

## 往复式喷射沉积管坯制备中喷射高度的闭环控制

马万太<sup>1</sup>, 王晓勇<sup>1</sup>, 张豪<sup>2</sup>, 张捷<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;  
2. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030;  
3. 张家港华通喷射成形有限公司, 张家港 215625)

**摘要:** 分析了往复式喷射沉积制备大壁厚管坯的工艺原理, 研究了喷嘴喷射高度在线检测及闭环控制方法及技术。喷射高度控制系统包括漏包提升执行机构、沉积层厚度在线测量、基于 PLC 的喷嘴高度控制。提升执行机构采用伺服电机驱动的丝杠螺母机构, 针对沉积层间断增长的特点, 采用间断提升控制方式; 研究了沉积层厚度在线测量方法, 分析了收集基底形状误差对测量及控制精度的影响并提出多点测量方案。理论分析表明, 采用三点测量法可消减基底形状误差的影响。对不同内径及壁厚的管坯进行了喷射实验, 喷射高度累积误差低于 5%, 较好地满足了大壁厚管坯制备对稳定的喷射高度的要求。

**关键词:** 管坯; 闭环控制; 往复式喷射沉积; 喷射高度; 沉积层厚度; 在线测量

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

## Closed loop control of spray height in tubular preparation with reciprocating spray deposition process

MA Wan-tai<sup>1</sup>, WANG Xiao-yong<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Astronautics & Aeronautics,  
Nanjing 210016, China;  
2. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University,  
Shanghai 200030, China;  
3. Zhangjiagang Huatong Spray Forming Co. Ltd., Zhangjiagang 215625, China)

**Abstract:** The process principle of reciprocating spray deposition for large thick-wall tubular was analyzed. A new accurate technology of online measurement and closed-loop control for spray height of the nozzle was studied. The control system of spray height consists of executive mechanism of tundish lift, online measurement of deposit layer thickness and control of nozzle height based on PLC. A set of lead-screw mechanism driven by servomotor was applied in the executive mechanism. Aiming at the characteristic of deposit layer growth, the tundish was lifted discontinuously. The measurement method of deposit layer thickness was studied. The influences of shape errors of mandrel on measurement and control accuracy were analyzed and a multi-points measurement technology was presented. Theoretical analysis indicates that the three-point measure along one circle is essential to clear up the influences of the shape errors. Several spray experimentations of the tubular with different inner diameter and wall thickness were carried out. The results indicate that the accumulative error of spray height is less than 5%. This measurement and control technology can well satisfy the need on steady spray height in preparation of large thick-wall tubular.

**Key words:** tubular; closed loop control; reciprocating spray deposition; spray height; deposit layer thickness; online measurement

喷射沉积技术是继铸造和粉末冶金技术之后发展起来的一种先进材料制备技术, 属于快速凝固近终形材料制备技术。喷射沉积坯件具有成分均匀、组织细化、致密度高、含氧量低、偏析程度小等特征, 在钢铁、铝合金、镁合金、铜合金、硅铝合金等领域有着广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

喷射沉积工艺的凝固过程以毫秒计, 远低于铸造工艺, 与快速凝固粉末冶金工艺相当。在瞬间内完成合金组织致密和产品成形对喷射沉积凝固过程的工艺控制提出了很高的要求。分析和实验结果表明<sup>[3-5]</sup>, 致密的合金组织所对应的过程工艺参数只有很窄的变化范围, 其中, 雾化锥沉积前固液相含量是关键的过程工艺参数之一。在雾化气压力、喷嘴直径、漏包(坩埚)液位高度、雾化器结构等工艺条件保持不变的情况下, 控制喷射高度稳定是提高粘结效率、坯件致密度、收得率以及性能的重要保证<sup>[6]</sup>。

现有的管坯喷射沉积工艺中, 对喷射高度控制的研究未深入展开。随着沉积层不断增长, 喷嘴喷射高度不断降低, 液相含量越来越高, 造成了在管坯在直径方向上的组织不均匀, 甚至会造成外层组织的铸态化, 尤其在制备大壁厚管坯时。文献[7-8]提出了喷射高度控制的简略方法, 针对坩埚移动式多层喷射沉积装置<sup>[9]</sup>, 收集基底按设定的速度匀速下降, 从而实现喷射高度的开环控制。该方法的问题表现在: 1) 该开环控制方式未能对喷射高度进行实时检测, 基底下降速度与沉积层实际生长速度难以匹配, 会造成较大的喷射高度的累积误差; 2) 沉积层生长速度受金属液流率、基底直径、基底旋转速度、雾化器移动速度的影响, 因而难以确定不同工艺条件下的基底下降速度; 3) 理论和实验表明<sup>[10-11]</sup>, 沉积层生长速度与基底直径有关, 基底直径越小, 生长速度越大, 反之亦然, 沉积层生长速度在整个喷射过程中呈现逐渐降低的趋势, 因此, 以基底匀速下降难以保证喷射高度的稳定。

针对基底往复式喷射沉积管坯制备装置和工艺特点<sup>[12-13]</sup>, 综合运用数据采集技术、数据处理技术、控制技术以及精密运动执行机构相关技术, 本文作者研究了喷射高度实时闭环控制方法和关键技术, 以提高喷射高度控制精度, 本研究已成功应用于国内首条自行研制喷射沉积铝合金管坯制备工业化生产设备中。

## 1 基底往复式喷射沉积工作原理

基底往复式喷射沉积技术和装置工作原理如图1

所示。其工作原理为: 通过由中间包1和2及相应的传动机构3、4和7构成的移液装置将金属熔体连续、稳定地注入到漏包6中, 在此过程中, 中间包受控交替倾倒, 并控制漏包液面稳定; 漏包中的金属熔体通过漏嘴进入雾化器, 被高压氮气雾化成锥状喷射流; 雾化器水平方向固定, 垂直方向根据在线测量的沉积层厚度增长量受控提升以控制喷嘴喷射高度; 收集基底8作匀速旋转运动及往复运动, 雾化锥沉积在收集基底上, 经过雾化锥的多次往复沉积, 最终成形管坯。为控制沉积室的氧含量, 沉积室保持微正压环境, 使大气中的氧被隔离在沉积室之外, 通过PID控制算法在线调节排气管中电控蝶阀12的开口量使沉积室内压力保持在设定状态。收集基底往复运动机构为变频电机驱动的丝杠螺母结构, 往复运动通过设置左接近开关13、右接近开关14控制往复变频电机11的正反转来实现。通过调整左右接近开关的位置可方便地生产出任意长度的管坯; 采用不同外径规格的收集基底可生产不同内径的管坯。

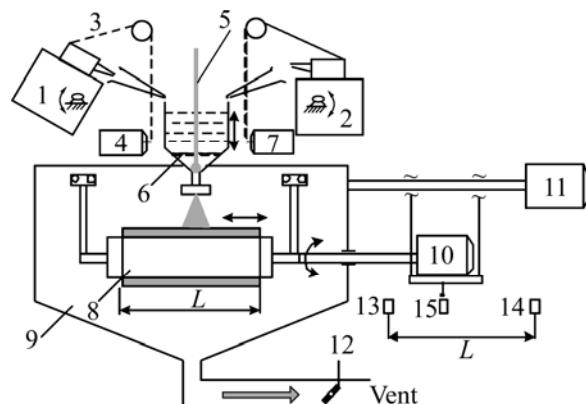


图1 基底往复式喷射沉积工艺原理

**Fig.1** Process principle of reciprocating spray deposition: 1, 2 Left and right ladles; 3 Transmission chain; 4, 7 Transduce motor; 5 Stop rod; 6 Tundish; 8 Mandrel; 9 Deposit chamber; 10 Rotating transduce motor; 11 Reciprocating transduce motor; 12 Dishing valve; 13, 14 Left and right approaching switch; 15 Trigger approaching switch

相比坩埚移动式喷射沉积工艺, 基底往复式喷射沉积工艺有效地解决了连续自动移液不便、机构复杂、沉积室气密性不好、运动控制复杂等缺陷, 可满足工业化生产对设备的连续性、安全性、可调性、可维护性等方面要求, 并实现对喷射工艺的自动控制。基底往复式喷射沉积工艺更适合制备大尺寸、大壁厚、不同内径规格的管坯。

## 2 喷射高度闭环控制

### 2.1 喷射高度控制结构

喷嘴喷射高度是往复式喷射沉积关键工艺参数之一，直接影响雾化锥在沉积处的固液相含量。由于喷射高度难以直接测量，本研究对喷射高度的检测和控制采用间接方法，其主要策略为当沉积层厚度增长时实时提升喷嘴位置(漏包位置)，从而控制喷射高度维持在初始的设定高度，控制结构如图2所示。管坯喷射沉积工艺中，基底沉积层增长为间断增长方式，即：基底往复运动一次，基底沉积层厚度增长两次。显然，沉积层增长量即为喷射高度减小量，也是控制漏嘴位置提升量。

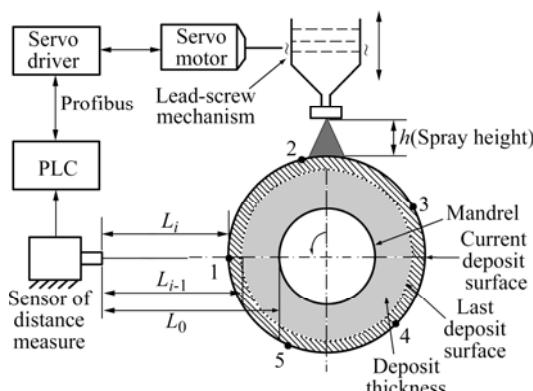


图2 喷嘴喷射高度控制系统结构

Fig.2 Architecture of control system of spray height

喷射高度检测及控制系统包括3部分：漏包提升执行机构、沉积层厚度在线测量、基于PLC(可编程控制器)的喷嘴高度控制。

### 2.2 沉积层厚度在线测量

#### 2.2.1 沉积层增长量测量

沉积层厚度在线检测是喷射高度控制中关键反馈环节。但沉积层厚度难以直接测量，控制方案中通过测量基底沉积面径向距离来间接获得沉积层厚度。距离测量采用非接触式激光测距传感器，适合恶劣工矿下的距离测量，测量精度可达0.1 mm。

如图2所示，设辊子基底至测距传感器的距离为 $L_0$ (测距传感器固定安装， $L_0$ 为初始固定值)，且设某时刻沉积面至测距传感器的距离为 $L_i$ ，则当前沉积层厚度 $\Delta R_i = L_0 - L_i$ ；设上一往复沉积面至测距传感器的距离为 $L_{i-1}$ ，则上一往复沉积层厚度 $\Delta R_{i-1} = L_0 - L_{i-1}$ ；显

然，两次往复运动间测量的沉积层增长量 $T_i$ 可表示为(距离 $L_0$ 、 $L_i$ 、 $L_{i-1}$ 均为测距传感器测量值)

$$T_i = \Delta R_i - \Delta R_{i-1} = L_{i-1} - L_i \quad (1)$$

#### 2.2.2 基底误差引起的沉积层厚度测量误差分析和解决方案

喷射沉积过程中，沉积层厚度始终间断增长，即两次往复运动间的沉积层增长量大于0，因此，理想状态下，测量值始终有 $L_{i-1} > L_i$ ，且 $T_{i-1} > 0$ 。但由于收集基底制造安装过程中产生的圆度误差、圆柱度误差、径向跳动误差(理想回转中心与实际回转中心不重合)等误差形式，造成基底轴向和圆周上各点至测距传感器的距离不同。在测量过程中，由于测量点的随机性不能保证每次测量点重合，因而会出现 $L_{i-1} < L_i$ 、 $T_{i-1} < 0$ 的情况，该测量为无效测量，将使实际喷射高度不断变小，产生较大的喷射高度累积误差。

图3所示为两种典型的基底形状误差产生的无效测量。图3(a)所示为基底存在径向跳动误差时对沉积层测量的影响，其中， $O$ 为理想基底回转中心， $O'$ 为实际回转中心， $\overline{OO'}$ 为径向跳动量，当上一往复测量点为A点、且当前测量点为B点时，由于 $\overline{OO'} > T_{i-1}$ ，产生 $L_{i-1} < L_i$ ；图3(b)所示为基底存在圆柱度误差(如基底为一圆锥)时对沉积层测量的影响，当上一往复测量点与当前测量点处于不同的轴向位置时同样会造成 $L_{i-1} < L_i$ 。因此，研究沉积层检测技术和数据处理技术是喷射高度控制关键。

根据往复式喷射沉积工艺沉积层间断增长的特点，激光测距传感器采用触发测量模式。为消除轴向形状误差对沉积层测量的影响，保证每次测量均处同一轴向位置，设置了测距触发开关(图1中15为触发接近开关)，当基底单向运动到该位置时触发激光测距传感器进行测量。

为消除径向误差的影响，应在基底旋转一周的圆周上均匀地测量尽量多的点以提高测量精度，并对其作加权平均作为沉积表面至测距传感器的距离 $L_i$ ，但测量点的数目和传感器采样周期以及基底的转速有着密切联系，测量间隔时间必须小于采样周期，同时，测量点数的增加会增加数据处理量。因此，需要对测量点数作理论上的分析和优化。本研究理论分析表明，在径向跳动小于15 mm时，采用三点测量法可满足测量精度的要求。

### 2.3 漏包提升控制

PLC是喷射沉积设备常用的控制器<sup>[14-15]</sup>，作为喷射高度控制系统的核心，接收激光测距传感器采集的

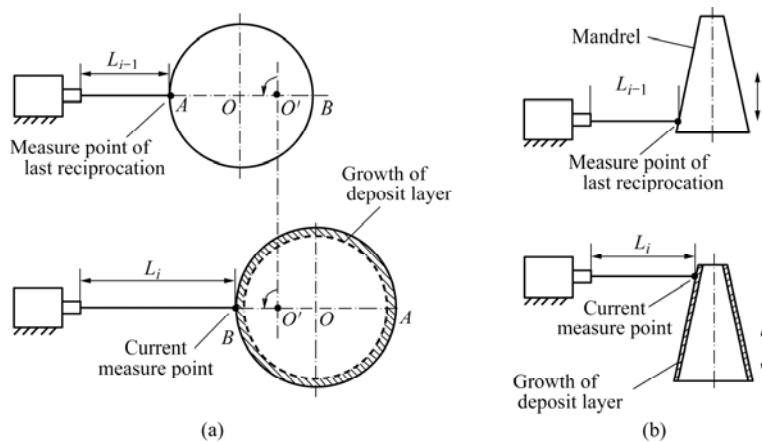


图3 基底误差产生的无效测量范例

**Fig.3** Examples of failure measurement caused by mandrel shape errors: (a) Runout in mandrel:  $L_{i-1} < L_i$ ; (b) Column in mandrel:  $L_{i-1} < L_i$ ;

上一往复以及当前沉积层3点测量数据, 对其进行处理得到沉积层增长量, 控制伺服控制器及执行机构对漏包进行提升, 提升量为沉积层增长量。

针对沉积层间断增长的特点, 采用间断提升方式, 当基底往复运动到右接近开关(图1中的14)处, PLC发出提升指令, 该控制方式保证基底每次往复过程中喷嘴喷射高度一致, 使管坯的外形尺寸得到较好的控制和保证。

#### 2.4 漏包提升执行机构

漏包提升执行机构的运动精度也是保证喷射高度精度不可忽视的因素, 漏包提升执行机构由丝杠螺母、伺服电机、伺服驱动器以及相应的限位开关、原点开关传感器等组成。伺服电机由于内部增加了反馈环节, 具有较高的旋转精度, 此外, 伺服电机的两个重要特性非常适应于喷射高度控制工艺特点。

1) 位置控制功能。伺服电机可实现精确的位置控制, 控制精度达0.01 mm, 该特性能间断提升方式要求, 而采用普通变频电机很难获得如此高的控制精度, 且控制复杂, 采用步进电机亦可实现位置控制, 但由于其输出扭矩较小, 难以用于漏包提升。

2) 定位功能。伺服电机具有自寻原点功能, 原点位置以原点开关传感器信号确定, 表示喷嘴的初始喷射高度位置, 因此, 仅调整原点传感器位置而不需修改控制程序即可满足不同内径管坯的生产要求。

### 3 三点测量法测量误差理论分析

当基底存在径向跳动时, 单点测量法将会产生较

大的测量误差, 影响喷射高度控制精度。采用多点测量可以减小测量误差。测量点数确定的基本原则是: 在满足测距传感器采样周期和测量误差要求条件下, 尽量减少测量点数以减少数据处理量。

#### 3.1 测量点数约束

多点测量中, 测量点在基底旋转一周中, 各点等时间间隔均匀分布在基底圆周上。理论上, 测量点数越多, 测量误差越小, 但测量点数受到传感器采样周期的限制, 测量点之间的间隔时间与传感器采样周期必须满足:

$$\frac{60}{\omega n} > T_s \quad (2)$$

式中  $\omega$  为基底转速;  $n$  为测量点数;  $T_s$  为测距传感器采样周期。

本实验中, 基底转速为90 r/min, 激光测距仪采样周期为100 ms, 则测量点数须小于6。

#### 3.2 多点测量误差分析

基底旋转中, 基底圆度误差和径向跳动等误差均会使沉积层表面各点至测距传感器的距离产生变化, 多点测量误差分析目的是为了分析多个测量点至测距传感器距离的平均值在圆周上不同分布位置时的最大和最小值, 最大最小之差即为测量误差。

为简化分析, 进行了以下几点假设: 1) 假设基底为理想圆柱, 各截面不存在圆度误差; 2) 存在径向跳动, 跳动量为  $\rho$ ; 3) 测距传感器光点通过实际回转中心。

图4所示为测距触发开关处基底截面几何形状及测量点分布,  $R$ 为基底半径,  $O$ 为理想回转中心,  $O'$ 为实际回转中心,  $\rho$ 为径向跳动量, 为 $OO'$ 之间距离。 $P_j(j=1, 2, \dots, n)$ 为测量点位置, 测量点数为 $n$ ,  $\theta_j$ 为测量点 $P_j$ 与 $X$ 轴夹角,  $\theta_1$ 与第一测量点 $P_1$ 存在以下关系:

$$\theta_j = \theta_1 + 2\pi/n \quad (3)$$

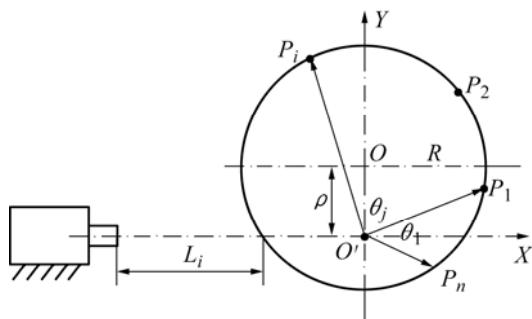


图4 基底沉积层测量点几何分布

Fig.4 Distribution of measured points of deposit layer

由于测距传感器至实际回转中心 $O'$ 的距离为固定值, 因此, 沉积层至测距传感器距离的测量误差即为 $O'$ 至测量点 $P_j$ 距离平均值的测量误差。在坐标系 $XO'Y$ 中, 点 $P_j$ 位置可表示为:

$$(\overline{O'P_j} \cos \theta_j)^2 + (\overline{O'P_j} \sin \theta_j - \rho)^2 = R^2 \quad (4)$$

解式(4)可得:

$$\overline{O'P_j} = \rho \sin \theta_j \pm \sqrt{R^2 - \rho^2 \cos \theta_j^2} \quad (5)$$

$\overline{O'P_j}$ 为正值, 因此, 回转中心至测量点间的距离

$\overline{O'P_j}$ 为:

$$\overline{O'P_j} = \rho \sin \theta_j + \sqrt{R^2 - \rho^2 \cos \theta_j^2} \quad (6)$$

结合式(3)和(6), 在第一测量点 $P_1$ 位置确定下,  $n$ 个测量点至 $O'$ 的距离平均值 $R_a(\theta_1)$ 为:

$$R_a(\theta_1) = \sum_{j=1}^{j=n} \overline{O'P_j} / n = \sum_{j=1}^{j=n} [(\rho \sin(\theta_1 + 2\pi/n)) + \sqrt{(\rho \sin(\theta_1 + 2\pi/n))^2 + (R^2 - \rho^2 \cos(\theta_1 + 2\pi/n))^2}] / n \quad (7)$$

式中  $0 \leq \theta_1 \leq 2\pi$ ,  $R_a(\theta_1)$ 是关于 $\theta_1$ 的函数;  $\theta_1$ 变化时, 总存在 $R_a(\theta_1)$ 的最大值和最小值, 其差值即为多点测量误差 $e_m$ :

$$e_m = R_{a, \max} - R_{a, \min} \quad (8)$$

表1 所列为取不同测量点数时根据式(7)和(8)计算得到的相应测量误差。

表1 不同测量点数下的测量误差

Table 1 Measurement errors at different number of measured points<sup>1)</sup>

$n$	$R_{a, \max}/\text{mm}$	$R_{a, \min}/\text{mm}$	$e_m/\text{mm}$
1	315.00	285.00	30.00
2	300.00	299.62	0.38
3	299.81	299.81	0.00
4	299.81	299.81	0.00

1)  $R=300 \text{ mm}$ ;  $\rho=15 \text{ mm}$

表1计算结果表明, 当测量点数大于3时, 多点测量误差接近于0。因此, 采用三点测量法可消减径向跳动对沉积层测量精度的影响。

## 4 生产验证

提出的喷射高度控制方案在国内首套自行研制的往复式喷射沉积管坯制备设备中得以实施和成功应用。以 $d=200 \text{ mm}$ 的收集基底为实验对象, 导液管直径4 mm, 初始喷射高度280 mm, 经过160次往复喷射沉积后, 管坯壁厚为300 mm, 喷射高度为270 mm, 喷射高度控制累积误差10 mm, 沉积管坯照片如图5所示, 管坯具有均匀的圆柱形状。对 $d=100 \text{ mm}$ 、 $d=200 \text{ mm}$ 和 $d=400 \text{ mm}$ 3个内径规格系列的管坯进行了实验, 喷射高度累积误差均低于5%, 表明本研究提出的喷射高度控制方案及相关技术具有较高的控制精度, 完全满足管坯制备对喷射高度控制的要求。

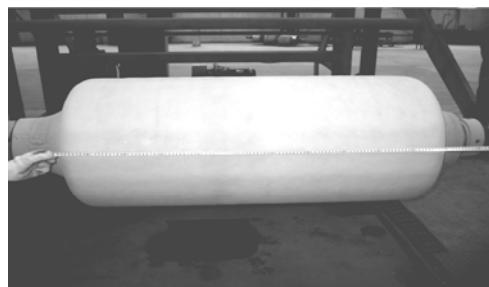


图5 沉积管坯实物照片

Fig.5 Photo of deposited tubular

## 5 结论

1) 基底往复式多层喷射沉积工艺适宜工业化生

产大规格、大壁厚管坯, 尺寸精度高。

2) 喷射高度是影响雾化锥固液相含量的重要工艺参数, 研究喷射高度在线检测、闭环控制具有重要意义。

3) 喷射高度的精确控制涉及到提升执行机构、控制系统以及在线检测等相关技术。

4) 多点测量误差分析表明, 采用三点测量法可消减基底径向跳动误差对沉积层厚度测量的影响。

5) 提出的喷射高度控制方案控制精度高, 较好地满足了大厚管坯制备对稳定的喷射高度的要求。

## REFERENCES

- [1] Lawley A, Leatham A G. Spray forming commercial products: principles and practice[J]. Material Science Forum, 1999, 299/300(6): 407–415.
- [2] 张永安, 刘红伟, 朱宝宏, 熊柏青, 石力开, 张济山, 陈美英. 新型 60Si40Al 合金封装材料的喷射成形制[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 23–27.  
ZHANG Yong-an, LIU Hong-wei, ZHU Bao-hong, XIONG Bai-qing, SHI Li-kai, ZHANG Jin-shen, CHEN Mei-ying. Novel 60Si40Al alloy packaging material by spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 23–27.
- [3] Pryds N H, Hattel J H, Pedersen T B, Thorborg J. An integrated numerical model of the spray forming process[J]. Acta Materialia, 2002, 50(2): 4075–4091.
- [4] Singha A K, Sivaramakrishnan C S, Panigrahi S C. Effect of processing parameters on physical properties of spray formed and stir cast Al-2Mg-TiO<sub>2</sub> composites[J]. Mater Sci Eng A, 2005, A393(10): 196–203.
- [5] 熊柏青, 朱宝宏, 张永安, 韦强, 石力开, 孙玉峰, 沈宁副. 喷射成形 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的制备工艺和性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 250–254.  
XIONG Bai-qing, ZHU Bao-hong, ZHANG Yong, WEI Qiang, SHI Li-kai, SUN Yu-feng, SHEN Ning-fu. Technique and property of heat resisting Al-Fe-V-Si alloys prepared by spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 250–254.
- [6] 陈振华, 严红革, 陈刚, 张福全, 胡仲勋, 傅杰新. 多层喷射沉积的装置和原理[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2001, 28(5): 20–28.  
CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, CHEN Gang, ZHANG Fu-quan, HU Zhong-xun, FU Jie-xin. Principle and setups of multi-layer spray deposition technology[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2001, 28(5): 20–28.
- [7] 曲迎东, 崔成松, 陈善本, 李庆春. 智能控制技术在喷射成形工艺中的应用[J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(2): 113–115.
- [8] 袁武华. 多层喷射沉积制备大尺寸耐热铝合金管坯的研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 2001: 5.  
YUAN Wu-hua. Study on Multi layer Spray Deposited Large Heat-resistant Al Alloy Pipe Blank[D]. Changsha: Central South University of Technology, 2001: 5.
- [9] 陈振华, 陈鼎, 康智涛. 坩埚移动式喷射共沉积制取铝基复合材料的技术[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(6): 23–30.  
CHEN Zhen-hua, CHEN Ding, KANG Zhi-tao. Preparation technology of Aluminum alloy matrix composites by spray co-deposition with moving crucible[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2002, 29(6): 23–30.
- [10] Cui C S, Fritsching U, Alwin S, Li Q C. Mathematical modeling of spray forming process of tubular performs Part 1. Shape evolution[J]. Acta Materialia, 2005, 53(4): 2765–2774.
- [11] Cui C S, Fritsching U, Alwin S, Li Q C. Mathematical modeling of spray forming process of tubular performs(Part 2)—Heat transfer[J]. Acta Materialia, 2005, 53(4): 2775–2784.
- [12] 张豪. 控制往复喷射成形装置[P]. 中国专利 03230878.7, 2004.5.  
ZHANG Hao. Setup of Controlled Reciprocating Spray Forming[P]. CN03230878.7, 2004. 5.
- [13] 张豪, 张荻, 张捷, 宋立. 控制往复喷射成形工艺[P]. 中国专利 03117066.8, 2004.2.  
ZHANG Hao, ZHANG Di, ZHANG Jie, SONG Li. Process of Controlled Reciprocating Spray Forming[P]. CN 03117066. 8, 2004. 2.
- [14] 康智涛, 陈振华, 严红革, 周多兰, 黄培云. 多层喷射沉积工艺中可编程调节器的应用[J]. 粉末冶金技术, 2000, 18(2): 98–101.  
KANG Zhi-tao, CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, ZHOU Duo-lan, HUANG Pei-yun. Application of programmable controller in multi-layer spray deposition[J]. Powder Metallurgy Technology, 2000, 18(2): 98–101.
- [15] 傅定发, 袁武华, 康智涛, 陈振华. 可编程控制器在多层喷射沉积制备管坯工艺中的应用[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(2): 160–162.  
FU Ding-fa, YUAN Wu-hua, KANG Zhi-tao, CHEN Zhen-hua. Application of programming logical controller in pipe-buildup by multi-layer spray deposition[J]. Journal of Central South University of Technology, 2000, 31(2): 160–162.

(编辑 龙怀中)