

文章编号 1000-5013(2005)04-0393-04

等离子熔射 ZrO_2 粒子飞行状态

王怀松 方建成 赵紫玉

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要 在熔射过程中, 粉末粒子的温度、速度、空间分布等是影响沉积效率和熔射质量的直接因素. 文中以等离子熔射 ZrO_2 粉末为例, 利用 CCD 技术和双比色原理, 对粒子飞行特性进行在线检测. 采用正交实验方式, 研究氩气流量、氢气流量和工作电流对粉末粒子的温度、速度的影响规律. 结果表明, 氩气和氢气的流量分别是影响粒子速度、粒子温度的主要因素, 而电流变化对粒子温度、速度也有一定影响.

关键词 等离子熔射, 粒子, 在线检测, 飞行特性

中图分类号 TK 121; TG 664 **文献标识码** A

由于等离子熔射射流具有高温、高速和能量集中等特点, 可以短周期、低成本地快速制作高熔点金属或合金、陶瓷材料, 以及梯度功能材料零件和模具, 所以在材料快速成形领域有重大的发展潜力^[1]. 但等离子熔射过程复杂, 有很多因素会影响到最终的熔射层质量和性能. 这些因素中包括一些可以调节的因素, 如气体流量、电流大小、送粉率等, 也有一些是不可调节因素, 如喷嘴电极的磨损^[2]. 弄清各种不同的因素对熔射质量的影响, 进而对这些因素进行控制, 是获得高质量熔射层的有效途径. 粒子飞行特性是影响熔射质量的直接因素, 因此对粒子状态进行有效的控制是获得高质量熔射层的主要方法. 但是由于检测手段的限制, 大部分的研究都集中在寻找熔射质量与输入参数之间的关系, 以达到优化输入参数, 提高熔射质量的目的. 对于直接分析输入参数对粒子特性的影响, 以分析熔射质量对应关系的研究较少^[3~4]. 近年来, 随着检测技术的发展, 特别是 CCD 技术在等离子熔射中的应用, 使得熔射过程的在线检测和诊断成为可能. 本文以等离子熔射 ZrO_2 为研究对象, 根据双比色测温原理及利用 CCD 技术, 按照正交实验的方式, 对每组实验的过程进行在线检测. 同时, 文中还研究主要参数对粒子飞行特性的影响, 并分析粒子飞行特性对熔射质量的影响.

1 实验

1.1 实验方案

实验采用喷嘴口径为 6 mm, 额定功率为 60 kW 的内送粉等离子喷枪, 熔射粉末采用粒径为 38~74 μm 的 ZrO_2 粉末. 熔射工作主气体和辅助气体分别为氩气和氢气, 送粉气体为氮气, 实验装置如图 1 所示. 喷涂的粒子沉积在不锈钢基体上, 喷涂距离为 110 mm, 检测距离为 100 mm. 实验以输入的氩气和氢气流量及电流的大小作为研究参数, 分别取 3 个水平, 按照正交表 $L_9(3^3)$ 的方案进行, 如表 1 所示. 实验中, 送粉气流量保持 $8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 不变.

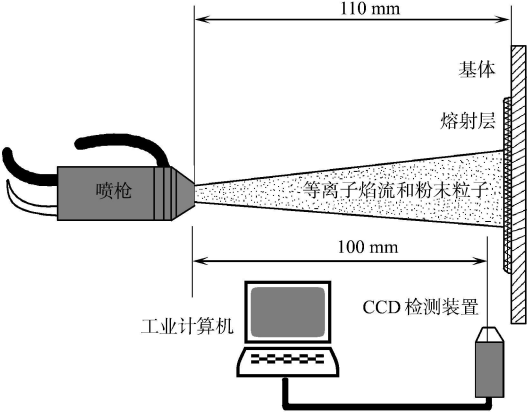


图 1 实验装置示意图

收稿日期 2005-05-11

作者简介 王怀松(1976), 男, 硕士研究生, 主要从事特种加工和表面工程的研究. E-mail: wshongoo01@163.com
基金项目 国家自然科学基金资助项目(50175035, 59805002); 福建省高新技术研究计划重点课题基金资助项目(2002H044)

表 1 正交实验表 $L_9(3^3)$

序号	氩气	氦气	电流	温度	速度	序号	氩气	氦气	电流	温度	速度	序号	氩气	氦气	电流	温度	速度
1	A_1	B_1	C_3	t_1	V_1	4	A_1	B_2	C_2	t_4	V_4	7	A_1	B_3	C_1	t_7	V_7
2	A_2	B_1	C_1	t_2	V_2	5	A_2	B_2	C_3	t_5	V_5	8	A_2	B_3	C_2	t_8	V_8
3	A_3	B_1	C_2	t_3	V_3	6	A_3	B_2	C_1	t_6	V_6	9	A_3	B_3	C_3	t_9	V_9

$A_1=30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}, A_2=45\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}, A_3=60\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}; B_1=6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}, B_2=9\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}, B_3=12\text{ L}\cdot\text{min}^{-1};$
 $C_1=300\text{ A}, C_2=340\text{ A}, C_3=380\text{ A}$

1.2 粒子飞行状态在线检测

熔射过程中, 粒子飞行特性是通过 CCD 技术和利用双比色原理实现在线检测的(图 1). CCD 单元是按照一定的空间排列成的 CCD 阵列. 每一个 CCD 单元相当于一个像素, 因此系统能够同时对焰流中的多个粒子进行检测. 通过软件可以进行实时分析, 输出粒子特性的空间分布, 包括粒子分布(n)、温度(t)和速度(V)等. 测量的输出结果, 如图 2 所示. 从粒子流量分布柱状图(Y 为径向位置)可以看出, 粒子

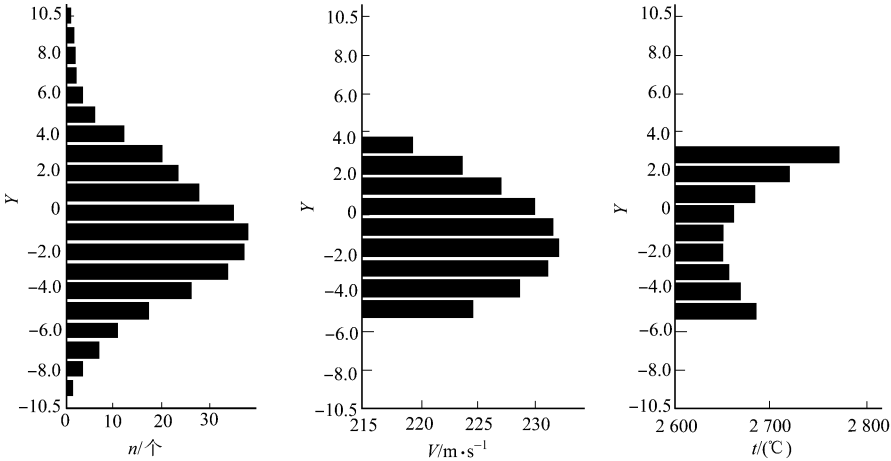


图 2 测量输出结果

流密度沿中心呈近似正态分布. 这是因为喷枪采用内送粉方式, 所以粉末粒子在等离子焰流中的分布呈现出中间部分密度较大, 四周密度较小的分布状态. 从粒子速度分布图和温度分布图可知, 粉末飞行速度高, 相应的温度低, 因为此时高速飞行的粒子与射流的相互作用的时间短, 获得的能量少, 这与数值模拟分析相同^[5].

2 结果与分析

2.1 正交实验结果

正交实验结果, 如表 2 所示. 表中 t 为测量温度, \bar{t} 为平均温度, V 为测量速度, \bar{V} 为平均速度.

表 2 实验结果和对应的平均值

序号	$t/(^{\circ}\text{C})$	$\bar{t}/(^{\circ}\text{C})$	$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\bar{V}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	序号	$t/(^{\circ}\text{C})$	$\bar{t}/(^{\circ}\text{C})$	$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\bar{V}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	2 696.0	2 702.0	225.0	225.0	6	2 682.0	2 711.0	259.0	248.3
2	2 662.0	2 691.0	233.0	244.0	7	2 708.0	2 684.0	226.0	239.3
3	2 645.0	2 677.3	256.0	261.0	8	2 720.0	2 689.0	251.0	243.7
4	2 702.0	2 667.7	224.0	238.0	9	2 705.0	2 697.0	268.0	247.3
5	2 691.0	2 691.7	249.0	244.0					

2.2 温度分析

图 3 中氩气流量(F_{Ar}) 的温度曲线呈下降趋势, 可见随着氩气流量的增大, 温度会有所下降. 因为氩气流量增大时, 一方面粒子在等离子焰流中获得较大的加速度, 使得粒子在等离子高温区停留时间缩短, 加热不充分. 另一方面, 氩气热焓值和热导率较低, 氩气流量提高时, 使得总体上粒子与等离子焰流进行热交换的效率变低. 因此, 增加氩气流量时, 粒子温度表现为下降的趋势. 图 3 中氢气流量(F_{H_2}) 曲线呈明显上升的趋势, 可见氢气流量的增大会使粒子温度显著上升. 这是因为氢气为双原子分子, 在电

离过程之前需要离解成原子, 电离电位较高, 热焓值较高, 而且氢气的比热容和热导率也较高. 当增大氩气流量时, 等离子喷枪的功率会迅速提高, 使得粒子在与等离子焰流进行热交换时可以获得较多的热量而达到较高的温度. 图 3 中电流(I) 曲线呈缓慢上升的趋势, 可见电流的增大会使得粒子温度有一定程度的上升. 因为电流增大时, 等离子熔射的功率会相应地提高, 从而使得等离子焰流的温度升高, 最终使得粒子在与等离子焰流进行热交换时, 获得较多的热量. 但功率增大的同时, 会使得粒子速度增大, 从而导致粒子加热时间缩短. 这两种因素的综合作用, 使得粒子温度上升并不显著.

2.3 速度分析

从图 4 的速度曲线图中可以看出, 3 条曲线都呈上升的趋势, 这说明 3 个因素的增大都会使粒子平均速度增大. 氩气流量曲线较为陡峭, 氩气流量、电流曲线则较为平缓, 说明氩气流量对速度影响最为明

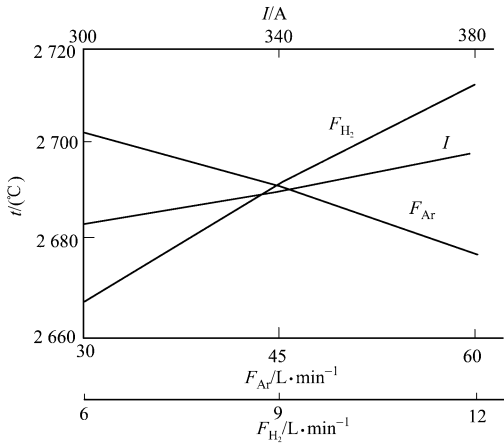


图 3 粒子温度曲线图

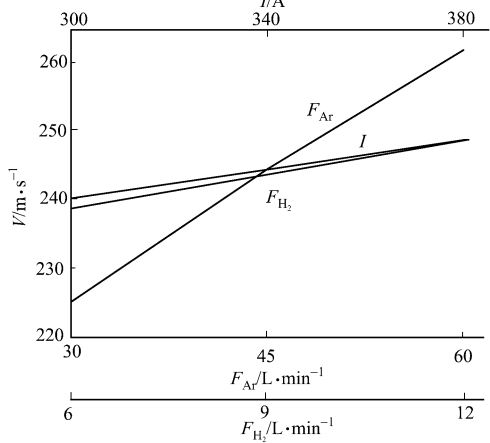


图 4 粒子速度曲线图

显. 当氩气流量从 $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 提高到 $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 粒子平均速度从 $225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到了 $261 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 提高幅度较大; 而氢气从 $6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 提高到 $12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 粒子平均速度从 $238 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $248 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度仅仅提高了 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 电流从 300 A 提高到 380 A 时, 粒子速度从 $243.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $247.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 上升幅度较小. 以上现象可以通过粒子与等离子焰流的动能交换过程加以解释. 即由于氩气分子量较大, 所形成的等离子焰流的动能也比较大. 当焰流与 ZrO_2 粉末粒子进行能量交换时, 粒子获得较大的动能, 宏观上表现为粒子在等离子焰流中获得较大的加速度. 氢气分子量仅仅为 2, 远远小于氩气分子量, 因此, 氢气在与粒子碰撞时使得粒子获得的动能远远小于氩气. 由于氢气热焓值较大, 增大氢气流量时, 焰流温度会大大提高. 这使得气体在喷枪内得到更大的热膨胀率, 从而使得等离子焰流整体速度有所提高, 因此氢气流量的增大也会使得粒子速度有一定程度的提高. 电流的提高对粒子的速度影响相对较小, 因为提高工作电流大小, 实际上提高了喷枪的功率. 这使得气体的电离度增大, 进而使得焰流速度相应地升高, 所以粒子的速度也会有所上升. 粒子的速度越大, 熔射层的结构就越致密, 孔隙率也越低, 同时熔射层与基体的结合强度也越大. 这是因为当粒子速度较大时, 粒子在沉积过程中有较大的冲击力, 获得内部结合力较大的致密熔射层. 但是较高的粒子速度也会导致粒子在等离子焰流中的热交换时间变短, 使得粒子熔融状态不好, 影响熔射层的质量. 部分固态粒子在与基体或者熔射层碰撞过程中会发生回弹, 降低粒子的沉积效率. 在实际应用中, 应该根据需要进行适当的输入参数, 以便在保证质量的前提下提高效率. 从以上分析可知, 影响粒子速度的主要因素是氩气流量, 氢气流量是影响粒子温度的主要因素, 而工作电流的大小则对温度和速度都有一定程度的影响. 对输入参数采用 $A_3B_1C_1$ 的组合进行追加实验, 测得粒子平均温度只有 2623°C , 低于表 1 中的任何一组, 这与分析结果相符; 而 $A_3B_3C_3$ 组合即如表 1 中第 9 组, 它的实验速度值 $V_9 = 268 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 是速度值最大的一组, 与上述分析结果相符.

2.4 粒子熔融状态分析

通过收集射流中飞行粒子, 可以研究粉末的熔融状态, 收集方法如图 5(a) 所示. 图 5(b) 为原始粉末放大图像, 基本上是不规则的棱角状; 图 5(c) 是输入参数按照 $A_3B_1C_1$ 的组合方式, 此时粒子平均温度

较低, 可以看到大部分粒子已经熔融成球状, 还有小部分未熔融或者部分熔融的呈不规则形状的颗粒. 图 5(d) 是表中第 8 组实验的结果, 此时粒子温度测量值达到 $2\,720\text{ }^{\circ}\text{C}$, 超过了 ZrO_2 的熔点. 从粒子放大图片中可以看到, 粒子基本上都熔融成球形或者椭球状的颗粒. 由此可见, 粒子熔融状态主要受粒子温

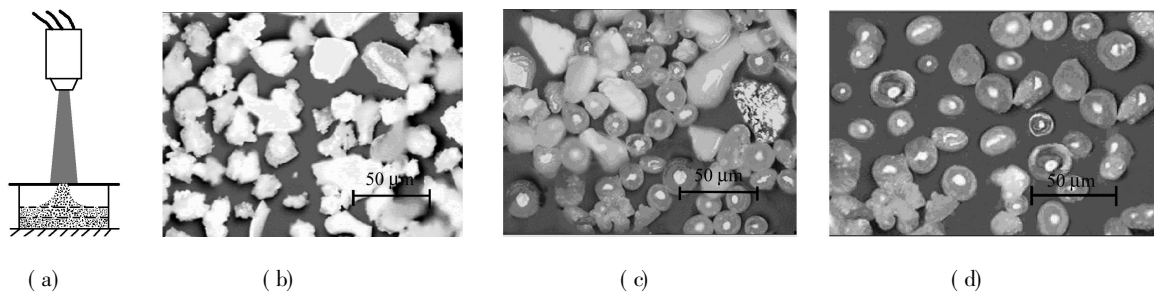


图 5 粒子收集装置和放大图片

度影响, 温度越高, 粒子熔融状态越好.

3 结束语

通过正交实验研究输入参数对粒子飞行特性的影响, 可以获得以下 4 点结论. (1) 影响粒子速度的主要因素是氩气的流量. 随着氩气流量的增大, 粒子速度显著提高, 而温度则有一定程度的下降. (2) 影响粒子温度的主要因素是氢气流量. 粒子温度随氢气流量的增大而升高, 同时速度也有所上升. (3) 电流的变化对粒子的温度和速度都有一定影响, 随着电流的增大, 粒子温度和速度都有一定程度的增大. (4) 粒子熔融状态主要受粒子温度的影响, 粒子温度越高, 熔融状态越好.

参 考 文 献

- 1 Fang J C, Xu W J. Plasma spray forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 288~ 293
- 2 Zhao L D, Klaus S. Study on atmospheric plasma spraying of Al_2O_3 using on-line particle monitoring[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 168: 186~ 190
- 3 Friis M, Persson C. Influence of particle in flight characteristics on the microstructure of atmospheric plasma sprayed yttria stabilized ZrO_2 [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 141: 115~ 127
- 4 Wang Z, Kulkarni A, Deshpande S. Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 5 319~ 5 334
- 5 Fang J C, Xu W J, Wang H S, et al. In flight behavior of ceramic particle in plasma spray forming[J]. Key Engineering Materials, 2004, (280 283): 1 807~ 1 810

Particle In-Flight State of Zirconia Powder during Plasma Spraying

Wang Huaisong Fang Jiancheng Zhao Zhiyu

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract On-line measurement and quality control of plasma spraying forming process is an important trend of recent study in that field. During spraying process, temperature and velocity and distribution of powder particles are factors directly influencing deposition efficiency and spraying quality. Taking plasma spraying of ZrO_2 powder as example, the authors carry out on-line measurement of particle in flight property by applying CCD technology and colorimetric principle; and study the regular influence of argon flow, hydrogen flow and operating current on temperature and velocity of powder particles. The study shows that, argon flow and hydrogen flow serve respectively as the main factor influencing particle velocity and particle temperature while the change of current exerts also a certain influence on temperature and velocity of particles. This achievement provides on-line control of spraying quality with a basis, which is beneficial to the development of plasma spraying forming technology.

Keywords plasma spraying, particle, on-line measurement, in flight properties