

多层喷射沉积规律^①

陈振华 黄培云 蒋向阳 杨伏良 周多三

(中南工业大学非平衡材料科学与工程研究所, 长沙 410083)

摘 要 对多层喷射沉积规律进行了研究。结果表明, 多层喷射沉积工艺的最佳沉积条件取决于喷射距离、基体和加热坩埚的运动速度、金属液体的过热温度以及气体与金属液体的质量比等工艺参数。多层喷射沉积工艺和传统的单次喷射沉积工艺相比, 易于实现最佳沉积条件。

关键词 多层喷射沉积 单次喷射沉积 最佳沉积条件 工艺参数

1 传统喷射沉积工艺的原理及过程分析

喷射沉积工艺的一般原理是: 熔融金属或合金在惰性气氛中雾化形成颗粒喷射流, 直接喷射在水冷的基体上, 经过撞击、聚结、凝固而形成沉积物^[1, 2]。雾化方式包括惰性气体雾化或在惰性气体保护下进行机械离心雾化。在喷射过程中, 通过与惰性气体的对流热交换和沉积后通过金属基体的热传导使沉积物凝固。喷射沉积实质上是一种雾化熔融金属颗粒同基体碰撞而中止飞行, 直接在基体上形成附着的沉积物, 而不是让雾化颗粒流飞行, 直接凝固成粉末的工艺。

喷射沉积是一个复杂的统计过程, 影响因素诸多。沉积坯的密度、结构及性能取决于液体的过热度、液流直径、喷射距离、雾化气体的压力和种类、基体材质的温度及冷却条件、基体的运动速度等一系列因素。Singe A^[3]认为可以采用喷射密度这个综合参数来描述喷射沉积。所谓喷射密度是指单位时间沉积在基体单位面积上的沉积物质量。如果使用低的喷射密度, 到达基体表面的熔滴稀少, 则每个颗粒在下次喷射到达之前就溅射凝固, 这样虽然沉积物的冷速较大, 但由于沉积坯多孔, 溅射

边界清楚。一般来说, 这种沉积物是不希望得到的。采用高密度喷射时, 则在前一批溅射物完全凝固之前, 也就是说在先前沉积物的顶部尚保持一层液体金属薄层, 下一批溅射物已到该处, 两个液面相遇对流、扩散混杂, 消除了孔隙和溅射边界, 得到高致密的沉积物。这种高喷射密度沉积虽然冷速较小, 但其孔隙度低, 后续热加工没有内氧化危险, 并能得到无或很少溅射边界的胞状组织。高密度喷射沉积的沉积速度很大, 如果通过气体对流和辐射带走的热量不充分, 则在沉积层顶部形成厚的液体层, 整个工艺恶化成为一般的铸造过程, 产生宏观偏析、晶粒粗化和热缩孔等缺陷。为了建立精确的喷射沉积理论模型, Lawley A 等人^[4]指出, 为了获得最佳的喷射沉积条件, 喷射沉积必须维持理想的液相体积分数, 而且液相体积分数主要取决于金属液体的过热温度、气体与金属液体的质量比和喷射距离。

根据上述分析, 传统的喷射沉积工艺在制备直径大的管坯、厚壁的筒坯、宽和厚的板坯时, 最佳喷射条件往往受到一定的限制。其主要原因是: 喷射密度过高, 通过气体对流和辐射带走的热量是有限的, 采用喷射沉积制备大型的物件, 容易恶化成铸件结构。另外在喷射沉积长和宽均很大的板材时, 传统的工艺均采用 V 型喷嘴、摇动扫描喷嘴或多个喷嘴, 使得

① 国家“八·五”攻关项目, 国家教委博士点基金资助项目, 湖南省自然科学基金项目 收稿日期: 1995-06-14

工艺过程变得非常复杂。

传统的喷射沉积工艺存在着沉积物冷凝速度较低($10 \sim 10^2$ K/s), 沉积坯尺寸精度不高和制备大型坯件困难等缺点。

2 多层喷射沉积规律的研究

2.1 金属液粒喷射沉积的轨迹

多层喷射沉积由于加热坩埚和基体都运动, 金属液粒喷射沉积的轨迹较为复杂。若讨论其复合运动的轨迹, 必须作近似处理。首先考虑单层问题, 喷射沉积在制备管坯时, 加热坩埚沿着基体的圆柱面母线作近似的匀速直线运动, 同时该母线又绕圆柱面轴线作匀速转动, 因此金属液粒喷射沉积的轨迹为圆柱螺旋线。当母线旋转一周, 动点在母线上移动的一段距离称为导程, 坩埚移动速度和基体转动速度决定导程大小。在制取板坯时, 加热坩埚沿着基体的两平行边作往复运动, 基体向前可看作近似的匀速直线运动, 因此金属液粒喷射沉积的轨迹为正弦曲线。坩埚移动速度和基体移动速度决定正弦曲线的周期。以上两种工艺的金属液粒喷射沉积的轨迹如附图所示。再考虑多层问题, 喷射管坯时加热坩埚往复运动, 喷射板坯时基体往复运动, 调整其相位就可获得多层沉积坯。多层沉积坯的单层厚度取决于加热坩埚的运动速度和基体的运动速度。实际上, 按照沉积物的运动轨迹图得知, 多层沉积坯的单层并不是通过加热坩埚(或基体)一次运动而成, 而是多次运动结果, 且结构非常复

杂。

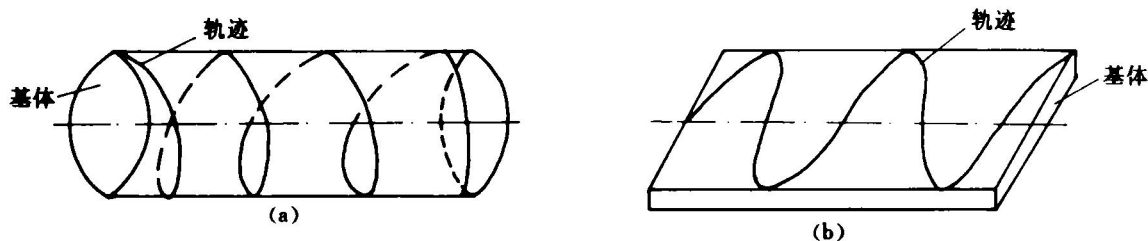
2.2 沉积层在基体上的粘附条件

多层喷射沉积和传统的单次喷射沉积相比, 沉积层在基体上的粘附状态有所不同。多次实验结果表明, 基体材质和基底表面温度是影响沉积层在基体上的粘附与脱落的主要因素。单次喷射沉积由于单位时间沉积在基体单位面积上的沉积物质量大, 即喷射密度大, 基体温升高, 沉积物易于粘附在基体上。多层喷射沉积由于单位面积上的沉积物质量小, 基体温升高, 沉积物不易粘附在基体上。为了防止沉积物的脱落往往要对基体进行预热。附表为实验得到的 Al、Cu、Al-33%Cu 和 Al-10%Fe 沉积层与基体粘附-脱落的基体材质和表面温度条件^[5]。

2.3 多层喷射沉积的最佳沉积条件

根据喷射沉积工艺原理和过程分析得知, 为了获得最佳的喷射沉积条件, 对于传统的单次喷射沉积来说, 喷射沉积必须维持理想的液相百分数, 而液相体积分数主要取决于金属液体的过热温度、气体与金属液体的质量比和喷射距离。在多层喷射沉积情况下, 由喷射工艺所决定, 最佳沉积条件较为复杂。其最佳沉积条件可进行如下分析:

(1) 在多层喷射沉积过程中, 后一层沉积物到达前一层沉积物的时间间隔比较长, 前一层沉积物比较容易凝固。因此, 为了消除喷射边界, 获得高的沉积物密度, 希望后一层喷射物液相量较高。除维持一定的金属液体过热温度外, 多层喷射沉积工艺的主要特征是喷射距



附图 多层喷射沉积过程中金属液粒的沉积轨迹

(a)—喷管; (b)—喷板

附表 沉积层粘附-脱落的基体材质和温度条件

沉积材料	基底 温度/℃	基 底 材 质				
		铝	铜	普通钢	不锈钢	铸铁
Al	100			×		✓
	150			✓	×	
	200	×	×		✓	
	250	✓	✓			
Cu	150	×				×
	200	✓				✓
	300				×	
	350			×	✓	
	400		×	✓		
	450		✓			
Al-33%Cu	220	×				×
	250	✓	×	×	×	✓
	300		✓	✓	✓	
Al-10%Fe	350				×	×
	400	×			✓	✓
	450	✓	×	×		
	500		✓	✓		

注：“✓”表示粘附，“×”表示脱落。

离非常短，气体与金属液体的质量比较小。

(2) 在多层喷射沉积过程中，若希望后一层喷射沉积物到达之前，前一层沉积物未完全凝固，则可在制取管坯时加快坩埚的往复速度，在制取板坯时加快基体往复速度。

(3) 在多层喷射沉积过程中，当需要制造长管和大板时，可使用多个往复移动的坩埚和喷嘴，使得最佳沉积条件与单个坩埚和喷嘴的最佳沉积条件一样。

综上所述，多层喷射沉积最佳沉积条件取决于喷射距离、基体和加热坩埚的运动速度、金属液体的过热温度、气体与金属液体的质量比等工艺参数。

2.4 强制外冷的作用

多层喷射沉积由于沉积物是一层接一层沉积而成，因而可以采用液氮和惰性气体对每层沉积物进行强制外冷。在喷射沉积大型工件时，气体对流和辐射带走的热量是有限的，强制外冷是有效的带走热量方法。另外强制外冷能调整最佳沉积条件，真正起到喷射沉积和快速冷凝的双重效果。特别是制造需要后续热加

工的坯件，多层喷射沉积坯更具有优异特性。

3 两种喷射沉积工艺的比较

多层喷射沉积工艺与传统的单次沉积工艺相比较有如下优越性：

(1) 在喷射沉积大型坯件时，易于实现最佳沉积条件。

(2) 沉积物冷凝速度较高。

(3) 在喷射板、管坯件时，工艺较为简单，沉积物精度较高。

目前采用多层喷射沉积工艺已经制得了理论密度为96%，尺寸为 $d\ 270\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ ，壁厚为70 mm，质量为30 kg的Al合金锭坯。从实验情况来看，制造更大的锭坯应无工艺问题。充分表明了多层喷射沉积制造大型坯件的优越性，多层喷射沉积工艺和设备目前已申报了国家发明专利^[6]。

4 结论

(1) 多层喷射沉积工艺的最佳沉积条件取决于喷射距离、基体和加热坩埚的运动速度、金属液体的过热温度、气体与金属液体的质量比等工艺参数。

(2) 多层喷射沉积工艺和传统的单次喷射沉积工艺相比，易于实现最佳沉积条件。

参考文献

- 1 Singer A. Powder Metall, 1982, 25(4): 195.
- 2 Singer A *et al.* Met Tech, 1983, 10: 61.
- 3 Singer A. The Int J of P/M and P/T, 1985, 3: 21.
- 4 Lawley A *et al.* Spray Forming: Sci, Tech and Appli, 1992 P/M World Congress, U S A.
- 5 蒋 宏, 陈振华. 中南矿冶学院学报, 1991, 增刊1: 95.
- 6 陈振华等. CN95110862X, 1995.

(编辑 彭超群)