

喷射成形过程工艺参数作用规律的理论预测^①

曹福洋 崔成松 范洪波 李庆春

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要 利用跟踪沉积坯表面坐标变化的计算机模型, 预测不同条件下喷射成形产品的几何形状, 结果表明: (1) 垂直喷射时不能形成形状规则的柱状沉积坯; (2) 斜喷且沉积器以一定的速度垂直下移, 可以形成形状很好的沉积坯, 沉积坯的直径主要与下移速度有关, 同时也受喷射角度和雾化锥的散射角度影响。

关键词 喷射成形 数值模型 坐标跟踪 快速凝固

中图法分类号 TG146.2

喷射成形技术是一种新近发展起来的先进材料制备技术, 一经出现便引起国内外许多研究机构和企业的重视, 它们投入大量的人力、物力对这项新技术进行研究和开发, 并取得很大进展^[1-3]。但是, 由于喷射成形过程的复杂性, 影响喷射成形的工艺参数很多, 需要把许多工艺参数优化匹配才能得到形状规范的锭材。为了减少试验工作量, 降低试验成本, 同时缩短试验周期, 可采用计算机模拟的方法, 通过给定的不同参数, 预测喷射沉积锭的形状和尺寸。然而, 国内外的一些研究单位以往建立的沉积坯形状预测计算机模型^[1-7]多数为二维模型, 难以准确预测沉积结果和沉积规律, 即使是三维模型^[8,9], 其考虑问题也不全面, 或者未考虑喷射过程中沉积坯形状的影响, 或者忽略了沉积坯在沉积过程中在某些方向的增量。

本文在以往的研究基础上, 首次利用坐标跟踪法建立了更符合喷射成形过程实际情况的数学模型及数值算法, 并对三种典型喷射成形条件进行了系统的计算分析, 得到了喷射角度、金属流率、沉积器移动速度等参数对沉积

坯形状的影响规律。

1 模型的建立及分析

喷射沉积过程中, 金属液流被高压气体碎化成小雾滴, 雾滴主要分布在一个锥内, 该雾化锥内粒子束流的密度分布沿径向是变化的, 近似符合高斯分布规律^[10]:

$$D = A \cdot \exp(-Br^2) \quad (1)$$

式中 A 为最大沉积速率, r 为径向距离, B 为分布系数。

哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室对自行研制和开发的一系列结构不同的雾化器的气体动力学特征和雾化效果进行系统测试研究, 得到了各种雾化器在不同雾化压力及金属流率的情况下式(1)中各项系数的值^[11]。

本文模型是在沉积器旋转并向下运动、金属雾滴倾斜一定角度或垂直向沉积盘面喷射的条件下建立的, 喷射过程如图1所示。在沉积过程中沉积盘以很高的速度旋转, 随着时间的变化, 盘上任意点到雾化锥对称中心的实际距

① 国家自然科学基金资助项目(59605012)、黑龙江省自然科学基金资助项目(E9709)和航天基金资助项目

收稿日期: 1998-03-13; 修回日期: 1998-09-09

曹福洋, 男, 29岁, 博士研究生

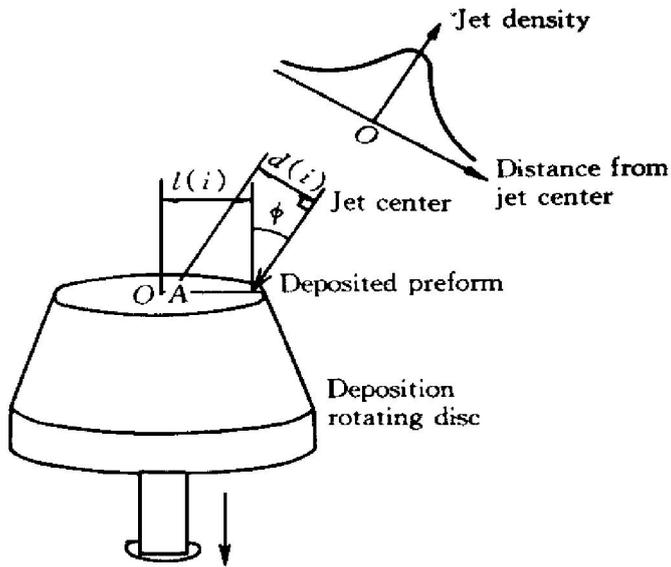


图1 喷射成形过程示意图

Fig.1 Schematic drawing of spray forming process

离是不断变化的, 所以任意点在沉积过程中的沉积速度 D 是时间的函数, 而且沉积到该点的粒子流的方向也是不断变化的。为了计算方便, 本文先把粒子流分解为垂直于沉积盘面方向和平行于沉积盘面方向的两个方向的分量 D_z 和 D^* , 然后再把平行于盘面的分量 D^* 分解为径向分量 D_r 和垂直于径向的分量 D_θ , 则有

$$\left. \begin{aligned} |D_z| &= |D| \times \cos \phi \\ |D_r| &= |D| \times \sin \phi \times \cos(\alpha + \theta) \\ |D_\theta| &= |D| \times \sin \phi \times \sin(\alpha + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 θ 为圆盘转过的角度, α 为该点的初始角坐标, ϕ 为喷射角度。圆盘上任意一点的坐标变化是:

$$\left. \begin{aligned} r(B) &= r_0(B) + \int |D_r| \cdot dt \\ z(B) &= \int |D_z| \cdot dt \\ \alpha(B) &= \alpha + \int |D_\theta| \cdot dt \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可以利用式(3)跟踪计算沉积坯的轮廓线坐标。在圆周运动中, 任意一点如果在某时刻的角坐标为 $\alpha + \theta$, D_θ 所引起的 α 增量恰好和该点在 $2\pi - \alpha - \theta$ 位置所引起的 α 增量大小相等、

方向相反而被抵消, 所以在计算中可以不考虑 D_θ 最终对坐标的影响。

沉积盘转速很高, 每转一周所沉积的厚度很少, 沉积坯的外轮廓近似为一个以 Z 轴为对称轴的回转体, 只要跟踪计算出圆盘的任何一条半径上各点对应 Z 值和 r 值的变化, 便可得到圆盘的轮廓形状。本文取 α 为零的半径为计算半径, 首先把该半径分成若干等份, 每份付以坐标 $[r(i), z(i)]$, $r(i)$, ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) 的初值为 $r_0 = i \times R/n$, $z(i)$ 的初值为 0。在某时刻, 该半径上任一点在此时刻距射流中心线的距离 $d(i)$ 可表示为:

$$d(i) = \{r^2(i) + l^2(i) - 2r(i)l(i) \cdot \cos(\omega t) - [l(i) - r(i) \cdot \cos(\omega t)]^2 \sin^2 \phi\}^{1/2} \quad (4)$$

其中, 该点的实际偏心距随时间变化, $l(i) = l_0 - [vt - z(i)] \tan \phi$, v 为沉积盘下移速度, t 为时间, $z(i)$ 为该点在该时刻的沉积高度; ω 为沉积转盘的角速度。把 $d(i)$ 代入式(1)并与式(2)联合求出该点的沉积速率 D_z 和 D_r 。用该沉积速率乘以时间步长 Δt , 便得到该时刻在 Δt 的时间内, 所产生的 z 轴方向增量 Δz 和径向增量 Δr 。因此, 在任意时刻, 经时间 Δt 后任意点坐标 $[r(i), z(i)]$ 变为 $[r'(i), z'(i)]$, 且 $r'(i) = r(i) + \Delta r$, $z'(i) = z(i) + \Delta z$ 。如此, 可得到沉积坯最终的外轮廓线坐标, 如图 2 所示。利用该轮廓线坐标可以绘制

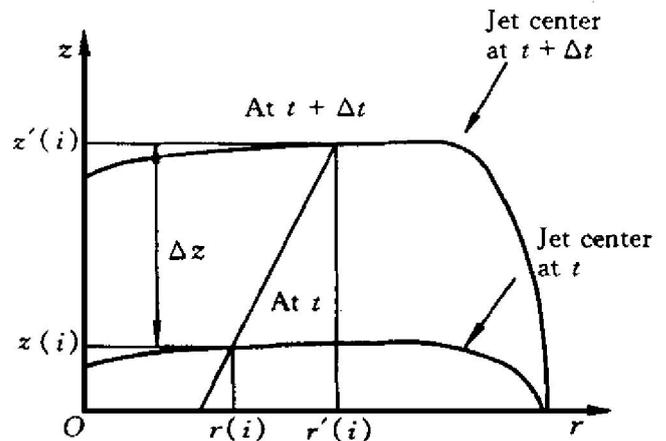


图2 沉积坯轮廓线形成示意图

Fig.2 Schematic formation process of contour line of deposited preform

出沉积坯的形状。图3为利用本实验室现有设备制备的沉积坯和利用本文模型计算的该工艺条件下的沉积坯形貌,可见两者很相似,说明本文模型具有较好的预测性,通过选择各种参数进行数值计算,可得到不同形状的沉积坯,这样不必进行大量试验就可得到工艺参数与沉积坯形状的基本关系。

2 结果分析

利用上述模型和算法,对几种典型的喷射成形方式制备的锭坯形状进行了计算分析。

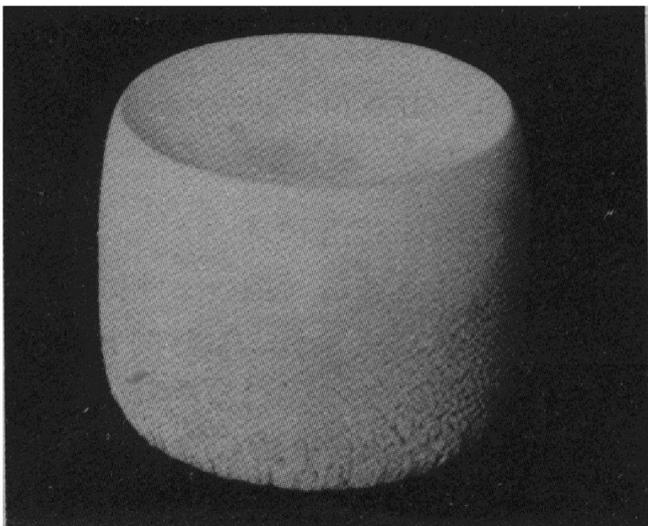
2.1 偏心、垂直喷射成形方式

垂直喷射成形是指当喷射角度为零时,金属雾滴被高速气流垂直吹射到沉积盘面上并沉积的过程。由于沉积盘移动方向与喷射方向一致,沉积器下移不会改变偏心距,所以在此工艺条件下,下移速度对沉积坯形状影响不大。垂直喷射成形的关键参数是初始偏心距,图4为该种工艺下偏心距不同时的计算结果,当偏心距较小(25 mm)时,沉积坯中间不出现凹坑,其轮廓线近似呈锥状,随时间增加,沉积锥变

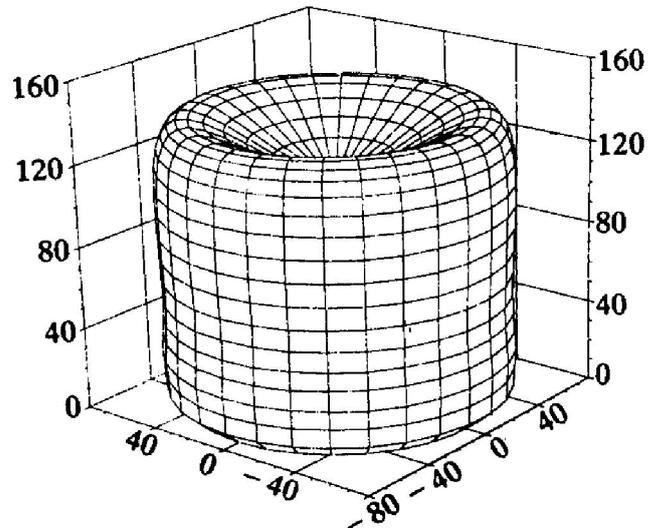
得更尖,如图4(a)所示;当偏心距增为30 mm时,如图4(b)所示,沉积坯中心部位开始出现凹坑,而且随时间的增加和沉积坯的增高,凹坑加深,其外部轮廓尺寸大于图4(a)中的情况,但仍存在一定的锥度;当偏心距增大到50 mm时,其外轮廓已成柱形,但其中心凹坑更深,如图4(c)所示;通过对图4(b)和图4(c)的比较,可以发现偏心距大时,沉积收得率小,偏心距为50 mm时其雾化锥内约有1/3的金属落到沉积坯外,从而降低收得率,而偏心距为30 mm时,雾化锥的95%以上能投影到沉积器上,收得率较高。图4(d)为偏心距为30 mm,沉积75 s时利用本文模型计算出的沉积坯三维形状图,可以看出,在垂直喷射条件下,虽然可以通过调整偏心距来改变沉积坯的形状,但最终很难形成规整的柱状,当偏心距大时,沉积坯中心出现凹坑;当偏心距小时,沉积坯呈锥状,可以确定垂直喷射工艺不是沉积锭(盘、柱)的理想工艺。

2.2 偏心、倾斜喷射成形方式

此种喷射沉积工艺的喷射角度不为零,沉积器下移时偏心距改变。该种工艺条件下可以



(a)



(b)

图3 沉积器倾斜,但沉积器运动方向和射流方向一致的实际沉积坯照片和对应的预测沉积坯形貌(倾斜角 20° ,偏心距20 mm)

Fig. 3 Photographs of actual appearance (a) and predicted shape (b) of deposited preform under conditions of tilt spray angle of 20° and off-center distance of 20 mm, and direction of spray being the same as that of disc moving

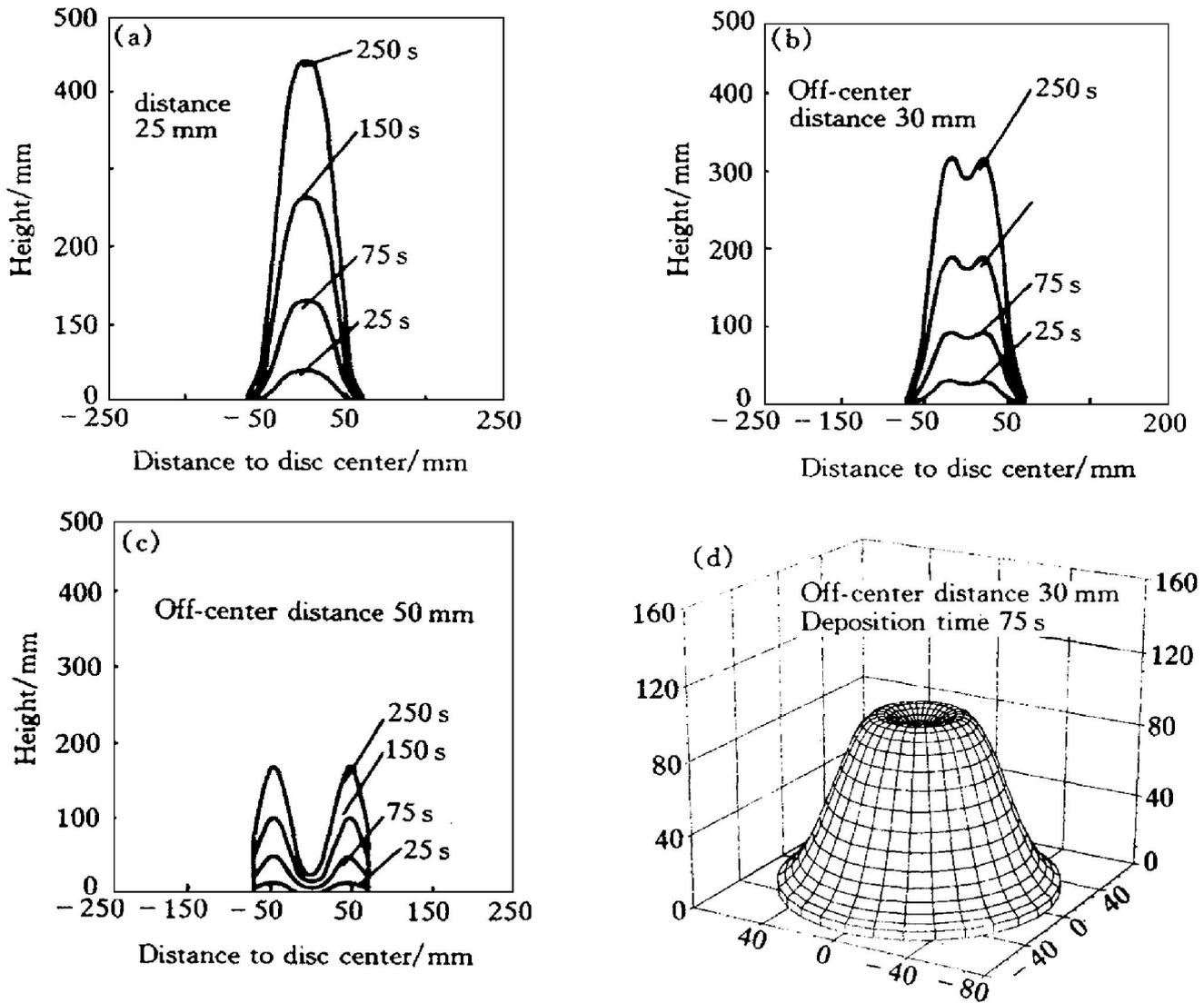


图4 垂直喷射、偏心距不同时的沉积坯形状的变化规律

Fig. 4 Shape variation of deposited preform with off-center distance under vertical spray (metal flow rate: 30 g/s Al)

影响沉积坯形状的因素有沉积器移动速度、喷射角度、金属流率(散射角大小)等。下面是一些参数的比较结果,图5(a),(b)和(c)为偏心距不同(30, 40, 50mm),而其它工艺参数相同时的一组实验结果。在沉积的开始段,如25s时三种情况的沉积坯形状差较大,偏心距大的沉积坯矮粗,中间有凹坑,但随时间增加,三者的区别越来越小,到250s时三种条件都沉积出较规整的棒料,而且棒料上半部分的直径相等,顶端圆头形状相似,下端直径略有差别,但直径变化规律相似,最下端大,往上变小,再向上逐渐变为上半部的尺寸。图5(d)为图5(c)中250s时的沉积坯三维形状图,是一

个形状规则的棒状沉积坯。

图6为其他参数与图5(c)相同、但沉积坯下移速度增加至1.0mm/s时的计算结果。随时间增加,图6中沉积坯直径逐渐变小,最后稳定在某一值上,但该值明显小于图5(c)中的上段直径。图7为改变喷射角度,其他参数与图5(c)相同的计算结果。可以看出,喷射角度减小,沉积坯中心易于出现凹坑,但随时间增加凹坑减小;沉积250s时沉积坯的外部尺寸与图5(c)相似。图8为加大金属流率和高斯分布系数工艺条件下的计算结果,其他条件与图5(c)相同,其沉积坯上段的直径比图5(c)粗大。由此可见,(1)倾斜喷射且沉积器以一定

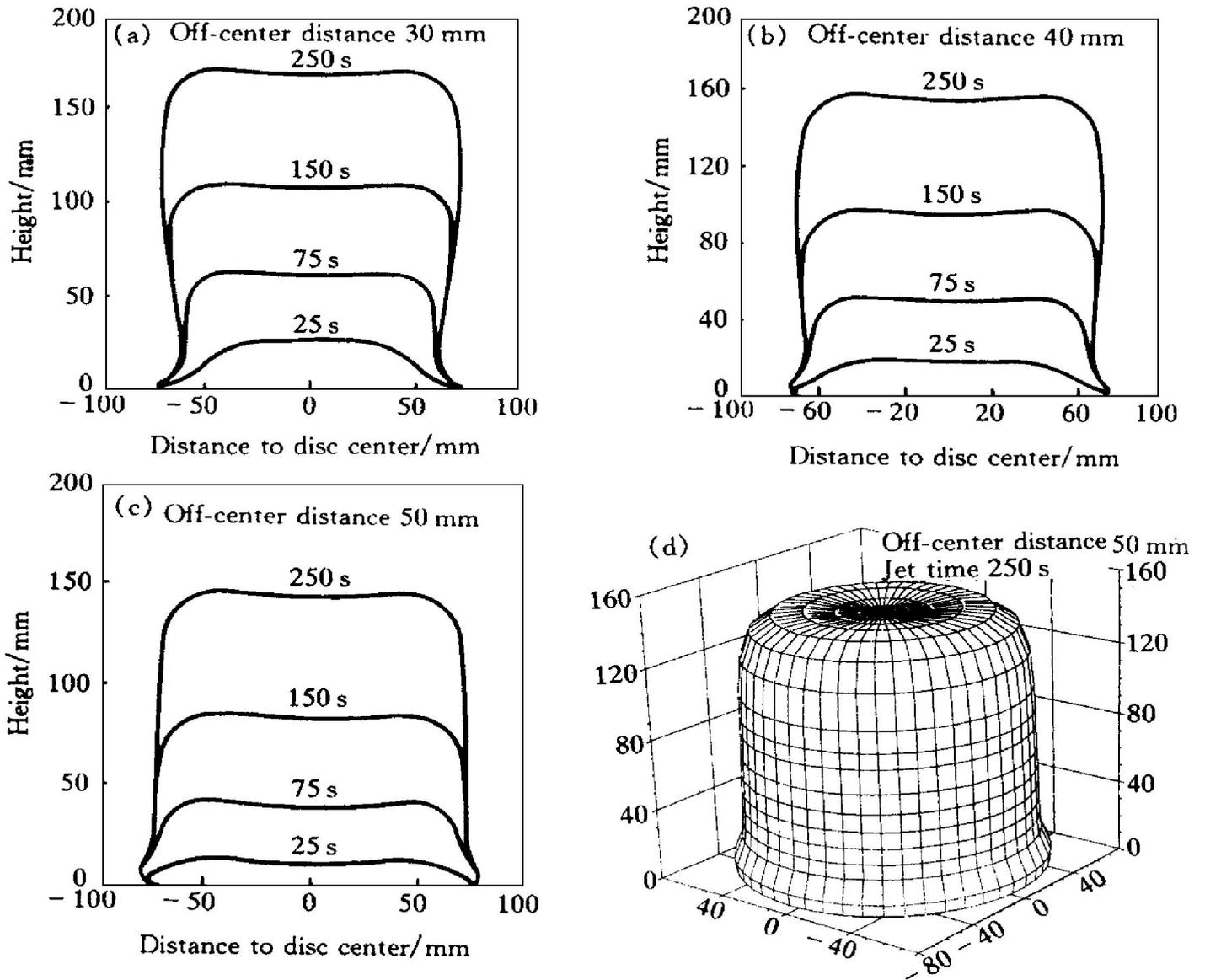


图5 偏心斜喷且沉积器移动时, 不同偏心距下的沉积坯轮廓图

Fig. 5 Shape variation of deposited preform with off-center distance under conditions of tilt spray angle of 40° and metal flow rate of 30 g/s Al and Gauss coefficient(B) of 0.015 and moving speed of disc of 0.6 mm/s

速度下移可以形成形状规整的长锭。(2) 沉积锭在生长过程中可分成两个阶段, 即开始过渡区和稳态生长区。在稳态生长区, 沉积锭外形规整, 尺寸均匀; 在过渡区, 沉积坯外形尺寸有波动, 其原因是开始时的沉积面是平面(沉积盘面), 而稳态时的沉积面是类球面, 从平面到类球面的变化要经过一定时间的沉积, 这段时间即形成沉积坯的过渡区。过渡区的长度和直径变化量主要与沉积盘下移速度和偏心距有关, 同时也受金属流率和高斯分布系数影响。(3) 稳态生长过程中, 沉积锭的直径与下降速度、雾化器高斯分布系数和金属流率有

关, 而与喷射角度、沉积盘的大小和偏心距大小无关。

3 结论

(1) 垂直喷射时, 不能形成规整的尺寸较大的柱状沉积坯。

(2) 斜喷且沉积器以一定的速度垂直下移, 可以形成形状很好的沉积坯, 沉积坯的直径主要与下移速度有关, 同时也受喷射角度和雾化锥的散射角度影响。

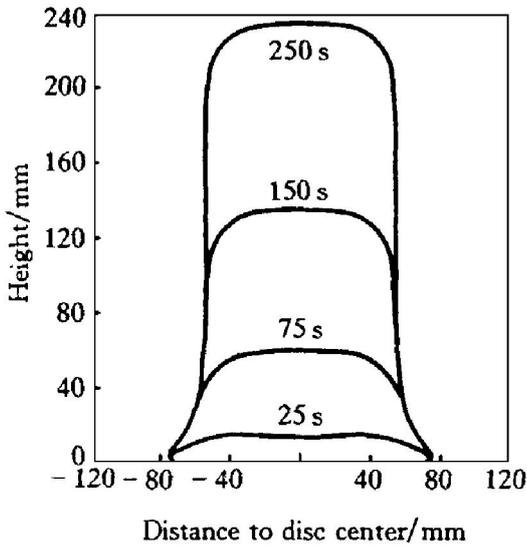


图6 移动速度增加时沉积坯的形貌

Fig. 6 Shape variation of deposited preform at moving speed of disc of 1.0 mm/s, and with other parameters being the same as Fig. 5(c)

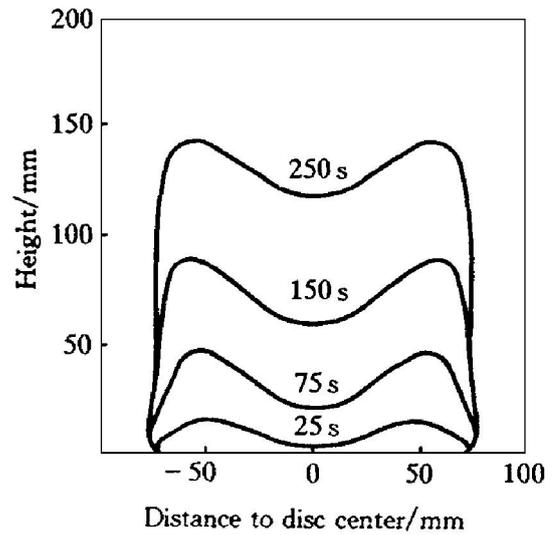


图7 喷射角度改变时沉积坯的形貌

Fig. 7 Shape variation of deposited preform at a tilt spray angle of 20°, and with other parameters being the same as Fig. 5(c)

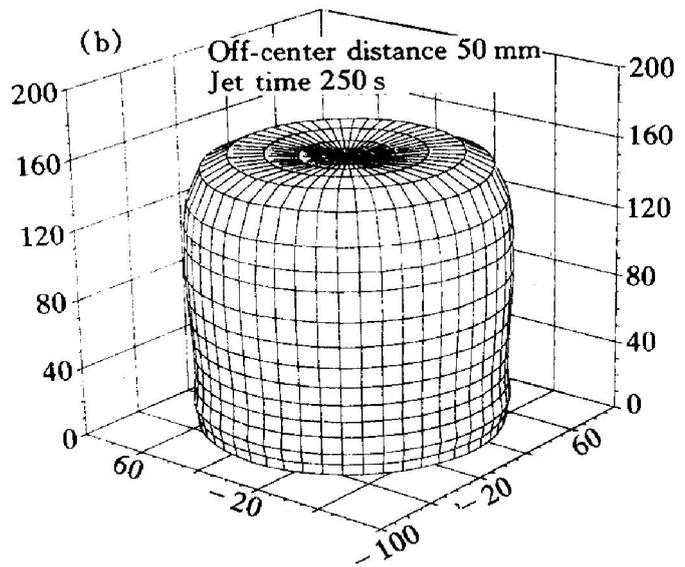
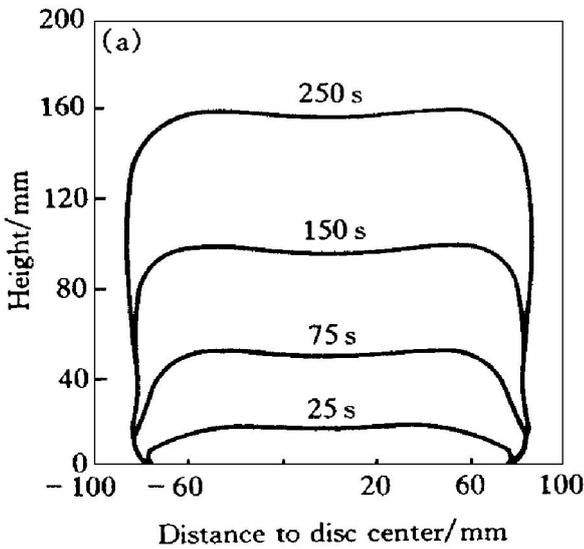


图8 改变高斯分布系数和增加金属流率时沉积坯的形貌

Fig. 8 Shape variation of deposited preform under a metal flow rate of s Al and Gauss coefficient (B) of 0.0075, and other parameters being the same as Fig. 5(c)

(3) 斜喷下移条件下形成的沉积坯开始段有过渡区, 过渡区内沉积坯的直径先增大, 后变小, 最后逐渐变为稳态沉积的尺寸, 过渡区长短及直径的变化量主要受偏心距和沉积器下移速度影响。

REFERENCES

- 1 Mathur P, Annavarapn S, Apelian D *et al.* Mat Sci Eng, 1991, A142: 261.
- 2 Mathur P, Apelian D and Lawley A. Powder Metallurgy, 1991, (34): 109.
- 3 Cui Chengsong(崔成松), Fan Hongbo(范洪波) and

- Li Qingchun(李庆春). The Chinese Journal of Non-ferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(4): 127.
- 4 Lee H C, Ra H Y, Oh K H *et al.* Journal of Korean Institute of Metals and Materials, 1992, (30): 1063.
- 5 Lee H C, Oh K H, Lee H L *et al.* Journal of Korean Institute of Metals and Materials, 1992, (30): 1071.
- 6 Frigaard I A. Saim J Appl Math, 1995, 55: 1161–1203.
- 7 Mahamad M, Medwell J O and Gethin D T. Powder Metallurgy, 1991, (38): 214.
- 8 Seok H K, Yeo D H, Oh K H *et al.* In: Third International Conference on Spray Forming, 1996: 287–295.
- 9 Fan Hongbo(范洪波), Cao Fuyang(曹福洋), Cui Chengsong(崔成松) *et al.* Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报), 1998, (2): .
- 10 Mathur P, Apelian D and Lawley A. Acta Metall, 1993, 29(4): 323.
- 11 Li Qingchun(李庆春), Cui Chengsong(崔成松), Jiang Zuling(蒋祖龄) *et al.* Aerospace Technological Report(航天科技报告), 1997.

THEORETICAL ANALYSIS ON EFFECT OF SPRAY FORMING PROCESSING PARAMETERS

Cao Fuyang, Cui Chengsong, Fan Hongbo and Li Qingchun

School of Materials Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China

ABSTRACT A mathematical model tracing the moving position of the surface of spray formed billets/ discs was utilized to predict the geometry of the preform under various processing conditions. The conclusions can be drawn as: (1) no regular cylindrical preforms can be produced under the condition of spraying perpendicularly to the substrate surface; (2) as the atomized droplets spray inclinely and the substrate translates perpendicularly, preforms with excellent formation can be spray formed. The preform diameter mainly depends on the translating velocity, and the spray incline angle and the spatial angle of the spray cone as well.

Key words spray forming numerical modeling rapid solidification

(编辑 彭超群)