

3D 形状模型辅助喷射成形工艺的优化^①

张智慧 李 周 张国庆 米国发 刘仲武 田世藩

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要 喷射成形工艺能够以较少的工序生产整体致密、成分均匀、晶粒细化、力学性能优良的坯件, 但控制喷射成形过程的独立工艺参数却较多, 给工艺优化带来困难。结合所建立的 3D 形状模型, 针对两种不同运动方式的沉积器, 探讨了喷射熔滴质量流率沿雾化锥的轴向及径向的空间分布, 研究了雾化压力、沉积距离、沉积器下降速度、偏心距及倾斜角对高温合金沉积坯形状及致密度的影响。研究表明, 通过计算机辅助优化工艺参数后, 可以获得所需形状的、致密的沉积坯。

关键词 喷射成形 高温合金 质量流率分布 形状模型

中图法分类号 TG249.7

喷射成形(Spray Forming), 或称喷射雾化沉积(Spray Atomization & Deposition), 是从 70 年代开始发展起来的一种新的材料成形技术, 其原理是: 金属(合金)熔化浇注后, 在流过雾化喷嘴时被其出口处的高速惰性气流雾化为按一定方向分布的细小的固态、半固态或液态熔滴射流, 随后直接沉积到放置于喷嘴下方的沉积器上; 通过设置沉积器的初始位置和运动方式(沉积器 1 旋转的同时垂直向下运动, 沉积器 2 则沿旋转轴方向倾斜向下运动), 可获得接近零件最终形状的沉积坯, 如图 1 所示。同时用喷射成形技术制备的沉积坯, 具有快速凝固的组织特征, 晶粒及显微组织细化, 成分均匀, 热加工及力学性能显著改善^[1]。但和其它存在着液体凝固的工艺一样, 喷射沉积的坯件内部, 也容易形成疏松, 尤其是使用 Ar 作雾化气体时, 疏松更容易出现^[2, 3]。一般认为, 沉积坯中疏松的形成, 主要是由坯件表面沉积层液相率大小所决定的^[4-6]。改变雾化锥熔滴颗粒质量及尺寸分布, 改变沉积坯生长速率和生长过程, 将沉积层液相率控制在适当的范围内, 可以使沉积坯达到整体致密。

本文从雾化沉积的实际应用出发, 对熔滴

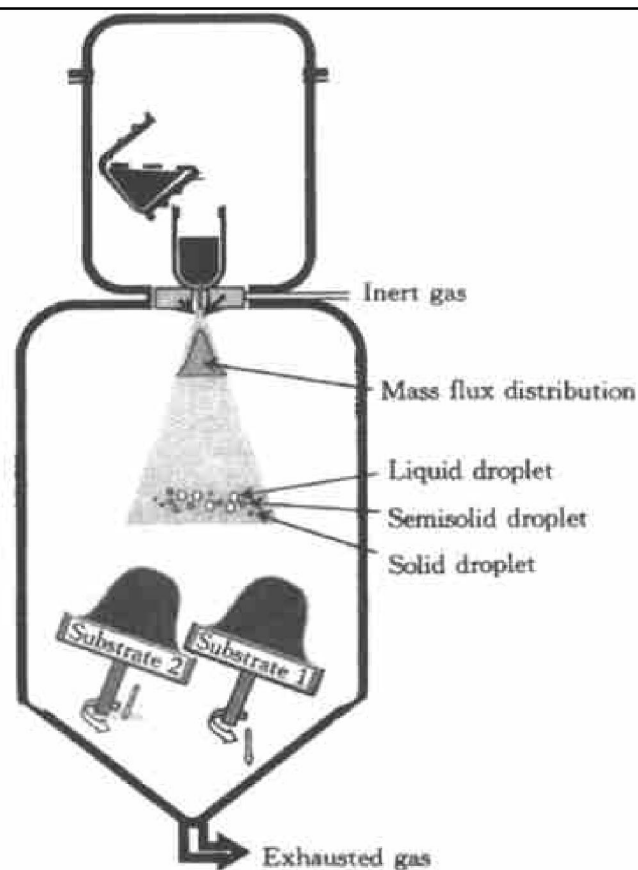


图 1 喷射成形原理示意图

Fig. 1 Schematic of spray forming process

颗粒质量流率分布沿雾化锥的径向和轴向的变化规律以及柱状沉积坯的生长过程进行了研究, 探讨了主要工艺参数和高温合金沉积坯的

形状及致密度之间的关系。

1 实验方法

试验在北京航空材料研究院自行研制的喷射雾化沉积炉上进行。合金材料为一种典型的高合金化镍基高温合金, 母合金由 100 kW 真空中频感应炉重熔, 液体金属浇注的过热度为 $(120 \pm 10)^\circ\text{C}$, 雾化气体使用高纯 Ar, 雾化压力 1.5~2.5 MPa。试验过程是先将沉积器拆去, 对距喷嘴某一高度的平面上的熔滴射流的质量流率进行了测定, 然后分别安装沉积器 1 和沉积器 2, 进行柱状坯的成形及优化试验, 试验装置如图 1 所示。

质量流率的测量装置如图 2 所示。测量位置距喷嘴的高度为 1 130 mm, 收集管排列于雾化锥底圆的某一直径线上, 对于本试验中使用的限制型喷嘴, 由于雾化锥半锥角较小(约 10°), 因此为了安装方便, 这里将收集管竖直放置。

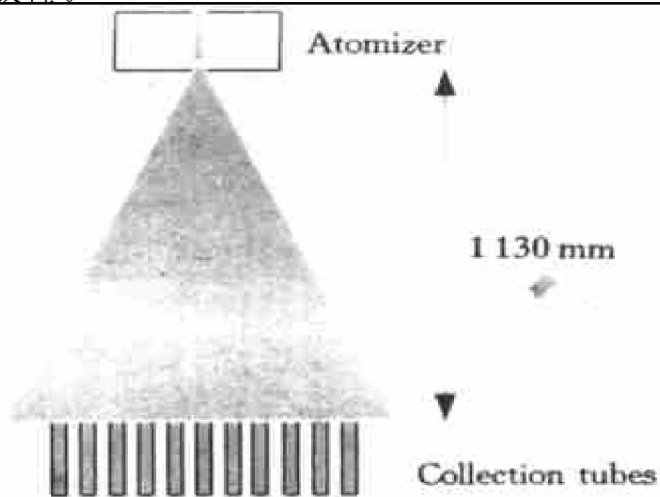


图2 质量流率测量装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental collection system for measurement of radial variation of mass flux

2 数学模型

2.1 质量流率空间分布模型

在距喷嘴某一高度 h_0 的平面内, 熔滴颗粒质量流率的径向分布一般认为是按正态函数分布的^[7], 即

$$MFD(r) = a_0 \cdot e^{-\left(\frac{r}{b_0}\right)^n} \quad (1)$$

式中 a_0 表示在测量高度 h_0 雾化锥中心点的质量流率, $\text{mm}^3/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$; b_0 表示在测量高度 h_0 雾化锥分布宽度的特征值, mm; n 为形状因子。

假设熔滴射流的迹线为直线, 则熔滴射流在一定空间范围内构成一雾化锥, 雾化锥中金属熔滴射流应满足连续性方程(质量守恒)。如果距喷嘴高度为 h_0 时雾化锥中心点的质量流率用 a_0 表示, 则高度为 h 时雾化锥中心点的质量流率 a 可表示为:

$$a = a_0 \cdot \left(\frac{h_0}{h}\right)^2 \quad (2)$$

在雾化锥包围的空间内, 对高度分别为 h_0 和 h 的两个平面上运用连续性方程有:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty a_0 \cdot e^{-\left(\frac{r}{b_0}\right)^n} \cdot r dr \\ = \int_0^\infty a \cdot e^{-\left(\frac{r}{b}\right)^n} \cdot r dr = I \end{aligned}$$

上式中当 $n = 1.0$ 或 $n = 2.0$ 时可直接积分, 但形状因子常取 $n = 1.0 \sim 2.0$ 之间的数值, 当 n 不为整数时需用数值积分进行计算。通过试算发现当 $n = 1.0 \sim 2.5$ 时, $I/\pi a b^2$ 为 n 的单值函数, 如图 3 所示, 即表明当 $n = 1.0 \sim 2.5$ 时下式成立:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right) = \left(\frac{b_0}{b}\right)^2 \quad (3)$$

综上所述, 通过实验确定了参数 a_0 , b_0 , h_0 后, 由式(1)~(3), 熔滴颗粒质量流率的空间分布可表示为:

$$MFD(r, h) = a_0 \cdot \left(\frac{h_0}{h}\right)^2 \cdot e^{-\left(\frac{h_0}{h} \cdot \frac{r}{b_0}\right)^n} \quad (4)$$

2.2 喷射沉积形状模型

实际的雾化沉积过程, 如图 1 所示, 喷嘴是固定的, 沉积器倾斜 ϕ 角并按一定的方式运动。为了方便, 取沉积器圆心 O 为原点, 并假设喷嘴向上运动, 建立坐标系如图 4 所示(以 Substrate 1 为例)。从图中可看出, 熔滴颗粒在

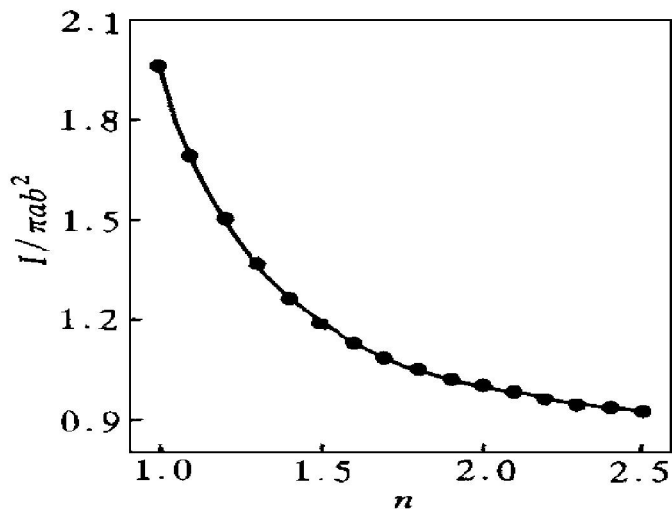
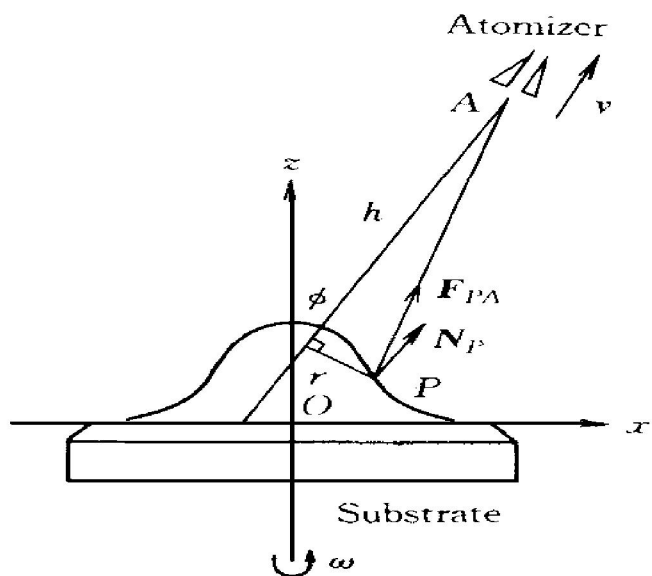
图3 $I/\pi ab^2$ 和形状因子 n 间的关系Fig. 3 Relationship between $I/\pi ab^2$ and n 

图4 喷射成形柱状坯形状模型示意图

Fig. 4 Schematic of shape modeling of columnar blank geometry

沉积表面沉积, 实际上是按某一变化着的空间曲面进行的, 即熔滴颗粒沉积到沉积表面, 使得该曲面形状不断变化, 为了计算通过该曲面的质量流量, 这时应将质量流率描述为一个向量 MFD , 且该向量的大小由式(4)计算, 方向为喷嘴 A 至点 P 方向。取 PA 方向为正方向, 设向量 F_{PA} 为正方向单位向量, 则单位时间内通过 P 点 dA 微元面积内质量为:

$$MFD dA = -a_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 e^{-\left(\frac{h_0}{h} \cdot \frac{r}{b_0} \right)^n} F_{PA} dA$$

设沉积表面点 P 位置的单位法向量用 N_P

表示, 由于熔滴沉积方向和坯件生长方向正好相反, 则点 P 处沉积坯的法向生长速率 G_n 可表示为(假设熔滴颗粒全部沉积):

$$G_n(r, h) = a_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 e^{-\left(\frac{h_0}{h} \cdot \frac{r}{b_0} \right)^n} \cdot N_P \cdot F_{PA} \quad (5)$$

雾化锥中的熔滴颗粒喷射到沉积坯表面时, 部分熔滴颗粒因从沉积坯表面反弹等原因没有沉积到坯件上, 一般用有效粘附系数 SE (sticking efficiency) 来表示其影响, 为了计算简单, 可取近似取 SE 为常数^[8,9]。

在雾化沉积的过程中, 还会由于沉积器的倾斜及沉积坯的长大, 沉积坯上的某些区域将无法被熔滴流喷射到, 这时该区域的生长速率为 0, 可用投影系数 p_j 来表示:

$$p_j = \begin{cases} 1 & \text{if } N_P \cdot F_{PA} > 0 \\ 0 & \text{if } N_P \cdot F_{PA} \leq 0 \end{cases}$$

则沉积过程中在 Δt 时间内沉积坯上某点 P 的法向生长高度 ΔG_n 为:

$$\Delta G_n = \int_t^{t+\Delta t} p_j \cdot SE \cdot G_n dt \quad (6)$$

3 计算模拟结果及实验结果

3.1 熔滴颗粒质量流率分布的实验测量结果

距喷嘴高度为 1130 mm 的平面内熔滴颗粒质量流率分布的实验测量结果如图 5 所示。实验结果表明; 对于所采用的紧密耦合限制型喷嘴及合金而言, 对不同的雾化压力, 质量流率分布函数的形状因子 n 是相同的, 雾化压力主要是影响雾化锥中心点的最大质量流率, 而对流率分布宽度的影响不是很大。

3.2 沉积坯计算模拟结果

运用上述 3D 形状模型, 对沉积器 1 和沉积器 2 在不同位置及运动参数下柱状沉积坯生长过程进行模拟结果如图 6 和图 7 所示。

(1) 沉积器偏心距及倾角

沉积器的偏心距及倾角是控制沉积坯的直径及高度的两个主要的工艺参数; 在偏心 and 倾角较小时, 沉积坯直径较小、高度较大; 偏心

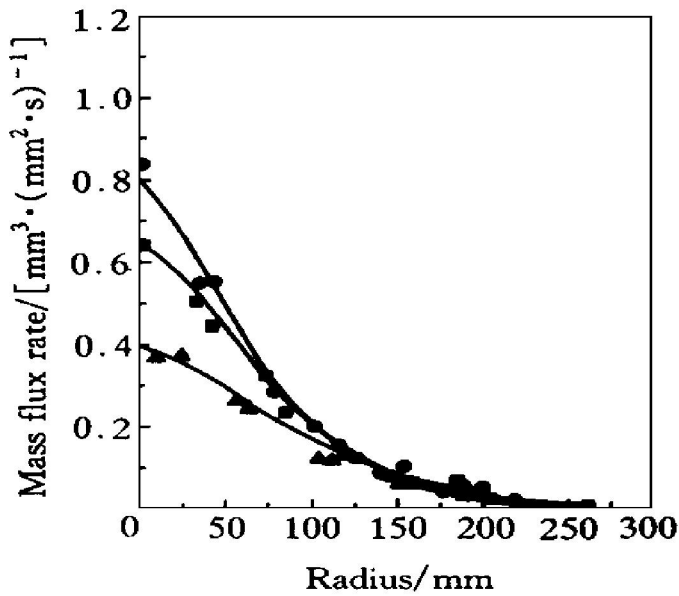


图5 质量流率分布

Fig. 5 Radial variation of mass flux

- ▲ —1.5 MPa $MFD = 0.40e^{-(R/111.4)^{1.5}}$
 ■ —2.0 MPa $MFD = 0.65e^{-(R/93.8)^{1.5}}$
 ● —2.5 MPa $MFD = 0.80e^{-(R/81.9)^{1.5}}$

和倾角较大时, 沉积坯直径较大、高度较小, 也就是说, 增加偏心距及倾角, 沉积坯形状变化趋势是相同的, 如图 6(a), (b), (c), (d) 所示。在其它参数相同时, 沉积器运动方式对沉积坯形状也有较显著的影响, 沉积器 2 的运动方式更容易形成柱状沉积坯, 如图 6(e), (f) 所示。

(2) 沉积距离

沉积距离直接影响熔滴射流的冷却过程, 而坯件表面沉积层的液相率是决定沉积坯质量的关键因素, 因而沉积距离的选择主要是为了控制熔滴射流到达沉积表面时的液相率, 从形状控制的角度来看, 增加沉积距离, 由于熔滴质量流率分布变得平坦, 所以沉积坯顶部下凹的倾向减小, 如图 7(a), (b) 所示。

(3) 沉积器下降速度

沉积器下降速度对沉积器 1 和沉积器 2 的影响不同; 沉积器 1 的偏心距在沉积过程中保

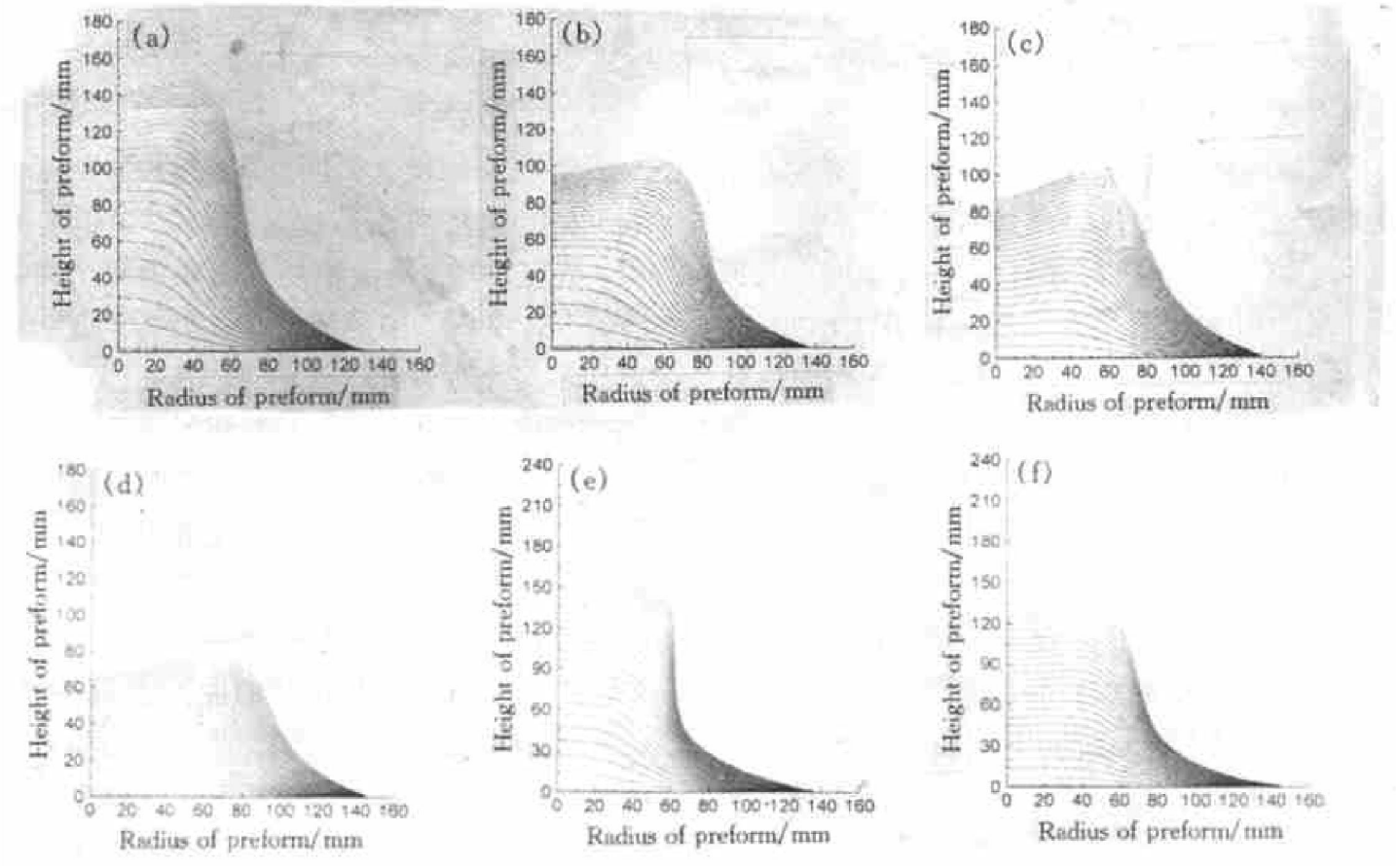
图6 偏心距和倾角对沉积坯形状的影响($P = 2.0 \text{ MPa}$, $t = 120 \text{ s}$)

Fig. 6 Effects of bias and tilt angle on shape of deposited preform

- (a) —Substrate 1, $x_e = 20 \text{ mm}$, $\phi = 15^\circ$; (b) —Substrate 1, $x_e = 20 \text{ mm}$, $\phi = 30^\circ$; (c) —Substrate 1, $x_e = 40 \text{ mm}$, $\phi = 15^\circ$;
 (d) —Substrate 1, $x_e = 40 \text{ mm}$, $\phi = 30^\circ$; (e) —Substrate 2, $x_e = 20 \text{ mm}$, $\phi = 30^\circ$; (f) —Substrate 2, $x_e = 40 \text{ mm}$, $\phi = 30^\circ$

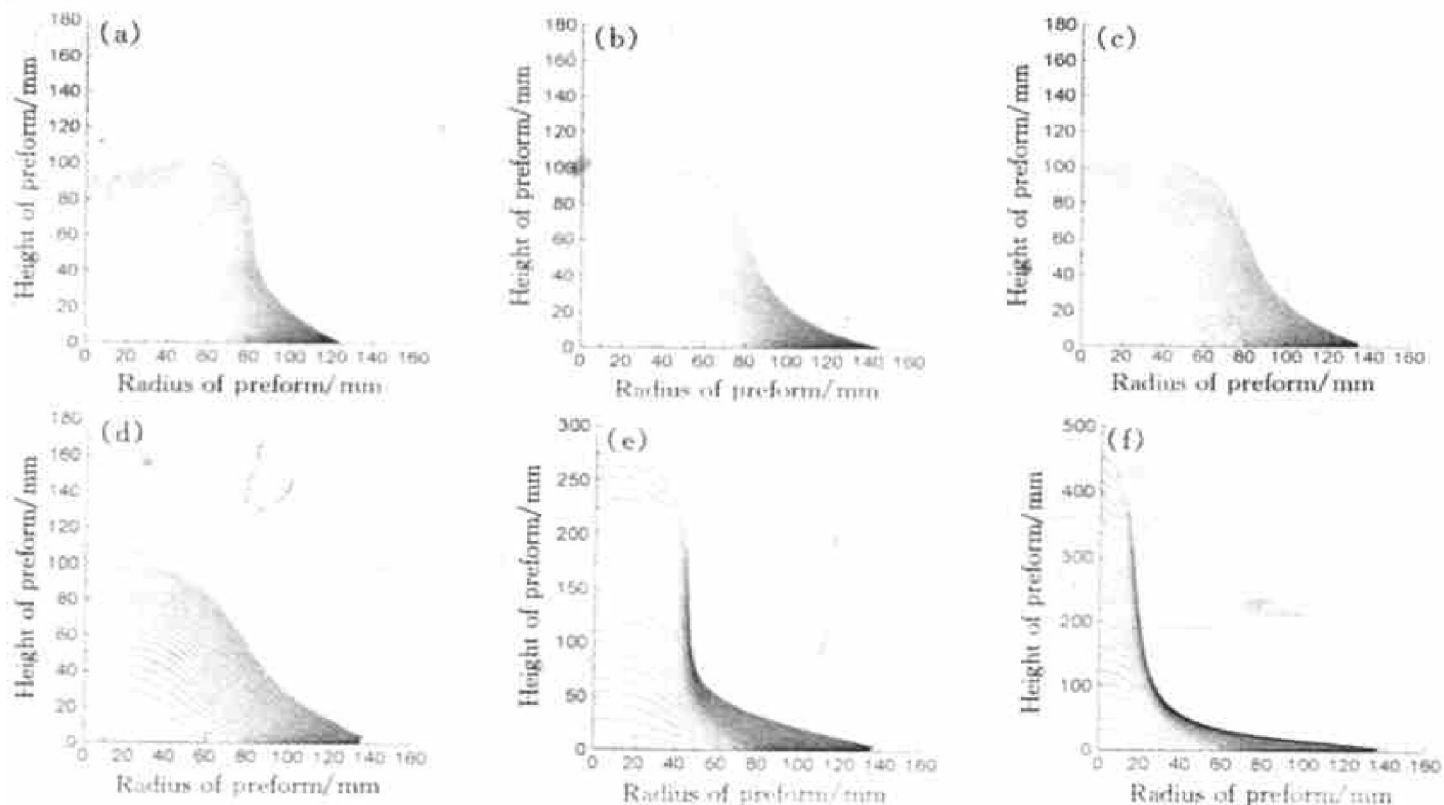


图 7 沉积距离及下降速度对柱状坯形状的影响($P = 2.0 \text{ MPa}$, $t = 120 \text{ sec}$)

Fig. 7 Effects of deposition distance and withdrawing speed on shape of columnar preform geometry

(a) —Substrate 1, $h = 340 \text{ mm}$; (b) —Substrate 1, $h = 420 \text{ mm}$; (c) —Substrate 1, $v = 2.0 \text{ mm/s}$;
(d) —Substrate 1, $v = 4.0 \text{ mm/s}$; (e) —Substrate 2, $v = 2.0 \text{ mm/s}$; (f) —Substrate 2, $v = 4.0 \text{ mm/s}$

持初始设定值不变, 不受下降速度的影响, 因而沉积表面的偏心距总是增加的(假定倾角大于零), 即沉积坯顶部存在着下凹倾向, 但沉积距离的增加却使得沉积坯顶部有上凸倾向, 所以随着下降速度增加, 后者的影响会超过前者, 沉积坯顶部变得上凸, 如图 7(c), (d) 所示。对于沉积器 2, 沉积器表面位置的偏心距总是减小的, 因而当下降速度小于沉积坯生长速度时, 沉积表面的偏心距是增加的; 当下降速度大于沉积坯生长速度时, 沉积表面的偏心距减小, 沉积集中于坯中心区域, 又使得沉积坯生长速度增加, 这样相互作用的结果是沉积表面趋向于稳定在一定的位罝, 所以随着下降速度增加, 沉积坯直径减小, 高度增加, 如图 7(e), (f) 所示。因此, 对于沉积器 2, 下降速度也是控制沉积坯形状的一个重要参数。

3.3 沉积坯实验结果的分析

通过调整沉积器的位置及运动, 可以获得

所需形状的柱状沉积坯, 但对沉积坯的解剖表明, 在沉积坯的内部容易出现不同程度的疏松。研究发现, 当沉积坯上出现由粗至细的过渡段时, 沉积坯中的疏松往往较为严重, 而且疏松容易出现在此过渡段上。其原因可能是在此过程中沉积坯顶部生长推进表面形状变化较大, 当沉积层液相率较低时, 接近凝固或凝固了的“硬”的颗粒之间容易发生相互覆盖、遮挡而出现空隙, 沉积层中液相又无法补充, 从而导致沉积坯中出现疏松; 当沉积层液相率较高时, 液相层则不易在这样的曲面上保持稳定, 沉积坯中也容易出现间隙, 并且在局部范围内因液相率较高, 陷入沉积坯中的气体发生聚集 (Coalescence of entrapped gas) 也会导致疏松出现^[10, 11]。因此, 这时沉积层只有在很窄的液相率范围内时, 才能形成致密的沉积坯。

如果沉积坯生长过程中顶部推进表面形状变化较为平缓, 这时在沉积坯顶部表面容易形

成稳定的沉积层, 形成致密沉积坯对沉积层液相率要求的范围也较宽, 因此沉积坯中的疏松可大大减轻。

图8为根据上述分析, 对工艺参数进行坯优化后获得的一个沉积坯, 对坯件试样密度的测量结果表明, 沉积坯的整体致密度可达98%以上。

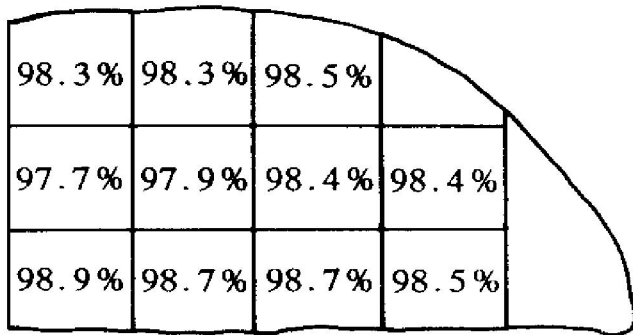


图8 沉积坯的相对密度($P = 2.5 \text{ MPa}$)

Fig. 8 Relative density measurements on cross section of spray formed preform

4 结论

(1) 雾化锥中熔滴射流质量流率沿轴向及径向的空间分布可通过对雾化锥特定高度分布的测量来确定, 即质量流率空间分布可表示为;

$$MFD(r, h) = a_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 \cdot e^{-\left(\frac{h_0}{h} \cdot \frac{r}{b_0} \right)^n}$$

(2) 在其它工艺参数相同的情况下, 沉积器2的运动方式较沉积器1更有利于沉积坯生长为柱状;

(3) 选择适当的工艺参数, 可以获得整体致密度大于98%的高温合金柱状沉积坯。

REFERENCES

- 1 Mi Guofa *et al.* (米国发等), Journal of Materials Science & Engineering (材料科学与工程), 1996, (4): 8.
- 2 Benz M G, Sawyer T F *et al.* ICSF2, 1993.
- 3 Zhang Guoqing(张国庆), Mi Guofa(米国发) *et al.* In: Imam M A, DeNale R, Hanada S *et al* eds. Proc 3rd Pacif Rim Intern Conf on Adv Mater and Proc, Vol II. Hawii: TMS, 1998: 1687.
- 4 Warner L, Cai C *et al.* ICSF3, 1996: 265.
- 5 Grant P S. Prog in Mater Sci, 1995, 39: 497.
- 6 Annavarapu S and Doherty R D. Acta Metall Mater, 1995, 43: 3207.
- 7 Li Zhou(李 周) *et al.* Journal of Aeronautical Materials (航空材料学报), 1998, (2).
- 8 Kramer C, Uhlenwinkel V *et al.* ICSF3, 1996: 273.
- 9 Murther P, Annavarapu S *et al.* Mater Sci & Eng, 1991, A142: 261.
- 10 Annavarapu S and Doherty R D. Int J of Powder Metall, 1993, 29: 331.
- 11 Cai W D and Lavernia E J. Mater Sci & Eng A, 1997, 226: 8.

3D SHAPE MODEL AIDED SPRAY FORMING PROCESS

Zhang Zhihui, Li Zhou, Zhang Guoqing, Mi Guofa, Liu Zhongwu and Tian Shifan
Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China

ABSTRACT The effect of processing parameters on shape and porosity of spray formed superalloy preform was studied using a 3D shape model, in which a further investigation of the spacial distribution of mass flux in the spray cone and tow sorts of substrate motion mechanism was concerned. It was concluded that a low porosity superalloy preform with desired shape can be achieved by optimizing the processing parameters.

Key words spray forming superalloy mass flux distribution shape model

(编辑 何学锋)