

焊合室高度对平面分流组合模挤出成型的影响

岳博文, 刘 鹏, 范克顺

(烟台大学机电汽车工程学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 运用 QForm 数值模拟软件, 分别对 5 种不同焊合室高度的模具进行模拟, 分析了平面分流组合模焊合室高度对铝型材挤压成型的影响。模拟结果显示, 随焊合室高度的增大, 模具应力、焊合室内静水压力、模芯 Z 向位移和挤压力均增大, 型芯与分流桥桥底结合部位的应力集中现象更加显著, 焊合室底部的应力分布更均匀。本文通过 QForm 软件所得结论为模具结构参数选择提供参考。

关键词: 铝型材挤压; 数值模拟; 焊合室高度; 模具; 应力

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

铝型材有重量轻、耐腐蚀、强度好的优点, 其应用十分广泛。如今, 运用计算机数值模拟技术, 计算得出型材挤压过程中模具及坯料各处的应力、应变、温度和流速等重要物理场。通过分析这些结果, 设计者在模具制作前改正设计缺陷, 以减少试模次数, 降低生产成本。近年来, 运用数值模拟技术分析铝型材挤压成型的论文有许多^[1-9]。常用的数值模拟软件有 HyperXtrude、Deform-3D、Simufact 等, 而本文运用的 QForm 有限元模拟软件与其他同类软件相比, 完全自动生成自适应的有限元网格, 在计算中自动重新划分网格。坯料与模具的有限元分析过程同时进行, 运算结束后直接得出坯料与模具的物理场计算结果。

模具设计中, 焊合室高度是平面分流模的关键参数之一。黄东男等^[10]利用 Deform-3D 数值模拟软件分析了 6065A 型材双孔分流模挤压时焊合室深度对于型材成型的影响。本文运用 QForm 软件,

对四分流孔模具挤压 6063 矩形空心铝型材制品进行数值模拟, 获得了不同焊合室高度下模具应力、挤压力、模芯 Z 向位移和焊合面静水压力的变化规律, 为模具的优化设计提供参考。

1 模具设计和挤压参数

1.1 几何模型的建立

图 1 为本文所研究的平面分流组合模, 由上模和下模组成。上模的结构包括分流孔、分流桥、模芯, 下模的结构包括焊合室、工作带、出口空刀。模具共 5 套, 除焊合室高度分别为 11 mm、13 mm、15 mm、17 mm、19 mm 外, 其他结构参数相同。将上、下模装配体的三维模型用 stp 格式导入 QForm 软件进行数值模拟前处理。

1.2 模拟参数的选择

6063 铝和 H13 钢的性能参数见表 1, 挤压参数的设置见表 2, 型材的外形尺寸见图 2。由于在铝型

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405416); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EEQ024); 烟台市科技发展规划(2013ZH085)。

作者简介: 岳博文(1993-) 男, 山东淄博人, 硕士研究生。

通信作者: 刘鹏(liupenglp@hotmail.com) 副教授, 博士, 研究方向: 铝合金挤压数值模拟。

材挤压成型过程中 ,金属坯料与模具间的接触压力大 ,金属坯料的表面粘着在模具表面 ,所以金属坯料和模具之间为粘着摩擦状态 ,选择塑性剪切摩擦模型 ,摩擦因子 $m = 1^{[11-12]}$.

表 1 6063 铝和 H13 钢的性能参数
Tab. 1 Material properties for 6063 Al and H13 Steel

	杨氏模量 /Pa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数 /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热 /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
6063 Al	4.0×10^{10}	0.35	2 700	198	900
H13 Steel	2.1×10^{11}	0.35	7 870	24.3	460

表 2 模拟挤压参数
Tab. 2 Extrusion parameters used in simulation

挤压筒内径 /mm	坯料直径 /mm	坯料长度 /mm	挤压比
120	120	450	63
挤压杆速度 /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	坯料温度 / $^{\circ}\text{C}$	模具温度 / $^{\circ}\text{C}$	挤压杆温度 / $^{\circ}\text{C}$
12	480	460	410

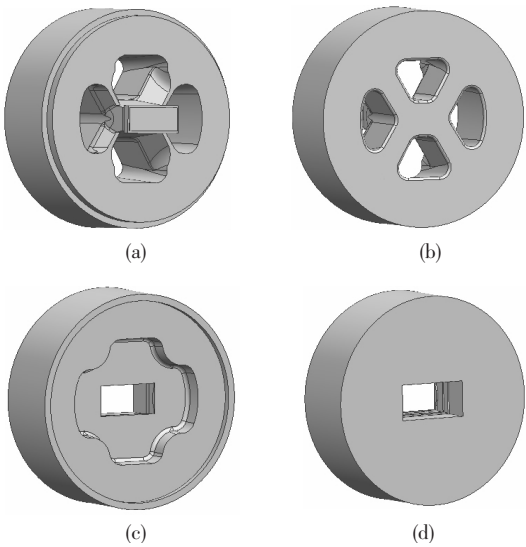


图 1 模具的三维模型

Fig. 1 3D model of the design die

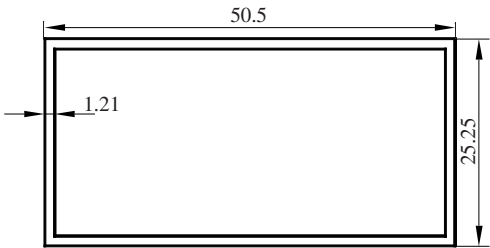


图 2 铝型材的外形尺寸

Fig. 2 Dimensions of the profile

2. 1 挤压过程

如图 2 所示 ,运用 QForm 软件模拟挤出型材的过程中 ,坯料的流动分为 3 个阶段 :分流、焊合和挤出成形阶段 .在分流阶段 ,坯料受挤压垫压力被压入模具分流孔中 ,流经上模后进入下模焊合室 .此时为坯料的焊合阶段 ,几股金属坯料在高温高压高摩擦的环境下汇聚为一股 ,充分焊合 .当坯料充满焊合室后 ,从下模工作带与上模型芯的间隙中被挤出 ,形成型材制品 .

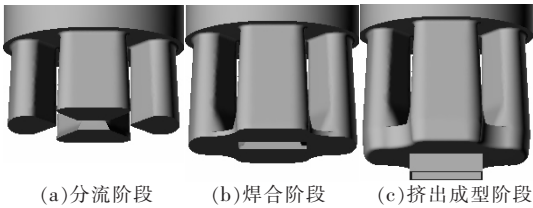


图 3 型材的挤压过程

Fig. 3 Process of profile extrusion

2. 2 焊合室高度对于挤压力及模具应力的影响

模具应力的模拟结果如图 4 所示 ,模具的最大应力分布在上模型芯与分流桥桥底的结合部位 .焊合室高度 h 分别为 11 mm、15 mm、19 mm 时上模应力集中处的应力分布云图如图 5 所示 .图 5 中 ,随 h 增加 ,有效应力值大于 1 000 MPa 区域的面积逐渐增大 ,且应力分布等值线更密集 .当 $h = 19$ mm 时 ,有效应力值大于 1 000 MPa 区域的面积最大 ,模具应力分布的等值线最密 ,此时模具的应力集中现象最严重 .

2 模拟结果与分析

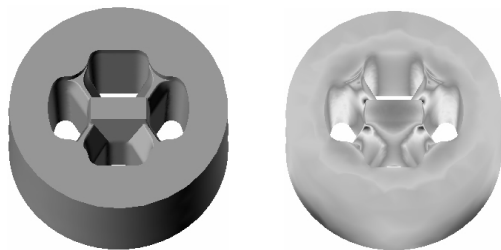


图4 模具剖视图及其应力分布

Fig. 4 Cutaway view of die and its stress distribution

模具最大应力及挤压力随焊合室高度变化曲线如图6所示,二者与焊合室高度大致呈线性关系。焊合室高度 h 为11~13 mm时,模具的最大应力增长较缓,当 h 大于13 mm时,应力迅速增大。直到 h 为

17~19 mm时,模具最大应力的增速有所放缓。当 $h = 19$ mm时,模具的最大应力值达到1 086.3 MPa,增幅达8.5%,超过H13钢在高温下的极限应力值1 080 MPa^[13]。挤压力随焊合室高度的增大而增大,且增速较为平缓。当 h 为17~19 mm时,挤压力的增速较为明显。

焊合室高度增大,其体积增大,内部的金属量增多。由于挤压杆的速度保持不变,则挤压力和模具的整体应力随之升高。同时,随着焊合室高度增大,金属与模具之间的接触时间增长,生成的摩擦热增多,此时模具表面的温升会引起材料屈服强度的下降,则模具表面更容易出现塑性的应变,尤其在模具应力集中的区域积累,导致模具的早期失效,降低模具的寿命。

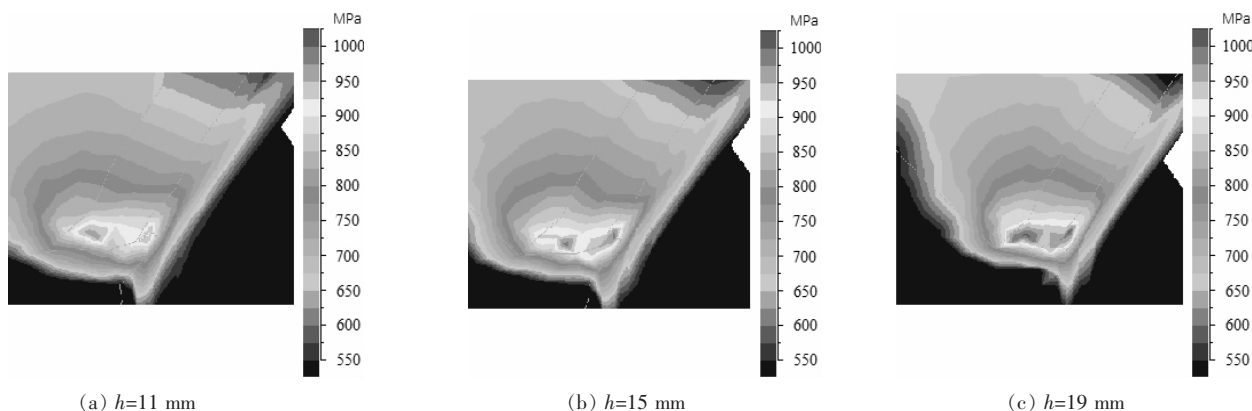


图5 模具应力集中云

Fig. 5 Nephogram of stress concentration in die

焊合室高度 h 分别为11 mm、15 mm、19 mm时下模的有效应力图如图7所示。焊合室底部的倒圆角区域是下模应力集中区域,主要原因是金属流经此处时,即将从下模模孔工作带处被挤出,此时金属中心流速远大于表面流速,使焊合室内壁与底面相交区域形成金属坯料流动的死区,此处最容易出现应力集中现象。

图7中,有效应力值为550~700 MPa的区域出现在下模焊合室底部倒角处,此区域内出现多处应力值大于650 MPa的应力集中现象。随焊合室高度的增大,应力值为550~700 MPa区域的分布面积增大,但应力值大于650 MPa的面积先增大后减小。当 $h = 15$ mm时,应力值大于650 MPa区域的面积最大。此时,下模的应力集中现象最严重,在长期的挤压生产中,最容易因热疲劳导致开裂失效现象。

随着焊合室高度的增大,焊合室的体积随之增大,焊合腔的压力增大,使下模金属流动死区区域的应力值整体增大,应力集中区域的面积增大,直到 $h = 15$ mm时应力集中现象最严重。但焊合室高度的增加引起焊合室内金属坯料平均应力的增大,尤其是550~600 MPa区域的面积增大且分布更均匀,金属在焊合室内的焊合更充分,焊合质量更高,金属的分布更均匀,则金属坯料对焊合室内壁的冲击也更均匀,应力集中现象缓解,使焊合室底部应力集中区域的面积减小。

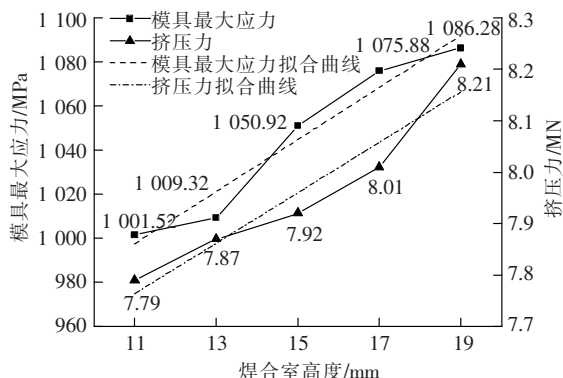


图6 模具最大应力、挤压力与焊合室高度的关系曲线

Fig. 6 The curve of the maximum stress of die, extrusion force and the height of welding chamber

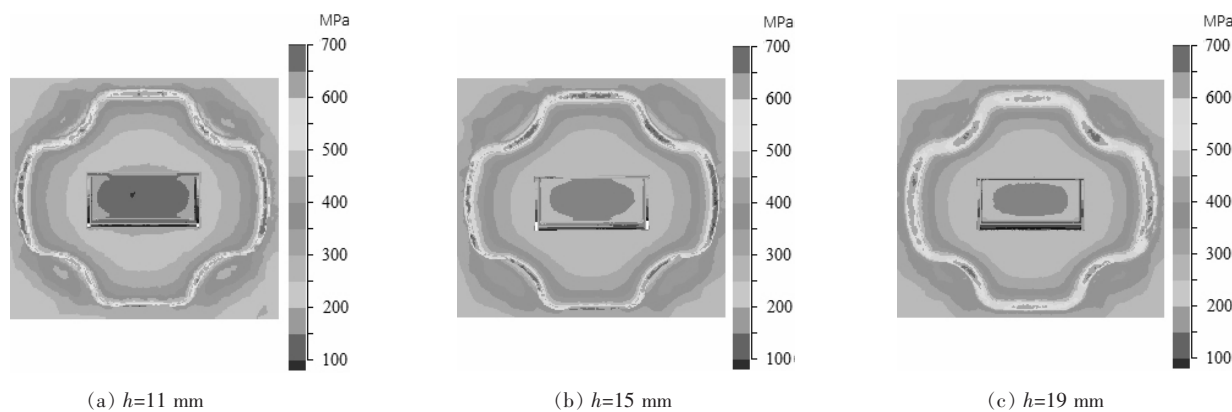


图 7 下模有效应力云

Fig. 7 Nephogram of effective stress in lower die

2.3 焊合室高度对上模模芯稳定性的影响

模具 Z 向位移剖视云图如图 8 所示,模芯及其凸台处的位移最大,沿着模具径向, Z 向位移值逐渐减小.在金属挤压的过程中,由于模芯处于悬空状态,该区域受到金属坯料的直接冲击时,其变形最严重,位移量最大.而对于与分流桥相连的上模外层区域,因下模对其起支撑作用,当受到坯料冲击时,部分能量被与下模接触的区域吸收,变形后的位移量远小于模芯.

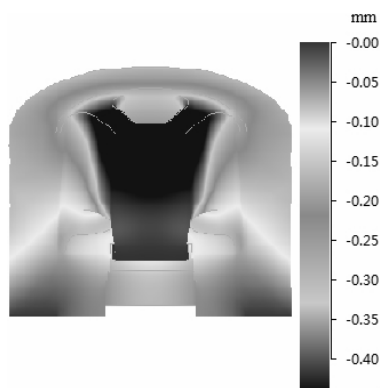


图 8 模具 Z 向位移剖视云

Fig. 8 Sectioning nephogram of die displacement in Z-direction

如图 9 所示,模芯 Z 向位移随焊合室高度的增大呈线性增加的趋势.当 $h = 11 \text{ mm}$ 时,模芯的位移为 0.403 mm ,当 $h = 19 \text{ mm}$ 时,上模型芯位移值为 0.446 mm ,增幅显著约为 10.7% .随着下模焊合室高度的增加,其内部金属量增多,金属与模具接触生成的摩擦热增加,温度升高,导致模具材料屈服强度下降,伴随挤压力升高,金属对模芯的冲击更强,使模芯更易发生塑性变形,增大了模芯在金属流向的变形量.本文所述模具,上模模芯与下模工作带配合

挤出矩形空心管材.型材挤压时,模芯在平行于挤压方向的位移导致模芯与工作带的配合出现偏差,直接影响型材的尺寸精度.随着焊合室高度增大,模芯 Z 向位移增量明显,更易造成挤出型材的尺寸偏差.

2.4 焊合室高度对焊合室内静水压力的影响

焊合面的平均静水压力随焊合室高度变化的曲线如图 9 所示.当焊合室高度 $h = 11 \text{ mm}$ 时,焊合室内静水压力为 198.5 MPa ,能够保证金属充分焊合.随着焊合室高度的增加,焊合室内静水压力明显升高,当 h 大于 15 mm 后,其增长速度放缓.当 $h = 19 \text{ mm}$ 时,焊合面平均压力达到最大值 253.3 MPa ,超过材料的屈服强度 15 倍^[14].

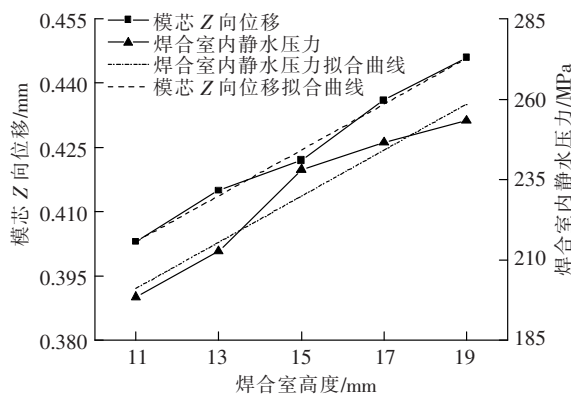


图 9 模芯 Z 向位移、焊合室内静水压力与焊合室高度的关系曲线

Fig. 9 The curve of the relationship between mandrel displacement in Z-direction, the hydrostatic in welding chamber and height in welding chamber

焊合室内静水压力直接影响型材焊缝的强度^[15].通过图 9 可以看出焊合面的平均静水压力随焊合室高度增大而升高.更高的焊合面静水压力值能获得更高强度的焊缝.同时,当焊合室的高度增大

时, 焊合室的容积增大, 使得金属在焊合室腔内停留的时间增长, 焊合时间增加, 流经分流孔的几股金属在焊合室内充分扩散, 使焊合质量提高。模具设计时, 增大焊合室的高度能提高挤压过程中金属坯料焊合面的静水压力, 在保证焊缝质量不变的情况下, 可提高挤压速度, 缩短焊合时间, 提高生产效率。

3 实验验证

根据数值模拟结果可知, 焊合室高度为 15 mm 时, 焊合室内静水压力达到 238.1 MPa, 超过该温度下 6063 铝合金的屈服强度 15 倍。一般认为, 当焊合室内静水压力值达此温度下被挤压材料屈服强度的 15~20 倍时, 即可保证焊合良好。为验证 QForm 软件计算结果的可靠性, 制作了焊合室高度为 15 mm 的模具。模具实物如图 10 所示。将此模具在 1 000 t 卧式挤压机上进行试模生产, 所得型材如图 11 所示。挤出型材的焊缝处在肉眼和放大镜下均无可见的缺陷, 焊缝区完全焊合, 焊合质量良好。从而验证了 QForm 软件数值模拟的可靠性。

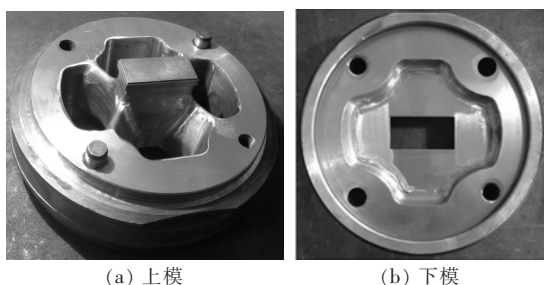


图 10 实验模具

Fig. 10 The picture of the experiment die

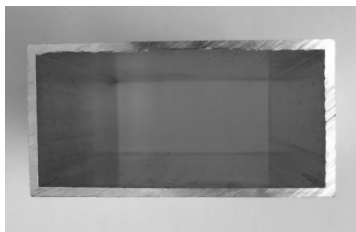


图 11 挤出型材

Fig. 11 The extruded profile

4 结论

通过对不同焊合室高度的分流组合模进行数值模拟和数据分析后, 得出以下结论。

(1) 模具的最大应力分布在上模型芯与分流桥桥底结合部位。随着焊合室高度的增大, 模具应力集中区域分布面积增大, 模具的最大应力值显著增大,

应力集中现象更加明显, 上模型芯与分流桥桥底结合部位更易出现早期失效现象。

(2) 随着焊合室高度的增大, 下模焊合室底部的应力分布更加均匀, 但总体应力值增大。在 $h = 15$ mm 时, 应力集中现象最严重, 焊合室底部的倒圆角区域最容易失效。 h 大于 15 mm 时, 应力集中现象有所缓解。

(3) 模芯 Z 向位移随焊合室高度的增大呈线性增加的趋势。模芯 Z 向位移越大, 上模模芯与下模工作带配合的偏差越大, 更易造成挤出型材的尺寸偏差。所以, 焊合室的高度不宜过大。

(4) 焊合面的静水压力随焊合室高度的增大而增大, 从而增大了焊合压力, 使金属的焊合更加充分。在保证焊缝质量的情况下, 模具设计时, 可以通过适度增大焊合室高度的方法, 提高型材挤压的速度, 以提高生产效率。

参考文献:

- [1] IQBAL U M, KUMAR V S, GOPALAKANNAN S. Application of response surface methodology in optimizing the process parameters of twist extrusion process for AA6061-T6 aluminum alloy [J]. *Measurement*, 2016(94): 126-138.
- [2] REGGIANIA B, DONATIA L, TOMESANI L. Multi-objective optimization of the extrusion process [C]// *Aluminium Two Thousand World Congress and International Conference on Extrusion and Benchmark ICEB 2015*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 4847-4855.
- [3] LIU P, XIE S S, CHENG L. Die structure optimization for a large, multi-cavity aluminum profile using numerical simulation and experiments [J]. *Materials and Design*, 2012(36): 152-160.
- [4] ZHAO Y, SONG B Y, YAN Z Y. Microstructure and mechanical properties of extrusion welds in continuous extrusion of AA6063 aluminum alloy with double billets [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016(235): 149-157.
- [5] 倪正顺, 黄庄泉, 谢要花, 等. 矩形铝合金型材挤压模具优化方法研究 [J]. *热加工工艺*, 2015, 44(11): 135-137.
- [6] 田晓光. 基于 DEFORM 软件模拟的铝合金挤压模具优化设计 [J]. *铸造技术*, 2016, 37(6): 1273-1276.
- [7] 王赫男, 王孟君, 刘超, 等. 基于 HyperXtrude 铝型材挤压模具优化设计 [J]. *铝加工*, 2012(6): 11-15.
- [8] 王彦俊, 李鹏伟, 孙巍, 等. H13 大型挤压模具分流桥断裂分析 [J]. *失效分析与预防*, 2012, 7(4): 262-266.
- [9] 余世浩, 安丛雪. 异形铝型材挤压模具受力分析与工艺优化 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45(5): 148-150.
- [10] 黄东男, 张志豪, 李静媛, 等. 焊合室深度及焊合角对方形管分流模挤压成形质量的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(5): 954-960.

- [11] 黄东男,于洋,宁宇,等. 分流模挤压非对称断面铝型材有限元数值模拟分析[J]. 材料工程 2013(3):32-37.
- [12] 吴向红,赵国群,孙胜,等. 挤压速度和摩擦状态对铝型材挤压过程的影响[J]. 塑性工程学报 2007,14(1): 36-41.
- [13] 高奇峰. 基于 DEFORM 的汽车衬板成形数值模拟研究[J]. 热加工工艺 2013,42(23):135-137.
- [14] 钟宇,熊计,杨启平,等. 成分控制对 6063 合金挤压性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金 2009,29(4):366-369.
- [15] KIM K J, LEE C H, YANG D Y. Investigation into the improvement of welding strength in three-dimensional extrusion of tubes using porthole die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 426-431.

Influence of Height of Welding Chamber on Profile Extrusion Process of Porthole Compound Die

YUE Bo-wen, LIU Peng, FAN Ke-shun

(School of Electromechanical Automobile Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Applying QForm numerical simulation software, five dies with different height of welding chamber are simulated, and the impact on the height of welding chamber on aluminum profile extrusion process by porthole dies is analyzed. The simulation results show that with the height of welding chamber increasing, the equivalent stress of die, the hydrostatic stress of welding chamber, the mandrel displacement in Z-direction and the extrusion force approximately by increase linear, the stress concentration phenomenon in the area of the binding site of die mandrel and the bottom of the divergent bridge tends to be more significant, the stress distribution at the bottom of the welding chamber inclines to be more uniform. The results of numerical simulation provide reference for the selection of die structure parameters.

Key words: aluminum profile extrusion; numerical simulation; height of welding chamber; die; stress

(责任编辑 苏晓东)