

I 型拉伸棒金属注射成形 3D 充模模拟

郭剑锋¹, 李云卿¹, 曲选辉², 郑洲顺¹

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南长沙 410083;

2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京, 100083)

摘要: 基于 ANSYS 提供的 Z-Buffer 切片模型空间观测方式模拟了注射成形喂料在简单几何模腔的流动情况。讨论了浇口位置、浇口大小和模壁温度等工艺参数对熔体充模过程的影响, 预测注射成形过程中部分常见缺陷产生的条件。模拟结果表明: 当采用长×宽为 4 mm×1 mm 的侧面浇口, 模温为 320 K、注射温度为 400 K 以及体积流量为 60 cm³/s 的注射参数时进行注射, 可以得到良好的无缺陷硬质合金 I 型拉伸试样预成形坯。

关键词: 金属注射成形; 拉伸棒; 充模流动; 3D 模拟

中图分类号: TF124. 39

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2004)02-0180-06

3D computer simulation of die filling process for metal injection molding tensile rod

GUO Jiarr feng¹, LI Yun qing¹, QU Xuar hui², ZHENG Zhou-shun¹

(1. State Key Laboratory for Power Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The 3D simulation of cemented carbide feedstock filling simple geometric cavity was investigated by using the Z-Buffer solid observation function of ANSYS. The effects of the three main parameters on the filling process, including inlet position, inlet size, wall temperature, were discussed, respectively. The conditions for some defects, which often appear in the process of the metal powder injection molding, were also predicted. The simulation results show that good I-shape green compacts of cemented carbide could be obtained when the volume flow velocity, the dimensions of lateral inlet size, the wall temperature and the injection temperature are 60cm³/s, 4 mm×1 mm, 320K and 400K, respectively, which is proved to be consistent with the experimental results.

Key words: metal injection molding; tensile rod; die filling; 3D simulation

金属注射成形 (Metal Injection Molding, 简称 MIM) 是近十几年发展起来的一门金属零部件近净成形技术, 其基本工艺流程是将细小的金属或陶瓷粉末与 15%~50% 的有机粘结剂在一定温度下混炼成均匀的喂料, 经制粒后在加热熔融状态下 (100~180 °C) 用注射机将其注入模具型腔中得预

成形坯, 然后采用化学或热分解的方法完全脱去成形坯中的有机粘结剂, 最后经烧结致密化及后处理得到最终产品^[1,2]。其中注射成形是关键的一步, 因为 MIM 制品的缺陷如表面塌陷、内部缩孔、开裂、两相分离、欠注等基本上是在这一步中引入的, 且这些缺陷不能在后 2 个阶段来消除^[3-7]。但由于无法

收稿日期: 2003-09-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (50025412); 国家“973”重点基础研究项目 (G2000067203); 国家教育部博士点基金资助项目 (20010008020)

作者简介: 郭剑锋 (1977-), 男, 广西柳州人, 中南大学硕士研究生, 从事粉末冶金研究

论文联系人: 郭剑锋, 男, 硕士研究生; 电话: 010-62332700(0); E-mail: arfengmail@163.com

观测喂料在模腔内的真实流动情况, 通常在实际生产中只能依靠“炒菜法”来摸索合适的工艺参数以消除缺陷。随着计算机技术的飞速发展, 一些学者在注塑成型的基础上采用有限元/有限差分、有限差分等数值方法对MIM喂料熔体的充模流动模拟进行了研究^[8-12]。而随后不断发展的充模流动模拟技术使MIM喂料熔体在模腔中的流动变成了可视化, 并被用于分析工艺条件和喂料性质对流动过程的影响, 优化浇口位置、工艺参数、模具设计及流道系统。3D充模模拟与20世纪末大量采用的2D模拟技术相比, 更接近实际的充填情况, 也能更精确地指导实际生产, 因此是注射成形过程计算机模拟的高级阶段^[13]。在此, 作者基于大型通用有限元分析软件ANSYS/FLOTRAN, 以硬质合金I型拉伸试样为例讨论了充模流动3D计算机模拟技术在预测缺陷和指导参数优化中的应用。

1 模型建立和网格划分

应用通用有限元分析软件ANSYS的计算流体分析模块FLOTRAN对I型拉伸件进行分析, 选用该模块的FLUID142单元, 采用自底向上的实体建模, 映射网格划分。单元为六面体, 划分后单元总数达到4860, 而通常2D模型划分后的单元数为几百个, 可见对3D模型的模拟分析计算量很大。3D模型和网格划分如图1所示, 喂料的流变参数及其热

物性参数如表1所示, 其中: n 为流动指数, $0 < n < 1$; m_0 为与材料有关的常数, T_a 为热力学温度, 模物的物性参数为: 密度 $\rho = 7\,800\text{ kg/m}^3$, 热导率 $\lambda = 42\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 比定压热容 $c_p = 543\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

表1 拉伸件喂料的流变参数及热物性参数^[14]

Table 1 Physical and rheological characteristics of feedstocks

	n	T_a/K	m_0
57% YG8	0.35	3 512	0.34
	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
57% YG8	8 779	556	46.5

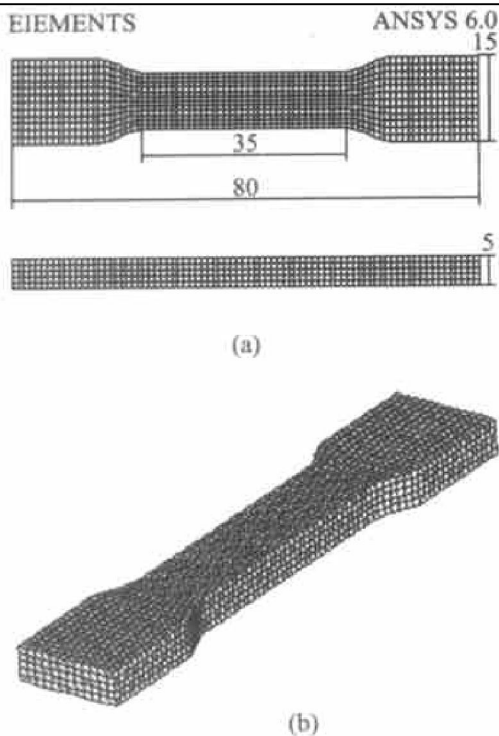
注: 57% 为体积分数。

2 模拟结果和分析

2.1 浇口位置的分析

浇口是指流道终端与型腔入口之间的一段细而短的通道, 喂料熔体通过浇口进入型腔。浇口的位置、形状、数量和尺寸对喂料熔体的充填性能以及成形件的质量都会产生很大的影响, 其中浇口的位置尤为关键。为此, 对采用中间浇口和侧面浇口时I型拉伸试样的充模流动进行3D模拟分析。利用ANSYS提供的Q-Slice Z-Buffer切片功能观测整个模腔充模情况。图2所示为在这2种浇口情况下, 沿拉伸试样厚度方向的3组横切片以及这3组切片上温度场分布情况。横切片的空间位置如图3所示。

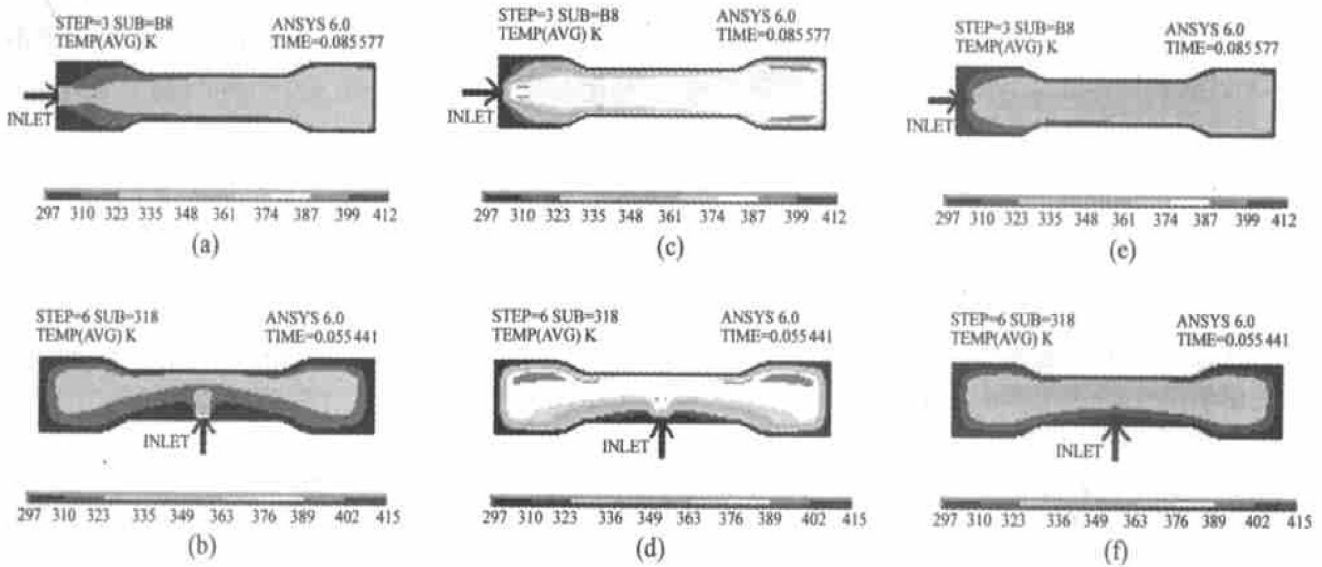
模拟条件为: 入口温度400 K, 模壁温度300 K, 体积流量 $60\text{ cm}^3/\text{s}$, 浇口大小(长×宽) $2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 。由图3可以看到横切片A和B靠近上、下两壁面, 而且切片A的平面经过浇口, 切片C则位于模型中部。图4所示为模腔即将充满时, 采用侧面浇口和中间浇口时模型的横切片示意图。对比图2中的(a)和(b), (c)和(d), (e)和(f)可以看出, 当采用侧面浇口时, 在模型的横向各个层面上的温度分布均比采用中间浇口时的均匀, 温度梯度也较小。通常拉伸试样对其中间拉伸段部分的力学性能要求很高, 模拟分析结果表明选择侧面浇口可以使温度场在I型拉伸试样的中部分布更加均匀, 从而在中部能得到更好的力学性能。不管是侧面浇口还是中间浇口, 分别比较它们各自的A和C横切片可以看到, 所在平面经过浇口的A切片上的温度比处于模腔中部的C切片上的温度低, 这是熔体进入模腔后由于重力作用, 首先在C切片层面上充填; 由A和C切片还可以看到, 熔体在靠近模壁附近流动时的热损失相当大, 这在实际生产中必须予以解决。



(a) 一拉伸试样的主视图和俯视图; (b) 一拉伸试样空间示意图
单位: mm

图1 3D模腔网格划分

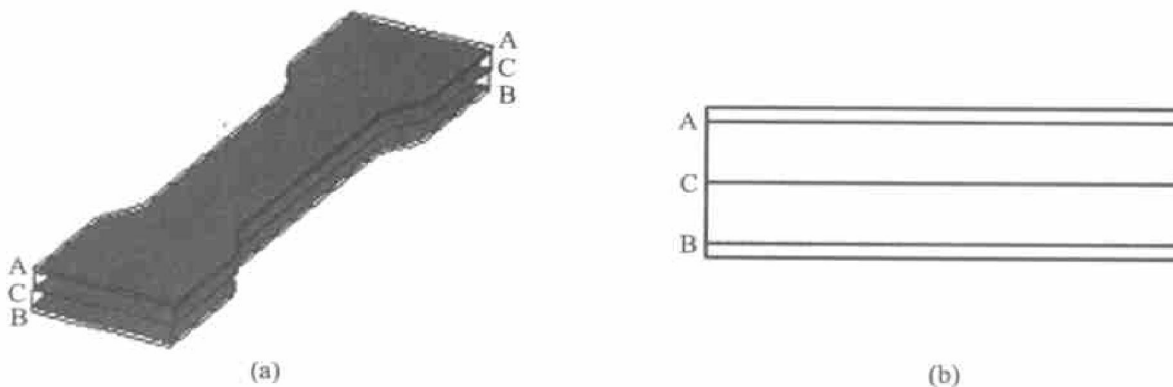
Fig. 1 Meshing 3D mold space



(a) —A 切片侧面浇口, 充模时间为 0.085 577 s; (b) —A 切片中间浇口, 充模时间为 0.055 441 s;
 (c) —C 切片侧面浇口, 充模时间为 0.085 577 s; (d) —C 切片中间浇口, 充模时间为 0.055 441 s;
 (e) —B 切片侧面浇口, 充模时间为 0.085 577 s; (f) —B 切片中间浇口, 充模时间为 0.055 441 s

图 2 不同浇口时模型横切片及其温度场分布

Fig. 2 Transverse sections and temperature field at different inlets



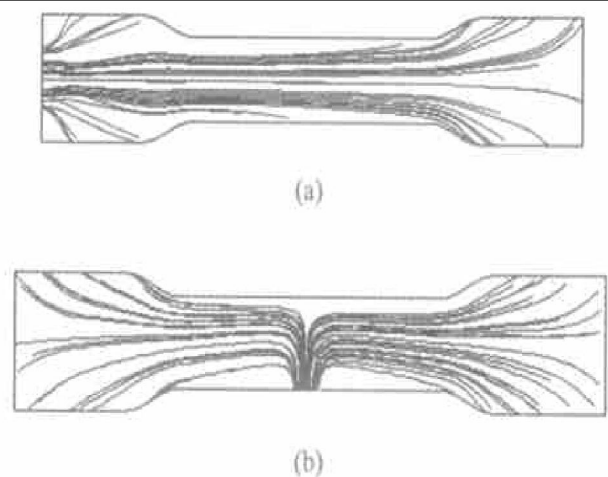
(a) 一横切片 3D 示意图; (b) 一横切片左视图

图 3 横切片空间位置示意图

Fig. 3 Special position of transverse section

当采用侧面浇口时, 靠近浇口两端的拐角温度梯度很大(见图 2(a), 2(c) 和 2(e)), 这是由拐角的几何形状决定的, 拐角处模壁几何形状较模腔其他部位更加复杂, 温度较低的模壁面积也较大, 造成熔体填充困难和大量的热交换损耗; 采用中间浇口时, 模型各个边角处也有类似情况出现, 而且在中间浇口附近由于两熔体前沿汇流, 还会形成熔接线^[5]。

由图 2 所示的充模时间可知, 采用中间浇口时充模时间 (0.055 441 s) 较侧面浇口所需时间 (0.085 577 s) 要少。这是因为当熔体由中间浇口进入模腔时, 流经的途径最短, 有利于保持较大的充模速度。但由图 4 所示的粒子轨迹图可以看出, 当采用中间浇口时, 熔体的充模流动行为较浇口在侧面时的行为更加复杂, 而流动过程不稳定, 容易导致出



(a) 一侧面浇口; (b) 一中间浇口

图 4 粒子轨迹图

Fig. 4 Flow trace

现次品。对于侧面浇口, 熔体基本上是沿着入口速度方向进行充模, 而对于中间浇口, 熔体进入模腔后, 由于受模腔形状限制, 流动方向发生强烈改变, 这种改变会导致流动阻力增大, 可能会带来粘结剂与粉末分离的问题。中间浇口浇注还容易产生熔接线(模拟预测熔接线可能出现在试样中部), 从而大大降低了试样中间段的力学性能和光洁度, 甚至有可能产生气孔等严重缺陷。因此, 在实际生产拉伸件试样时, 一般选择侧面浇口进行。

2.2 浇口大小的分析

图5所示为当侧面浇口尺寸(长×宽)增大到4 mm×1 mm, 其他条件不变时, 拉伸试样模型的横向切片A和B及其温度场的分布情况。与浇口尺寸(长×宽)为2 mm×1 mm时的模型切片进行比较(见图2)可以看到, 增大侧面浇口尺寸后模型内部温度场的分布也较为均匀、一致, 此外, 熔体充模所需时间明显减少, 由增大浇口尺寸前的0.085 577 s(见图2)减少到增大后的0.039 235 s(见图5)。过小的浇口会导致熔体经由浇口进入面临较大的流动阻力, 适当增大浇口的大小, 可以降低入口压力, 使熔体保持较高的充模速度。从图6所示的流场前沿发展情况可以看到, 浇口尺寸增大后熔体进入模腔能够更快地扩散至壁面处, 从而获得更为理想的渐进式模腔充填过程, 通常很小的浇口和充模时使喂料不与模壁接触的浇口会导致“喷射”现象产生, 容易导致模腔中气体来不及排出而形成气孔和空洞等缺陷, 还可能出现熔接线。渐进式的充填能够使喂料沿模壁迅速往里填, 减少缺陷出现的几率。可见, 浇口尺寸(长×宽)放大到4 mm×1 mm时能够得到

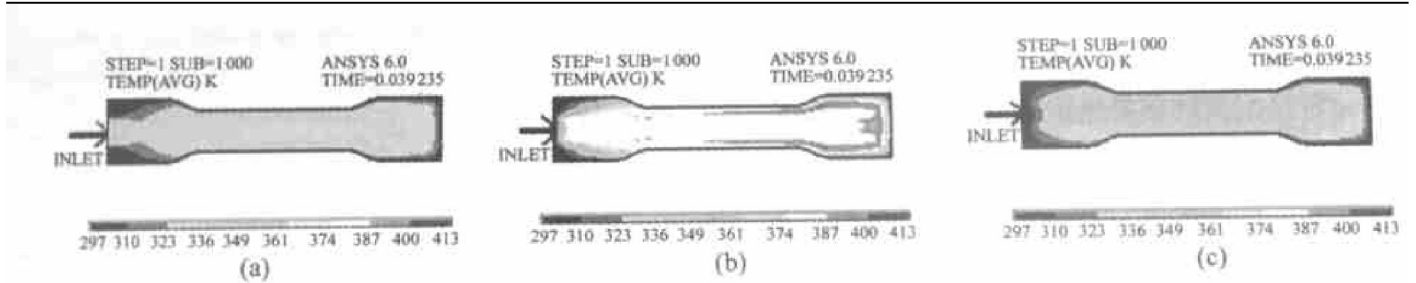
理想的充模过程。但是浇口的尺寸太大也会导致注射压力突降, 不利于熔体的充模, 有可能造成短射等。此外, 尺寸放大后, 浇口附近转角处温度梯度过大的情况仍然存在。

2.3 模壁温度的分析

喂料熔体充填模腔的初期, 由于接触到温度较低的模腔壁面, 产生强烈的热量交换, 从而会在模壁表面上形成一层“冷凝层”, 并且冷凝层还可能随着充模过程的进行而不断增厚, 这迫使流体流经的模腔截面不断减小, 使得熔体流动阻力增大, 影响模壁内压力梯度分布。

当注射压力不足或冷凝层过厚则可能引起欠注等缺陷。由于模壁附近的热交换而产生大量的热损失导致切片A和B上温度较模腔中部的切片C要低得多, 而拐角处也出现了类似的情况, 因此, 模腔的温度控制对于MIM制品的生产是具有决定性的因素。图7所示为当侧面浇口尺寸(长×宽)为4 mm×1 mm, 模壁温度提高到320 K后, 拉伸试样模腔的横向切片切片图及温度分布情况。

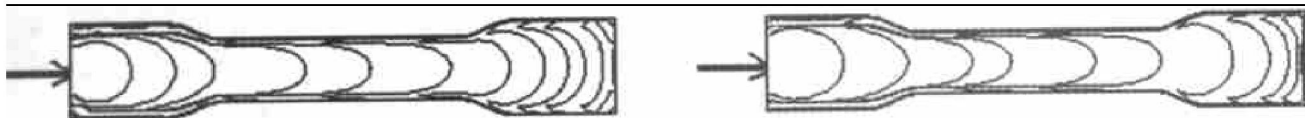
比较图5和图7可以看出, 模壁温度提高后, 模型内部温度分布较均匀, 且在模壁温度提高后, 减小了浇口附近拐角处温度梯度过大的现象。温度梯度控制在很小的范围内, 这对于形状复杂, 充模困难的零件生产具有指导意义。从图7(a)和7(c)还可以看出, 靠近壁面的A和B切片上的温度均比模壁温度提高前相同位置切片的温度高许多, 这可以减缓熔体在模壁表面上的冷却速度, 消除因局部冷却过快造成的成形坯表面开裂、起皱的现象, 对于表面光洁度和性能要求较高的零件来说, 有利于提高模壁



(a) —A 切片, 充模时间为 0.039 235 s; (b) —C 切片, 充模时间为 0.039 235 s; (c) —B 切片, 充模时间为 0.039 235 s

图5 增大浇口尺寸后, 模型的横切片及温度场分布

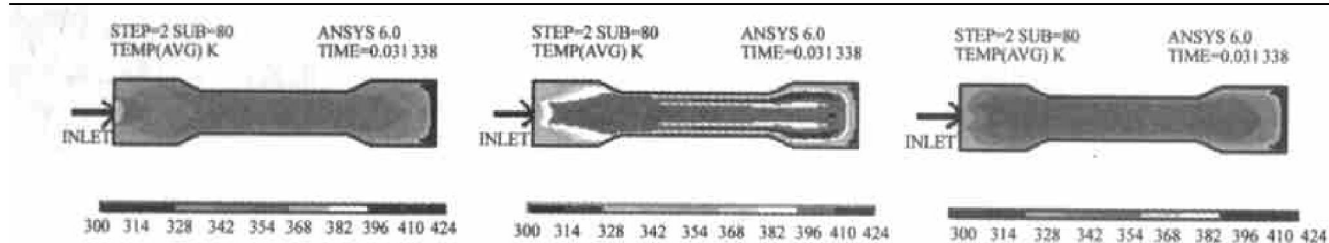
Fig. 5 Transverse sections and temperature field when inlet is enlarged to 4 mm×1 mm



(a) —浇口长×宽为 2 mm×1 mm; (b) —浇口长×宽为 4 mm×1 mm

图6 不同浇口大小下, B切片上熔体前沿充填情况

Fig. 6 Melt front distribution at different inlets size



(a) —A 切片, 充模时间为 0.031 338 s; (b) —C 切片, 充模时间为 0.031 338 s; (c) —B 切片, 充模时间为 0.031 338 s

图 7 模壁温度提高后, 模型的横竖切片及温度场分布

Fig. 7 Transverse sections and temperature field when wall temperature is enhanced

温度, 同时有利于减小冷凝层厚度, 降低熔体流动阻力, 从而更快地填充模腔, 这点从充模时间由模壁温度提高前的 0.039 235 s 减少到模壁温度提高后的 0.031 338 s 可以得到证实。从经济因素角度考虑, 当每次或每单位时间注射成形坯的数量增加时, 注射机的成本是保持不变的, 因此在大批量生产时, 提高模壁温度能够产生明显的经济效益^[16]。

在平面穿过浇口的切片 A 上的温度往往比 B 要低, 上、下底面的熔体温差对制品的质量有较大的影响, 温差太大时, 还常常会引起翘曲和表面裂纹等缺陷, 这些现象在实际生产中时常发生。模壁温度提高到 320 K 时, A 和 B 切片上的温度差别很小(见图 7(a) 和 7(c))。因此, 模壁温度提高到 320 K 对于提高拉伸件表面性能和质量, 消除由于温差过大导致应力集中, 以至在烧结后处理过程中出现严重的翘曲变形、开裂等现象有着重要作用。当然, 模壁温度也不能提高太大, 否则会对生产人员手动脱模时带来不便。

由图 7(b) 所示的模型中部的切片 C 的温度场分布可看到, 由于存在粘性项(流动过程中因粘性摩擦作用而将机械能转化为热能的部分), 加上模腔中部熔体流动时热散失较少, 注射过程中熔体中心局部地方的温度高于初始注射温度(400 K), 超过初始温度达 24 K, 这些区域可能使粘结剂失效而形成缺陷^[17]。

需要指出的是, 在实际生产过程中, 往往都是连续生产, 模具由于不断地接触高温喂料熔体同时加上喂料与模具之间的摩擦生热作用, 模具温度往往高于周围室温, 这对模具加热以提高模壁温度时需要考虑的。而生产初期, 如间歇后开始的第 1 次生产, 模壁温度则是较低的室内温度, 所以要特别注意此时模壁温度的控制, 以防止由于模温过低造成的

欠注和制品翘曲等问题。

3 结 论

a. 以硬质合金 I 型拉伸试样为例, 对金属注射成形喂料在简单几何模腔的流动情况进行了 3D 模拟。

b. 利用 ANSYS 提供的 Z-Buffer 切片模型空间观测方式, 讨论了浇口位置、浇口大小和模壁温度等工艺参数对熔体充模过程的影响, 预测注射成形过程中部分常见缺陷产生的条件。

c. 模拟结果表明: 当采用浇口大小(长×宽)为 4 mm×1 mm 的侧面浇口, 模温为 320 K、注射温度为 400 K 以及体积流量为 60 cm³/s 的注射参数进行注射时, 可以得到良好无缺陷的硬质合金 I 型拉伸试样预成形坯。

参考文献:

- [1] 曹勇家. 金属注射成形发展的机遇和挑战 [J]. 粉末冶金工业, 2001, 11(3): 7-17.
CAO Yong-jia. The developing opportunity and challenges of metal injection molding [J]. Powder Metallurgy Industry, 2001, 11(3): 7-17.
- [2] 乐红胜. 粉末注射成形充模过程中凝固层形成规律的计算与分析 [J]. 粉末冶金技术, 1999, 11(1): 14-18.
YUE Hong-sheng. Formation of solidified layer in die during feedstock filling process in PIM [J]. Powder Metallurgy Technology, 1999, 11(1): 14-18.
- [3] German R M. A vision of PIM industry—yesterday, today and tomorrow [A]. MPIF. Proceedings of PIM98[C]. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1998: 3-26.
- [4] 曲选辉, 乐红胜, 林好转, 等. 粉末注射成型喂料充模过程数值分析 [J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1998, 29(5): 454-457.
QU Xuanyue, YUE Hong-sheng, LIN Haoran, et al. Numerical

- analysis is for mold filling process of feedstock in powder injection molding [J]. *Journal of Central South University of Technology (Natural Science)*, 1998, 29(5) : 454 - 457.
- [5] Winand R. Hydrometallurgy on chloride [J]. *Hydrometallurgy*, 1991, 27(3) : 285 - 316.
- [6] Gaspervich J R. Pratical application of flow analysis in metal injection molding [J]. *The International Journal of Metallurgy*, 1997, 27(2) : 133 - 135.
- [7] ZHENG Zhou-shun, QU Xuarr hui, LI Yurr ping. Numerical simulation of powder injection molding filling process [J]. *Mathematical Theory and Applications*, 2003, 23(3) : 96 - 100.
- [8] Najmi L A, Lee D. Modeling of mold filling process for powder injection molding [J]. *Polym Eng Sci*, 1991, 31(5) : 1 137- 1 141.
- [9] Wang C M, Leonard R L, Booker P H, *et al.* Prediction of defect formation in powder injection molding by computer simulation [A]. MPIF, APMI. *Proceedings of the 3rd international conference on powder metallurgy in aerospace defense and demanding applications*[C]. Princeton: Metal Powder Industries Federation, American Powder Metallurgy Institute, 1993, 85 - 92.
- [10] Kwon T H, Hwang C J, Rhee J H. Numerical simulation of powder injection molding filling process for three dimensional complicated cavity geometries [A]. MPIF. *Advances in powder metallurgy & particulate materials 1996*[C]. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1996: 79 - 90.
- [11] Carr K E. PIM analysis and design tools: computer simulation code and knowledge based expert system [A]. MPIF. *Advances in powder metallurgy and particulate materials 1995*[C]. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1995: 279 - 286.
- [12] 郑洲顺, 曲选辉, 韩旭里, 等. 粉末注射成形过程数值计算机模拟[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(14) : 1257 - 1260. ZHENG Zhou shun, QU Xuarr hui, HAN Xu li, *et al.* Computer simulation of powder injection(PIM) process [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(14) : 1257 - 1260.
- [13] 曲选辉, 温宏宇. 粉末注射成形技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 18 - 22. QU Xuarr hui, WEN Hong yu. *Powder injection technology and its application* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 18 - 22.
- [14] 史安娜, 王晓方. 盒形塑料浇口位置的选择[J]. *模具工业*, 2000(4) : 31 - 32. SHI An na, WANG Xiao fang. Selecting the gate location for the box-shaped plastic parts [J]. *Die and Mold Industry*, 2000(4) : 31 - 32.
- [15] Iwai T. Powder-binder flow simulation in powder injection molding [A]. MPIF. *Advances in powder metallurgy and particulate materials 1996*[C]. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1996: 19 - 24.
- [16] Geman R M. 粉末注射成形[M]. 曲选辉, 刘绍军, 乐红胜, 等译. 长沙: 中南大学出版社, 2001. R. M. Geman. *Powder injection molding* [M]. QU Xuarr hui, LIU Shaor jun, YUE Hong sheng, *et al.* translated. Changsha: Central South University Press, 2001.
- [17] 梁叔全, 黄伯云. 粉末注射成形流变学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000. LIANG Shu quan, HUANG Bai yun. *Powder injection molding rheology* [M]. Changsha: Central South University Press, 2000.