

# 约束喷射沉积过程中雾化气流场的模拟研究

Simulation of Atomization Gas Flow Field  
During Constrained Spray Deposition Process

尹建成<sup>1</sup>, 杨 环<sup>1</sup>, 刘英莉<sup>2</sup>, 陈业高<sup>1</sup>, 张八洪<sup>1</sup>, 钟 毅<sup>1</sup>

(1 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650504)

YIN Jian-cheng<sup>1</sup>, YANG Huan<sup>1</sup>, LIU Ying-li<sup>2</sup>,

CHEN Ye-gao<sup>1</sup>, ZHANG Ba-qi<sup>1</sup>, ZHONG Yi<sup>1</sup>

(1 Faculty of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2 Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

**摘要:** 采用双旋转盘流型控制器约束雾化射流, 利用计算流体动力学 Fluent 软件模拟分析不同雾化气体压力下约束喷射沉积的流场特性, 并进行了实验验证。结果表明: 随着雾化气体压力的增加, 反向气流速度增大, 导流管出口温度降低, 极易出现堵塞现象。当雾化气体压力为  $2.5 \times 10^5$  Pa、熔体入口压力为  $2.0 \times 10^4$  Pa 时, 作用于熔体上的压强最小, 约为  $8.99 \times 10^3$  Pa, 金属熔体可顺利流出, 沉积坯没有明显的氧化现象, 雾化效果最好, 且沉积坯的宽度与连续挤压机轮槽的宽度一致。

**关键词:** 喷射成形; 喷射沉积连续挤压; 气体压力; 数值模拟

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.000931

**中图分类号:** TF124.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)11-0102-08

**Abstract:** Double disks controller was used to constrain the size of spray plume. The flow field characteristics of the constrained spray technology under different gas inlet pressures were simulated by the computational fluid dynamics (CFD) software “Fluent”, and the simulation result was experimentally verified. The results show that with the increase of atomization gas inlet pressure, the speed of reverse gas flow increases, and thus, the temperature of the nozzle tip decreases. In this case, solidification of the melt in the nozzle occurs. When the inlet pressures of the gas and metal are  $2.5 \times 10^5$  Pa and  $2.0 \times 10^4$  Pa respectively, the pressure acting on the melt decreases to minimum value of about  $8.99 \times 10^3$  Pa. At this condition, the molten metal flows out smoothly and no apparent oxidation phenomena appear in the deposition billet. Moreover, the effect of atomization is the best and the width of the deposition billet is exactly consistent with the width of the wheel groove of continuous extrusion machine.

**Key words:** spray forming; spray deposition with continuous extrusion; gas pressure; numerical simulation

喷射成形技术是一种利用快速凝固方法制备难成形金属材料的近净成形工艺<sup>[1-3]</sup>。该技术在冶金材料的制备行业具有广泛的适应性, 因此被称为“未来材料制备技术之星”<sup>[2]</sup>。该技术采用惰性气体雾化合金熔液, 在无任何约束的情况下, 雾化液滴沉积在底托上形成沉积坯, 此时雾化液滴的沉积区域较宽( $>100$ mm)。

喷射沉积连续挤压是近年来提出的一种利用快速凝固技术制备高合金含量材料的近净成形新技术, 具有广泛的应用前景<sup>[4-7]</sup>。常规连续挤压机轮槽的宽度为  $10 \sim 28$  mm, 在自由喷射的情况下, 会有大量的合金熔滴沉积在轮槽之外, 造成原料的巨大浪费。因此, 是否能够有效地约束沉积坯的宽度是喷射沉积连续挤压技

术应用的关键<sup>[7]</sup>。

据文献报道,雾化过程对雾化液滴的速度<sup>[1,8-12]</sup>、液滴尺寸<sup>[1,10-13]</sup>、温度<sup>[1,9-10,12]</sup>、沉积坯状态以及最终产品质量<sup>[2,9,12]</sup>有着直接的影响。雾化的主要工艺参数包括气体的类别、压力和温度,其中气体压力是最关键的因素<sup>[12,14-15]</sup>。目前,许多学者采用数值模拟技术对喷射成形雾化过程的流场进行了模拟,为实验提供理论指导。施立新等<sup>[10]</sup>采用 DPM(离散相)模型和 RNG $k-\epsilon$  模型进行了 Laval 气雾化喷嘴的雾化流场数值模拟,发现随着压力的增加,冷却速率升高,冷却时间减少。Mates 等<sup>[16]</sup>重点研究了 3 种离散型喷嘴和 1 个环缝型喷嘴,发现环缝型喷嘴产生的超音速射流具有较高的动态压力,可得到更细的粒滴。

喷射沉积连续挤压是一种新技术,须对喷射沉积雾化区域进行约束,致使其雾化过程更加复杂,目前关于此方面的文献报道较少。因此,为了更好地探究气体压力对约束喷射成形雾化过程的影响,本工作在传统喷射成形雾化的基础上,采用环缝型喷嘴<sup>[12]</sup>和双旋转盘流型控制器<sup>[17]</sup>,利用计算流体力学软件 Fluent 中的 RNG $k-\epsilon$  模型和 DPM 模型模拟分析约束喷射成形雾化过程<sup>[1,10]</sup>,从理论上分析雾化气体压力对约束喷射成形雾化阶段的影响,同时进行实验验证。

1 实验材料与方法

1.1 实验原理

喷射沉积连续挤压技术的基本原理<sup>[5-6]</sup>是:合金熔液从导流管流出时,被雾化器喷嘴喷出的高速气体雾化破碎,破碎的粒滴在双旋转盘流型控制器的约束作用下,以挤压轮槽为基体形成沉积坯。沉积坯经过连续挤压形成近终形的制品,如图 1 所示。采用双旋转盘流型控制器约束雾化射流,即在雾化器气体出口处,对称放置一对高速旋转的圆盘,雾化过程中合金液滴从双旋转盘间飞出,在狭长的区域内沉积成窄条状沉积坯。

1.2 物理模型

图 2 为本工作选用的环缝型雾化器结构图,雾化器高度  $H$  为 60mm,气孔入口高度  $H_0$  为 30mm,气体进入气腔后沿环形狭缝  $d_2$  流出,为 1.2mm,气体出口角度  $\alpha$  为  $25^\circ$ ,金属液入口直径  $d_0$  为 70mm,金属液出口直径  $d_3$  为 4mm。本工作数值模拟采用三维物理模型,图 3 为约束喷射沉积计算域示意图。计算区域为圆柱与双圆盘边缘射流旋转体的耦合体,其圆柱体底面直径为 800mm,高度为 460mm,双旋转盘的直径为 235mm,双盘底部夹角为  $8^\circ$ ,底部间距为 6mm。由于

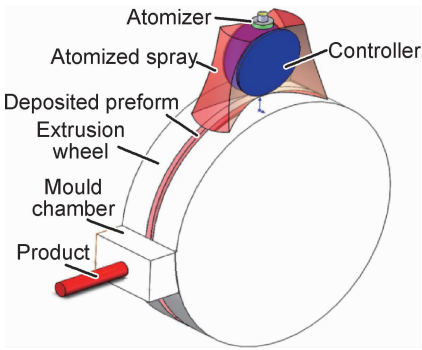


图 1 喷射沉积连续挤压技术原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of the spray deposition with following continuous extrusion forming technique

喷嘴几何形状比较复杂,为捕捉边界层的特征,不适合在整个计算区域内使用同一类型的网格<sup>[18-19]</sup>,因此,在环缝、导流管底端和双旋转盘底部细化网格,其余区域采用粗网格。

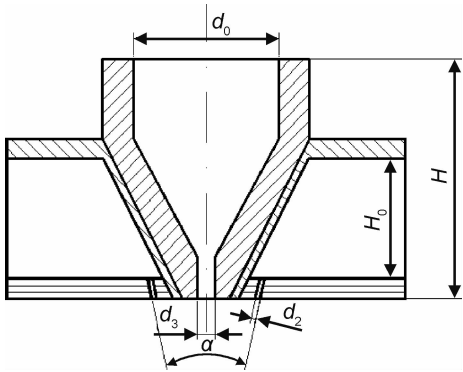


图 2 环缝型雾化器结构图  
Fig. 2 Structure diagram of annular-slit atomizer

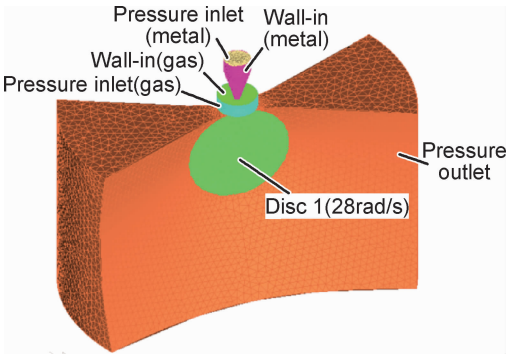


图 3 环缝型雾化器计算域示意图  
Fig. 3 Computational grid diagram for the annular-slit atomizer

1.3 计算模型

Fluent 软件中对于喷雾这类问题的模拟主要采用 DPM 离散模型,湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$  模型。近壁面为标准的壁面函数,破碎模型选择 TAB(泰勒比)模

型。求解器采用压力基的半隐式(SIMPLE)算法<sup>[19]</sup>。

由于影响雾化过程的因素较多,根据流体力学中伯努利定律,对计算过程进行简化。本模拟作以下假设<sup>[10,18-20]</sup>:(1)气体为可压缩的理想气体;(2)流体是不可压缩的黏性流体;(3)雾化粒滴在自身重力和气流作用下作直线运动;(4)雾化粒滴为球形。不可压缩流体的伯努利方程为: $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = C$ ,式中: $P$ , $\rho$ , $v$ 分别为流体的压力,密度和速度; $h$ 为相对于选定基准面的高度; $C$ 为常数。由该方程可知,在 $\rho$ 一定时, $P$ 较大,则 $v$ 越小。利用皮托管测得导流管入口压力约为 $2.0 \times 10^4$  Pa。

边界条件<sup>[3,10]</sup>:由于本工作使用的喷射沉积熔体装置较小,金属静力学压力很小,为减小温度降低的影响,设置熔体入口为压强入口;漏斗壁面温度为1020K,放热速率为 $20000\text{W/m}^3$ ;气体入口为压强入口;双旋转盘转速为 $28\text{rad/s}$ ;底部出口为压强出口;外部环境工作压力为0Pa;其他壁面条件采用标准的壁面函数。

本工作模拟了5种不同雾化气体压力( $1.5 \times 10^5$ ,  $2.0 \times 10^5$ ,  $2.5 \times 10^5$ ,  $3.0 \times 10^5$ ,  $3.5 \times 10^5$  Pa)对约束喷射成形过程的影响。雾化气体为氮气,以Al-20Si合金为主要雾化金属,并与7075Al合金雾化温度场进行对比,计算中模拟热物理性能参数见表1<sup>[21-22]</sup>。

表 1 N<sub>2</sub>,Al-20Si 和 7075Al 的性质参数

Table 1 Parameters of N<sub>2</sub>, Al-20Si and 7075Al alloys

Sample	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\mu/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$M/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	$T/\text{K}$
N <sub>2</sub>	1.138	1040.67	0.0242	$1.663 \times 10^{-5}$	28.0134	
Al-20Si	2380	820	0.01	0.00104		1100
7075Al	2820	960	0.01	0.001		910

2 结果与分析

2.1 模拟结果与分析

2.1.1 雾化气体压力对总压强的影响

图 4 为不同雾化气体压力时双盘轴对称截面总压

强分布,可以看出,不同气压下的总压强分布类似,但由压力梯度显示,随着气体压力的增加,雾化区压强及其影响范围逐渐增大,导流管出口附近的负压也越来越大,这有助于对金属熔体产生稳定的抽吸作用,使雾化过程稳定进行<sup>[22]</sup>;导流管内部熔体的压力受气体压

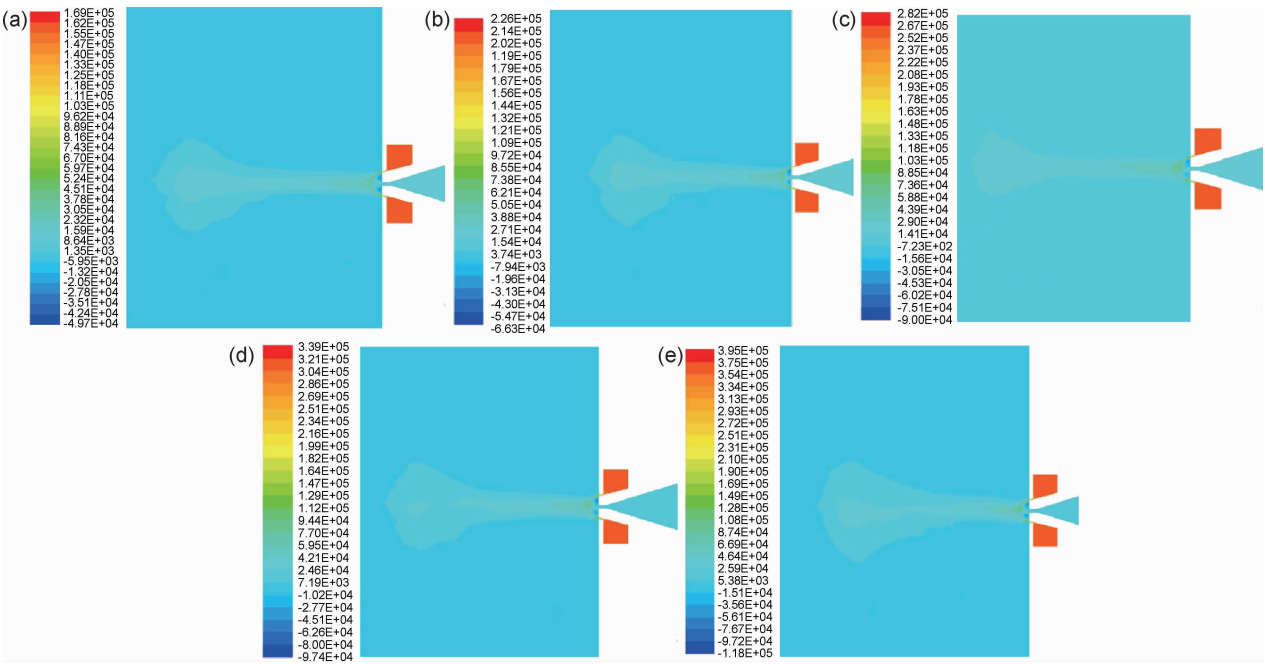


图 4 不同雾化气体压力时双盘轴对称截面总压强分布

(a)  $1.5 \times 10^5$  Pa; (b)  $2.0 \times 10^5$  Pa; (c)  $2.5 \times 10^5$  Pa; (d)  $3.0 \times 10^5$  Pa; (e)  $3.5 \times 10^5$  Pa

Fig. 4 Total pressure distribution at the axial symmetrical section of double disks under different gas inlet pressures

(a)  $1.5 \times 10^5$  Pa; (b)  $2.0 \times 10^5$  Pa; (c)  $2.5 \times 10^5$  Pa; (d)  $3.0 \times 10^5$  Pa; (e)  $3.5 \times 10^5$  Pa

力的影响较大,呈现先减小后增大的趋势。由压力梯度显示,当雾化气体压力为  $2.5\times10^5\text{Pa}$  时(图 4(c)),熔体内压强值最小,约为  $8.99\times10^3\text{Pa}$ ,有利于金属熔体的流出。当气体压力为  $3.5\times10^5\text{Pa}$  时(图 4(e)),熔体内压强值最大,约为  $1.88\times10^4\text{Pa}$ 。由于设定金属熔体入口压力为  $2.0\times10^4\text{Pa}$ ,所以压强值差很小,约为  $120\text{Pa}$ 。较小的正压导致金属熔体向下流速较慢,而金属熔体的热量被高速气流带走,极可能造成金属熔体在导流管出口处凝固,出现堵塞现象,导致雾化不能顺利进行。若继续增大气体压力,则压强差值可能为负值,导致金属熔体反向流动,出现“反喷”现象。

2.1.2 雾化气体压力对速度的影响

设置金属熔体入口中心为起始点即 0m 位置,当轴向距离为 0.15m 时,存在速度驻点,且气体压力越大,驻点速度越大;轴向距离为 0.15~0.16m 时,气流交汇,不同气体压力下的速度都达到峰值,且气体压力越大,速度峰值越大,如图 5 所示。图 6 为不同雾化气体压力时双盘轴对称截面速度流场,由图 5 和图 6 可以看出,不同气体压力下的速度曲线和速度流场分布都很类似,在双旋转盘流型控制器的中心即轴向距离为 0.16~0.3m 区域,双旋转盘之间的中心位置的粒滴速度受到双旋转盘流型控制器的影响,有一定的波动,但速度并没有很大的衰减,在  $150\sim250\text{m/s}$  之间。

这是由于不同尺寸的雾化粒滴以高速撞击到双旋转盘的表面,瞬间铺展,然后在双旋转盘的离心力作用下离开。在双旋转盘之间的底部位置即轴向距离为 0.3~0.4m 区域,双旋转盘底部间隙较小,且粒滴极易受到外环境流场的影响,造成速度波动很大。气体压力越小,双旋转盘流型控制器下方扇形区域越小,如图 6 所示。由此可见,当雾化压力较小时,气体对金属熔体的雾化作用较小,已雾化的粒滴很少撞击到双旋转盘的表面,而是直接从双旋转盘流型控制器底部缝隙流出,汇集于正下方。

图 7 为不同雾化气体压力时双盘轴对称截面速度

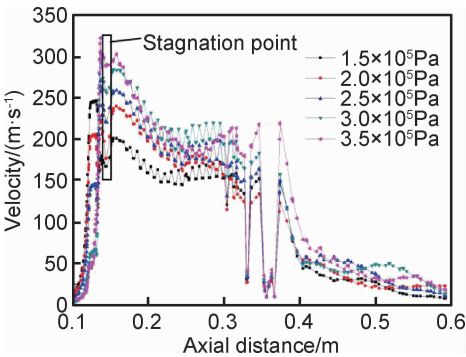


图 5 5 种气体压力下轴向速度曲线  
Fig. 5 Axis velocity distribution curves under five kinds of gas inlet pressures

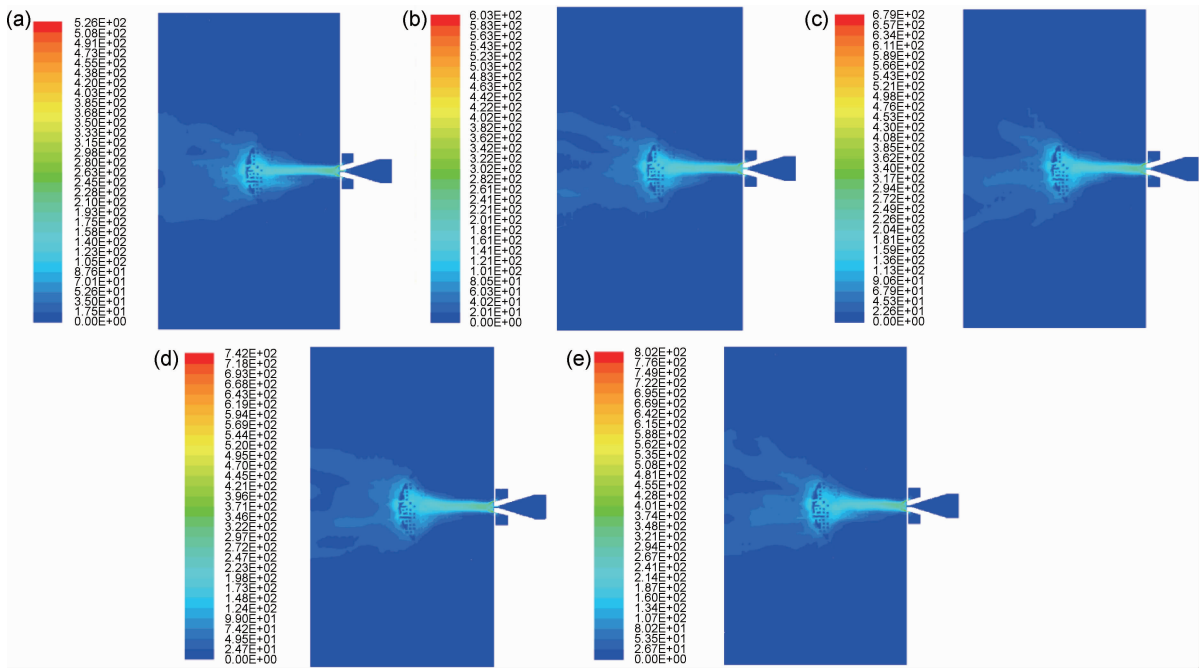


图 6 不同雾化气体压力时双盘轴对称截面速度流场  
(a)  $1.5\times10^5\text{Pa}$ ; (b)  $2.0\times10^5\text{Pa}$ ; (c)  $2.5\times10^5\text{Pa}$ ; (d)  $3.0\times10^5\text{Pa}$ ; (e)  $3.5\times10^5\text{Pa}$   
Fig. 6 Velocity flow field at the axial symmetrical section of double disks under different gas inlet pressures  
(a)  $1.5\times10^5\text{Pa}$ ; (b)  $2.0\times10^5\text{Pa}$ ; (c)  $2.5\times10^5\text{Pa}$ ; (d)  $3.0\times10^5\text{Pa}$ ; (e)  $3.5\times10^5\text{Pa}$



矢量图,可以看出,随着气体压力的增加,从气腔流出的气体速度增加,导流管底端出口周围涡流区越紊乱。导流管底端出口周围为涡流区(负压区),涡流区内气流沿中心轴接近导流管出口<sup>[18]</sup>。当涡流区接触从气腔流出的高速气体时,随着高速气流沿轴向向下流动交汇于距离导流管底端出口 6~10mm 处。在气流交

汇中心,部分气体反向向导流管底端出口运动,且气体压力越大,反向气流速度越大,阻碍导流管内金属熔体流出,极可能导致堵塞,使雾化不能顺利进行。当气体压力为  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时(图 7(e)),反向气流速度最大,阻碍了金属熔体流出,使金属熔体在导流管底部形成回流,即出现“反喷”现象。

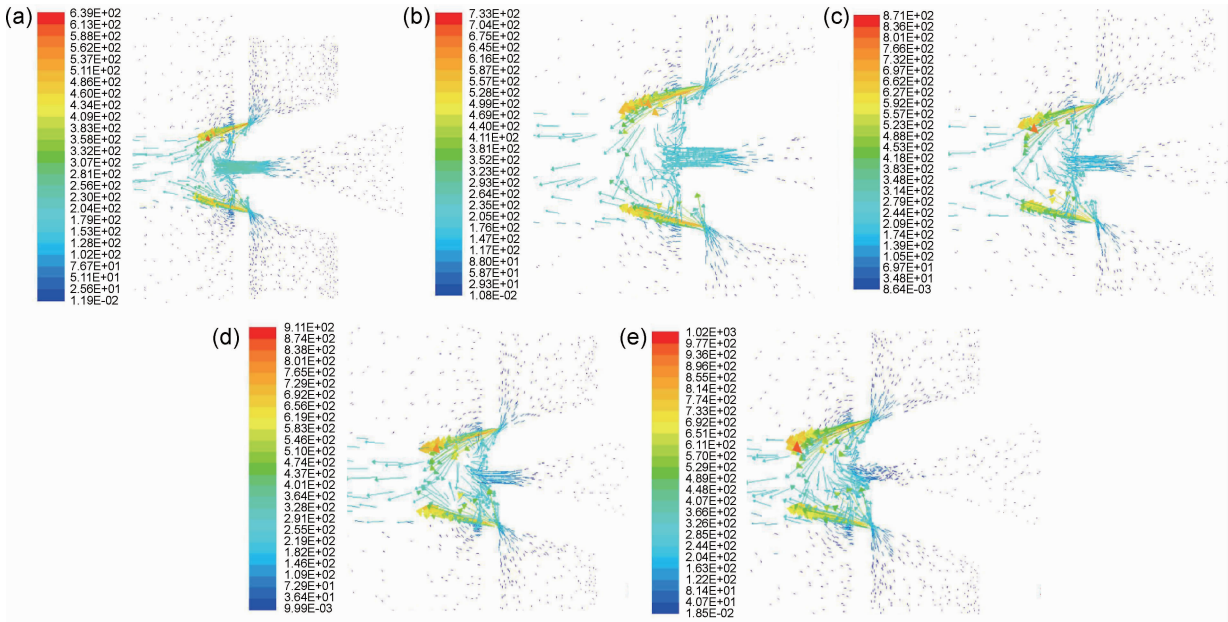


图 7 不同雾化气体压力时双盘轴对称截面速度矢量图

(a)  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (b)  $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (c)  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (d)  $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (e)  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

Fig. 7 Velocity diagrams at the axial symmetrical section of double disks under different gas inlet pressures

(a)  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (b)  $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (c)  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (d)  $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (e)  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

2.1.3 雾化气体压力对温度的影响

图 8 为不同雾化气体压力时双盘轴对称截面温度场分布,可以看出,不同气体压力下,相同截面的温度分布类似,雾化的粒滴撞击到双旋转盘的表面,且受到双旋转盘的离心作用,粒滴集中分布于双旋转盘流型控制器底部并偏向一侧,有利于粒滴在挤压轮的转动过程中均匀地沉积到轮槽内,由图 8 中的放大图可以看出,在雾化室内,随着气体压力的增大,导流管出口温度降低。在气体压力为  $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  时,金属熔体在导流管出口处部分凝固,使金属熔体不能从导流管出口顺利流出;当气体压力为  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时,整个导流管底部已凝固。当气体压力为  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时,Al-20Si 和 7075Al 合金的双盘轴对称截面温度场分布类似,说明雾化粒滴尺寸相同时,在飞行中合金粒滴凝固时相变潜热对温度场影响不大,如图 9 所示。在双盘中下部两侧各有一处涡流区,且受到双盘旋转方向的影响,一侧太明显的涡流区靠近双盘边缘,而另一侧涡流区的位置在双盘盘内,如图 10 所示。在双旋转盘上

部,双旋转盘轴对称截面的压力迹线方向几乎相同,说明气体压力与双旋转盘的转速无关,只约束粒滴沉积方向以及沉积坯长条宽度。

2.2 实验结果与分析

在本实验中,为简化实验过程,金属熔体直接喷射在平面上。图 11 为 5 种气体压力下沉积坯形貌图,可以看出,气体压力较小时,雾化作用较小,雾化粒滴中液相含量较多,且已雾化的粒滴很少撞击到双旋转盘的表面,而是直接从双旋转盘流型控制器底部缝隙流出,在中心速度较高的雾化气体及雾化颗粒的冲击作用下,由心部半固态组织转移至侧边,形成凹槽,造成沉积坯截面宽度变大,同时,沉积坯在冷却时存在再辉放热过程,表面及内部部分金属粒滴被迅速加热,枝晶间将发生重熔现象<sup>[23-24]</sup>,因此,孔洞较少,表面光亮。气体压力较大时,雾化作用较大,雾化粒滴尺寸较小,且固相含量较多,在沉积坯表面形成较薄的半液态层,再辉的热量较小,枝晶间重熔现象不明显,沉积坯正面有明显的“分层”现象。同时,沉积坯侧面长度较小,集

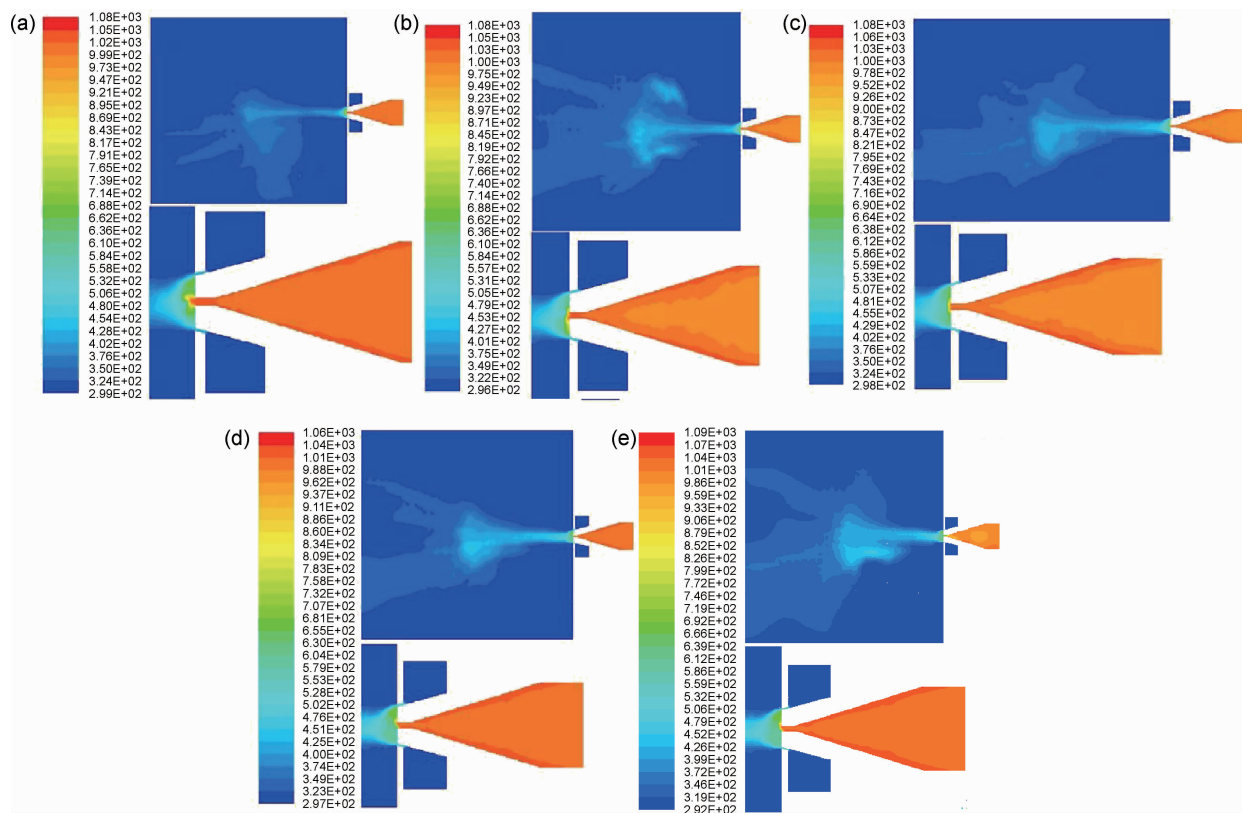


图 8 不同雾化气体压力时双盘轴对称截面温度场分布

(a)  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (b)  $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (c)  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (d)  $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (e)  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

Fig. 8 Temperature field distribution at the axial symmetrical section of double disks under different gas inlet pressures

(a)  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (b)  $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (c)  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (d)  $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; (e)  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

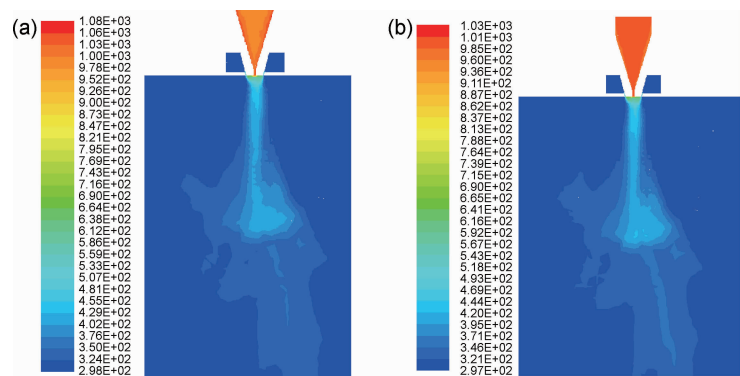


图 9 气体压力为  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时双盘轴对称截面温度场分布

(a) Al-20Si 合金; (b) 7075 铝合金

Fig. 9 Temperature field distribution at the axial symmetrical section of double disks under the gas inlet pressure of  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

(a) Al-20Si alloy; (b) 7075 Al alloy

中分布于雾化中心,多以片状粉末飞出,材料损耗严重;粒滴在飞行中发生严重氧化,因此,沉积坯较为灰暗。在气体压力为  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时,沉积坯表面较平整、圆滑,没有明显的氧化现象,雾化效果较好,且沉积坯的宽度与连续挤压机轮槽的宽度一致。实验过程中还发现,当气体压力为  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,在雾化开始时,金属熔体能顺利流出,但随后导流管底部受到气流的影响,温度降低,出现堵塞导流管现象(图 12),这与模拟结果一致。

### 3 结论

(1)对不同气体压力下约束喷射成形的流场特性进行数值模拟,结果表明:当雾化气体压力为  $2.5 \times$

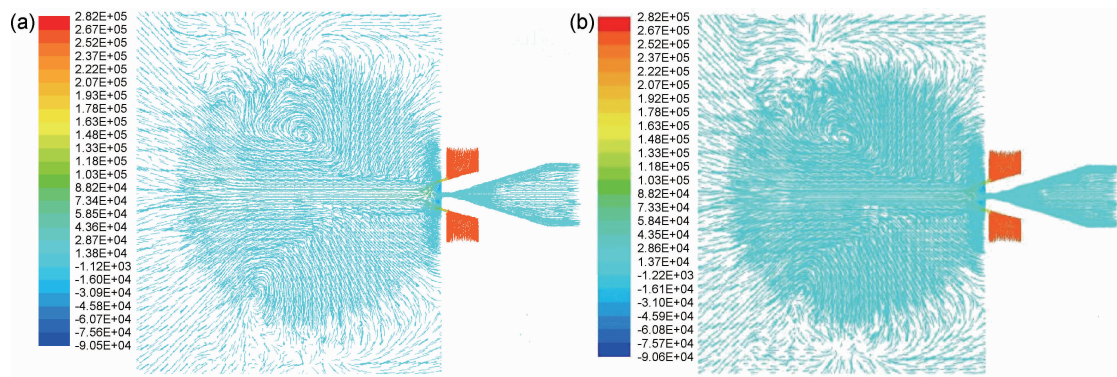


图 10 气体压力为  $2.5 \times 10^5$  Pa 时双盘轴对称截面总压力迹线分布

(a) 双盘转速 10rad/s; (b) 双盘转速 28rad/s

Fig. 10 Total pressure distribution at the axial symmetrical section of double disks under the gas inlet pressure of  $2.5 \times 10^5$  Pa (a) speed of double disks 10rad/s; (b) speed of double disks 28rad/s

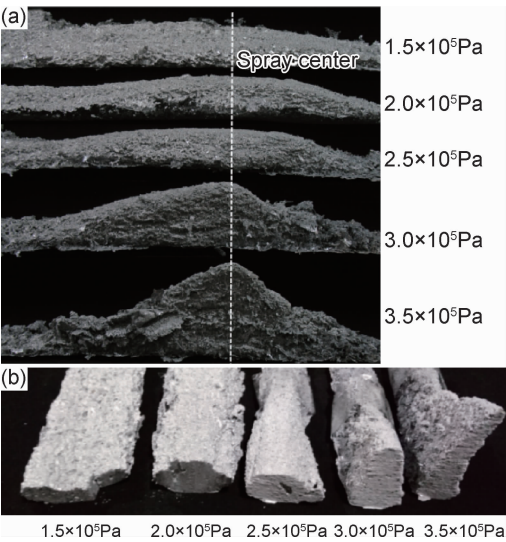


图 11 5 种气体压力下沉积坯形貌图

(a) 沉积坯侧面; (b) 沉积坯正面

Fig. 11 Surface morphology images of deposition under five kinds of gas inlet pressures (a) side of deposition; (b) front of deposition



图 12 气体压力为  $3.5 \times 10^5$  Pa 时导流管堵塞图

Fig. 12 Blocked delivery tube image under the gas inlet pressure of  $3.5 \times 10^5$  Pa

$10^5$  Pa, 熔体入口压力为  $2.0 \times 10^4$  Pa 时, 作用于熔体上的压强最小, 约为  $8.99 \times 10^3$  Pa, 金属熔体顺利流出, 雾化效果最佳。

(2) 实验与数值模拟结果均表明, 沉积坯集中分布于双旋转盘流型控制器底部并偏向一侧, 有利于粒滴在挤压轮的转动过程中均匀地沉积到轮槽内。当气体压力为  $2.5 \times 10^5$  Pa 时, 没有明显的氧化现象, 雾化效果较好, 且沉积坯的宽度与连续挤压机轮槽的宽度的匹配度较高。

参考文献

[1] 赵文军. 喷射沉积气体流场与雾化机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
ZHAO W J. Study on the gas flow field in spray deposition and the breakup mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[2] 温利军. 喷射成形液滴运动和传热过程及沉积坯的应力研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2008.  
WEN L J. Study of motion and transfer heat process of droplet and stress of billet[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2008.

[3] 古元军. 喷射成形新型雾化器设计的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.  
GU Y J. Research of new spray forming atomizer design[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.

[4] 汪创伟, 尹建成, 周静波, 等. 喷射沉积连续挤压制备 2A12 铝合金[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 957-963.  
WANG C W, YIN J C, ZHOU J B, et al. 2A12 aluminum alloy produced by spray forming Conform[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(4): 957-963.

[5] CHEN Y G, ZHONG Y, YIN J C, et al. Spray Conform 7075 Al[J]. RSC Advances, 2015, 5(118): 97612-97618.

[6] 李昊, 尹建成, 王宇锋, 等. 喷射沉积连续挤压 Al-20Si 合金的微观组织及磨损性能[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(2): 296-300.



- LI H, YIN J C, WANG Y F, et al. Microstructure and wear performance of Al-20Si alloy prepared by spray deposition and Conform[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 34(2): 296-300.
- [7] 张俊一, 尹建成, 李昊, 等. 喷射沉积连续挤压制备 Al-20Si 的参数[J]. 有色金属工程, 2015, 5(5): 24-28.
- ZHANG J Y, YIN J C, LI H, et al. Parameters of Al-20Si continuous preparation by spray-conform technology[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015, 5(5): 24-28.
- [8] 孙剑飞, 曹福洋, 崔成松, 等. 金属雾化过程中气体流动动力学行为[J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(2): 79-81.
- SUN J F, CAO F Y, CUI C S, et al. Dynamic behaviors of gas velocity field during metal atomization[J]. Powder Metallurgy Technology, 2002, 20(2): 79-81.
- [9] LI F X, LIU Y Z, XIAO W H, et al. Simulation of metal droplet events during gas horizontal atomization stage in the spray rolling of 7050 aluminum alloy[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2013, 33: 291-297.
- [10] 施立新, 李强. 雾化压力对冷却速率及冷却时间影响的定量分析[J]. 计算机与应用化学, 2013, 30(4): 431-434.
- SHI L X, LI Q. Quantitative analysis of the effect of atomization pressure on the cooling rate and cooling time[J]. Computers and Applied Chemistry, 2013, 30(4): 431-434.
- [11] 刘杨, 李周, 许文勇, 等. 喷射成形雾化器结构对流场的影响[J]. 粉末冶金技术, 2014, 32(2): 87-92.
- LIU Y, LI Z, XU W Y, et al. Flow fields simulation of nozzle construction of spray forming atomizer[J]. Powder Metallurgy Technology, 2014, 32(2): 87-92.
- [12] ZEOLI N, GU S. Computational simulation of metal droplet break-up, cooling and solidification during gas atomization[J]. Computational Materials Science, 2008, 43(2): 268-278.
- [13] 李新春, 杨明勇. 气体压力对雾化颗粒大小的影响[J]. 湖南有色金属, 2009, 25(6): 28-30.
- LI X C, YANG M Y. The influence of gas pressure on atomization size[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2009, 25(6): 28-30.
- [14] 唐增武, 曹福洋, 孙剑飞, 等. 喷射成形时雾化压力与静压头对雾化熔滴尺寸影响的理论分析[J]. 粉末冶金技术, 2006, 24(1): 13-17.
- TANG Z W, CAO F Y, SUN J F, et al. Effect of static head and pressure on atomization droplets size in spray forming: theory analysis[J]. Powder Metallurgy Technology, 2006, 24(1): 13-17.
- [15] MI J, FIGLIOLA R S, ANDERSON I E. A numerical simulation of gas flow field effects on high pressure gas atomization due to operating pressure variation[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 208(1): 20-29.
- [16] MATES S P, BIANCANIELLO F S, RIDDER S D. The effect of swirl on gas velocity decay in a generic annular close-coupled nozzle[M]. Hoboken, US: John Wiley & Sons Inc, 2003: 21-28.
- [17] 刘英莉, 尹建成, 郑大亮, 等. 一种与连续挤压机匹配的喷射沉积装置: CN203346464U[P]. 2013-12-18.
- LIU Y L, YIN J C, ZHENG D L, et al. Spray deposition device matched with continuous extrusion machine: CN203346464U[P]. 2013-12-18.
- [18] JEYAKUMAR M, GUPTA G S, KUMAR S. Modeling of gas flow inside and outside the nozzle used in spray deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1/3): 471-479.
- [19] 代继义, 赵玉刚, 周成柱. 气-固两相流双层雾化器上层锥角参数的数值模拟与优化设计[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(1): 15-18.
- DAI J Y, ZHAO Y G, ZHOU C Z. Numerical simulation and optimized design of upper taper angle parameter of gas-solid two-phase flow double-layer atomizer[J]. China Powder Science and Technology, 2016, 22(1): 15-18.
- [20] 张永安, 熊柏林, 张少明, 等. 喷射成型过程中雾化粒滴的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(增刊 1): 78-83.
- ZHANG Y A, XIONG B L, ZHANG S M, et al. Computer simulation of droplets in flight stage during spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(Suppl 1): 78-83.
- [21] ZEOLI N, TABBARA H, GU S. CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(24): 6498-6504.
- [22] 沈军, 蒋祖龄, 曾松岩, 等. 气体雾化过程的增压与吸动现象[J]. 粉末冶金技术, 1994, 12(1): 15-17.
- SHEN J, JIANG Z L, ZENG S Y, et al. Pressurization and aspiration phenomena in process of gas atomization[J]. Powder Metallurgy Technology, 1994, 12(1): 15-17.
- [23] LIU D M, HAO J Z, YE H Q. Modeling of the solidification of gas-atomized alloy droplets during spray forming[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 372(1/2): 229-234.
- [24] 张勇, 张国庆, 李周, 等. 喷射成形高温合金组织演变过程试验研究[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(增刊 2): 29-32.
- ZHANG Y, ZHANG G Q, LI Z, et al. Experiments concerning dendrite re-melting and its role in microstructure evolution of spray formed Ni superalloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(Suppl 2): 29-32.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874055); 云南省教育厅科学研究基金项目(2016ZZX041)

收稿日期: 2016-08-07; 修订日期: 2018-07-04

通讯作者: 尹建成(1978—), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事金属材料成形新技术的教学与研究, 联系地址: 云南省昆明市五华区学府路昆明理工大学(莲华校区)材料科学与工程学院(650093), E-mail: yjc\_2002@126.com

(本文责编: 寇凤梅)