

微注射浇注系统对微制件熔接缝形成的影响的模拟研究

Simulation of Micropart's Weld Lines by Injection Molding

戴亚春, 王 匀, 周建忠

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

DAI Ya-chun, WANG Yun, ZHOU Jian-zhong

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Zhejiang, China)

摘要: 微塑件的需求逐年增加, 微注射是批量生产高精度微塑件的主要手段, 但与宏观注射方法相比, 制件尺寸的微小化也给微注射在理论、工艺、设备、检测等方面带来了难题。浇注系统、熔接缝的位置和数目是影响微制件质量的主要因素, 本工作就此进行了数值模拟, 得出了微成型与传统注射成型工艺参数的差异。结果表明: 微注射成型的温度、压力和速度均高于传统注射成型, 微注射成型过程中温度是保证微注射能否顺利进行的关键, 微注射成型的模具温度必须高于聚合物材料的玻璃化转变温度, 因此对微注射成型必须进行有效温控。

关键词: 微注射模具; 熔接缝; 浇口; 微流道; MEMS

中图分类号: TQ311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2008)03-0028-04

Abstract: With the increasing demands of plastic microparts, microinjection process is becoming the focus as it is the main method for producing the microparts with high precision in batch. However, compared with the conventional injection process, the minimization of parts' dimensions has brought the problems such as the theory, process, equipment and measurement. As the gating system, the positions and numbers of melding lines are the main concerns influencing the microparts quality. In this paper, the numerical simulation has been carried on to obtain the process parameters difference between the microinjection and conventional injection. The results show that the temperature, pressure and velocity of microinjection are higher than conventional process, and the temperature is the key factor to ensure the success of microinjection. Furthermore, the mould temperature should be high than the vitrification point of polymeric material, and the temperature of microparts needs to be control efficiently.

Key words: microinjection molding; meld lines; gate; micro-runner; MEMS

微型化使得微机电系统(MEMS)在精度、热变形、振动和速度等方面具备更优异的性能和功能, 微塑件在医疗卫生、电信电子、精密仪器和国防各种应用领域具有广阔的发展前景。但是微塑件尺寸的微型化对其加工工艺、加工质量、成本和批量等提出了新的要求, 其最终目的是能够低成本大批量制造可实际应用的微塑器件。而注射成型微制件具有工艺简单、生产效率高和零件精度的特点, 并且随着各种能满足微制件使用性能要求的功能性工程塑料的出现^[1], 如LCP, PEEK等高聚物在强度、耐用度、和耐疲劳性等方面均有优异表现, 因此近来微注射成型技术得到了很大发展。

国外的许多学者对此进行了研究: Micheali 和 Spenneman^[2]对微注射成型机进行了改进, 使微注射

机的注射精度达到 0.01g/次, 并且采用干冰(CO₂)作为微注射模具的冷却剂, 从而缩短了微制件的成型周期; Ho 和 Tai^[3]研究指出, 微制件的尺寸效应会对微注射成型的熔体流产生影响, 从而影响微制件的成型质量; Hill^[4]用 Cadmould 软件对微制件的翘曲与变形进行了模拟, 但是没有指出微注射原料与工艺参数对微制件影响的关系; Y. K. Shen^[5]等采用 3D 数值模拟方法, 针对不同原料, 来优化成型工艺; Yao 和 Kim^[6]等人采用数字模拟的方法对微制件的充模过程进行了模拟, 来优化微注射成型工艺; Piotter^[7]等对不同材料在实际成型过程中, 结合数值模拟的工艺参数, 来优化模拟结果。而国内对这方面的研究, 才刚刚起步, 报道相对较少。

以上的研究并没有指出浇注系统对微注射成型的

以及对熔接缝现成的影响。因此, 本工作采用 3D 的数字模拟方法, 通过改变浇注系统, 来研究微注射过程中工艺参数的制定, 获得浇注系统于熔接缝之间的关系。

1 流动方程-斯托克斯(Navier-Stokes)方程

纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)流动方程, 即指实际流体的动量(运动)方程。实际聚合物熔体在流动过程中会产生内摩擦力-剪切应力, 而传统的 Hele-Shaw 模型在模拟过程中忽略了熔体的流动惯量和变截面带来对熔体流动的影响^[8], 并且, 在模拟过程中, 必须选择制件的中性层来模拟, 耗时多。而随着微制件尺寸的微型化, 拐角绕流、壁厚变化、喷射流对熔体前锋料流的影响等因素必须在微制件成型模拟过程中加以考虑。由于 Hele-Shaw 模型不能解决这些问题, 因此只有引入 Navier-Stokes 流动方程才能对微制件进行 3-D 的真实模拟^[9]。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = & - \frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = & - \frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = & - \frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \end{aligned}$$

η —熔体粘度;

u, v, w —三个速度分量;

ρ —熔体密度;

能量方程:

$$\rho C_v \frac{dT}{dt} u = - (\vec{\nabla} \cdot q) - T \left[\frac{\partial p}{\partial T} \right]_p (\vec{\nabla} \cdot u) + (\nabla \cdot \tau \cdot u)$$

式中 C_v —定容比热;

q —导热通量向量。由热传导的傅立叶定律给定: $q = -\lambda \vec{\nabla} \cdot T$;

λ —熔体的导热系数;

$\vec{\nabla} \cdot$ 散度 div 符号;

流体的粘度方程:

$$\eta(T, P, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T, P)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

τ^* —材料参数;

η_0 —零剪切度;

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2}$$

边界条件:

在: $z = \pm b, u = v = w = 0, T = T_w$; (模具壁处)

在: $z = 0; \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$ (中心线位置)

其他条件: $P = 0$; (流体前锋位置)

$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$; (模具壁处)

然后, 根据有限元的方式, 用前面的公式进行计算^[12]。

2 模拟工艺条件

2.1 模拟制件设计

微塑件的尺寸如图 1 所示。其原料为 ABS, 选取聚合物材料为商品名: Magnum 9030, 生产厂家: Dow Chemicals USA。模拟时采用的主要工艺参数为:

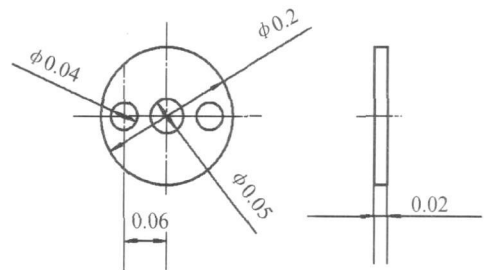


图 1 微制件尺寸图

Fig. 1 The size of micro-part

2.2 模拟注射工艺制定

模拟时采用的主要工艺参数为: (1) 模具温度 $T_{\text{模}}$ 为 135°C , 微注射的特点是模具温度很高, 模温的选择很重要, 过低会出现不能充模完全, 过高会使制件冷却困难, 不利于成型于制件的脱模。和传统注射模具温度不同(低于原料玻璃化温度 T_g), 微注射成型选择依据是模温控制在 T_g 以上。(2) 成型温度 $T_{\text{成}}$ 为 250°C (ABS 原料熔化温度在 $170 \sim 260^{\circ}\text{C}$ 之间, 如果温度高于 270°C , ABS 会分解, 产生有毒的气体。因此成型温度在 250°C 时, 熔体粘度为 $41.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 剪切速率为 $100741/\text{s}$, 利于熔体顺利充模。而在传统注射成型温度中, 一般控制在 $180 \sim 220^{\circ}\text{C}$ 之间。)(3) 注射压力:

180MPa。其他各项参数与成型工艺参数如表 1 所示。

表 1 ABS 微注射成型参数
Table 1 ABS forming parameter

Heat conductivity	$0.134\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Mould temperature	110-140℃
Injection temperature	200-280℃	Recommend mould temperature	135℃
Recommend injection temperature	230℃	Max shearing stress	0.28MPa
Capacity of heat	$1965\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Max shearing rate	24000/s
Melt density	$0.949\text{g} \cdot \text{cm}^3$	Solid density	$1.054\text{g} \cdot \text{cm}^3$

2 3 浇注系统设计

根据制件本身形状的特性,在注射过程中,对于浇口的放置及进料方法和浇注系统的设计,参见如下的图示,图 3—7 分别对应于浇口方案 1—5。在浇注系

统的设计过程中,主流道的设计采用传统的锥形设计,主流道、分流道的尺寸如表 2 所列。

2 4 微制件的数值模拟

图 2 是从建模到模拟结束输出的过程。

表 2 主流道与分流道、浇口的尺寸/mm
Table 2 Size of host runner, sub channel and gate/mm

Size of host runner	Diametric of up pyramidal face	Diametric of low pyramidal face	Size of sub channel	Width of sub channel	Height of sub channel	Deep of cold slug well
0.2	0.03	0.04	0.013	0.01	0.01	0.02

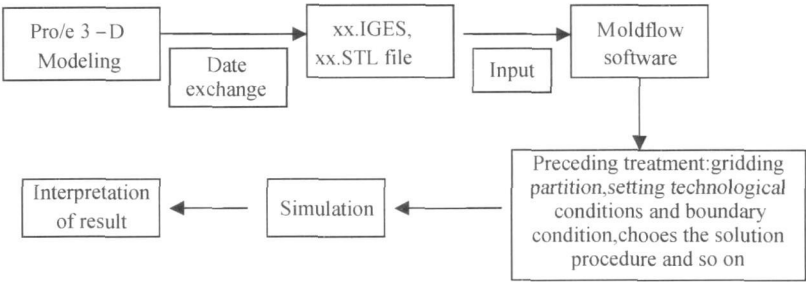


图 2 模拟过程示意图
Fig 2 The schematic representation of simulation process

3 模拟结果

根据以上的工艺条件和模拟准备工作,模拟结果如图 3—7 所示。

采用外侧进料的浇口方案 1 和 2 方案(见图 3, 4)其流道的设计有所差别的,从图 3 可以看出,微制件的熔接缝形成在型芯的一直线上,而图 4 的熔接缝形成是平行的,对制品强度的影响较小。

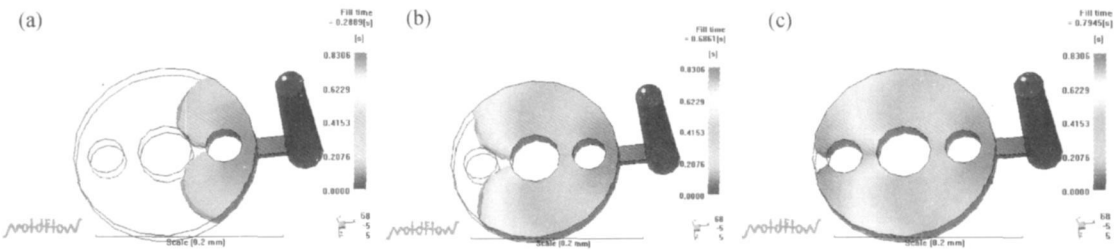


图 3 浇口方案 1 的熔接缝在充模过程中形成的过程
(a) 充模初始阶段($t = 0.2889\text{s}$); (b) 充模中间阶段($t = 0.6861\text{s}$); (c) 充模临终阶段($t = 0.7945\text{s}$)
The melt line's forming of the No1 gate in injection process
(a) preliminary stage of filling ($t = 0.2889\text{s}$); (b) middle stage of filling ($t = 0.6861\text{s}$); (c) proximity end of filling ($t = 0.7945\text{s}$)

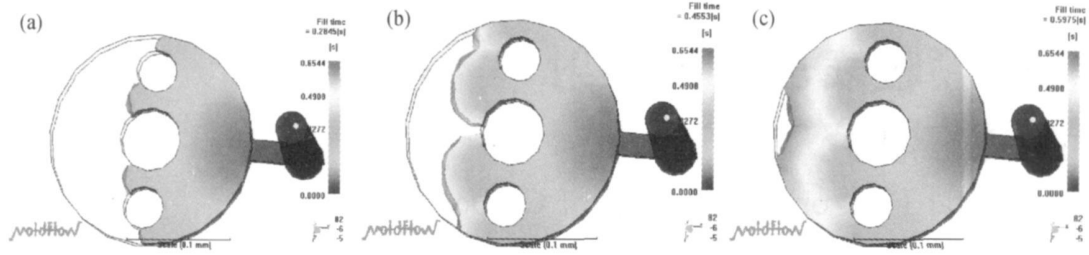


图 4 浇口方案 2 的熔接缝在充模过程中形成的过程

(a) 充模初始阶段($t=0.2845\text{s}$); (b) 充模中间阶段($t=0.4553\text{s}$); (c) 充模临终阶段($t=0.5975\text{s}$)

Fig. 4 The melt line's forming of the No2 gate in injection process

(a) preliminary stage of filling ($t=0.2845\text{s}$); (b) middle stage of filling ($t=0.4553\text{s}$); (c) proximity end of filling ($t=0.5975\text{s}$)

而采用中心进料的浇注系统(见图 5- 7 所示), 浇注系统的设计位置于模具型芯位置同样对熔接缝位置

和熔接缝数目有影响。只是中心进料的充模时间比边侧进料的充模时间缩短了大约 0. 4 s 左右。(对

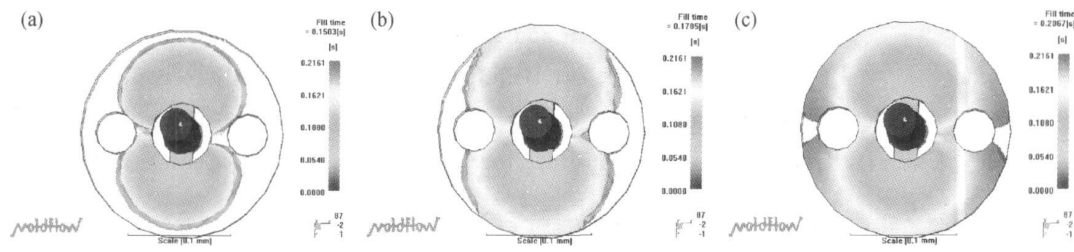


图 5 浇口方案 3 的熔接缝在充模过程中形成的过程

(a) 充模初始阶段($t=0.1503\text{s}$); (b) 充模中间阶段($t=0.1785\text{s}$); (c) 充模临终阶段($t=0.2067\text{s}$)

Fig. 5 The melt line's forming of the No3 gate in injection process

(a) preliminary stage of filling ($t=0.1503\text{s}$); (b) middle stage of filling ($t=0.1785\text{s}$); (c) proximity end of filling ($t=0.2067\text{s}$)

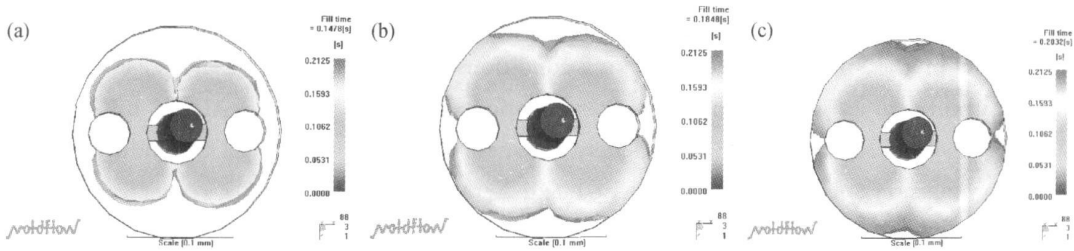


图 6 浇口方案 4 的熔接缝在充模过程中形成的过程分解图

(a) 充模初始阶段($t=0.1478\text{s}$); (b) 充模中间阶段($t=0.1848\text{s}$); (c) 充模临终阶段($t=0.2032\text{s}$)

Fig. 6 The melt line's forming of the No4 gate in injection process

(a) preliminary stage of filling ($t=0.1478\text{s}$); (b) middle stage of filling ($t=0.1848\text{s}$); (c) proximity end of filling ($t=0.2032\text{s}$)

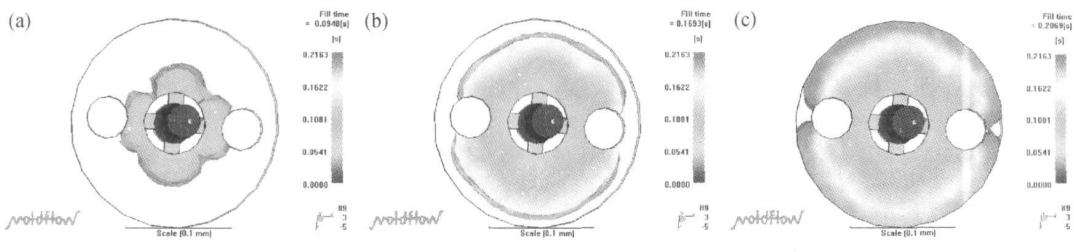


图 7 浇口方案 5 的熔接缝在充模过程中形成的过程分解图

(a) 充模初始阶段($t=0.0940\text{s}$); (b) 充模中间阶段($t=0.1693\text{s}$); (c) 充模临终阶段($t=0.2069\text{s}$)

Fig. 7 The melt line's forming of the No5 gate in injection process

(a) preliminary stage of filling ($t=0.0940\text{s}$); (b) middle stage of filling ($t=0.1693\text{s}$); (c) proximity end of filling ($t=0.2069\text{s}$)

了Ni基单晶高温合金(002)晶面的衍射线。得到该晶面衍射线的重要性在于通过对该衍射线型的分析,可以得到单晶的微观结构信息。

(3)讨论了该方法可以测定的单晶的取向角度的范围,以及扩大该范围的方法。

参考文献

- [1] 陈荣章,王罗宝,李建华. 铸造高温合金发展的回顾与展望[J]. 航空材料学报, 2000, 20(1): 55- 61.
- [2] 孟南. 定向凝固及单晶高温合金的发展与研究[J]. 金属材料研究, 2005, 31(3): 46- 54.
- [3] 李影, 苏彬. DD6 单晶合金的高温低周疲劳机制[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 732- 736.
- [4] SASS V, GLATZEL U, FELLER-KNIEPMEIER M. Anisotropic Creep Properties of the Nickel-Base Superalloy CMSX-4[J]. Acta mater. 1996, 44(5): 1967- 1977.
- [5] OSTERLE W, BETTGE D, FEDELICH B, et al. Modeling the Orientation and Direction Dependence of The Critical Resolved Shear Stress of Nickel-Base Superalloy Single Crystals[J]. Acta mater. 2000, 48: 689- 700.

(上接第31页)

浇口方案1和浇口方案2,充模时间在在0.6~0.8s左右;对于浇口方案3-浇口方案5,充模时间在0.2s左右。)

4 结论

(1)通过模拟,可以直观的得到熔体的充模过程,观察微制件熔接缝与浇注系统之间的关系,以防止熔接缝对微制件性能的影响。

(2)浇注系统设计对熔接缝数量和形成过程有影响,但是,对于微制件成型最重要的是浇注系统凝料的清理,所以浇注系统设计应该方便清理。

(3)成型温度的应该高于传统的成型温度。为保证聚合物熔体充模的顺利进行,成型温度设置较高,从而使熔体在较低的粘度下充模,保证制品质量,也有利于熔接缝的质量改进。

(4)模具温度设定高,模具温度高于 T_g 以上。这是微注射成型于传统注射成型最重要的区别。因此,微注射的模具加热和模具冷却系统的设计是非常重要的设计。要提供成型过程中模具的升温 and 冷却。

参考文献

- [1] GEIGER M, KLEINER M, ECKSTEIN R, et al. Microforming [J]. Annals of the CIRP, 2001 50(2): 445- 462.
- [2] MICHAELI W, SPENNEAMAN A. A new injection molding technology for micro parts [J]. Journal of Polymer Engineering,

- [6] GUNTURI S S K, MACLACHLAN D W, KNOWLES D M. Anisotropic creep in CMSX-4 in orientations distant from <001> [J]. Materials Science and Engineering 2000, A289: 289- 298.
- [7] 岳珠峰, 吕震宙, 杨治国, 等. 晶体取向的偏差和随机性对镍基单晶叶片强度与蠕变寿命的影响[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 477- 480.
- [8] 任遥遥, 彭志方, 梅青松, 等. 根据枝晶优先生长方向计算铸造合金的晶体位向[J]. 材料科学与工程, 2000, 18(4): 78- 87.
- [9] 任遥遥, 彭志方, 于洋洋. 一种测算单晶铸造合金取向的程序及其应用[J]. 理化检验-物理分册, 2003, 39(5): 240- 245.
- [10] 马胜利, 郭振琪, 井晓天. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 单晶体的X射线衍射仪分析[J]. 西安理工大学学报, 1996, 12(4): 303- 306.
- [11] 郭振琪, 付涛, 王宁, 等. 一种测定晶体取向及其分布的简便XRD方法[J]. 无机材料学报, 2002, 17(3): 460- 464.

收稿日期: 2007-07-09; 修订日期: 2007-11-10

作者简介: 方建锋(1975—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事材料结构的X射线分析工作, 联系地址: 钢铁研究总院 北京海淀区学院南路76号(100081)。E-mail: jf.fang@263.net

2001, 21(2-3): 87- 98.

- [3] HO C M, TAI Y C. Micro-electro-mechanical systems (MEMS) and fluid flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998 30: 579- 612.
- [4] HILL S D J. Computer modeling for micro-injection molding[R]. LIGA News Third Issue, 1995, 9.
- [5] SHEN Y K, WU W Y. An analysis of the three dimensional micro-injection mold[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2002, 29(3): 423- 431.
- [6] YAO D, KIM B. Simulation of the filling process in micro channels for polymer material[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12: 604- 610.
- [7] PIOTTER V, MUELLER K. Performance and simulation of thermoplastic micro injection molding[J]. Microsystem Technologies, 2002, 8: 387- 390.
- [8] HU B H, TONG K K, NIU X P, et al. Design and optimization of runner and gating systems for the die casting of thin walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105: 128- 133.
- [9] 唐志玉. 塑料模流变学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991. 5- 8.

基金项目: 江苏省自然科学基金【创新人才】(BK2006551)

收稿日期: 2007-04-06; 修订日期: 2007-08-15

作者简介: 戴亚春(1969—), 男, 硕士, 研究方向: 模具 CAD/CAE/CAM、模具优化设计、微成形研究等. 联系地址: 江苏大学机械学院机械系(212013)。E-mail: yc69@tom.com