

模具

基于 HyperXtrude 的大型空心铝型材挤压模具优化

王鸿鼎¹, 何凯波¹, 刘 洪¹, 姚亚成¹, 李正宁²

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 挤压模具在铝型材生产中起着关键的作用, 合理的模具设计对于挤压出高质量的铝型材至关重要。以分流组合模挤压大型空心铝型材为研究对象, 分析了型材的工艺特点, 建立了挤压模具的三维模型, 采用基于任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 算法的 HyperXtrude 软件对铝型材挤压过程进行了数值模拟。针对初始模具模拟出现的金属流速严重不均的问题, 设计了两次优化 (阻流块结构修改和高度的调整) 对铝型材挤压模具进行了修正。结果表明, 优化后的挤压模具挤出了流速均匀且基本无变形的铝合金型材, 有效地解决了因初始模具设计不合理而导致的金属流速不均的问题。

关键词: 挤压模具; 铝合金型材; 金属流速; 模具优化; HyperXtrude

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.027

中图分类号: TG76

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0194-08

Optimization on extrusion mold for large hollow aluminum profile based on HyperXtrude

Wang Hongding¹, He Kaibo¹, Liu Hong¹, Yao Yacheng¹, Li Zhengning²

(1. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Extrusion molds play a key role in the production of aluminum profiles, and reasonable mold design is essential for extruding high-quality aluminum profiles. Therefore, for the large hollow aluminum profiles extruded by split-flow combined mold, the process characteristics of the profiles were analyzed, and the 3D model of the extrusion mold was established. Then, the extrusion process of aluminum profiles was numerically simulated by using software HyperXtrude based on Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) algorithm, and aiming at the problem of serious uneven metal flow velocity in the initial mold simulation, two times of optimization (the modification of choke block structure and the adjustment of height) were designed to correct the extrusion mold for aluminum profile. The results show that the optimized extrusion mold extrudes the aluminum alloy profiles with uniform flow velocity and basically no deformation, which effectively solves the problem of uneven metal flow velocity caused by unreasonable initial mold design.

Key words: extrusion mold; aluminum alloy profile; metal flow velocity; mold optimization; HyperXtrude

铝合金具有密度小、比强度高、塑性好、耐腐蚀等众多优点, 在汽车等各个行业有着广泛的应用^[1-2]。目前, 各行业对铝合金型材制品的需求越来越多, 而挤压作为一种高效率、低能耗、少/无切削的加工工艺, 成为铝合金型材的主要成形方法^[2]。铝型材种类繁多且断面复杂, 加之市场对铝型材的质量提出了更高的要求, 这使得型材的挤压生产更加困难, 因此, 合理的模具结构显得尤为重

要^[3]。铝型材挤压时, 材料在空腔内的流动情况十分复杂: 经过预热的高温铝锭在挤压机的压力下分为几股金属流进入焊合室, 在焊合室高温、高压、高真空的模腔内被重新焊合, 并经过模孔流出, 从而形成具有一定形状和尺寸的空心型材^[4]。传统的模具修正过于依赖设计人员的经验, 在投入生产前需要进行反复的试模和修模^[5]。这使得模具的设计周期、生产成本成倍增加, 无法满足产品开发的需求。通过将数值模拟引入至挤压模具的设计中, 得到模腔内部的物理量分布情况, 判断型材的挤出缺陷, 对不合理的模具结构进行修改和优化, 提高了模具设计效率, 降低了试模和修模的次数, 降低了生产成本、缩短了模具设计

收稿日期: 2022-11-16; 修订日期: 2023-02-13

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目 (1606RJZA013, 20JR10RA266)

作者简介: 王鸿鼎 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wanghd@lztu.edu.cn

周期^[6-7]。对此,许多学者对铝型材挤压模具优化的数值模拟开展了大量工作。

闫丽^[8]使用 Deform-3D 软件对 6061 铝合金圆管的 1/10 模型进行了挤压,通过改变分流比、焊合角、焊合室高度的方法,对比确定了合理的模具结构参数。Wu X H 等^[9]使用 Msc/SuperForge 软件对原模具的 1/4 进行了挤压过程模拟,结果发现工作带出口的型材流速不均,针对这种情况设计了 3 种模具修改方案并分别进行了仿真模拟,从中对比得出了最佳设计方案。孙朝华^[10]以平面分流模挤压 Al6063 铝合金圆管为研究对象,通过正交模拟实验对分流孔、焊合腔、工作带进行了研究,对 1/2 模型进行了对称挤压模拟,最后给出了最佳工艺水平组合。以上研究者在进行模具优化时,将复杂的三维结构焊合面简化为一个简单的刚性平面,这导致型材挤压数值模拟的真实性降低。倪正顺等^[11]应用 HyperXtrude 软件对一大型简单断面空心型材进行了挤压模拟,对于流速不均的问题通过调节分流孔的供料量、增设导流槽、调节工作带来平衡金属流速,最后得到了均匀的金属流速。陈浩等^[12]采用 HyperXtrude 软件对一空心薄壁型材进行挤压模拟,对流速不均的问题设计了增加二级焊合室和阻流坎两种方案,流速均匀性大大改善。Hua T R 等^[13]对一大断面复杂铝合金型材挤压模具设计了三级焊合室,通过研究各级焊合室的高度和尺寸形状优化了模具结构,挤出了满足要求的铝合金型材。上述研究者在优化过程中更多地针对模具主体结构进行修改,修改后模具结构更加复杂,这使得模具机加工成本提高,精度降低,且不利于后期维护。

已有的文献多次证明了 HyperXtrude 软件在实验仿真上的可靠性与正确性^[14-15]。因此,本文采用基于任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 算法^[16]的 HyperXtrude 软件对整个空心铝型材挤压过程进行了稳态模拟。对于初始方案中的速度分布不均的问题设计了两次优化,通过对模具上相对独立的阻流块结构进行修改和高度的调整,挤出了流速均匀、基本无变形的铝合金型材,确定了最优的铝型材挤压模具,并对初始模拟结果与最优结果进行了对比与分析。

1 型材的工艺特点

对某高速列车车体典型侧墙铝型材结构进行研究,该空心型材的断面形状和主要尺寸如图 1 所示。

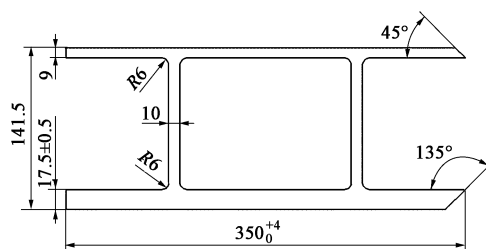


图1 型材截面尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-section size for profile

该型材存在一个空腔、上下结构基本对称,但上、下壁板的厚度差过大,这将导致挤压时两壁板的金属流速存在差异,并且在挤压时无法通过挤压工艺参数的改变来消除这种速度差异,容易导致挤出的型材产生弯曲等质量问题,是该型材成型的主要难点之一。型材材料为 AA 6061 高强度可热处理铝合金,因其具有轻质、高强、抗腐蚀的优点,越来越多的在结构承力件上得以应用。

该型材的整体宽度为 350 mm,高度为 141.5 mm,断面面积约为 11500 mm²,最大外接圆直径为 $\Phi 640$ mm,属于大型断面扁宽型材,挤压难度较大。对此型材选用分流组合模具进行挤压。

2 初始方案的数值模拟

2.1 模具三维模型的建立

对该空心型材进行分流组合模具的设计,设计要素主要包括分流孔、焊合室、模芯、工作带等,并应用 SolidWorks 三维建模软件建立三维模型,建模时忽略销孔、螺孔等与模拟无关的特征。

根据第 1 节对型材的挤压难点分析,为降低厚壁上金属的流速,决定在焊合室底面上添加一块阻流块,阻流块的尺寸为 333 mm×16 mm×6 mm,阻流块与工作带的距离为 3 mm。建立的模具三维模型如图 2 所示。

2.2 有限元模型的建立

采用基于 ALE 算法的 HyperXtrude 软件对该型材挤压过程进行模拟。建立有限元模型的一般顺序为:模型导入、几何模型抽取、几何清理、网格划分等。在网格划分时,HyperXtrude 软件要求对所有材料流过的区域划分网格,且划分顺序一般遵循几何尺寸由小到大的原则,即按照工作带-焊合室-分流孔-坯料的顺序划分网格,且网格尺寸依次增大,此模型工作带处的网格尺寸为 2 mm。建立的有限元模型如图 3 所示。

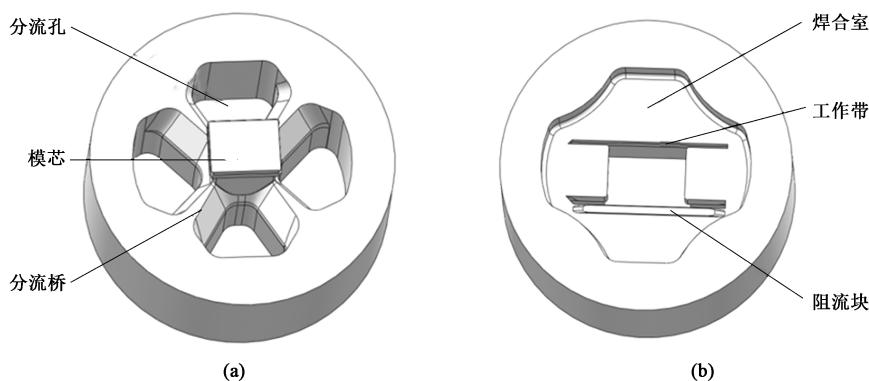


图 2 模具的三维模型

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 2 3D model of die

(a) Upper die (b) Lower die

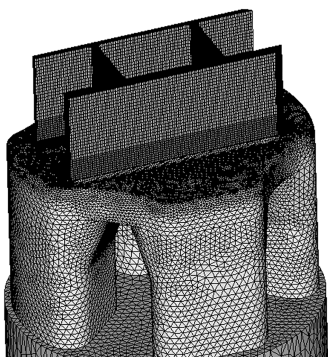


图 3 型材挤压过程的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of profile extrusion process

模具材料为 AISI H13 热作模具钢, 上下模具、坯料、挤压筒的预热温度分别为 480、510 和 410 $^{\circ}\text{C}$, 坯料直径为 $\Phi 480\text{ mm}$, 长度为 1000 mm, 挤压速度为 $4\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在工作带处的摩擦类型为库伦摩擦, 摩擦因数为 0.3, 在挤压筒和模腔内部为粘着摩擦, 模具与坯料的界面热交换系数为 $3000\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

3 模拟结果及优化方案

3.1 初始方案模拟结果分析

在 HyperView 中读取型材流速、温度、等效应力分布等信息。挤出模孔后型材截面的流速分布云图如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 厚壁流速仍然快于薄壁, 筋部流速介于上、下壁之间。型材截面的最大流速为 $72.38\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小流速为 $49.48\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 流速差达到了 $22.90\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 金属流速非常不均匀。这种整体截面基本对称但两部分流速不同的情况会使型材产生严重的弯曲变形, 这与第 1 节对型材挤压可能产生的问题分析相一致。

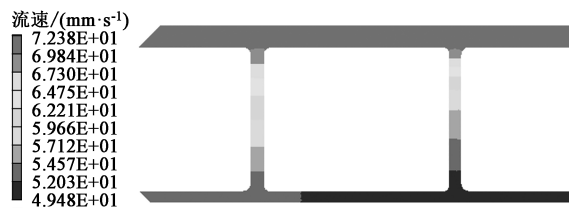


图 4 型材截面流速分布云图

Fig. 4 Flow velocity distribution nephogram of profile cross-section

型材截面温度、等效应力分布云图分别如图 5 和图 6 所示。从截面温度分布情况来看, 金属焊合区由于严重的塑性变形而产生大量热量, 远高于工作带与金属摩擦产生的热量, 最高温度出现在厚壁板的焊合位置, 为 $564.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低温度为 $543.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出现在薄壁板上的非焊合区, 温度差为 $21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。截面等效应力最大的区域出现在与厚壁连接的筋上, 由于厚壁上的金属流速快, 筋上的金属流速慢, 两部分金属因流速差相互制约, 导致此处产生较大的应力, 等效应力最大值为 21.93 MPa 。过大的等效应力会对挤出型材的性能产生不利影响, 因此等效应力值越小越好。



图 5 型材截面温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution nephogram of profile cross-section

为了准确地描述挤出型材截面上金属流速的均匀程度, 本文引入速度均方差 SDV 的概念, 其数学



图 6 型材截面等效应力分布云图

Fig. 6 Equivalent stress distribution nephogram of profile cross-section

模型^[17]如式 (1) 所示。很明显, SDV 值越小, 金属流速越均匀, 反之则不均匀。初始方案下型材截面的 SDV 值为 $8.84 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$SDV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n}} \quad (1)$$

式中: v_i 为型材截面上第 i 个节点的流动速度; $i = 1, 2, \dots, n$; n 为截面上选取的节点总数; \bar{v} 为所

选取的全部节点的平均速度。

图 4~图 6 的结果表明, 挤压出的型材截面上金属流速非常不均匀, 初始模具的结构设计不合理, 不符合型材生产的要求, 因此, 必须对模具结构进行优化。

3.2 模具优化方案及分析

初始方案的模拟结果表明, 初始设计的阻流块远未达到平衡流速的作用。对此, 本文设计了两次优化来实现金属的均匀挤出, 以完成模具的优化。

第 1 次优化为修改阻流块结构, 对原来阻流效果较弱的阻流块结构进行修改, 修改前后的阻流块结构如图 7 所示, 宽度和高度不变, 修改前后阻流块与工作带的距离均为 3 mm。第 2 次优化为通过调节不同阻流块高度来确定最佳的高度值, 使挤出的型材流速均匀且基本无变形。

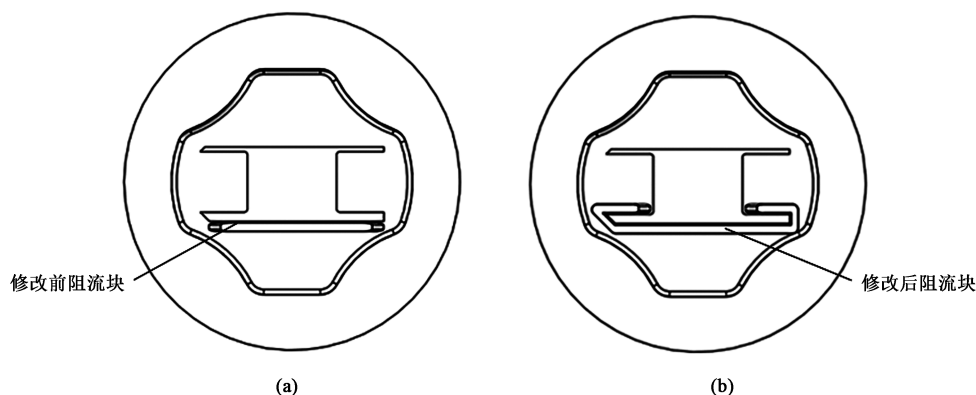


图 7 阻流块修改前 (a) 和修改后 (b) 的结构图

Fig. 7 Structure diagrams of choke block before (a) and after (b) modification

第 1 次优化后型材截面流速分布云图如图 8 所示。阻流块的修改破坏了初始焊合室结构左右大致对称的特点, 使得型材左右两侧的流速发生改变, 左侧流速整体高于右侧, 但截面上的最大速度有所降低, 最大值降为 $68.78 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度差降为 $16.66 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, SDV 值为 $4.43 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明此次阻流块的修改对调节金属流速具有一定的作用, 但截面流速差仍然较大, 因此需要进一步优化。

第 1 次优化后型材截面的温度、等效应力分布云图分别如图 9 和图 10 所示。从图 9 和图 10 中看出, 型材截面温度分布与初始情况相差不大, 但等效应力最大值由原来的 21.93 MPa 减小为 17.46 MPa, 截面等效应力分布情况改善明显。

第 2 次优化时, 根据不同的阻流块高度, 设计了 3 种优化方案进行优化。以高度分别为 10.0、12.5 和 15.0 mm 时对应的不同优化方案进行了模拟。



图 8 第 1 次优化后型材截面流速分布云图

Fig. 8 Flow velocity distribution nephogram of profile cross-section after the first optimization

不同阻流块高度下型材截面流速分布云图如图 11 所示。从模拟结果看出, 阻流块高度对金属流速的影响极大。随着阻流块高度的增加, 型材截面最高速度和速度差均呈现先减小后增大的趋势, 当阻流块高度为 12.5 mm 时, 最高速度和速度差分别为 63.96 和 $2.96 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度差达到最小值, 此时截面 SDV 值为 $0.81 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而



图 9 第 1 次优化后型材截面温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution nephogram of profile cross-section after the first optimization



图 10 第 1 次优化后型材截面等效应力分布云图

Fig. 10 Equivalent stress distribution nephogram of profile cross-section after the first optimization

当阻流块高度为 10.0 和 15.0 mm 时, 截面 SDV 值分别为 2.51 和 4.94 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。合理的阻流块高度可以增加金属流动阻力, 降低厚壁区的金属流速, 并迫使适量金属流向薄壁区, 增加薄壁区

的金属流速, 从而使整个型材截面上的金属流速更加均匀。当阻流块高度为 12.5 mm 时, 型材截面的金属流速基本一致、速度差很小、型材几乎无变形, 是较理想的阻流块高度推荐值。

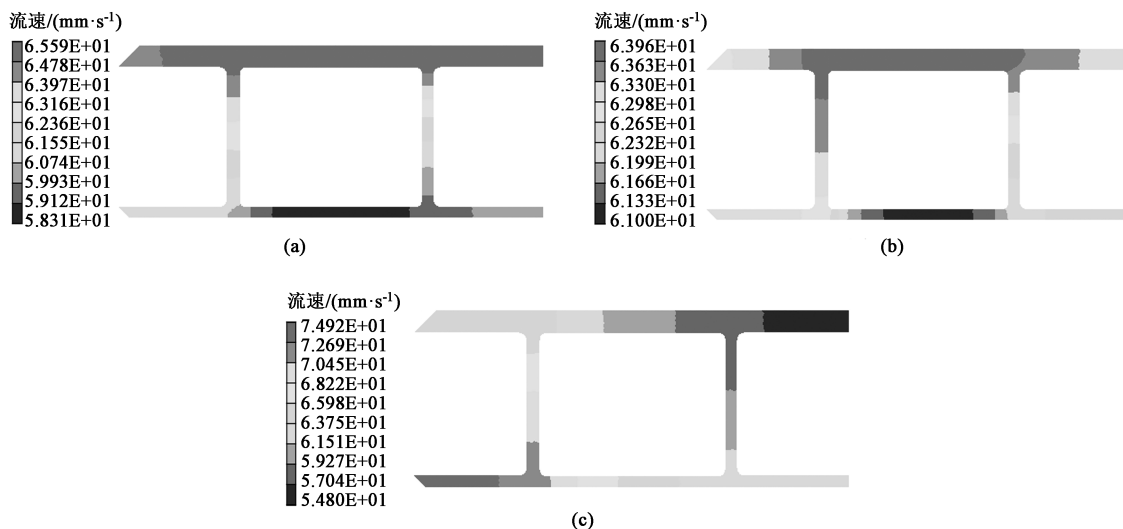


图 11 不同阻流块高度下型材截面流速分布云图

(a) 10.0 mm (b) 12.5 mm (c) 15.0 mm

Fig. 11 Flow velocity distribution nephograms of profile cross-section at different choke block heights

不同阻流块高度下型材截面温度分布云图如图 12 所示。当阻流块高度为 10.0、12.5 和 15.0 mm 时, 型材截面的最高温度分别为 567.2、567.9 和 571.9 $^{\circ}\text{C}$, 截面温差分别为 21.6、21.9 和 21.2 $^{\circ}\text{C}$ 。随着阻流块高度的增加, 型材截面的最高温度略有增加, 但截面温差均保持在一个较小值。截面上温度分布情况基本不变, 最高温度依旧出现在塑性变形较大的焊合区, 型材的焊合状况稳定。

不同阻流块高度下型材截面等效应力分布云图如图 13 所示。得益于速度均匀性的提升, 当阻流块高度分别为 10.0、12.5 和 15.0 mm 时, 型材截面的最大等效应力值分别为 15.65、16.29 和 17.77 MPa, 相比初始情况下的 21.93 MPa, 等效应力分布改善很多。

不同阻流块高度下的型材截面上的速度差和 SDV 值如图 14 所示。随着阻流块高度的增加, 速度差和 SDV 值先降低后升高, 当阻流块高度为 12.5 mm 时, 速度差和 SDV 值最小, 此时截面上的金属流速最均匀、优化效果最佳。

从图 11~图 14 的结果分析得出, 当阻流块高度为 12.5 mm 时, 型材截面的金属流速最均匀, 此时型材上温度差合理、等效应力也保持在一个较小的合理值。挤出的型材的均匀性最好, 成形效果最佳, 挤出型材的变形也较小, 不需要进行下一步优化, 是较理想的阻流块高度推荐值。

在两次模具优化过程中, 优化前后型材截面的速度差和 SDV 值如表 1 所示。优化路线上速度差和 SDV 值随着优化的进行持续降低, 在第 2 次优化完

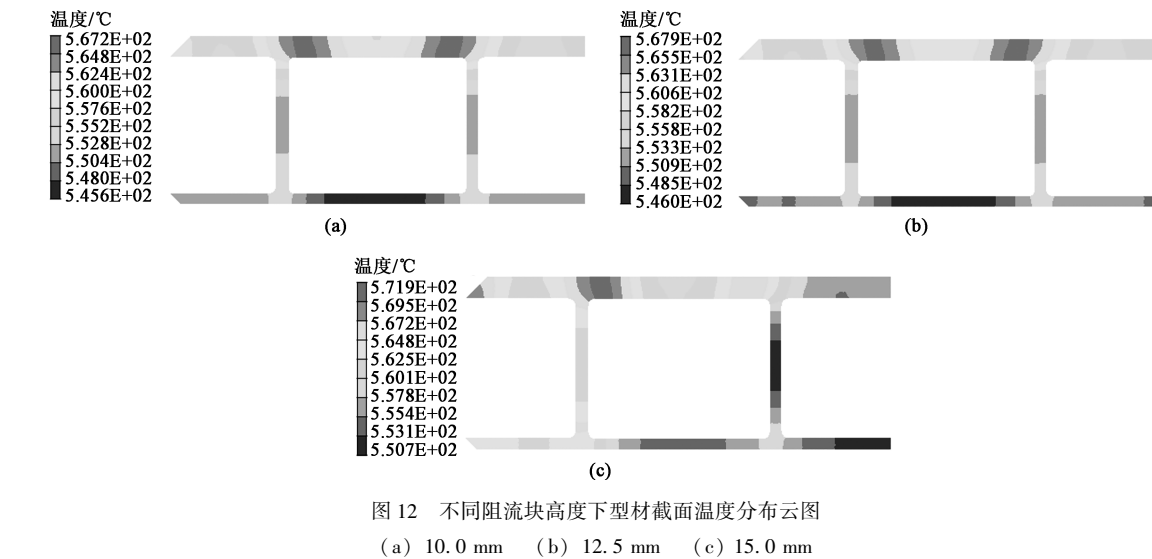


Fig. 12 Temperature distribution nephograms of profile cross-section at different choke block heights

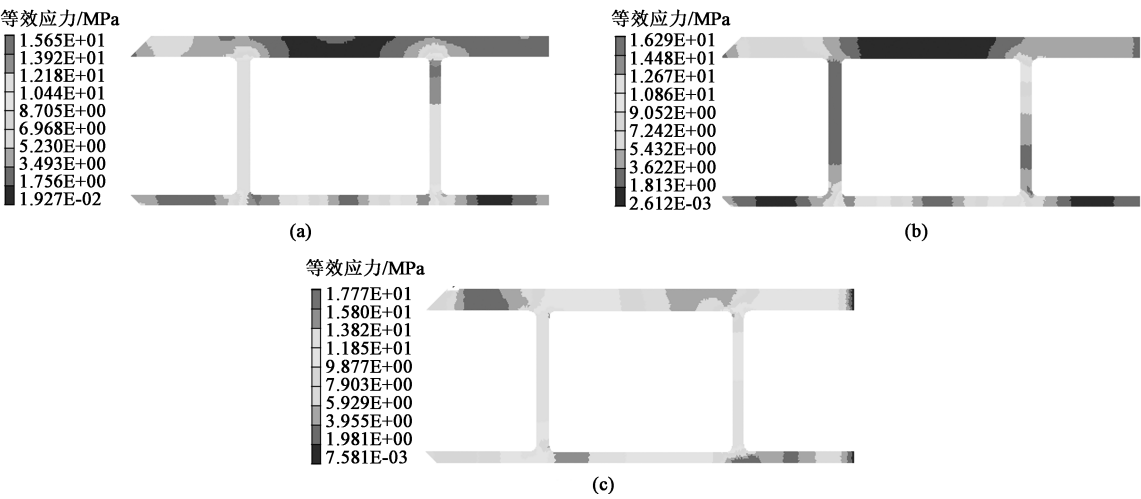


Fig. 13 Equivalent stress distribution nephograms of profile cross-section at different choke block heights

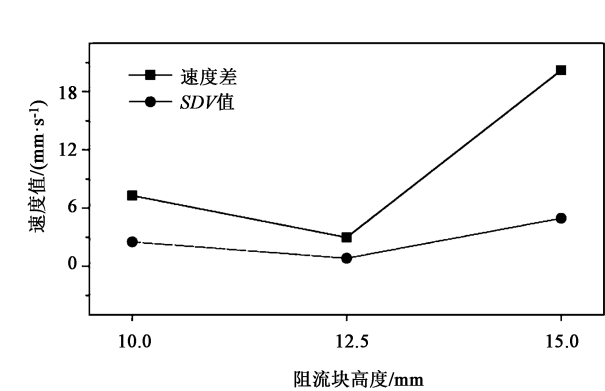


Fig. 14 Relationship curves between choke block height and velocity difference and SDV value

表 1 模具优化前后型材截面的速度差和 SDV 值 ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 Velocity differences and SDV values of profile cross-section before and after mold optimization ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

参数	初始模具	第 1 次优化	第 2 次优化
速度差	22.90	16.66	2.96
SDV 值	8.84	4.43	0.81

成后降到最小，此时的模具结构最优，且挤出的型材完全符合要求。

3.3 初始方案与最优方案对比分析

图 15 和图 16 分别为焊合室内阻流块上方 5 mm 处截面上和焊合室底面的金属流速分布云图。从图 15 和图 16 中看出，初始方案下，焊合室内阻流块

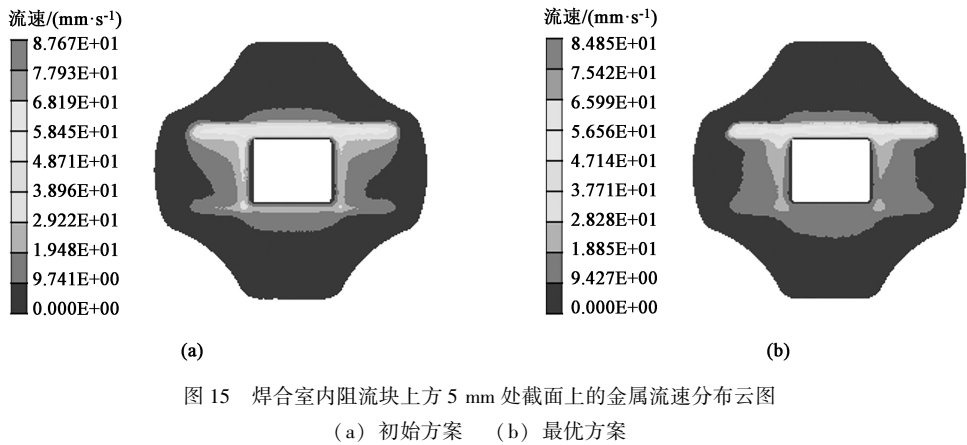


图 15 焊合室内阻流块上方 5 mm 处截面上的金属流速分布云图
(a) 初始方案 (b) 最优方案

Fig. 15 Metal flow velocity distribution nephograms of cross-section which is 5 mm above choke block in welding chamber
(a) Initial scheme (b) Optimal scheme

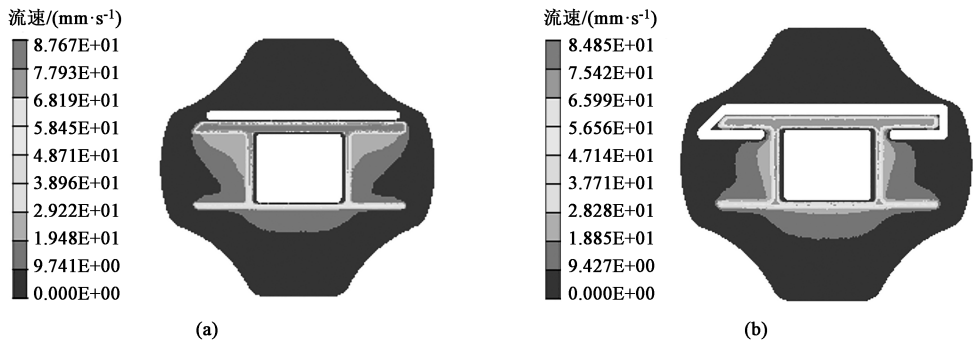


图 16 焊合室底面上金属流速分布云图
(a) 初始方案 (b) 最优方案

Fig. 16 Metal flow velocity distribution nephograms of bottom surface in welding chamber
(a) Initial scheme (b) Optimal scheme

上方的金属流动情况为：上方分流孔内的金属向厚壁区流动，下方分流孔内的金属向薄壁区流动，左右两侧分流孔内的金属既流向筋，又流向厚壁区和薄壁区，但很大部分金属流向了厚壁区。在焊合室底面：底面阻流块一侧的金属由于受到阻挡而不再流入工作带，然而左右两侧的大部分金属仍然流向厚壁区，这使得厚壁区的金属流速过快，薄壁区因流动阻力过大而流速降低，从而产生较大的流速差，使得挤压生产的型材严重弯曲而不符合生产要求。

在最优方案下，焊合室内阻流块上方的金属流

动情况与初始情况相差不大。但在焊合室底面上，左右两侧分流孔内的金属受到修改后阻流块的作用而无法流向厚壁区，转而流向流动阻力相对较小的筋和薄壁区。阻流块的修改使得厚壁区的金属仅能从阻流块上方流入工作带，合理地增加了厚壁区的流动阻力，迫使金属流向筋和薄壁区，增加了此处的金属流速，提高了金属流速的均匀程度，挤出了符合要求的型材。阻流块优化模具的机理在于平衡模具内部金属的流动阻力。

为便于对比最优方案与初始方案的优化参数，表 2 列举了各项初始方案与最优方案的模拟结果。

表 2 初始方案与最优方案模拟结果

Table 2 Simulation results of initial scheme and optimal scheme

方案	最高速度/(mm·s ⁻¹)	速度差/(mm·s ⁻¹)	SDV 值/(mm·s ⁻¹)	最高温度/℃	温度差/℃	等效应力/MPa	挤压力/MN
初始方案	72.38	22.90	8.84	564.7	21.2	21.93	79.13
最优方案	63.96	2.96	0.81	567.9	21.9	16.29	80.67

4 结论

(1) 初始方案的模拟结果表明, 型材厚壁区的金属流速整体高于薄壁区, 产生这种差异的主要原因是厚壁区的流动阻力小于薄壁区, 这决定了模具结构优化设计的方向。

(2) 基于本文中差异产生的原因, 设计了两步优化方法: 通过修改阻流块结构和调整阻流块高度对模具结构进行了优化设计, 优化后挤出了流速均匀的型材。相对于初始方案, 优化后型材截面的金属流速差减小了 87.07%, 最小值为 $2.96 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度均方差减小了 90.84%, 最小值为 $0.81 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度分布均匀性改善明显, 同时为型材实际生产提供了可靠的参考。

参考文献:

- [1] 韩冰源, 高祥涵, 杜文博, 等. 铝合金基材表面耐磨性能强化研究现状 [J]. 材料导报, 2023, (10): 157-164.
Han B Y, Gao X H, Du W B, et al. Technological advances in strengthening the surface wear resistance of aluminum alloys substrate [J]. Materials Reports, 2023, (10): 157-164.
- [2] 李海, 徐海峰, 王芝秀. 预处理对冷轧时效 6156 铝合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (1): 17-26.
Li H, Xu H F, Wang Z X. Microstructures and tensile properties of cold-rolled and re-aged 6156 Al alloy by pre-treating [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (1): 17-26.
- [3] 卢有世, 于明涛. 异形铝型材挤压模具优化设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2009, 44 (2): 87-89.
Lu Y S, Yu M T. Optimization design of extrusion die for special aluminum [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2009, 44 (2): 87-89.
- [4] 黄春华. 模具结构对复杂断面铝合金型材挤压变形的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (11): 142-144.
Huang C H. Influence of die-structure on extrusion deformation of aluminum alloy profiles with complex section [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (11): 142-144.
- [5] 陈泽中, 姜臻亮, 阮雪榆, 等. 复杂铝型材挤压成形有限体积仿真 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (1): 27-31, 40.
Chen Z Z, Lou Z L, Ruan X Y, et al. Finite volume simulation of extrusion of complex aluminum profile [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 39 (1): 27-31, 40.
- [6] 郑庆, 徐万和. 基于 HyperXtrude 的铝型材稳态模拟 [J]. 机械制造与自动化, 2012, 41 (2): 124-126.
Zheng Q, Xu W H. Steadystate simulation of aluminium profiles based on HyperXtrude [J]. Machine Building & Automation, 2012, 41 (2): 124-126.
- [7] 宋佳胜. 散热铝型材挤压模具设计及数值模拟 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Song J S. Extrusion Die Design for Heat-dissipation Aluminum Profile and Numerical Simulation [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [8] 闫丽. 铝型材挤压过程数值模拟及模具优化设计 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
Yan L. Numerical Simulation for Aluminum Tube Extrusion Process and Optimum Design of Die [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [9] Wu X H, Zhao G Q, Luan Y G, et al. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 435-436: 266-274.
- [10] 孙朝华. 铝型材挤压过程数值模拟及模具优化设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
Sun Z H. Process Simulation and Optimization Design of Porthole Die for Aluminum Profile Extrusion [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [11] 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 Z S, Liu S B, Tian S L, et al. Numerical simulation on aluminum profile extrusion process and optimization design of die [J]. Foundry Technology, 2012, 33 (5): 596-599.
- [12] 陈浩, 赵国群, 张存生, 等. 薄壁空心铝型材挤压过程数值模拟及模具优化 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (24): 34-39.
Chen H, Zhao G Q, Zhang C S, et al. Numerical simulation of extrusion process and die structure optimization for a hollow aluminum profile with thin wall [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (24): 34-39.
- [13] Hua T R, Yao Y, Li H R, et al. Study on the numerical simulation application in the design and optimization of aluminum extrusion forming mold [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44 (12): 88-95.
- [14] 张德军, 林春梅, 孙巧妍, 等. 基于 HyperXtrude 的大宽厚比工业铝型材挤压速度优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 156-160.
Zhang D J, Lin C M, Sun Q Y, et al. Extrusion speed optimization on industrial aluminum profiles with large width to thickness ratio based on HyperXtrude [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 156-160.
- [15] 刘国勇, 郝鹏鹏, 万里. 基于 HyperXtrude 的挤压工艺参数对模具力学行为的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 179-186.
Liu G Y, Hao P P, Wan L. Influence of extrusion process parameters on mechanical behavior of die based on HyperXtrude [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 179-186.
- [16] 徐磊, 赵国群, 张存生, 等. 多腔壁板铝型材挤压过程数值模拟及模具优化 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (22): 61-68.
Xu L, Zhao G Q, Zhang C S, et al. Numerical simulation of extrusion process and die optimization for aluminum multi-cavity profile [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (22): 61-68.
- [17] 闫洪, 柳和生, 刘家生. 型材挤压模工作带长度设计计算的数学建模 [J]. 塑性工程学报, 2002, 9 (3): 70-73.
Yan H, Liu H S, Liu J S. Mathematical model of design and calculation of aluminum profile extrusion die land length [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9 (3): 70-73.