

实心边框铝型材挤压数值模拟与模具结构优化

周晓远¹, 陈文琳¹, 徐晨¹, 阮祥明², 吉宏选²

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;

2. 安徽生信铝业股份有限公司, 安徽 宣城 242000)

摘要: **目的** 针对汽车用某实心边框铝型材出口流速不均匀的现象, 改进模具的工作带、阻流块和促流角结构。**方法** 运用专业铝型材挤压成形有限元软件系统, 对型材的挤压过程进行分析, 模拟稳态挤压成形过程, 以速度相对差作为衡量速度均匀程度的指标。**结果** 初始模具结构挤出的型材流速不均匀。通过改变工作带长度、增设阻流块以及增加促流角的方法, 使得模具出口处的金属流速变得均匀。**结论** 改进后模具所受的压力更小, 可以减小模具的磨损, 增加模具寿命, 模拟结果与实验吻合。

关键词: 实心铝型材挤压; 速度相对差; 模具结构优化

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.02.006

中图分类号: TG376 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)02-0035-06

Numerical Simulation of Solid Aluminum Profile Extrusion and Optimization of Die Structure

ZHOU Xiao-yuan¹, CHEN Wen-lin¹, XU Chen¹, RUAN Xiang-ming², JI Hong-xuan²

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Shengxin Aluminum Industry Co., Ltd., Xuancheng 242000, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the working belt, flow block and flow angle of mold to solve the uneven flow at the exit of a certain solid aluminum for vehicle. This paper used the professional aluminum profile extrusion forming finite element software system to analyze the extrusion process of the profile and simulate the steady extrusion process. The relative speed difference was used as an index to measure the speed uniformity. The profile flow rate extruded by the initial mold structure was not uniform. The metal flow rate at the exit of the mold was made uniform by changing the length of the working belt, adding a chock block, and increasing the flow angle. The improved mold is subjected to less pressure, which can reduce the wear of the mold and increase the life of the mold. The simulation results are in agreement with the experiment.

KEY WORDS: solid aluminum extrusion; SDV; mold structure optimization

铝合金在现代工业中有着广泛的应用, 多运用于民用建筑、航空航天、交通运输等领域, 且铝型材具有容易回收、质量轻、生产耗能不高、成品表面质量高等其他材料无法比拟的优点^[1]。与此同时, 随着计算机技术的发展与进步, 运用有限元技术对铝型材的

挤压过程进行模拟分析, 这样的虚拟试模极大提高了型材的生产效率和质量^[2]。另外, 在加工的过程中, 模具结构设计对型材质量有着很大的影响, 不合理的模具结构就会使生产出的型材出现扭拧、断裂、焊合不良、弯曲和波浪等缺陷, 有时候还会出现无法成形

收稿日期: 2019-02-14

基金项目: 安徽省2018重点研究与开发计划项目(1804a09020073)

作者简介: 周晓远(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为塑性成形工艺与模具技术。

通讯作者: 陈文琳(1963—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为精密塑形成形理论。

的情况^[3]。

本次研究以汽车用某铝合金结构件为研究对象,为验证模具结构的合理性,利用商业有限元软件^[4-5],模拟实心边框铝型材挤压成形过程,根据模具出口处的速度相对差,对模具的结构进行优化,从而得到成形质量合格的型材。

1 模具设计和有限元模型建立

1.1 型材截面分析

汽车用某实心边框铝型材的几何形状和主要尺寸见图 1,材料为 6082 铝合金。该型材截面积为 11450.5 mm^2 ,最大壁厚为 4 mm,最小壁厚为 2 mm。型材为实心,没有空腔,壁厚较薄且不均匀。从截面形状看,具有多个悬臂和弯曲结构,型材断面形状复杂。经过计算得出难度系数 K 为 1.429,属于 5 级^[6]。由于截面形状比较复杂,在连续挤压时,如果模具结构不合理极易导致型材挤压时出现较大的流速差,容易造成型材弯曲、扭拧等质量缺陷。

型材的最大外接圆直径为 $\Phi 123.7 \text{ mm}$,周长为 531.3 mm。通过查阅参考文献^[6]并结合生产单位的实际情况,取 $\Phi 230 \text{ mm}$ 为挤压筒内径尺寸,坯料尺寸为 $\Phi 220 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 。

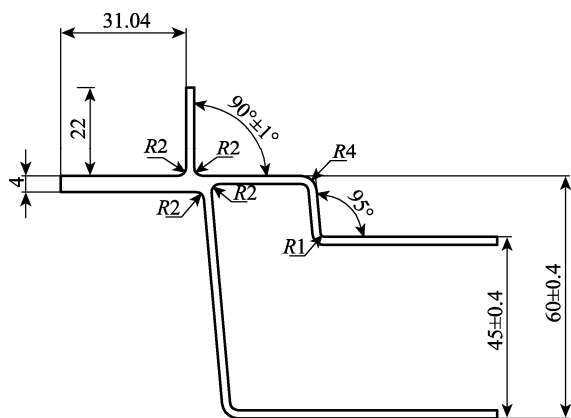


图 1 型材截面
Fig.1 Profile section

1.2 模具设计

模具结构是带有导流槽的平面模,相比较于平面分流组合模,平面模挤出的铝型材不会形成焊缝。根据相关设计手册^[6]所设计出的模具初始结构见图 2,其中,模角为 90° ,入口圆角为 0.2 mm,导流槽的高度为 15 mm^[7]。为了保证模具的强度要求,设计上模尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,下模尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

1.3 有限元模型的建立

将模具的三维图导入有限元模拟软件中,对模型进行单元划分,型材工作带处的网格尺寸设定为 0.4 mm,其他位置的网格尺寸介于 0.4 ~ 12.8 mm 之间。

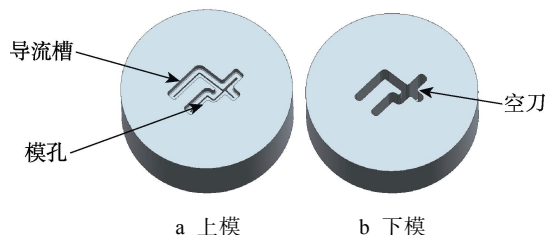


图 2 模具三维图
Fig.2 Mold 3D

型材的材料为 6082 铝合金,模具材料为 H13 钢^[8]。设定材料与挤压筒之间、模具与型腔内壁之间的摩擦类型为粘着摩擦,材料与模具工作带之间的摩擦类型为库伦摩擦,坯料和模具之间的界面换热系数为 $3000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[9]。根据生产单位的情况,选定的挤压工艺参数见表 1。

表 1 挤压模拟工艺参数
Tab.1 Extrusion simulation process parameters

挤压速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	模具初始 温度/ $^\circ\text{C}$	挤压筒 温度/ $^\circ\text{C}$	坯料 温度/ $^\circ\text{C}$
2.5	470	400	520

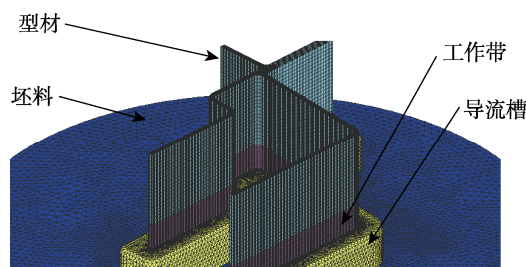


图 3 有限元模型
Fig.3 Finite element model

2 初始模拟结果分析

2.1 金属流速相对差

为了表征模具出口处金属流速的均匀性,引入速度相对差 (D_{vrd}) 来进行判断。速度相对差的具体表达式如下:

$$D_{\text{vrd}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|v_i - v_\alpha|}{v_\alpha}}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: v_i 为对应的节点速度; v_α 为所有节点平均速度; n 为节点数量。

当速度相对差的数值越小,则表示金属的挤出速度越均匀,质量越好;反之,当速度相对差的数值越大,则挤出型材质量就越差^[10]。

2.2 初始模具模拟的结果分析

为了保证型材的形状,型材挤压生产时必须保证模具出口处型材横截面上各个质点以比较均匀的速

度流出模孔^[11]。初始模具出口处的金属流速情况见图 4。从图 4 可以看出, B 处的金属流速最快, 为 204.77 mm/s; AB 两处的金属流速明显偏高, 而 CD 两处的金属流速偏低, 其中在 D 处的金属流速最低, 为 105.12 mm/s。型材出口的金属流速差达到 99.65 mm/s, 根据式(1)计算, 速度相对差为 15.64%。由此判断初始模具的结构不合理。拟分别采用调整工作带长度、增设阻流块、增加引流角的方式对初始模具进行改进, 以减小型材截面的流速差异, 保证成形质量^[12]。

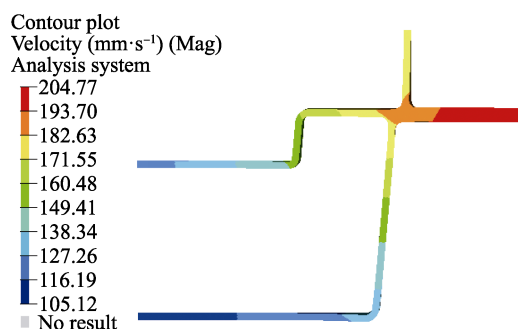


图 4 初始模具金属流速分布
Fig.4 Initial metal flow rate profile of mold

3 模具结构优化

3.1 工作带长度调整

在铝型材挤压模具中, 工作带的主要作用是控制金属流动, 稳定制品尺寸和保证制品表面质量。工作带设计不合理或加工不准确, 会导致挤压制品出现波浪、扭拧、弯曲和长短不齐等缺陷。较短的工作带可以提高金属流速和制品的表面质量, 减少挤压力, 但工作带过短, 会使模具磨损加快, 制品尺寸不稳定易超差^[13], 而工作带过长则不仅增加挤压力, 对薄壁型材易产生堵模现象, 并且容易在工作带上粘结金属, 导致型材表面出现麻点、划伤等缺陷。根据流速大的地方增加工作带长度, 流速低的地方减小工作带长度的原则, 改进前后的工作带长度见图 5。

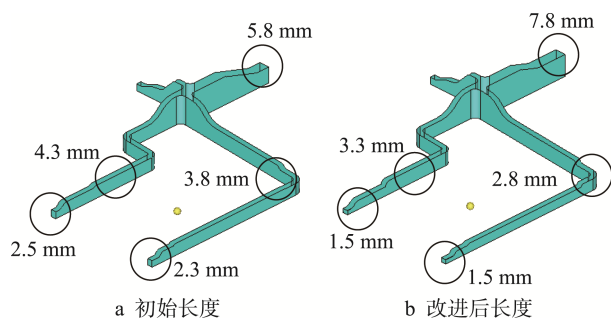


图 5 调整前后工作带长度
Fig.5 length of working belt before and after adjustment

工作带改进后, 模具出口处的金属流速情况见图 6。金属流速差降低为 92.04 mm/s, 速度相对差降低为 15.49%。流速的均匀性有一定的改善, 但改善幅度不大, 表明调整工作带对流速的改善具有一定局限性, 所以还需要在模具的其他结构上进行进一步优化。

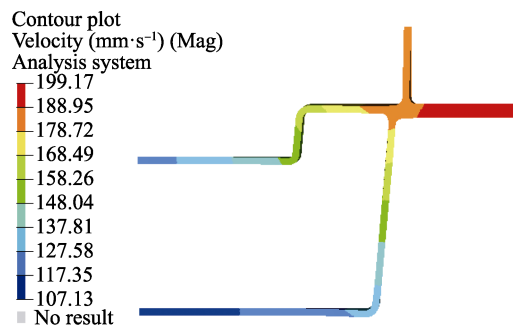


图 6 改进工作带的流速分布
Fig.6 Improved flow rate profile of the working belt

3.2 增设阻流块

针对模具出口处金属流速的不均匀现象, 实际生产中常运用增加阻流块的方法来改善金属流速^[14]。阻流块的结构相对独立, 主要作用是增大金属的流动阻力, 降低局部的金属流速。阻流块易于添加、去除、修改, 在生产中广泛应用。阻流块高度宽度的比值一般不超过 1.5^[9]。

改进原则为在流速较大的地方, 设置较大的阻流块, 流速较慢的地方, 设置较小的阻流块。根据多次改进后的模拟结果, 选定大阻流块尺寸为 15 mm×3.5 mm×3.5 mm; 小阻流块尺寸为 13 mm×1 mm×1 mm。改进后的模具结构见图 7。

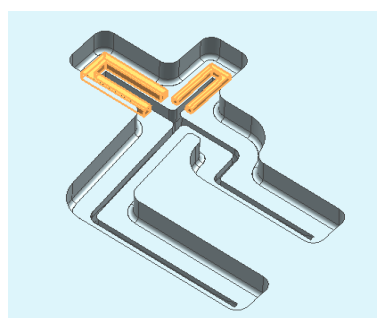


图 7 增加阻流块后的模具结构
Fig.7 Mold structure after adding the choke block

增设阻流块过后, 模具出口处金属流速差降低为 44.09 mm/s, 速度相对差降低为 8.62%。优化效果明显, 模拟结果见图 8, 但远端悬臂处的金属流速还是明显偏低, 所以还需要进一步的改进。

3.3 导流槽中增设促流角

促流角是在导流槽的边缘, 增设一定的边倒角来减小金属流动的阻力, 以此来提高流速。根据之前的

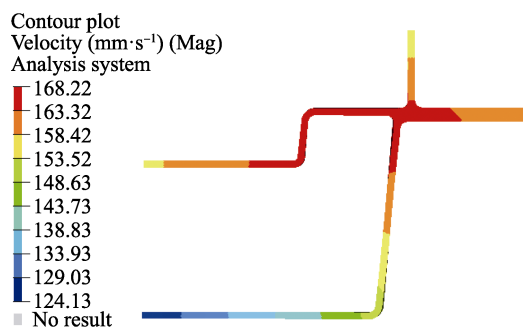


图8 增设阻流块后的流速分布

Fig.8 Flow rate distribution after adding the choke block

模拟结果,在悬臂端处流速较低的地方设置促流角,以此来提升流速,经过多次模拟,改进后的模具结构见图9。促流角A的深度为8 mm,角度为35°;促流角C的深度为6 mm,角度为30°;促流角B和D的深度均为8 mm,角度为30°。

增加促流角后,悬臂端处的金属流速明显增大,整体流速均匀性改善效果明显。模具出口处的金属流速差为11.65 mm/s,速度相对差为1.85%,流速的均匀性较好,相比初始模具出口处的金属流速情况有大幅度的改进,优化效果明显,流速分布见图10。

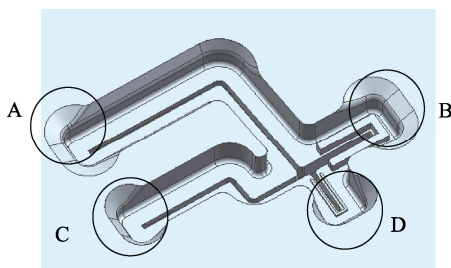


图9 增加促流角后的模具结构

Fig.9 Mold structure after increasing the flow angle

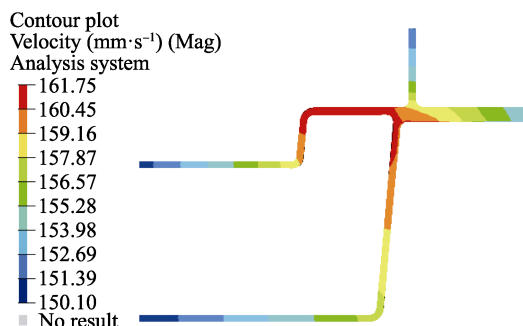


图10 增加促流角后的流速分布

Fig.10 Flow rate distribution after increasing the flow angle

4 模具优化前后关键参数比较

4.1 型材挤压流速对比

工作带长度的增加,加大了金属流与工作带的接触面积,从而降低了金属流动速度;反之,工作带长度减小,则金属流速增加。加设阻流块,可以增大金

属在导流槽中的流动阻力,从而使金属流速降低。在导流槽中的边缘增加促流角,可以减小金属的流动阻力,使得金属流动速度得到提升。

经过模具结构优化后,金属流速差由原来的99.65 mm/s,降低为11.65 mm/s,降低了88.31%;速度相对差由原来的15.64%,降低为1.85%,降低了88.17%,型材流速分布对比见图11。

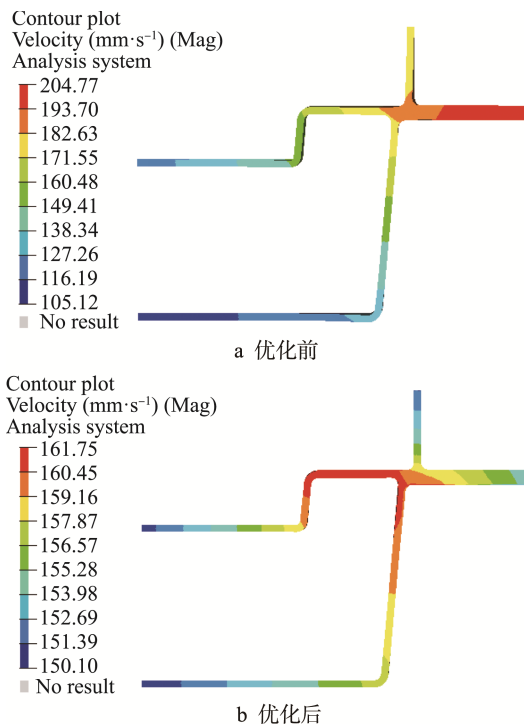


图11 优化前后型材流速分布

Fig.11 Profile velocity profile before and after optimizing

4.2 型材出口温度对比

由于优化后的模具增加了阻流块和促流角,使得金属与模具的接触面积增加,金属的传热更快,从而使得优化后的型材挤出温度明显低于初始模具型材挤出温度。最高温度由原来的557℃降低为530℃,最低温度由原来的530℃降低为494℃,优化前后型材出口温度对比见图12。

由于铝合金的熔点较低,因此拥有更低的型材出口温度,不仅可以保证型材成形质量也允许更高的挤压速度。在实际生产中,拥有更高的挤压速度,可以有效提高生产效率^[15]。

4.3 压力对比

挤压过程中,坯料直接进入导流槽,这时导流槽将承受金属流的全部压力。增加的促流角对进入导流槽的坯料起到缓冲作用,因此模具所受的压力有所降低,如图13所示,初始模具所受的最大压力为1207 MPa,经过模具优化改进后,模具所受最大压力降低为1028 MPa,降低了14.8%。

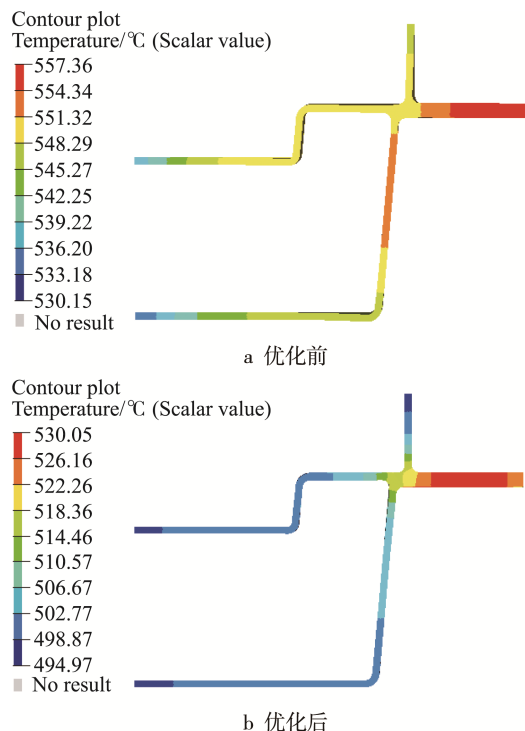


图 12 优化前后型材温度

Fig.12 Profile temperature before and after optimizing

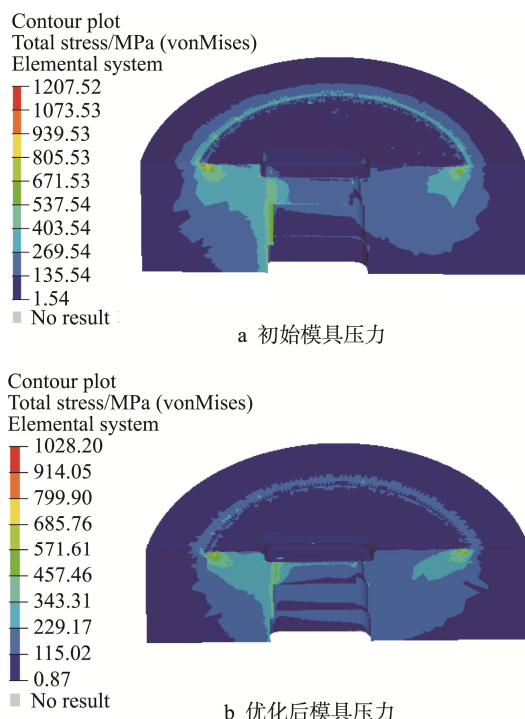


图 13 优化前后模具压力

Fig.13 Mold pressure diagram before and after optimizing

模具所受的压力越大，则磨损程度越大，模具寿命越短。优化后的模具压力降低，模具磨损变小，模具寿命增长。

4.4 实验验证

模具结构改进后所生产的铝型材质量良好，与模

拟结果一致，由此验证了有限元模型的可行性。模具结构改进后所生产的铝型材零件见图 14。

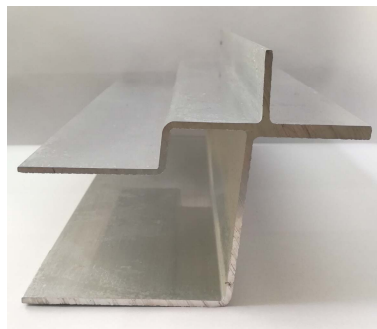


图 14 模具优化后型材截面

Fig.14 Mold profile after optimizing

5 结论

1) 通过改变工作带长度，可以调节模具出口处的金属流速。增大工作带长度可以降低金属流速，减小工作带长度可以增加金属流速。

2) 对于带有导流槽的平面模模具，在导流槽中增加阻流块可以有效降低金属流速；在导流槽边缘增加促流角可以提高金属流速。

3) 模具结构经过改进后，模具出口处的金属流速差降低了 88.31%，速度相对差降低了 88.17%，优化效果明显；型材的出口温度明显降低，从而允许更高的挤压速度，进而提高生产效率；模具压力降低了 14.8%，减小了模具磨损，提高了模具寿命。

参考文献：

- [1] MAHMOODKANI Y, WELL M A, PARSON N, et al. Numerical Modelling of the Material Flow during Extrusion of Aluminium Alloys and Transverse Weld Formation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 688—700.
- [2] GAMAGE P, XIE S Q. A Real-time Vision System for Defect Inspection in Cast Extrusion Manufacturing Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(1/2): 144—156.
- [3] 谢水生, 刘静安, 王志英. 铝合金车辆大型材模具的设计与制造工艺研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 146—150. XIE Shui-sheng, LIU Jing-an, WANG Zhi-ying. Design and Manufacture of Die for Aluminum Alloy Extrusion Section Train with Large[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 146—150.
- [4] 吴向红, 赵国群, 赵新海, 等. 铝型材挤压成形过程数值模拟的研究现状及发展[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 945—951. WU Xiang-hong, ZHAO Guo-qun, ZHAO Xin-hai, et al. Research Status and Development of Aluminum Extrusion Process Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2007,

- 19(5): 945—951.
- [5] ZHANG Cun-sheng, ZHAO Guo-qun, GUAN Yan-jin, et al. Virtual Tryout and Optimization of the Extrusion Die for an Aluminum Profile with Complex Cross-sections[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78: 927—937.
- [6] 吴锡坤. 铝型材加工实用技术手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
- WU Xi-kun. Aluminum Profile Extrusion Applied Technical Manual[M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [7] 刘静安. 铝型材挤压模具设计、制造、使用及维修[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- LIU Jing-an. Design, Manufacture, Use and Maintenance of Aluminum Extrusion Die[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.
- [8] ZHANG Cun-sheng, ZHAO Guo-qun, CHEN Hao, et al. Optimization of an Aluminum Profile Extrusion Process Based on Taguchi's Method with S/N Analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60: 589—599.
- [9] 陈浩. 空心铝合金型材挤压过程数值模拟及模具优化方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2012
- CHEN Hao. Numerical Simulation of Extrusion Process of Hollow Aluminum Alloy Profiles and Mold Optimization Methods[D]. Jinan: Shan Dong University, 2012
- [10] ZHANG C, ZHAO G, CHEN Z, et al. Effect of Extrusion Stem Speed on Extrusion Process for a Hollow Aluminum Profile[J]. Materials Science & Engineering B, 2012, 177(19): 1691—1697.
- [11] 潘鹏林, 陈文琳, 吉宏选, 等. 异形空心铝型材挤压工艺数值模拟及模具结构改进[J]. 模具工业, 2018(1): 8—11.
- PAN Peng-lin, CHEN Wen-lin, JI Hong-xuan, et al. Numerical Simulation of Extrusion Process for Special-shaped Hollow Aluminum Profile and the Die Improvement[J]. Die & Mould Industry, 2018(1): 8—11.
- [12] PADMANATHAN K, THOMAS N. Optimization of Pocket Design to Produce a Thin Shape Complex Profile[J]. Production Engineering-Research and Development, 2003, 142: 23—241.
- [13] 倪正顺, 刘石柏, 田胜利, 等. 铝型材挤压成型数值模拟与模具优化设计[J]. 铸造技术, 2012, 33(5): 596—599.
- NI Zheng-shun, LIU Shi-bai, TIAN Sheng-li, et al. Numerical Simulation on Aluminum Profile Extrusion Process and Optimization Design of Die[J]. Foundry Technology, 2012, 33(5): 596—599.
- [14] 喻俊荃, 赵国群, 张存生, 等. 阻流块对薄壁空心铝型材挤压过程材料流速的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 52—58.
- YU Jun-quan, ZHAO Guo-qun, ZHANG Cun-sheng, et al. Effect of Baffle-block on Material Flow Velocity during Thin-walled Hollow Aluminum Profile Extrusion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 52—58.
- [15] FANG G, ZHOU J, DUSZCZYK J. Extrusion of 7075 Aluminium Alloy through Double-pocket Dies to Manufacture a Complex Profile[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(6): 3050—3059.