

双级雾化过程的数值模拟^①

袁晓光 崔成松[†] 任露泉 李庆春[†]

(吉林工业大学工程仿生研究所, 长春 130025;

† 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要 通过双级雾化过程分析, 建立了雾滴经历两次破碎的飞行和冷却数学模型, 并进行了模拟计算; 利用模拟计算结果分析了雾化工艺参数, 并通过实验进行了初步的验证。结果表明: 该模型基本能预测双级雾化雾滴的飞行和冷却过程, 可为双级雾化工艺参数的选择提供理论依据。

关键词 雾化 数值模拟 雾滴

中图法分类号 TG146.2

双级雾化是由超音气体雾化和旋转盘雾化组合在一起的新型雾化工艺^[1]。雾化过程中金属液流经历了两次破碎, 因此, 制备出的粉末十分细小, 平均直径 10 μm 左右, 冷却速度高达 $(10^5 \sim 10^6) \text{ K/s}$ ^[2]。双级雾化过程中的二次破碎, 即气体雾化雾滴在旋转盘上的撞击破碎, 是该工艺获得超细粉末和高冷却速度的关键, 而雾化距离(气体雾化喷嘴至旋转盘的距离)是影响二次破碎效果的主要工艺参数, 适宜的雾化距离既可以使气体雾化雾滴充分破碎和获得良好的形貌, 又可使雾滴获得较高的冷却速度^[1]。因此, 确定适宜的雾化距离是优化双级雾化工艺参数的重要环节。然而, 适宜雾化距离受雾滴冷却状况、雾化气体压力、金属液流温度、冷却介质种类等因素的影响^[3], 无法精确确定。为此, 采用数值模拟的方法对雾滴的飞行和冷却过程进行了研究, 以便为优化雾化工艺参数提供依据, 并进行了初步实验验证。

1 数学模型

雾滴在雾化气体中的流动是一个非常复杂

的过程, 为了便于用数学模型描述, 首先进行简化问题的假设。主要假设为^[4]: ①熔融金属或雾滴破碎时均在雾化初期瞬间完成, 雾滴尺寸在后续过程不变; ②金属雾滴的形状为球形, 且假设雾滴是不可压缩的; ③不考虑雾滴在飞行过程中的碰撞融合, 同时忽略吸附在大雾滴表面的卫星雾滴影响; ④由于雾滴的 Biot 数较小(< 0.1), 可以忽略雾滴内部的温度梯度, 用集总参数模型(即: 牛顿传热方式)分析金属雾滴与气体之间的热量传输问题; ⑤假设雾化气体和金属雾滴的流动都是定常的。保持金属质量流率和气体质量流率不变时, 可以认为两相流是定常流动; ⑥由于一般雾化气体采用不活泼气体, 而且金属熔体温度不是特别高, 可认为雾化气体和金属熔体之间不发生化学反应。模型示意图见图 1。

1.1 雾滴飞行的动量方程

根据气体-雾滴的流动模型, 作用于单个雾滴的外力有重力和气流对它的拖拽力, 根据牛顿第二定律, 并假设飞行路线为直线, 且垂直向下, 可得到雾滴飞行的动量方程^[5]:

$$\frac{dV_d}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_m}\right) \cdot g - C_D \cdot \frac{3}{8R_d} \cdot$$

① 黑龙江省科学技术基金资助项目 收稿日期: 1998-10-26; 修回日期: 1998-12-28

袁晓光, 男, 36岁, 博士后, 副教授

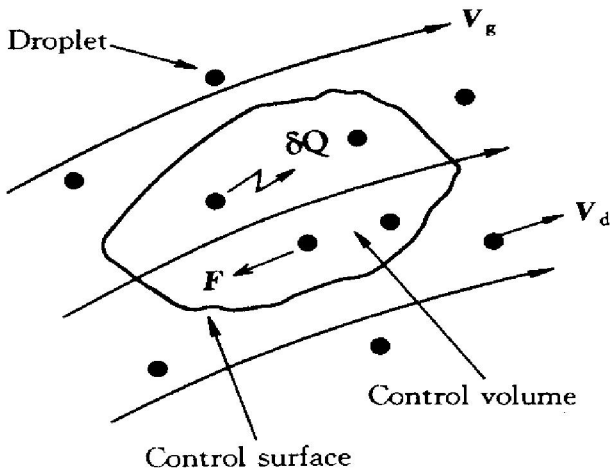


图1 雾化过程气体-雾滴的流动模型

Fig.1 Gas-droplet flow model in atomization process

$$\frac{\rho_g}{\rho_m} \cdot (V_d - V_g) \cdot |V_d - V_g| \quad (1)$$

式中 V_d , V_g 分别为雾滴和气流速度; ρ_m , ρ_g 分别为雾滴材料和气流密度; g 为重力加速度; C_D 为拖拽系数, 是雷诺数的函数, 可由 Kurten 公式确定^[6]:

$$C_D = f(Re) = 0.28 + \frac{6}{(N_{Re})^{0.5}} + \frac{21}{N_{Re}} \quad (2)$$

式中 $N_{Re} = \frac{V_d - V_g}{\nu_g} \cdot d$, ν_g 为气体的动力学粘度。

1.2 金属雾滴的能量方程

金属雾滴与环境的热量传输主要包括雾滴与雾化气体的对流换热和雾滴的辐射散热, 其散热速度可表示为^[4]:

$$\delta Q_d = h \cdot (4\pi \cdot R_d^2) \cdot (T_d - T_g) + 4\pi \cdot R_d^2 \cdot \sigma_g \cdot \varepsilon \cdot (T_d^4 - T_w^4) \quad (3)$$

式中 δQ_d 为雾滴向环境散热速率; h 为雾滴与雾化气体之间的对流换热系数; T_d , T_g , T_w 分别为雾滴, 气流和雾化室内壁温度; σ_g 为 Stefan 常数, 为辐射率。

其中对流换热系数是影响散热速度的主要因素, 该参数主要与 Reynolds 数有关, 其经验关系通常表示为^[7]

$$h = K_g \cdot (2 + 0.6Re^{0.5} \cdot P_r^{0.33}) \cdot$$

$$\frac{(C_g/C_g)^{0.26}}{2R_d} \quad (4)$$

式中 Prandtl 数 $P_r = \eta_g/\alpha$; $\alpha = K_g/(C_g \cdot \rho_g)$; K_g 为气体导热率; C_g , C_g 分别为气体温度 $(T_g + T_d)/2$ 和 T_g 时的热容。

1.3 雾化气体的速度方程

气体雾化过程中, 雾化气体由喷嘴喷出后, 在喷嘴出口处速度最大, 此后不断衰减, 其衰减规律为

$$V_g = A \cdot (B)^z \quad (5)$$

式中 z 为距雾化喷嘴的距离, mm; A , B 为与雾化喷嘴有关的常数, 本文雾化条件下分别为 432 和 0.993^[8]。

1.4 二次破碎后雾滴飞行速度的近似处理

假设在旋转盘静止时, 二次破碎后的雾滴沿着与盘成 45° 角的方向溅出(实验观察证明了这一现象), 当旋转盘以角速度 ω 转动时, 其飞行方向变为与盘成 θ 角, 则飞出速度表达式为

$$V_e = \omega \cdot r \cdot [\cos\theta + \sin\theta / \operatorname{tg}(\theta - 45)] \quad (6)$$

2 模拟参数的处理

双级雾化发生雾滴二次破碎时, 雾滴与旋转盘接触而发生热传导。验算表明: 直径为 80 μm 的雾滴, 以 160 m/s 的速度撞击旋转盘, 变为厚 2 μm 的薄片所需时间约在 10~6 s 数量级, 考虑到快凝制带的最大冷却速度为 10⁶ K/s 数量级, 雾滴温度下降仅约几度, 故雾滴与盘接触发生的传热可忽略。因此, 二次破碎的主要特征是颗粒尺寸发生突变, 同时飞行速度也改变其大小和方向。颗粒尺寸的突变可在上述数学模型中实现。二次破碎后的雾滴是沿与旋转盘成很小的角度方向飞离雾化气体的射流区, 这一阶段雾滴周围的气体与气体雾化阶段相比运动速度相对较低, 可看成雾滴是在几乎静止的气体中飞行, 其初始速度约为 V_e 。同样, 二次破碎后的雾滴冷却过程仍适合用气体

雾化阶段的数学模型进行计算。

雾化过程中雾滴凝固冷却重要参数之一是换热系数 h 。由于雾化过程中喷入的冷却剂(本文为水),使雾化室内的气体中弥撒大量水雾,提高了雾化气体的换热系数。此时,雾化气体与雾滴之间的热交换十分复杂,其中包括混合气体与雾滴之间的对流换热,部分水珠在雾滴表面发生沸腾而引起的换热,因此,换热系数很难精确计算。考虑到雾化时喷入的冷却剂量远大于金属熔体的流量,为了简化计算,可忽略沸腾引起的热交换,此时,可将雾化气体看成饱和水蒸汽,选取的热物性参数分别为^[9]: $K_g = 0.0246 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$, $P_r = 1.060$, $\gamma_g = 2.16 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho_g = 0.5863 \text{ kg}/\text{m}^3$, $C_p = 2.06 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

利用前面建立的数学模型,以 Al-20Si 合金为例计算双级雾化过程的雾滴飞行速度和冷却过程。计算中采用的 Al-20Si 合金热力学参数列于表 1 中。雾化温度为 1173 K,雾化室内壁和雾化气体的温度均定为 323 K。

表 1 Al-20Si 合金的热力学参数^[10,11]

Table 1 Thermophysical properties of Al-20Si alloy^[10,11]

Parameters	Value	Unit
ρ_m	2 300	kg/m^3
C_p	2.6×10^6	$\text{J}/\text{m}^3\text{K}$
K_m	90	W/mK
ΔH	9.5×10^9	J/m^3
T_m	980	K
ε	0.15	—
S	1.74	—
η_m	4.2×10^{-7}	m^2/s
γ_m	0.84	J/m^2

3 模拟计算结果与分析

3.1 气体雾化阶段雾滴模拟计算结果

图 2 和图 3 是气体雾化阶段(2 次破碎发生前),雾滴在雾化气体中流动的计算结果。

由雾滴飞行距离与飞行速度的关系(图 2)可见,气体雾化雾滴的飞行过程经历了先加速

后减速两个飞行阶段。雾滴尺寸不同加速期间达到的最高速度不同,雾滴尺寸越小达到的最高速度越大,同时,雾滴尺寸越小减速运动开始越早;减速一定距离后,不同尺寸雾滴的飞行速度几乎相等。

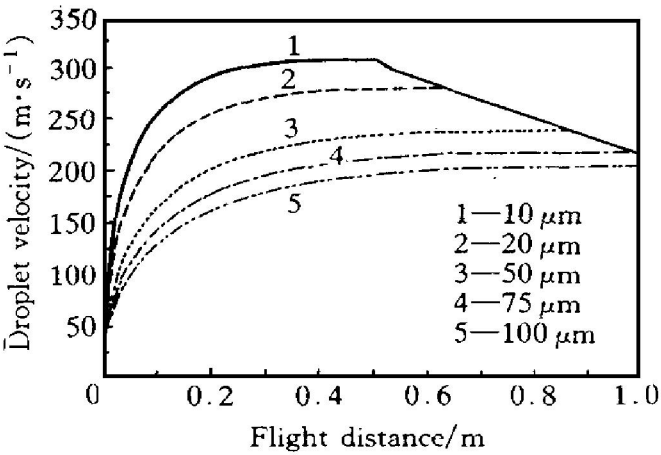


图 2 雾滴飞行速度与飞行距离的关系

Fig. 2 Relationship between droplet velocity and flight distance

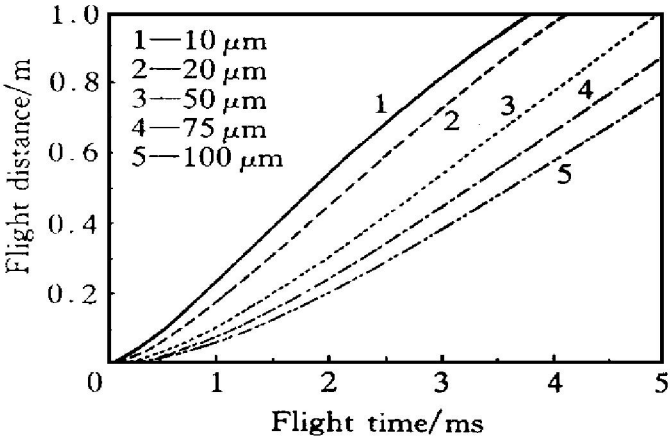


图 3 雾滴飞行距离与飞行时间的关系

Fig. 3 Relationship between droplet flight distance and time

图 4 和图 5 是气体雾化阶段雾滴冷却的计算结果。可以看出,尺寸较大的雾滴冷却时明显经历了 3 个阶段。第一阶段合金失去过热;第二阶段合金开始凝固,由于结晶潜热的释放,冷却曲线出现了平台;第三阶段是凝固后的雾滴进一步冷却到室温。雾滴尺寸越小冷却的第二阶段越不明显,当雾滴尺寸小于 20 μm 时,冷却曲线几乎观察不到结晶潜热释放引起的平台,显然雾滴的冷却速度相当高,使凝固

释放出的潜热迅速散失, 导致再辉现象极不明显, 见图4。雾滴飞行距离与凝固体积分数的关系表明, 雾滴尺寸越小, 出现固相时的飞行距离越短且固相分数的增加速度越快, 见图5。

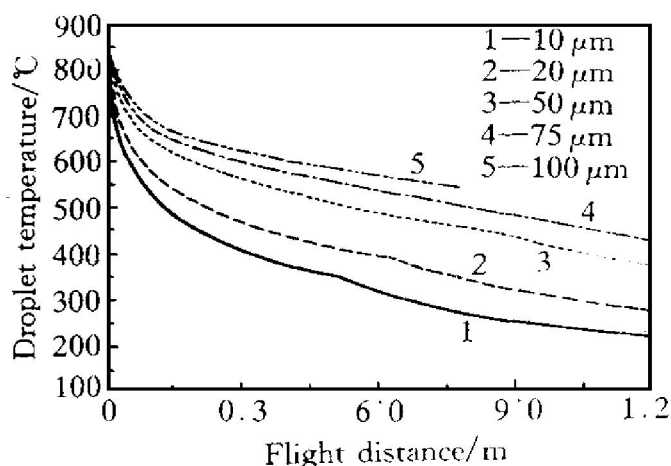


图4 雾滴温度与飞行距离的关系

Fig. 4 Relationship between droplet temperature and flight distance

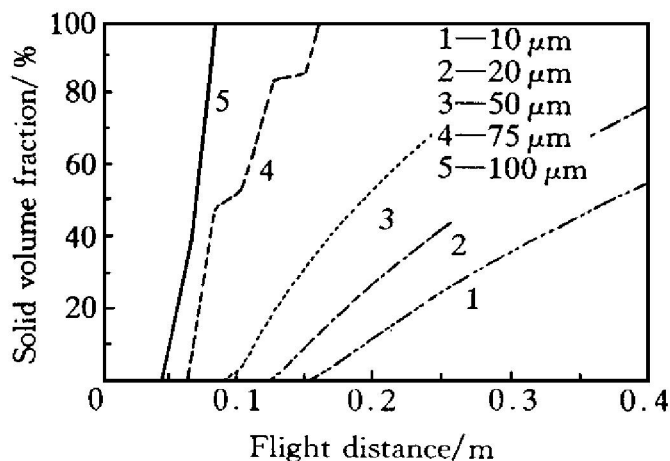


图5 雾滴固相分数与飞行距离的关系

Fig. 5 Relationship between droplet solid volume fraction and flight distance

3.2 二次破碎后的雾滴模拟计算结果

图6至图9是发生二次破碎雾滴的飞行速度及冷却曲线。比较可见, 二次破碎发生时, 雾滴飞行速度发生突变, 数值减小, 见图6。同时, 热交换系数也发生变化, 比二次破碎前数值增大, 见图7。由于二次破碎引起雾滴直径突然变小, 冷却曲线也出现了转折, 见图8。冷却速度在冷却曲线的转折点突然增大, 比二次破碎前增加了近一个数量级, 而且在后续的

冷却过程中一直保持高于未发生破碎的雾滴, 见图9。雾滴直径变小和热交换系数的增大是双级雾化冷却速度提高的主要原因。

3.3 模拟结果分析

双级雾化获得良好雾化效果取决于二次破碎程度^[3]。二次破碎驱动力主要是雾滴发生破碎时的动量, 飞行速度越快破碎越易; 而阻力来自雾滴金属液的粘度和表面张力。由图2可

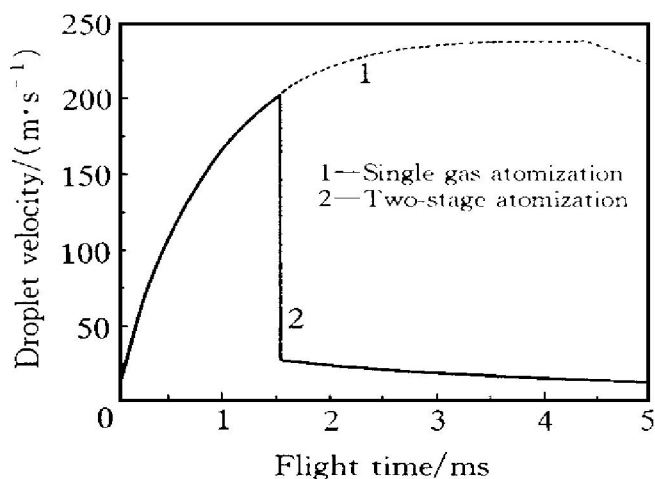


图6 直径为75 μm 的气体雾化雾滴发生二次破碎的飞行速度与时间关系

Fig. 6 Relationship between flight velocity and time of a gas droplet with a diameter of 75 μm at secondary fragmentation process

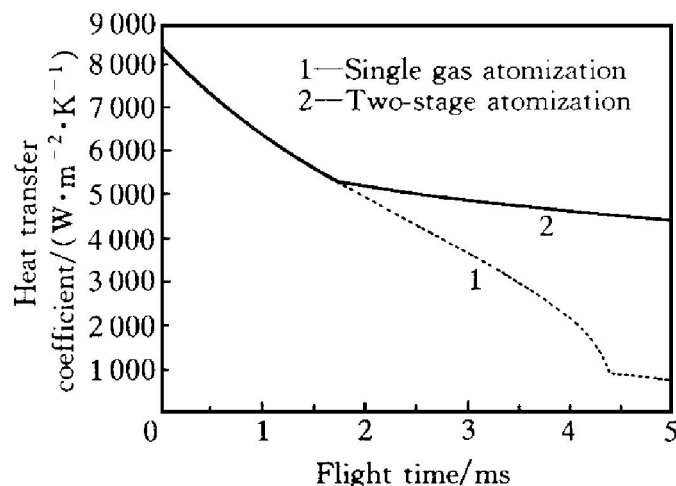


图7 直径为75 μm 的气体雾化雾滴发生二次破碎的热交换系数与时间关系

Fig. 7 Relationship between heat transfer coefficient and time of a gas droplet with a diameter of 75 μm at secondary fragmentation process

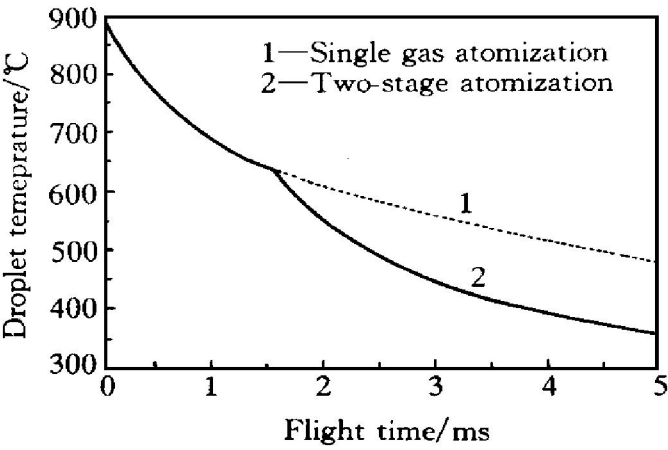


图 8 直径为 $75\text{ }\mu\text{m}$ 的气体雾化雾滴发生二次破碎的温度与飞行时间关系

Fig. 8 Relationship between temperature and flight time of droplet with $d\text{ }75\text{ }\mu\text{m}$ at secondary fragmentation process

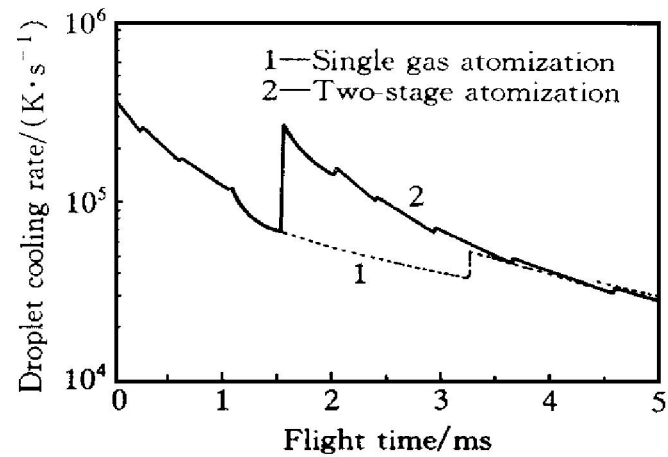


图 9 直径为 $75\text{ }\mu\text{m}$ 的气体雾化雾滴发生二次破碎的冷却速度飞与行时间的关系

Fig. 9 Relationship between cooling rate and flight time of droplet with $d\text{ }75\text{ }\mu\text{m}$ at secondary fragmentation process

知,雾滴的飞行速度经过一段加速后才达最大值,而雾滴的温度经历一定时间后会迅速降低并发生凝固。因此,保证尽可能大的破碎动力

和尽可能小的破碎阻力是相互矛盾的。

根据图 2、图 4 和图 5 的模拟计算结果,在本文选取的雾滴尺寸范围内,雾滴达到最高飞行速度时均要飞行 0.5 m 以上,而这时多数雾滴已完全凝固,即使直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴,其固相分数也达到了 70% 以上,此时发生二次破碎几乎不可能。这种情况下,工艺参数的选择要综合考虑雾滴的飞行速度和雾滴温度两个因素,即雾滴不但具有足够的飞行速度,又要不发生凝固或凝固量很少。通常情况下,超音速气体雾化铝合金的雾滴平均直径约 $80\text{ }\mu\text{m}$ ^[6],由计算可知其飞行达到最大速度的距离接近 0.5 m,而这时雾滴已完全凝固,因此,雾化距离不能选在飞行速度的最高点。作者认为,这种情况下的雾化距离应选在雾滴即将发生凝固或凝固量很少的时刻。

为了对上述分析结果进行验证,本文选取两个雾化距离对 Al20Si 合金进行了双级雾化。雾化距离分别为 0.2 和 0.3 m,其它工艺参数见表 2。

图 10 是不同雾化距离条件下的粉末粒度分布曲线。由图可见,雾化距离为 0.2 m 时,获得的粉末粒度明显比雾化距离为 0.3 m 的细小。图 11 是两种工艺下粉末的颗粒形貌。可以看出,雾化距离为 0.2 m 时,粉末形状多为长条形;而雾化距离为 0.3 m 时,粉末形状极不规范,有未完全破碎的粉末(图 11),反映出雾滴温度过低导致雾化效果和雾滴形貌的恶化。

为了利用模拟计算分析雾化实验结果,首先测定了上述雾化工艺条件下不发生二次破碎的雾滴平均直径,约 $75\text{ }\mu\text{m}$ 。为此,根据模拟计算结果图 2~ 图 4,得到了雾化距离分别为 0.2 和 0.3 m 时的雾滴状态,见表 3。

表 2 双级雾化工艺参数

Table 2 Technological parameters of two-stage atomization

Atomization radius / mm	Atomization gas	Atomization gas pressure / MPa	Melt temperature / K	Atomization distance / m	Delivery tube diameter / mm	Rotative velocity / min
150	N ₂	1.5	1173	0.2/0.3	3.8	4 000

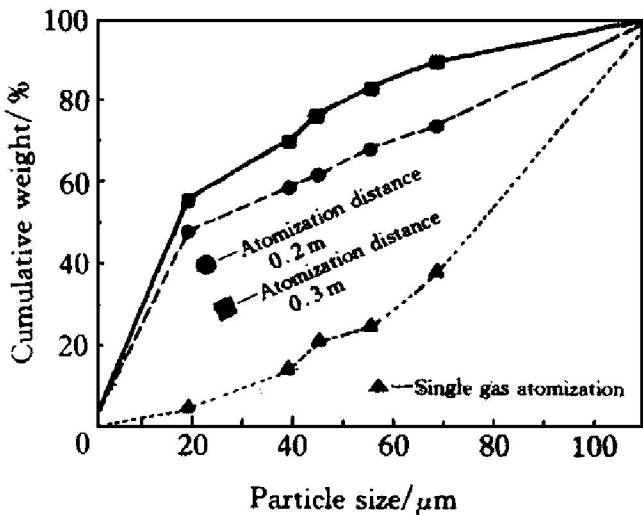


图 10 不同雾化距离下粉末粒度分布

Fig. 10 Cumulative weight distribution of powders at various atomization distances

表 3 不同雾化距离下雾滴所处状态

Table 3 State of droplets at various atomization distances

Atomization distance / m	Flight velocity / (m·s ⁻¹)	Droplet temperature / K	Solid fraction / %
0.2	180	893	30
0.3	195	853	60

由雾滴状态可知, 虽然雾滴飞行 0.3 m 获得的速度比 0.2 m 的高约 15 m/s, 但雾滴温度却低近 40 K, 固相分数多 30%, 说明雾化距离增大引起的雾滴破碎阻力增大大于破碎动力的增加, 这将导致粉末粒度增大和形状的不规范。另外, 文献[2] 利用 Al-4.5Cu 合金二次枝晶间距实测的双级雾化冷却速度, 也与本文模拟结果接近。可见, 模拟结果与实验是相符的, 即模型可作为预测雾化工艺参数的依据。

结合模拟和实验结果, 对于二次破碎适宜雾化距离的选择可以得到这样的结论: 二次破碎发生时间对雾化效果十分重要, 过早地发生二次破碎, 雾滴飞行速度低, 破碎动力小, 破碎效果差; 而二次破碎时间过迟, 雾滴已发生凝固, 破碎困难, 且粉末形状极不规范。因此, 二次破碎发生的最佳时机选在雾滴处于微过热或微过冷状态。

4 结论

(1) 雾滴在气体雾化阶段凝固冷却时, 冷却曲线存在由凝固潜热释放引起的平台; 雾滴尺寸越小, 平台越不明显。

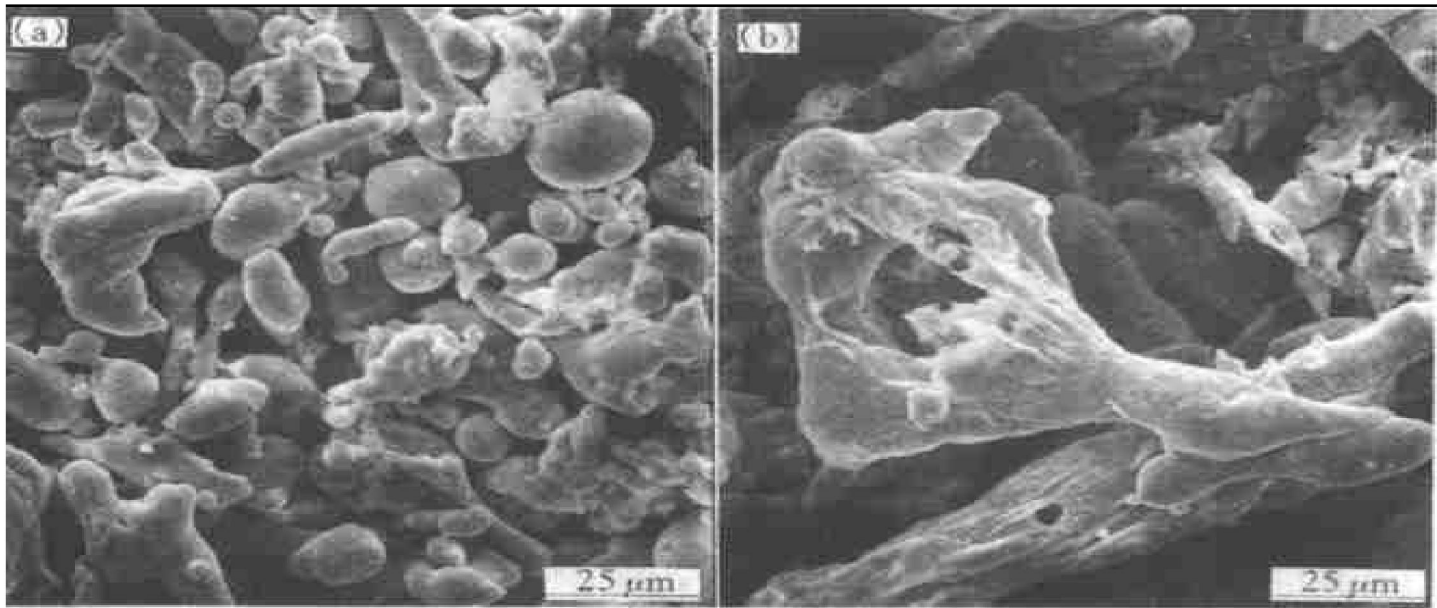


图 11 不同雾化距离下粉末形貌

Fig. 11 Morphologies of powder at various atomization distances

(a) —0.2 m; (b) —0.3 m

(2) 与单级气体雾化相比, 双级雾化的二次破碎引起雾滴飞行速度和尺寸突变, 热交换系数增大, 冷却速度增加, 这是双级雾化高冷却速度的主要原因。

(3) 本文模拟计算结果可作为确定双级雾化工艺参数的依据, 双级雾化的主要工艺参数—雾化距离, 可由气体雾化阶段雾滴飞行速度和雾滴凝固冷却进程决定。

(4) 雾化实验结果与模型预测结果基本相符, 说明本模型能反映双级雾化的实际过程。

REFERENCES

- 1 Yuan Xiaoguang(袁晓光), Xu Daming(徐达鸣) and Li Qingchun(李庆春). The Chinese Journal of Non-ferrous Metals(中国有色金属学报), 1997, 7(Suppl. 1): 330.
- 2 Yuan Xiaoguang(袁晓光), Xu Daming(徐达鸣) and Li Qingchun(李庆春). Acta Metall Sinica(金属学报), 1996, 32(10): 1034.
- 3 Yuan Xiaoguang(袁晓光). PhD Dissertation, (in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 1997: 70.
- 4 Cui Chengsong(崔成松). PhD Dissertation, (in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995: 45.
- 5 Peng Yichuan, Xu Kuangdi and Fan Yangyi. Flow Phenomenon of Metallurgical Fluid. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 342.
- 6 Li Yuezhong(李月珠). Rapid Solidification Technique and New Materials(快速凝固技术及新材料). Beijing: National Defence Industry Press(国防工业出版社), 1993: 29.
- 7 Gutierrez miravete E, Lavernia E J *et al.* Metall Trans, 1989, 20A: 71.
- 8 Shen Jun(沈 军). PhD Dissertation, (in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 1993: 56.
- 9 Yang Shiming(杨世铭). Heat Transfer Theory(传热学(第二版)), Beijing: Higher Education Press, 1987: 444.
- 10 Rappaz M and Thevoz PH. Acta Metall, 1987, 35(7): 1487.
- 11 Thevoz Ph, Desbiolles J L and Rappaz M. Metall Trans, 1989, 20A: 311.

COMPUTER SIMULATION OF DROPLETS DURING TWO-STAGE ATOMIZATION PROCESS

Yuan Xiaoguang, Ren Luquan, Cui Chengsong[†] and Li Qingchun[†]

The Research Institute for Engineering Bionics

Jilin University of Technology, Changchun 130025, P. R. China

[†] *Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*

ABSTRACT A computer model has been developed to describe the dynamic and thermal behavior of droplets in fragmentation process based on the studies on two stage atomization process. According to the model, the dynamic and thermal behavior of Al-20Si alloy droplets were calculated, and the technological parameter of two-stage atomization was discussed. The calculated result was also verified by atomization testing.

Key words atomization computer simulation droplet

(编辑 朱忠国)