于二者之间。

(3) 送丝速度的降低有利于制备较细的金属粉末。在粉末制备中，喷枪中的气体燃烧温度、雾化气体的流量和压力以及送丝速度是主要的控制因素。

参考文献：

[1] 李凤生. 超细粉体技术[M]. 北京：国防工业出版社，2000.
LI Fengsheng. Superfine Powder Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)

[2] 美国焊接学会.金属手册:第七卷 粉末冶金[M].第九版.韩凤麟译.北京：机械工业出版社，1994.
American Welding Society. Handbook of Metal: Vol: 7: Powder Metallurgy[M]. 9th edition. Translated by HAN Fenglin. Beijing: China Machine Press, 1994. (in Chinese)

(下转第34页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

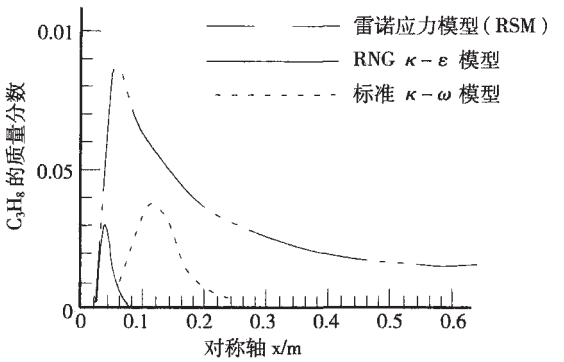


图 5 几种湍流模型结果的丙烷分布

3.3 工况 3

第三种工况下的温度分布如图 5 所示。

从图 6 中看出,对于 RNG κ-ε 模型与前两种工况差不多,都是燃料进入燃烧室就开始燃烧,计算的最高温度为 1 820 K,与 Reytech 红外测温仪的测量值 1 555 K 的结果吻合;对于雷诺应力模型,与第二种工况比较,燃烧的很滞后,而且最高温度也只将近 1 000 K,与实验中的情况相差很大;标准 κ-ω 模型与前两种工况相比变化不是很大,只是温度高一些,火焰更长一些,实验中观测到的火焰明焰长度为 95 mm 左右。

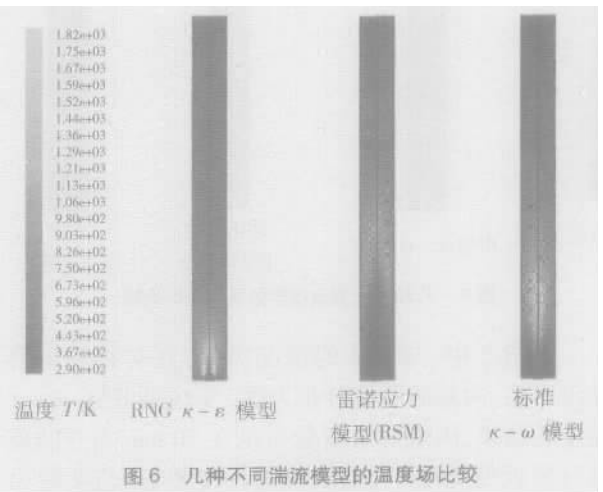


图 6 几种不同湍流模型的温度场比较

4 结 论

本文中应用 CFD 商业软件 Fluent,对以 C_3H_8 为燃料,O_2 为氧化剂的火焰气相沉积法合成 TiO_2 颗粒的火焰温度场进行数值模拟。在湍流扩散燃烧数值模拟中,3 种湍流模型在 3 种工况下进行了比较,可以看出,对于 RNG κ-ε 模型来说,三种工况下的温度分布和丙烷的组分分布与实验中所测的温度和所观察到的火焰形状吻合的很好;而对于雷诺应力模型来说,虽然有的工况可以接受,但是有的工况并不能成功进行模拟;而标准 κ-ω 模型模拟的结果与实验中所测的温度低大约 400℃,火焰长度比所观察到的明焰要长很多,而且它的燃烧很滞后。

参考文献:

[1] 张立德,牟季美.纳米材料与纳米结构[M].北京:科学出版社,2001.
ZHANG Lide, MU Jimei. Nanomaterials and nanostructures [M]. Beijing: Science Press, 2001.(in Chinese)

[2] 郭 永,巩 雄,杨宏秀.纳米微粒的制备方法及其进展[J].化学通报,1996,(3):1-4.
GUO Yong, GONG Xiong, YANG Hongxiu. The development of synthesis of nanomaterials [J]. Chemical Conmunication, 1996,(3):1-4. in Chinese)

[3] 刘维平,邱定蕃,马瑞新. 超细粉体制备及测量技术研究进展[J]. 化工矿物与加工,2003,(3):1-4,19.
LIU Weiping, QIU Dingfan, MA Ruixin. Research and development in synthesis and measurement of ultrafine particles[J]. Chemical Minerals and Processing, 2003,(3):1-4,19. (in Chinese)

[4] 谢洪勇.粉体力学与工程[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
XIE Hongyong. Mechanics and Process Engineering of Powder and Particles[M]. Beijing: Chemical Indurstry Press, 2003. (in Chinese)

[5] 王利希,陈 石,谢洪勇.湍流扩散火焰数值模拟中若干影响因素的研究[J].中国粉体技术,2005,11 (1):16-20.
WANG Lixi, CHEN Si, XIE Hongyong. Analysis of the factor affecting the simulation of turbulent diffusion combustion [J]. Chinese Powder Science and Technology, 2005,11 (01):16-20. (in Chinese)

(上接第 30 页)

[3] 李金桂.防腐蚀表面工程技术[M]. 北京:化学工业出版,2003.
LI Jingui. Technology of Anti-corrosive Surface Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)

[4] Lubanska H. Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals[J]. Met, 1970, 22(2): 45-49.

[5] 张 玨,周哲玮.喷射成型中的雾化机理研究[J].粉末冶金技术,1999,17 (3):163-168.
ZHANG Jing, ZHOU Zhewei. On the Sprar Atomization Mechanism in Spray-forming [J]. Powder Metallurgy Technology, 1999, 17(3): 163-168. (in Chinese)

[6] 麻洪秋,贾成厂,金成海,等. 急冷水雾化工艺对金属粉末性能的影响[J].粉末冶金技术,2002,20 (6):346-349.
MA Hongqiu, JIA Chengchang, JIN Chenghai, et al. Effects of rapid solidification water atomization process on properties of metal powder [J]. Powder Metallurgy Technology, 2002, 20(6): 346-349. (in Chinese)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net