

# 喷涂机器人的喷枪轨迹优化设计与实验

陈伟<sup>1,2</sup> 赵德安<sup>1</sup> 梁震<sup>2</sup>

1. 江苏大学, 镇江, 212013      2. 江苏科技大学, 镇江, 212003

**摘要:** 针对工件上涂层厚度均匀性与喷涂时间相互制约的问题, 提出一种曲面上喷涂机器人喷枪轨迹优化设计方法。首先根据复杂曲面的几何特性, 对曲面进行分片处理, 求解每个曲面片上的喷涂速度和涂层重叠区域宽度的最优值; 再利用无方向的连接图表示曲面上的喷枪轨迹优化组合问题, 采用改进的粒子群算法进行求解。仿真和喷涂实验结果验证了算法的可行性和有效性。

**关键词:** 机器人喷涂; 轨迹优化; 粒子群算法; 喷涂实验

**中图分类号:** TP24      **文章编号:** 1004—132X(2011)17—2104—05

## Design of Tool Path Planning of Robotic Spray Painting and Its Experiments

Chen Wei<sup>1,2</sup> Zhao De'an<sup>1</sup> Liang Zhen<sup>2</sup>

1. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013

2. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212003

**Abstract:** A complex curved surface was divided into several patches and the trajectory planning for each patch was performed. A quadratic function of the paint deposition rate on a plane was proposed according to the experimental data, and a model of paint deposition rate was established. The trajectory integration problem can be modeled as the tool trajectory optimal integration, and a particle swarm optimization was advanced to solve the trajectory integration problem. Finally, the simulation and experimental results illustrate the feasibility and availability of these optimization algorithms.

**Key words:** robotic spray painting; trajectory optimization; particle swarm optimization; spray painting experiment

## 0 引言

近年来,随着 CAD/CAM 技术的长足发展,先进的机器人离线编程系统已成为世界各国的研究热点。喷涂机器人的喷涂效果和效率与机器人的运动轨迹、被涂工件表面形状、喷枪参数等诸多因素有关。为了迎合汽车、航天、造船等工业领域的要求,研究喷涂机器人喷涂模型以及基于该模型的复杂曲面上的轨迹优化方法已经成为新的研究热点。实际生产中,机器人喷涂作业的优化目标主要有两个:一是提高工件表面的涂层均匀性;二是缩短喷涂时间。然而,这两个优化目标是相互制约的。李发忠等<sup>[1-2]</sup>提出在有凹凸结构的曲面上进行喷涂轨迹优化,并采用一种基于 CAD 的轨迹优化算法以提高曲面漆膜厚度的一致性,但并未考虑喷涂时间的优化问题,无法进一步提高喷涂机器人的工作效率。赵德安等<sup>[3]</sup>提出采用遗传算法对喷涂机器人喷枪轨迹进行优化,但该方法只能在一定程度上提高喷涂效率,不能提高喷涂效果,且该方法没有经过喷涂实验论证。Sheng 等<sup>[4-6]</sup>按照工件几何特点,在对复杂曲面进行分片处理后,通过建立优化目标函数来设计喷

涂机器人喷枪的路径模式和走向,但该方法并未考虑涂层均匀性优化问题,无法实现复杂曲面上的轨迹优化。Chen 等<sup>[7-9]</sup>利用平面上的喷涂模型对涂层重叠区域宽度进行优化,生成喷枪空间路径,在曲率变化较小的曲面上实现了沿指定空间路径的喷涂机器人喷枪轨迹的优化,并通过实验的方法推出平面上的涂层累积速率模型,建立了曲面上的喷涂模型,但该方法并未考虑喷涂时间的优化问题,无法进一步提高复杂曲面上的喷涂效率。文献<sup>[10]</sup>中曾提出了一般性自由曲面交界处的喷涂机器人喷枪轨迹优化方法,对涂层厚度均匀性进行了优化,但该方法不能解决复杂曲面上的优化喷涂问题。

针对上述问题,本文提出一种曲面上的喷涂机器人喷枪轨迹优化设计方法。在对曲面进行分片后,采用黄金分割法求解涂层重叠区域宽度的最优值,并讨论了分片后的喷枪轨迹优化组合问题,采用改进的粒子群算法进行求解,最后进行了仿真和实验研究。

## 1 喷涂模型的建立

喷枪位置和姿态在固定的笛卡儿坐标系 XYZ 中可定义为一个 6 维的时间矢量函数:

$$\mathbf{a}(t) = (\mathbf{p}(t), \mathbf{o}(t))^T$$

其中,  $\mathbf{p}(t) = (P_x(t), P_y(t), P_z(t))^T$  表示喷枪相对于固定笛卡儿坐标系  $XYZ$  的位置;  $\mathbf{o}(t) = (O_\varphi(t), O_\theta(t), O_\varphi(t))^T$  表示喷枪相对于  $XYZ$  轴的角度。

确定喷涂模型是喷涂机器人喷枪轨迹优化设计中的一个重要步骤,在此之前,必须先确定涂层累积速率的数学表达式。本文通过在平面工件上进行喷涂实验以获得实验数据从而推出涂层累积速率函数表达式。为了简化模型,假设喷涂时的外界环境因素(温度、气压、湿度等)和喷枪本身技术参数(喷枪张角、喷射压力、涂料黏度等)都为恒定。只要喷枪的设置和喷涂参数保持不变,涂料流速率通量就不变,因而简化的模型也可应用于更为复杂的工件。喷涂模型的建立可参考文献[2]。

## 2 复杂曲面上喷枪轨迹优化

### 2.1 复杂曲面分片及每片上喷枪轨迹优化

复杂曲面分片步骤如下<sup>[6]</sup>:①对复杂曲面进行三角网格划分;②按照划分后的相邻三角面片之间拓扑结构连接生成若干个面片,保证每个面片为单连通区域且可近似看作为一个平面。

图1所示为平面上的喷涂过程<sup>[3]</sup>。图1中,  $R$  为喷涂半径,  $v$  为喷枪移动速度,  $w$  为两个喷涂行程的涂层重叠区域宽度,  $x$  表示喷涂半径内某一点  $s$  到第一条路径的距离,  $s'$  为点  $s$  在路径上的投影,  $O$  为喷枪中心投影点, 则点  $s$  的涂层厚度为

$$q_s(x) = \begin{cases} q_1(x) & 0 \leq x \leq R-w \\ q_1(x) + q_2(x) & R-w < x \leq R \\ q_2(x) & R < x \leq 2R-w \end{cases}$$

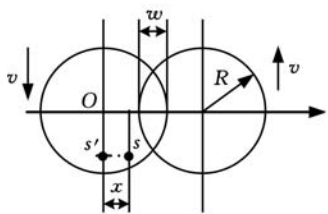


图1 平面上喷涂过程示意图

$q_1(x)$  和  $q_2(x)$  分别表示两条相邻路径上喷涂时点  $s$  的涂层厚度,  $q_1(x)$  和  $q_2(x)$  计算公式为

$$\left. \begin{aligned} q_1(x) &= 2 \int_0^{t_1} f(l_1) dt & 0 \leq x \leq R \\ q_2(x) &= 2 \int_0^{t_2} f(l_2) dt & R-w \leq x \leq 2R-w \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} t_1 &= \sqrt{R^2 - x^2} / v \\ t_2 &= \sqrt{R^2 - (2R-w-x)^2} / v \\ l_1 &= \sqrt{(vt)^2 + x^2} \end{aligned}$$

$$l_2 = \sqrt{(vt)^2 + (2R-w-x)^2}$$

式中,  $t_1, t_2$  分别为两条相邻喷涂路径上喷枪在点  $s$  喷涂时间的一半;  $l_1, l_2$  分别为点  $s$  到两条相邻喷涂路径上的喷枪中心投影点的距离;  $t$  为喷枪从点  $O$  运动到点  $s'$  的时间。

由式(1)可得

$$q_s(x, w, v) = \frac{1}{v} J(x, w) \quad (2)$$

其中,  $J$  为  $x$  和  $w$  的函数。为了使工件表面涂层厚度尽可能均匀,取点  $s$  的实际涂层厚度与理想涂层厚度之间的方差为优化目标函数:

$$\min_{w \in [0, R], v} E_1(w, v) = \int_0^{2R-w} (q_d - q_s(x, w, v))^2 dx \quad (3)$$

式中,  $q_d$  为理想涂层厚度。

由于最大涂层厚度  $q_{\max}$  和最小涂层厚度  $q_{\min}$  决定了工件表面上涂层厚度的均匀性,因此,  $q_{\max}$  和  $q_{\min}$  也需要进行优化:

$$\min_{w \in [0, R], v} E_2(w, v) = (q_{\max} - q_d)^2 + (q_d - q_{\min})^2 \quad (4)$$

由式(2)~式(4)可得

$$\min_{w \in [0, R], v} E(w, v) = \frac{1}{2R-w} E_1(w, v) + E_2(w, v) \quad (5)$$

又由式(1),最大涂层厚度和最小涂层厚度表达式可写为

$$\left. \begin{aligned} q_{\max} &= \frac{1}{v} J_{\max}(w) \\ q_{\min} &= \frac{1}{v} J_{\min}(w) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

令  $\frac{\partial E(w, v)}{\partial v} = 0$ , 由式(2)、式(5)、式(6)可得

$$v = \frac{\frac{1}{2R-w} \int_0^{2R-w} J^2(x, w) dx - J_{\max}^2(w) - J_{\min}^2(w)}{q_d \left( \frac{1}{2R-w} \int_0^{2R-w} J(x, w) dx + J_{\max}(w) + J_{\min}(w) \right)}$$

由此看出,喷枪速率  $v$  可表示成  $w$  的函数,因此,  $E(w, v)$  的最小值只与  $w$  有关。可采用黄金分割法<sup>[11]</sup> 求出  $w$  的优化值,从而可得到每一面片上的优化轨迹。

### 2.2 喷枪轨迹优化组合

为了使喷涂机器人在喷涂作业时喷涂时间最短,必须对曲面分片后每片上的喷枪轨迹进行优化组合<sup>[3]</sup>。为简化问题,将曲面分片后的每一面片上的轨迹看成是一条边。可用一个无方向的连接图  $G(V, E, C, \omega; E \rightarrow Z^+)$  来表示喷枪轨迹优化组合(tool trajectory optimal integration, TTOI)问题,其中,  $V$  表示顶点集,  $E$  表示边集,  $C$  表示  $E$  的任意一个子集,  $\omega$  表示边的权(实际喷枪轨迹的长度)。TTOI问题就是在图  $G$  中求出一条经过所有边且只经过一次的具有最短距离的回路。设  $M = \{d_{ij}\} (i, j = 1, 2, \dots, n)$  是由图  $G$  中不在一条边上的顶点  $i$  和顶点  $j$  之间的最短轨迹所组成的集合,且各顶点间的最短距离矩阵可使用

Floyd 算法算出。图 2 所示是一个有 5 条边的连接图  $G$ , 图中实线表示边, 虚线表示从一个顶点到其他任意一个不在同一条边上的顶点的轨迹。

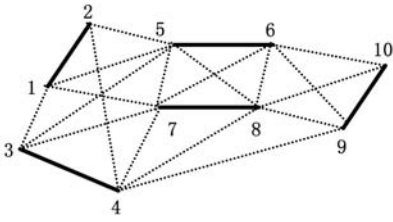


图 2 具有 5 条边的连接图  $G$

### 2.3 利用粒子群算法求解 TTOI 问题

粒子群算法与其他优化算法相比, 易于实现, 没有很多参数需要调整, 且不需要梯度信息, 是解决优化组合问题的有效工具。算法中, 每个个体为一个粒子, 每个粒子代表着一个潜在的解。设  $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iD})$  为第  $i$  个粒子的  $D$  维位置矢量, 根据适应度函数计算  $z_i$  当前的适应值, 即可衡量粒子位置的优劣, 而 TTOI 问题中可选取计算喷枪轨迹长度最小值为适应度函数。  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  为粒子  $i$  的飞行速度, 即粒子移动的距离;  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  为粒子迄今为止搜索到的最优位置;  $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$  为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置。每次迭代中, 粒子可根据下式更新速度和位置:

$$\begin{aligned} v_{id}^{(k+1)} &= v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{id} - z_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 (p_{gd} - z_{id}^{(k)}) \\ z_{id}^{(k+1)} &= z_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \\ i &= 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, D \end{aligned}$$

式中,  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数;  $c_1, c_2$  为学习因子。

由此, TTOI 问题的粒子群算法步骤为: ① 初始化。初始化粒子位置  $z_i^{(0)} = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iD})$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ); 初始化每个粒子的速度  $v_i^{(0)} = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ); 选择速度最大阈值  $\epsilon$  和最大迭代次数  $N_{\max}$ , 令迭代次数  $k = 0$ 。② 测量每个粒子的适应值, 表示为  $D_i^{(0)}$ , 令  $p_i^{(0)} = z_i^{(0)}$ 。③ 迭代次数  $k \leftarrow k + 1$ ; 更新速度  $v_{id}^{(k+1)}$ ; 更新位置  $z_{id}^{(k+1)}$ 。④ 测量每个粒子的适应值, 表示为  $D_i^{(k)}$ , 取  $D^{(k)} = \min(D_1^{(k)}, D_2^{(k)}, \dots, D_m^{(k)})$ , 更新  $p_i^{(0)}$  和  $p_g^{(0)}$ 。⑤ 若  $\frac{D^{(k-1)} - D^{(k)}}{D^{(k)}} \geq \epsilon$  且  $k < N_{\max}$ , 则跳转到 ③; 若  $k \geq N_{\max}$ , 循环停止, 输出计算结果。

### 3 仿真

利用 MATLAB 软件对喷涂机器人喷枪轨迹优化组合问题进行仿真。为了与下面喷涂实验中的工件相符合, 这里假设复杂曲面工件被分为 5 片, 则连接图  $G$  中的边数为 5, 顶点数  $m = 10$ 。算法中, 为保证算法精度, 最大循环次数  $N_{\max} =$

100; 为保证粒子不跳过最好解且能够对搜索空间进行充分搜索, 取  $\epsilon = 1000$ ; 为保证精度且减小计算量, 粒子个数取 20。而学习因子  $c_1$  和  $c_2$  可以使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力, 从而向自己的历史最优点以及群体内历史最优点靠近, 这两个参数对算法的收敛性作用不是很大, 但适当调整这两个参数可以使收敛速度变快。通过多次调整  $c_1$  和  $c_2$  值, 并分析  $c_1$  和  $c_2$  值对最优适应值的影响后, 可得出以下结论: 即对于 TTOI 问题来说取  $c_1 = c_2 = 2$  是一个较好的选择。图 3 所示是算法中得出的最优解的进化曲线, 可看出, 喷涂轨迹长度随进化过程呈单调下降趋势, 最后趋于定值。由于喷涂机器人工作过程中一般不考虑避障问题, 环境信息已知且相对较简单, 故粒子群算法收敛速度较快, 从图 3 中可看出, 进化大约 80 代后轨迹长度基本不再变化, 算法收敛。

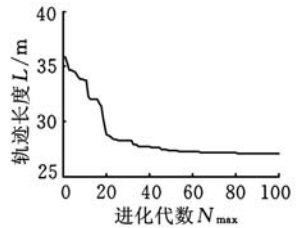


图 3 仿真结果

### 4 实验研究

为研究方便, 选取本科研发团队中喷涂机器人离线编程系统的实验工件作为喷涂对象<sup>[2]</sup>。该工件的三角网格图形(允许误差 2mm) 如图 4 所示。

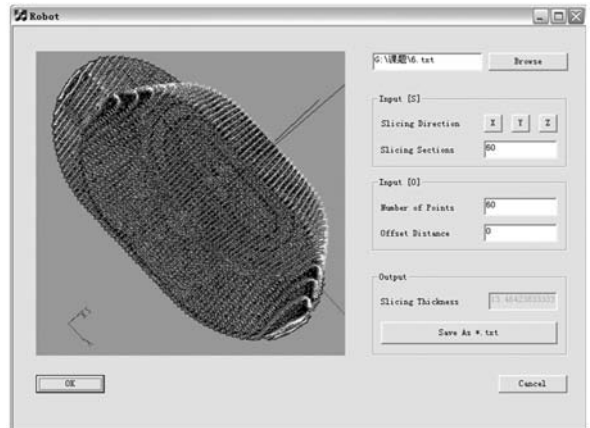


图 4 工件三角网格

实验中, 为了更加符合实际生产需要, 减小实验点上的涂层厚度的测量误差, 并能够充分检验粒子群算法的优越性和可靠性, 需要适当提高理想涂层厚度值并加大喷涂半径。因此, 这里假设理想涂层厚度  $q_d = 50 \mu\text{m}$ , 涂层厚度最大允许偏差  $q_w = 10 \mu\text{m}$ , 喷枪喷出的圆锥形涂料底面半径  $R = 60 \text{mm}$ 。则通过平板上的喷涂实验数据得到涂层累积速率为

$$f(r) = \frac{1}{15} (R^2 - r^2) (\mu\text{m/s})$$

生成并优化平板上的喷枪轨迹后,得到喷涂机器人喷枪速率(匀速)和每两个喷涂行程的涂层重叠区域宽度分别为  $v = 256.3\text{mm/s}$  和  $w = 50.2\text{mm}$ 。算法中各个参数设置如下:  $q_d = 50\mu\text{m}$ ,  $q_w = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 60\text{mm}$ , 喷涂距离  $h = 100\text{mm}$ , 匀速喷涂时  $v = 256.3\text{mm/s}$ , 优化喷涂时以  $v = 256.3\text{mm/s}$  作为算法迭代的初始值,该复杂曲面工件被分为 5 片,粒子群算法中的参数设置参照仿真实验中的参数:  $\epsilon = 1000$ , 粒子个数取 20,  $c_1 = c_2 = 2$ ,  $N_{\max} = 100$ 。实验中采用江苏大学自主研发的喷涂机器人离线编程系统分别以优化轨迹喷涂和非优化轨迹喷涂两种情况进行喷涂实验。离线编程系统中复杂曲面工件底部部分优化喷涂轨迹如图 5 所示,图 6a 所示为喷涂实验过程。喷涂后采用涂层测厚仪在工件上均匀测取 200 个离散点的涂层厚度。优化轨迹喷涂后的采样点的涂层厚度如图 6b 曲线所示,实验结果数据如表 1 所示。可看出,优化轨迹喷涂不仅涂层的均匀性更佳,而且更节约时间,与非优化轨迹喷涂相比,对该复杂曲面工件的喷涂时间缩短了 25%,从而提高了生产效率。

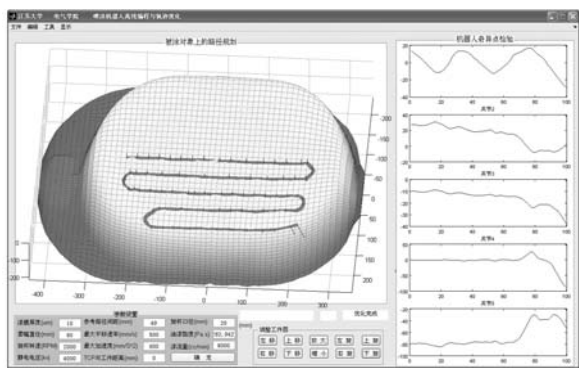
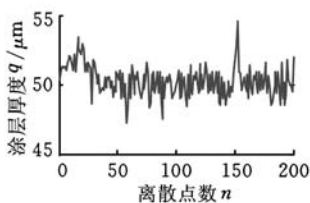


图 5 工件底部部分优化轨迹



(a) 机器人喷涂实验

(b) 优化轨迹涂层厚度

图 6 实验过程与优化轨迹涂层厚度

表 1 实验结果比较

	优化	非优化
平均厚度( $\mu\text{m}$ )	49.5	49.1
最大厚度( $\mu\text{m}$ )	54.6	57.9
最小厚度( $\mu\text{m}$ )	47.3	42.5
轨迹总长度(m)	27.6	30.8
喷涂时间(s)	88	118

#### 4 结语

针对曲面上涂层厚度的均匀性与喷涂时间相互制约的问题,提出一种曲面上喷涂机器人喷枪轨迹优化设计方法,并使用改进粒子群算法对复杂曲面上喷涂机器人喷枪轨迹优化组合问题进行求解。该方法在满足涂层厚度均匀性要求的同时,提高了喷涂机器人的喷涂效率,仿真和喷涂实验结果验证了算法的可行性和有效性。提出的算法还可以用于其他类型机器人轨迹规划,如机器人研磨复杂曲面的轨迹规划、复杂曲面上清洁机器人轨迹规划等。

#### 参考文献:

- [1] 李发忠,赵德安,姬伟,等.面向凹凸结构曲面的喷漆机器人轨迹优化研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2008,22(4):64-67.
- [2] 李发忠,赵德安,张超,等.基于CAD的喷涂机器人轨迹优化[J].农业机械学报,2010,41(5):213-217.
- [3] 赵德安,陈伟,汤养.基于遗传算法的喷涂机器人喷枪路径规划[J].中国机械工程,2008,19(7):777-779.
- [4] Sheng W H, Xi N, Song M, et al. Automated Cad-guided Robot Path Planning for Spray Painting of Compound Surfaces [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tankamutsa, Japan, 2000:1918-1923.
- [5] Sheng W H, Xi N, Chen H P. Surface Partitioning in Automated CAD Guided Tool Planning for Additive Manufacturing [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, Nevada, 2003: 2072-2077.
- [6] Sheng W H, Chen H P, Xi N. Tool Path Planning for Compound Surfaces in Spray Forming Processes [J]. Automation Science and Engineering, 2005, 2(6): 240-249.
- [7] Chen H P, Sheng W H. Automated Robot Trajectory Planning for Spray Painting of Free Form Surfaces in Automotive Manufacturing [C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D C, 2002: 450-455.
- [8] Chen H P, Xi N, Sheng W H, et al. Optimal Spray Gun Trajectory Planning with Variational Distribution for Forming Process [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, LA, 2004: 45-50.

## Zr 基块体非晶合金在过冷液态区微正挤压实验研究

王 懿 郑志镇 李建军

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉, 430074

**摘要:** 为了研究  $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  大块非晶合金在过冷液态区内的微正挤压变形行为, 采用不同尺寸非晶合金圆柱形棒料在不同长度凹模工作带下进行了微正挤压实验。实验结果表明: 所选非晶合金在成形温度  $450^\circ\text{C}$ 、初始应变速率  $0.001\sim 0.01\text{s}^{-1}$  的条件下正挤压是可行的; 随着坯料尺寸减小, 其单位挤压力和挤出胀大比均增大, 且挤压成形力表现出不同的变化趋势; 坯料在短凹模中的单位挤压力和挤出胀大比分别大于在长凹模中的单位挤压力和挤出胀大比。

**关键词:** Zr 基非晶合金; 过冷液态区; 微正挤压; 尺寸效应

**中图分类号:** TG376.2; TG139.8

**文章编号:** 1004—132X(2011)17—2108—05

## Study on Micro Forward Extrusion of Zr-based Bulk Metallic Glass in Supercooled Liquid Region

Wang Yi Zheng Zhizhen Li Jianjun

State Key Laboratory of Materials Processing and Die &amp; Mould Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

**Abstract:** In order to study the influence of specimen dimension and extruded die length on micro forward extrusion processing of  $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  bulk metallic glass in the supercooled liquid region, micro forward extrusion experiments with different specimen sizes using different extruded dies were proceeded, and the characteristic of material flow in different conditions were obtained. The results indicate that, the forward extrusion is feasible for  $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  bulk metallic glass at temperature  $450^\circ\text{C}$  and strain rate  $0.001\sim 0.01\text{s}^{-1}$ . Also, with the decrease of specimen size, the unit pressure of upper die and the swell ratio of specimen increase and the tendency of forming load changes. At last, when the specimen is extruded in a short die, the unit pressure and swell ratio are both larger than those of which is extruded in a long die.

**Key words:** Zr-based bulk metallic glass; supercooled liquid region; micro forward extrusion; size effect

## 0 引言

以塑性加工方式生产至少在二维方向上尺寸处于亚毫米量级的零件或结构的工艺技术称为微成形技术<sup>[1]</sup>。这一技术继承了传统塑性加工技术的许多优点, 非常适合微型零件的大批量生产。

但是, 随着产品的微型化, 金属材料成形特征表现出极强的尺寸效应。已有研究表明<sup>[2-4]</sup>, 一般金属的材料流动、摩擦行为等都呈现出明显依赖于坯料尺寸及材料晶粒尺寸的尺寸效应现象, 由此导致传统成形理论和工艺不能完全适用于微成形。与一般金属相比, 非晶合金具有长程无序短程有序的非晶态结构, 在微成形中不存在晶粒尺寸效应, 而且在过冷液态区块体非晶合金具有超塑性

收稿日期: 2010—09—28

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目 (50635020)

[9] Chen H P, Sheng W H, Dahl J. Optimizing Material Distribution for Tool Trajectory Generation in Surface Manufacturing [C]//Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, CA, 2005: 1389-1394.

[10] Chen Wei, Zhao De'an. Tool Trajectory Optimization of Robotic Spray Painting [C]//IEEE International Conference on Intelligent Computation Tech-

nology and Automation. Changsha, 2009: 419-422.

[11] 黄红选, 韩继业. 数学规划 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (编辑 苏卫国)

**作者简介:** 陈 伟, 男, 1981 年生。江苏大学电气信息工程学院博士研究生, 江苏科技大学电子信息学院讲师。主要研究方向为系统建模和机器人控制技术。发表论文 10 余篇。赵德安, 男, 1956 年生。江苏大学电气信息工程学院院长、教授、博士研究生导师。梁 震, 男, 1987 年生。江苏科技大学电子信息学院硕士研究生。