

文章编号: 1006 5013(2010)05-0483-04

低速大熔滴扁平化过程的温度变化

张素芝, 高燕青, 林新美, 赵紫玉

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为了便于研究喷涂过程中熔滴粒子的碰撞扁平行为, 根据雷诺数力学相似性准则, 采用低速大熔滴撞击基体来模拟粒子的碰撞扁平行为. 设计一个基于快速热电偶的温度采集装置, 分别对 Sn-Pb, Zn 和 Zn-Al 熔滴与基体碰撞扁平, 以及冷却凝固过程的温度变化进行检测与分析. 研究表明, 一定速度的熔滴粒子撞击基体后, 会以粒子轴为中心, 在基体表面向四周任意方向发生横向铺展流动. 其温度曲线是先急剧升高到峰值, 然后快速下降, 并且随着时间的增加, 下降速率开始慢慢减小; 由于 Zn-Al 熔滴的潜热值最大, 其冷却凝固的时间相对于 Sn-Pb, Zn 熔滴的冷却凝固时间更长.

关键词: 低速; 大熔滴; 扁平化; 温度

中图分类号: TG 664; TG 122

文献标识码: A

研究熔滴扁平沉积过程中的温度变化规律并加以控制, 可以有效改善涂层质量. 文[1-3]对喷涂熔滴的测量进行研究, 但有的是误差较大, 有的是测量系统复杂而昂贵或是系统调试困难. 文[4-7]采用模拟实验研究低速大熔滴测量、熔滴的扁平过程、熔滴扁平形貌和基体粗糙度对形貌的影响规律, 以及熔滴碰撞后的形态与基体的结合特性. 喷涂或熔射成形过程的熔滴粒子极其微小(直径为 10~120 μm), 且是高速(速度为 50~300 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 撞击基体, 其单个熔滴的扁平变形与冷却凝固一般发生在 10~20 μs 之内. 因此, 对熔滴扁平过程的温度变化的检测难以进行. 本文采用低速大熔滴撞击基体来模拟粒子的碰撞扁平行为, 同时, 利用快速热电偶检测与分析熔滴与基体碰撞后的温度变化.

1 实验部分

熔滴与基体碰撞扁平的实验装置图, 如图 1 所示. 金属材料在功率为 15 kW 的高频感应加热器中受热熔化后, 在自身的重力与 N_2 气的保护下形成熔滴并自由下落. 碰撞发生在室温 (25 $^{\circ}\text{C}$) 下光滑平坦的不锈钢基体表面, 进而发生扁平变形, 并最终在基体上凝固冷却.

装置中, 热电偶与不锈钢基体垂直装配在一起, 热电偶头与基体表面平齐并被放置在熔滴粒子自由下落的正下方处, 熔滴粒子与热电偶相接触的瞬间开始进行测温. 基体放置在升降台上, 通过调整高度来实现熔滴粒子与基体的不同碰撞速度. 熔滴粒子的下落、碰撞、扁平化和冷却过程, 都在 N_2 气氛保护下进行.

测温热电偶采用 E12 自更新型快速响应热电偶 (美国 Nanmac 公司), 探针外径尺寸 Φ 为 6.35 mm, 位于探针内部多功能传感器内的热电偶结材料是钨铼 5%-钨铼 26% (分度号: W5%Re-W26%Re). 该热电偶结定位精度为 ± 0.025 mm, 测温误差为 ± 1 $^{\circ}\text{C}$, 响应时间为 0~10 μs .

收稿日期: 2009 09 27

通信作者: 赵紫玉 (1968), 男, 副教授, 主要从事表面工程技术的研究. E-mail: zyzhao@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2009J01254); 福建省发改委小发明专项基金资助项目 (20061095); 华侨大学实验教学改革与建设项目 (20090120)

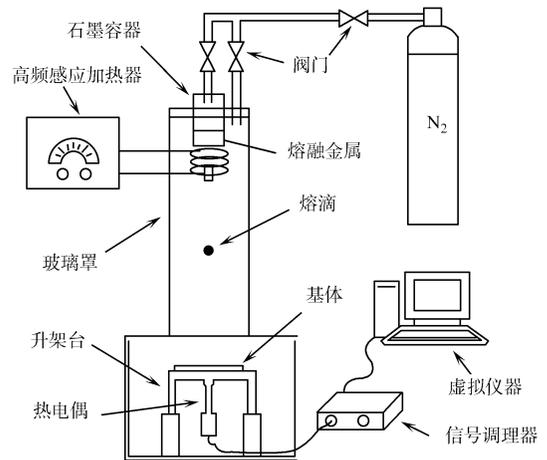


图 1 实验装置

Fig. 1 Device of experiment

采用 Sn-Pb (Sn 质量分数为 30%, Pb 质量分数为 70%), Zn 和 Zn-Al (Al 质量分数为 12.5% ~ 13.5%, 其余为 Zn) 材料作为研究对象. 熔滴材料的物性参数, 如表 1 所示. 表 1 中: 材料的热物理性均是指在其熔点时的值; ρ 为密度; θ_m 为熔点; C 为比热容; a 为热扩散率; H_f 为潜热.

表 1 熔滴材料的物性参数

Tab. 1 Physical parameters of droplets material

熔滴材料	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\theta_m / ^\circ\text{C}$	$C / \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	$a / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$H_f / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
Sn-Pb	9.73	190	161.8	0.145	34.2
Zn	6.62	420	502.0	0.289	111.4
Zn-Al	6.00	380	450.0	0.430	207.9

金属材料经过高频感应加热器与石墨容器后, 可生成直径为 3.60~5.29 mm 的熔滴. 当熔滴与基体及热电偶头碰撞扁平时, 其冷却凝固过程的温度变化通过热电偶、信号调理器和虚拟仪器瞬态温度采集系统进行实时采集与处理. 熔融的高温粒子与热电偶头直接接触, 多次实验后会降低热电偶的响应时间. 为了尽可能地保证熔滴粒子扁平冷却过程温度测量的准确性, 每次实验完要对热电偶头用氧化铝砂纸进行打磨. 通过测量热电偶结(包括补偿导线)的电阻, 可以确保其响应时间再次达到微秒级.

2 结果与讨论

2.1 Sn-Pb 熔滴扁平过程的温度变化

在碰撞速度为 $3.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 熔滴在不锈钢基体上扁平过程前 200 ms 的温度曲线, 如图 2 所示. 由图 2 可看出, 温度曲线是先急剧升高到峰值, 然后快速下降; 随着时间的增加, 下降速率慢慢减小, 最后趋近于室温. 在 3.865 ms 时, 熔滴的温度峰值为 $210 ^\circ\text{C}$, 要高于其熔点值 $190 ^\circ\text{C}$. 温度曲线在达到峰值后开始快速下降, 表明熔滴在扁平铺散过程的冷却凝固速度是非常快的.

文[8-9]的研究表明, 当直径约为 2 mm 的铅锡熔滴以 $1.6 \sim 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度碰撞在冷的 ($20 \sim 25 ^\circ\text{C}$) 平坦光滑的不锈钢基体表面时, 其扁平变形发生在 5~20 ms 内. 因此, 热电偶在 3.865 ms 时, 熔滴还处于扁平流动未完成状态.

Sn-Pb 材料属于二元共晶体(即在液态无限互溶, 在固态有限互溶), 其液相线与固相线分别是 $254.4, 187.8 ^\circ\text{C}$. 在 $210 ^\circ\text{C}$ 时, 熔滴的结晶组织为 $L + \alpha$ 相(L 相为液相, α 相是以 Pb 为熔剂, Sn 为熔质的有限固熔体). 此时, Sn-Pb 熔滴为不完全凝固状态. 随着熔滴粒子在基体表面进一步扁平, 与基体的接触面积进一步增大, 熔滴粒子与基体的热传导更加充分, 使得 Sn-Pb 熔滴的冷却速率变得非常高.

在 8.205 ms 时, 熔滴温度下降到 $187.82 ^\circ\text{C}$, 达到了 Sn-Pb 合金熔滴的固相线. 此时, Sn-Pb 熔滴已完全凝固, 说明熔滴的扁平变形运动(包括横向铺散流动, 反弹或飞溅等)已经结束. 当熔滴完全凝固后, 主要是已成形的扁平粒子与基体进行热传导, 并逐渐冷却到与基体温度相等. 从图 2 中可知, Sn-Pb 熔滴在 200 ms 时温度已经接近 $60 ^\circ\text{C}$.

2.2 Zn 熔滴扁平过程的温度变化

在碰撞速度为 $3.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, Zn 熔滴在不锈钢基体上扁平过程前 200 ms 的温度曲线, 如图 3 所示. 从图 3 中可知, 在 4.54 ms 时, Zn 熔滴粒子的温度峰值为 $441 ^\circ\text{C}$, 熔滴温度达到峰值后开始下降; 但是, 其下降曲线与 Sn-Pb 熔滴的下降曲线有所不同. Zn 熔滴粒子的冷却曲线在峰值后开始快速下降, 在下降到约 24.015 ms, 熔滴温度为 $356.2 ^\circ\text{C}$ 时, 冷却曲线开始出现一个平稳阶段. 这一平稳阶段持续到 42.15 ms, 温度为 $348.6 ^\circ\text{C}$, 而温度保持在平均 $352.4 ^\circ\text{C}$ 左右的持续时

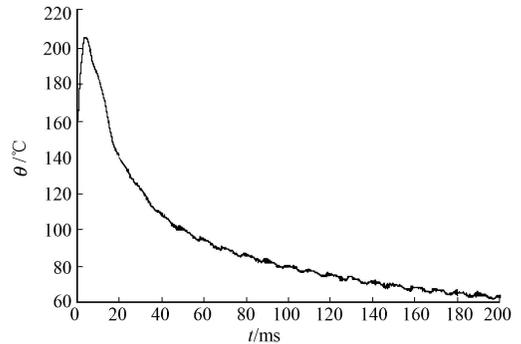


图 2 Sn-Pb 熔滴的温度曲线

Fig. 2 Temperature curve of Sn-Pb droplet

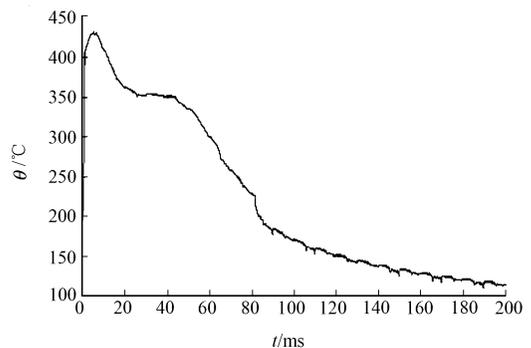


图 3 Zn 熔滴的温度曲线

Fig. 3 Temperature curve of Zn droplet

间约为 18.135 ms. 等平稳期结束后, 冷却曲线开始再次下降, 下降速度要比平稳阶段之前的速度慢一些; 随着时间的增加, 曲线的下降变得越来越平缓.

图 2 中曲线的平稳段属于 Zn 熔滴冷却过程中出现的固-液共存期. 在这段共存期中, 熔滴温度基本保持不变. 这是因为 Zn 材料在凝固过程中, 由于潜热的存在会释放热量, 而释放的热量被自身吸收后补偿了熔滴由于热传递而造成的温度下降. 在 Sn-Pb 熔滴的冷却曲线上没有观察到明显的平稳段, 主要是因为 Sn-Pb 熔滴的潜热很小(潜热值为 $34.2 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$), 而其冷却率又很大. 所以, 在图 2 的时间比例下, 并不能像 Zn 熔滴(潜热值为 $111.4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$)一样能观察到明显的温度平稳期.

在 42.15 ms 时, Zn 熔滴完全凝固, 其温度值 $348.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 比熔点 $420 \text{ }^\circ\text{C}$ 要低. 这是因为 Zn 熔滴在结晶过程中出现了“过冷现象”(液态金属实际结晶温度低于理论结晶温度的现象). 当 Zn 熔滴完全凝固时, 熔滴在基体表面的扁平变形运动结束, 主要是与基体进行热传导并缓慢冷却到室温. 所以, 此后的温度下降曲线会变得越来越平缓. Sn-Pb 熔滴完全凝固所用的时间 8.2 ms, 而 Zn 熔滴的完全凝固发生的时间很长. 这就使得在相同的碰撞速度条件下, Zn 熔滴粒子的扁平流动会更加充分, 最终的扁平形貌越复杂, 即越容易发生溅射.

2.3 Zn-Al 熔滴扁平过程的温度变化

当碰撞速度为 $3.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, Zn-Al 熔滴在不锈钢基体上扁平过程前 200 ms 的温度曲线, 如图 4 所示. Zn-Al 材料也是二元共晶体, 但在 $443 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 它有包晶反应(一个液相与一个固相互作用而生成另一个固相的恒温转变). 这使得 Zn-Al 熔滴的冷却凝固过程中, 其所发生的结晶反应要比 Sn-Pb 熔滴复杂的多. 从图 4 可知, Zn-Al 熔滴在不锈钢基体上的测温响应时间要比前面的 Sn-Pb 和 Zn 熔滴快. 在 2.61 ms 时, Zn-Al 熔滴的温度峰值为 $381 \text{ }^\circ\text{C}$.

与 Zn 熔滴的冷却曲线类似, Zn-Al 熔滴的冷却曲线也会出现一段明显的平稳期, 并且存在“过冷现象”. 平稳期从 10.008 ms 开始, 到 31.114 ms 结束, 持续时间约 21.106 ms, 温度平均保持在 $330 \text{ }^\circ\text{C}$. 由此可见, Zn-Al 熔滴的平稳期比 Zn 熔滴的平稳期(约 18.135 ms)要长一些. 说明, 前者在冷却凝固过程中出现的固-液共存期要比后者更长. 这主要是因为 Zn-Al 熔滴的潜热值($207.9 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$)比 Zn 熔滴的潜热值($111.4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$)大很多.

当熔滴粒子由液态向固态转变时, 对于 Zn-Al 熔滴来说, 由潜热释放的热量就会更多, 这就使得它的固液共存时间比 Zn 的要更长久, 扁平流动过程也更充分, 最终会导致其扁平粒子的边缘形貌变得更复杂.

2.4 熔滴扁平形貌的分析

熔滴粒子与基体碰撞后, 其扁平形貌可通过 CCD 照相获得. 对粒子扁平形貌分析是在图像二值化处理后进行的. 熔滴与基体碰撞前的速度是根据图 1 实验装置中石墨容器底端出口距离基体的高度确定的, 熔滴直径由扁平粒子的质量、密度及平均厚度来确定. 不同实验材料在不同碰撞速度(v)下的扁平形貌二值化图, 如表 2 所示. 表 2 中, 熔滴图形下方数据为粒子直径.

由表 2 可看出, 不同材料的金属熔滴以不同的速度正面碰撞在基体上, 其最终的扁平形貌是不同的. 熔滴的扁平化过程是以接触点开始, 以熔滴中轴线为基准, 在基体表面向四周任意方向铺散流动, 并最终凝固成形; 随着粒子碰撞前速度的增加, 扁平形貌发生飞溅的趋向愈大.

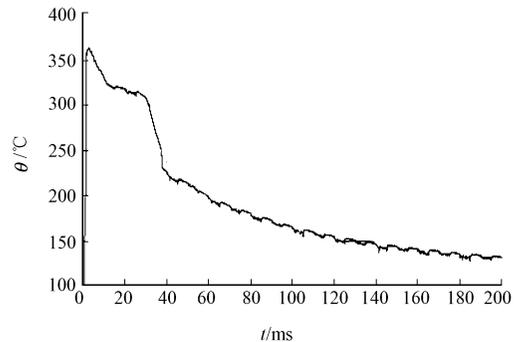


图 4 Zn-Al 熔滴的温度曲线
Fig. 4 Temperature curve of Zn-Al droplet

表 2 熔滴扁平形貌二值化图

Tab.2 Binarization diagram of droplet splat morphology

熔滴材料	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				
	2.42	2.80	3.28	3.70	4.20
Sn-Pb					
	5.20 mm	4.93 mm	5.29 mm	5.06 mm	5.15 mm
Zn					
	4.25 mm	3.96 mm	3.98 mm	4.13 mm	4.11 mm
Zn-Al					
	3.80 mm	3.75 mm	3.60 mm	3.93 mm	3.87 mm

3 结束语

高温、高速的微细粒子在极短的时间内扁平,而现有条件是很难获取熔滴粒子与基体的瞬时特性的实验数据.根据雷诺数力学相似性准则,采用低速大熔滴粒子的扁平化实验,可获取类似实际熔射过程的粒子扁平化实验数据,方案可行,成本低廉.熔滴扁平化过程的结果,为研究粒子动态生长特性及涂层结合机理提供了必要的实验依据.

参考文献:

- [1] GOUGEON P, MOREAU C. Simultaneous independent measurement of splat diameter and cooling time during impact on a substrate of plasma-sprayed molybdenum particles[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, 10(1): 76-82.
- [2] FAUCHAIS P. Understanding plasma-spraying[J]. *J Phys (D): Appl Phys*, 2004, 37(9): 86-108.
- [3] ESCURE C, VARDELLE M, VARDELLE A, et al. Visualization of the impact of drops on a substrate in plasma spraying: Deposition and splashing modes[C] // *Proc International Thermal Spray Conference Singapore*: [s. n.], 2001: 28-30.
- [4] FUKUMOTO M, NISHIYAMA T, NISHIOKA E. Effect of surface morphology of substrate on flattening behavior of freely fallen metal droplet[C] // *Proc Int Thermal Spray Conference. Essen*: [s. n.], 2002: 37-41.
- [5] AMADA S, OHYAGI T, HARUYAMA M. Evaluation of splat profile for droplet impingement[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 115(2/3): 184-192.
- [6] AMADA S, IMAGAWA K, AOKI S. Splat profile of impinging droplets on rough substrates: Influence of surface roughness[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 154(1): 27-33.
- [7] 皮涛, 李京龙, 李长久. 低速大熔滴模拟热喷涂熔滴扁平化过程的研究[J]. *甘肃工业大学学报*, 1998, 24(4): 14-18.
- [8] GHAFOUR-AZAI R, SHAKREI S, CHANDRA S, et al. Interactions between molten metal droplets impinging on a solid surface[J]. *International Journal of Heat and Mass Trans*, 2003, 46(8): 1395-1407.
- [9] GHAFOUR-AZAI R, YANG Z, CHANDRA S, et al. Impact of molten metal droplets on the tip of a pin projecting from a flat surface[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2005, 26(2): 334-347.

Temperature Variation During the Splatting Process with Low-Speed Big Droplet

ZHANG Su-zhi, GAO Yan-qing,
LIN Xin-mei, ZHAO Zi-yu

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

Abstract: In order to investigate the splatting process of thermal sprayed droplets, this paper adopts the low-speed big droplets impinging on the substrate to simulate collision and flattening process of particles, based on the rule of Reynolds number similarity criteria. A temperature acquisition device with fast thermocouple is designed for the detection and analysis of temperature variation in the splatting and solidification process with Sn-Pb, Zn and Zn-Al droplets. The results have shown that after the droplet is impinged on the substrate with a certain velocity, the droplet transversely flows and spreads in random direction centering on the particle axis; the temperature curve first rises to the peak and then declines rapidly, as time increases, the decline rate is slowly reduced; compared to Sn-Pb and Zn droplets, Zn-Al droplet has longer time in solidification and cooling because of the largest latent heat.

Keywords: low-speed; big droplet; splatting; temperature

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)