

文章编号:1000-6893(2007)03-0719-05

## 液滴喷射过程流场和温度场的数值模拟

李莉<sup>1</sup>, 齐乐华<sup>1,2</sup>, 杨方<sup>1</sup>, 罗俊<sup>1</sup>, 蒋小珊<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

(2. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

### Numerical Simulations of Flow Field and Temperature Field for Droplet Spray Process

LI Li<sup>1</sup>, QI Le-hua<sup>1,2</sup>, YANG Fang<sup>1</sup>, LUO Jun<sup>1</sup>, JIANG Xiao-shan<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Education Ministry Key Laboratory of Modern Design and Integrated Manufacturing Technology, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘要:** 建立了液滴喷射过程流场和温度场的计算模型,研究了在外加周期性正弦扰动作用下,石蜡液滴形成过程的流场和温度场及其变化情况,给出了不同扰动频率下所形成液滴的形态及其变化规律,得出了比较均匀的液滴流,指出扰动频率对液滴的形成及其均匀性具有重要影响。模拟结果与文献中的实验结果吻合较好。

**关键词:** 液滴; 喷射; FLUENT; 数值模拟

**中图分类号:** V261 **文献标识码:** A

**Abstract:** The changes of flow field and temperature field for wax droplet formation process by external periodic sinusoidal disturbance are studied based on computational fluid dynamics software FLUENT. The morphology of droplets at different disturbance frequencies is simulated, and the uniform droplet stream is obtained. By simulation, it is known that the disturbance frequency has a good effect on the droplet formation and its uniformity. The numerical results agree well with the experimental ones in the literature.

**Key words:** droplet; spray; FLUENT; numerical simulation

均匀液滴喷射技术是近年来发展起来的快速成形新技术,在微电子、生物医学、微光学、制粉等领域均有广泛应用。在快速成形结构件方面,该方法能够直接沉积金属材料,在航天、航空及民用领域具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。该工艺的基本原理为<sup>[2]</sup>:从喷嘴内喷出的金属射流在压电元件的振动作用下,离散为等间距的均匀液滴流,对充电液滴进行电场偏转,并利用先进的计算机控制系统控制基板的运动,使液滴在基板上准确定位,逐点逐层累加,从而成形出复杂的几何造型。而得到稳定的均匀液滴流是该技术的关键和难点,只有当扰动频率为最优频率时,才能得到均匀的液滴流。由于影响最优频率的因素众多,很难通过大量的实验加以确定。数值模拟不仅可以直观显示各参数的影响作用,还具有节省实验成本、易于实现等诸多优点。

Heng-Chuan Kan 等<sup>[3]</sup>利用商业计算流体力

学软件对单粒径液滴(Mono-Sized Droplet, MSD)的形成进行了数值模拟,得到了扰动频率与液滴形成之间的关系,但没有考虑传热对液滴形成及其均匀性的影响。文献[4]利用运动质点半隐式法(Moving Particle Semi-implicit Method, MPS)对射流断裂进行了二维数值模拟,得出在重力和非重力条件下,Weber数和Froude数对射流断裂长度和液滴尺寸的影响,但忽略了黏性的作用,且未考虑射流周围流体的影响,也没有考虑温度的影响。文献[5]对射流的断裂情况进行了数值模拟,得出初始扰动幅值对水和甘油水溶液的射流断裂形态具有显著影响。这些文献所模拟的流体仅限于常温下为液态的流体(如水和水溶液),并没有考虑实际喷射成形过程中温度场的变化情况,而实际上在液滴成形过程中温度场的控制对成形制件的质量具有重要影响<sup>[6]</sup>。针对上述问题,本文利用FLUENT软件,对石蜡液滴形成过程的流场和温度场进行了数值模拟,给出了不同扰动频率下所形成液滴的形态、温度及其变化规律,得出了比较均匀的液滴流,对液滴沉积增

收稿日期:2006-02-22; 修订日期:2006-08-10

基金项目:航天支撑基金; 国防基金(9140A18040106HK0311)

通讯作者:齐乐华 E-mail:qilehua@nwpu.edu.cn

材制造工艺的实现和合理选取工艺参数具有指导意义。

## 1 流动控制方程组

液滴沉积增材制造工艺的流场和温度场是二维轴对称非稳态问题,其流动基本方程可以用连续方程、动量方程和能量方程表示<sup>[7-9]</sup>。连续方程的形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (1)$$

式中: $x$ 为轴向坐标; $r$ 为径向坐标; $v_x$ 为轴向速度; $v_r$ 为径向速度; $S_m$ 为质量源项。

动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \quad (2) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = \\ - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right) \right] - \\ 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \frac{v_x^2}{r} + F_r \quad (3) \end{aligned}$$

式中: $p$ 为静压; $F_x$ 为轴向体力; $F_r$ 为径向体力。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (4)$$

能量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \mathbf{v}(\rho E + p) = \\ \nabla \cdot \left[ k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\bar{\mathbf{c}}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v}) \right] + S_h \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $k_{\text{eff}}$ 为有效导热系数; $S_h$ 为热源(包括辐射生成热)。

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (6)$$

由于考虑到液滴喷射时涉及气液两种流体,并且属于射流断裂问题,选用 VOF 两相流模型,该模型基于两种流体间的不相渗透性。附加方程为两相流模型的体积分数方程,液相的体积分数方程为

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_2 = \frac{S_{\alpha_2}}{\rho_2} \quad (7)$$

气相的体积分数为

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 \quad (8)$$

控制方程的计算基于体积分数平均参数(密度、黏度等),体积分数平均密度为

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (9)$$

体积分数平均黏度为

$$\mu = \alpha_2 \mu_2 + (1 - \alpha_2) \mu_1 \quad (10)$$

## 2 关键技术问题

液滴沉积增材制造工艺的喷射原理如图 1 所示。坩埚内的液体材料在坩埚内外气体压差的作用下,从坩埚底部的喷嘴内喷出,形成液体射流,在外加周期性正弦扰动作用下,射流断裂形成液滴流。模拟所用坩埚、喷嘴、振动杆和振动盘的尺寸见图 2。

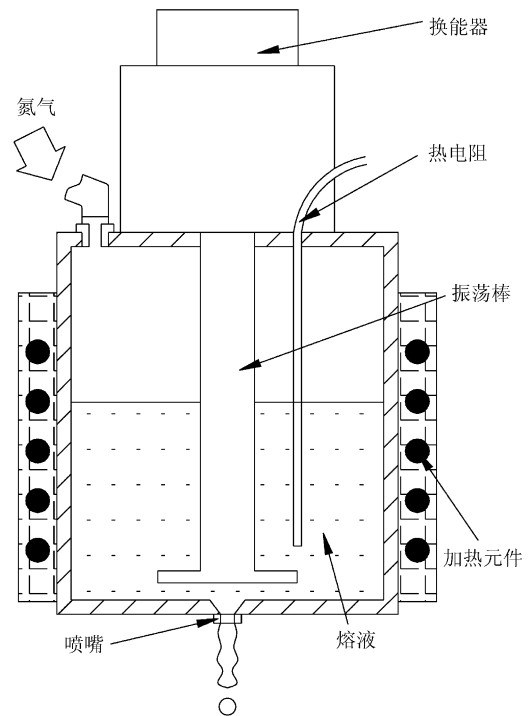


图 1 喷射原理图

Fig. 1 Schematic of spray principle

模拟区域包括坩埚内流体、喷嘴内流体和环境部分。由于在喷射过程中,各部分流体始终保持轴对称,所以液滴沉积增材制造工艺流程场和温度场的求解,实际上是一个二维轴对称问题。采用专用的前处理软件 GAMBIT 进行建模和网格划分,考虑计算精度和效率,将喷嘴和环境部分划分为四边形结构网格,坩埚和喷嘴的接口处采用逐渐过渡的方法划分为四边形非结构网格。模型及网格划分见图 3,共 61 361 个网格单元。

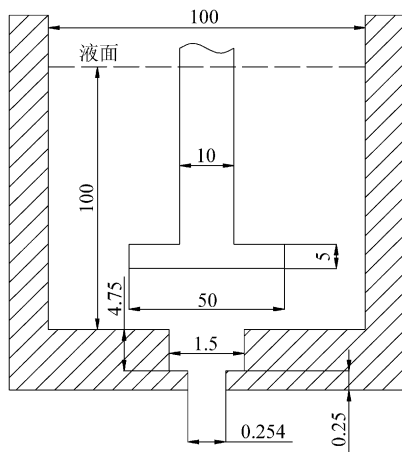
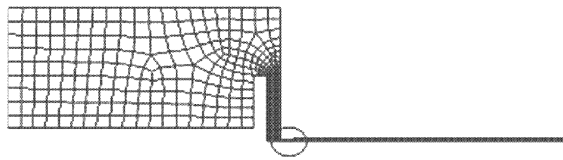
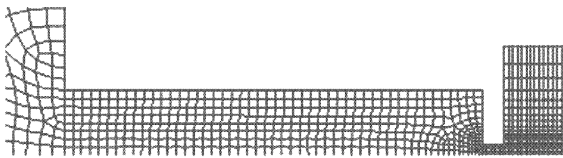


图2 坩埚和喷嘴尺寸图(单位:mm)

Fig. 2 Sizes of crucible and orifice (Unit:mm)



(a) 模拟区域网格图



(b) 图(a)的局部放大

图3 模拟区域网格图

Fig. 3 Mesh of simulation domain

采用 FLUENT 求解器求解控制方程组,选用 Body Force Weighted 算法进行压力离散,PI-SO 算法进行压力-速度耦合离散,First Order Upwind 算法进行动量方程对流项离散。

### 2.1 边界条件

参考压强设为 101 325 Pa,环境气体流出表面压强设为 0,则坩埚内液面的压强即为喷射压强。坩埚壁和喷嘴壁温度为 341 K,环境气体温度为 300 K,认为振动杆和振动盘绝热。

### 2.2 材料物性值

模拟所用材料(石蜡)和环境气体(空气)的物性值见表 1。石蜡的吸收系数取  $0.9^{[10]}$ ,空气取 0;认为石蜡的固相线和液相线一致,均为其熔点。

表 1 模拟使用的物性值

Table 1 The physical properties used in simulation

材料	石蜡	空气
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	846	1.16
比热/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$ )	2 542.9	1 006.43
导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}$ )	0.167	0.024 2
黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	0.006 19	$1.789 4 \times 10^{-5}$
吸收系数/( $\text{L} \cdot \text{m}^{-1}$ )	0.9	0
熔化热/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.173 6	
固相线/K	336	
液相线/K	336	
表面张力/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	0.028 9	

### 2.3 周期性扰动的实现

周期性正弦扰动的位移为

$$D = A \sin(2\pi ft) \quad (11)$$

式中: $A$  为扰动振幅; $f$  为扰动频率; $t$  为时间。

对式(11)求导,得到振动杆和振动盘的运动速度为

$$v = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \quad (12)$$

数值模拟时按照各时间的速度值对振动杆和振动盘的位置自动进行更新。

### 2.4 热辐射计算

考虑计算精度和成本,选用离散传递辐射模型(DTRM),认为以一定范围的固体角离开表面单元的辐射可以用一条射线近似表示,则沿着路径  $ds$  的辐射强度  $dI$  可以表示为<sup>[11,12]</sup>

$$\frac{dI}{ds} + aI = \frac{a\sigma T^4}{\pi} \quad (13)$$

式中: $a$  为气体吸收系数; $I$  为辐射强度; $T$  为气体温度; $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,其值为  $5.672 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$ 。

如果  $a$  沿着射线等值,则将上式积分

$$I(s) = \frac{\sigma T^4}{\pi}(1 - e^{-as}) + I_0 e^{-as} \quad (14)$$

式中: $I_0$  为路径初始位置的辐射强度。

在每个网格单元内,通过叠加各条射线的辐射强度来计算辐射能量源。

## 3 模拟结果与分析

利用计算流体力学软件 FLUENT 对液滴喷射过程的流场和温度场进行了数值模拟。所加喷射压强为 17.5 kPa,形成的射流直径略小于喷嘴直径(约为喷嘴直径的 0.95 倍),在喷嘴以下 10 cm 处未断裂,射流速度约为 4.56 m/s。对上述射流施加周期性正弦扰动,扰动振幅为  $0.2 \mu\text{m}$ ,

扰动频率分别为 3 400 Hz, 3 500 Hz, 3 600 Hz, 3 700 Hz, 3 800 Hz, 所形成的石蜡液滴的形态如图 4 所示。从图中可知, 当扰动频率为 3 700 Hz 时, 液滴最均匀, 在喷嘴以下 10 cm 范围内, 不仅液滴大小一致, 而且间距一定。当扰动频率为 3 500 Hz 和 3 600 Hz 时, 液滴在断裂位置以下较

短距离内比较均匀, 但飞行一段距离后, 间距变得不均匀, 在喷嘴以下 10 cm 距离内, 没有出现液滴融合现象。当扰动频率为 3 400 Hz 和 3 800 Hz 时, 液滴在断裂位置以下较短距离内比较均匀, 但飞行一段距离后, 间距变得不均匀, 并且在喷嘴以下 10 cm 距离内, 出现了液滴间的相互融合现象。

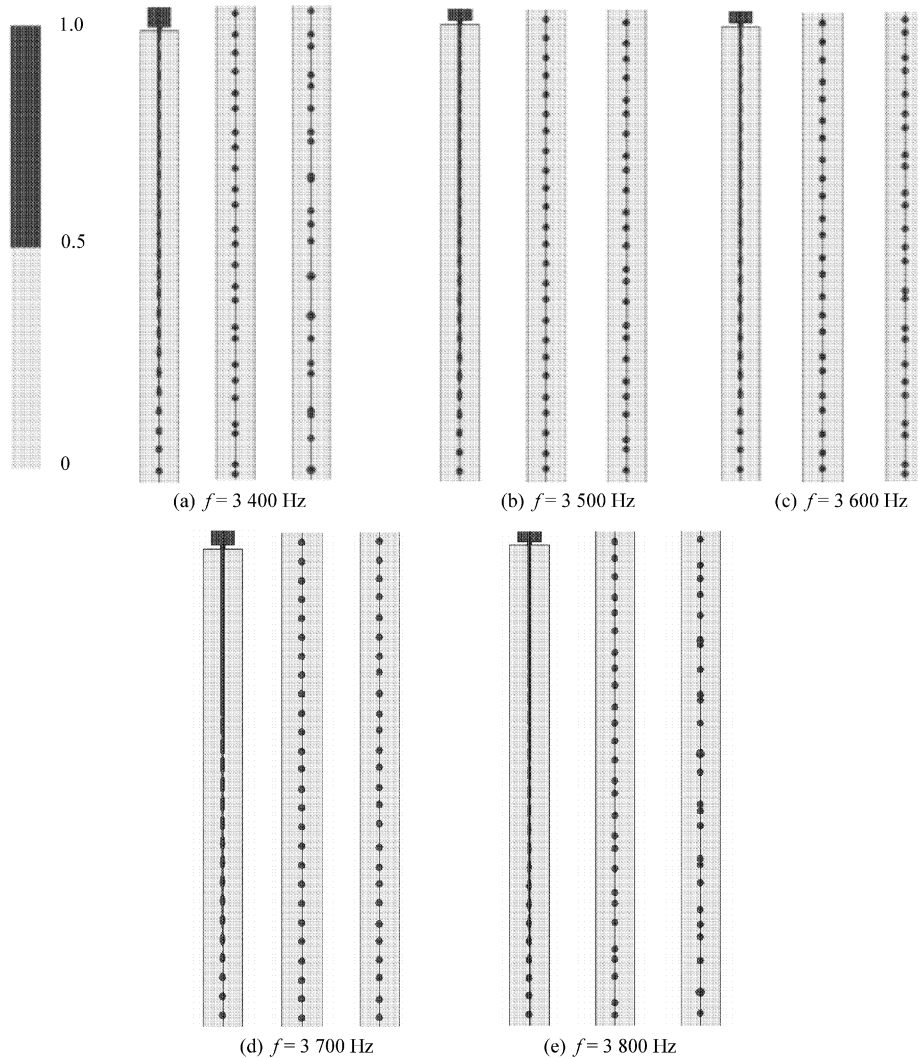


图 4 液滴形态图

Fig. 4 Droplet stream

不同频率的模拟结果见表 2。可以看出随着扰动频率的增加, 射流断裂长度增加, 液滴直径减小, 这与实际相符<sup>[4]</sup>。实验表明, 在射流速度和最优频率分别为 4.56 m/s 和 3 600 Hz 时, 固化石蜡液滴直径约为  $464.05 \mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>, 考虑液固密度差异, 折算成液态液滴直径约为  $477.38 \mu\text{m}$ 。通过模拟, 得出相同频率下液滴直径约为  $475 \mu\text{m}$ , 最优频率约为 3 700 Hz, 与实验结果吻合较好, 说明本文建立的模型是可行的。

图 5 为在外加正弦扰动作用下射流断裂过程

表 2 不同频率的模拟结果

Table 2 Simulation results of different frequencies

扰动频率/Hz	射流断裂长度/mm	液滴直径/ $\mu\text{m}$	液滴均匀性	是否融合
3 400	23.90	487.68	不均匀	是
3 500	23.95	482.60	较均匀	否
3 600	24.50	475.00	较均匀	否
3 700	24.95	469.90	均匀	否
3 800	25.15	467.36	不均匀	是

的等压线图, 从图中可以看出, 射流颈缩处的压强大于凸起处的压强, 且颈缩处压强逐渐增大, 凸起



处压强保持不变。这与实际情况相符,正是以此压强差推动液体由颈缩处向凸起处运动,导致凸起处逐渐增大,颈缩处逐渐缩小,最终射流断裂,形成液滴。

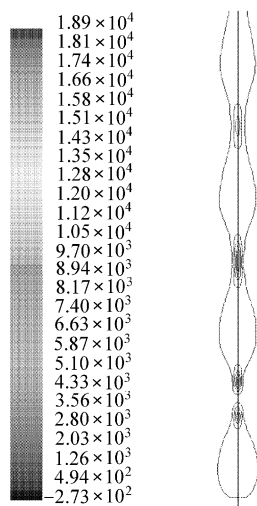


图5 射流压强图(单位: Pa)

Fig. 5 Pressure of jet(Unit: Pa)

模拟结果显示,液滴从断裂到喷嘴下 10 cm 的距离内,边缘温度略有降低,液滴中心大部分区域温度仍为 341 K。这是由于石蜡的导热系数较小,石蜡液滴冷却较慢,所以在喷嘴下较短距离(10 cm)内,石蜡液滴温度基本不变。

#### 4 结 论

(1) 所建立的计算模型与实验结果吻合较好,可以较为真实地反映实际情况。

(2) 利用计算流体力学软件 FLUENT 对石蜡液滴喷射过程的流场和温度场进行数值模拟,揭示了不同扰动频率下所形成液滴的形态及其变化规律,得出了比较均匀的液滴流,模拟结果显示扰动频率对液滴的形成及其均匀性具有重要影响;整个过程液滴的边缘温度略有降低。

(3) 本文模拟结果可以为液滴的充电、偏转和沉积固化过程提供初始数据,为液滴沉积增材制造工艺的实现和合理选取工艺参数奠定了理论基础。

#### 参 考 文 献

- [1] Orme M, Liu Q B, Smith R, et al. Net-form manufacturing of aluminum components; the dependence of processing parameters on component quality [C]//Tenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas, 1999.
- [2] Gao S D, Yao Y X, Cui C S. Study on droplet-based cir-

cuit board printing technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2005, 12(S2):145-148.

- [3] Kan H C, Chen C C. Numerical analysis of effects of perturbation frequency on mono-sized droplet formation[C]//The 11<sup>th</sup> National Computational Fluid Dynamics Conference. 2004.
- [4] Kazuya S, Seiichi K, Yoshiaki O. Numerical analysis of jet breakup behavior using particle method[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, 41(7): 715-722.
- [5] Cheong B S, Howes T. Effect of initial disturbance amplitude in gravity affected jet break-up[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60: 3715-3719.
- [6] Sahu S N, Harikishore S, Korla S C. Solidification behaviour of droplets in spray deposition[J]. Powder Metallurgy, 2005, 48(3): 270-276.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 7-11.  
Wang F J. Analysis of numerical hydrodynamic—the fundamental and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-11. (in Chinese)
- [8] 章本照, 印建安, 张宏基. 流体力学数值方法[M]. 北京:机械工业出版社, 2003: 116-152.  
Zhang B Z, Yin J A, Zhang H J. Numerical method of fluid mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 116-152. (in Chinese)
- [9] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社, 1982: 145-199.  
Wu W Y. Fluid Mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 1982: 145-199. (in Chinese)
- [10] 翁中杰, 程惠尔, 戴华淦. 传热学[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1986: 304.  
Weng Z J, Cheng H E, Dai H G. Heat transfer[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1986: 304. (in Chinese)
- [11] Carvalho M G, Farias T, Fontes P. Predicting radiative heat transfer in absorbing, emitting, and scattering media using the discrete transfer method[J]. Fundamentals of Radiation Heat Transfer, 1991, 160: 17-26.
- [12] Shah N G. A new method of computation of radiant heat transfer in combustion chambers [D]. London, England: Imperial College of Science and Technology, 1979.
- [13] Tseng A, Lee M H, Zhao B. Design and operation of a droplet deposition system for freeform fabrication of metal parts[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2001, 123: 74-84.

#### 作者简介:

李莉(1980—)女,硕士研究生。主要研究方向:微制造及其应用。

Tel:029-88493936-119

E-mail:luojun@mail.nwpu.edu.cn

齐乐华(1957—)女,教授,博士生导师。主要研究方向:机械制造及自动化和计算机应用。

Tel:029-88460447

E-mail:qilehua@nwpu.edu.cn

(责任编辑:蔡斐)