

薄壁矩形管铝型材分流挤压过程挤压力影响研究

陈飞¹, 魏科¹, 党利², 李平生¹, 叶黑¹

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063; 2. 郑州航空工业管理学院 航空工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 以 6063 铝合金薄壁矩形管为研究对象, 首先应用 Deform-3D 模拟软件分析成形过程中的材料流动与挤压力的变化规律及原因; 其次, 基于正交试验研究不同工艺参数对挤压力的影响及显著性。结果表明: 挤压初期材料处于镦粗和填充状态, 挤压力显著上升, 而当材料经分流孔进入焊合室后被焊合, 分流金属接触到焊合室底部后在焊合室内不断聚集并横向移动, 导致挤压力急剧增大; 挤压力随坯料温度与模具温度的升高而降低, 随挤压速度的增加而增大。最后, 基于优选的因素水平, 模拟获得了较低的挤压力, 将该值与基于主应力法获取的理论最大挤压力进行对比, 模拟值与理论值的误差为 5.6%。研究成果可为铝型材多孔分流挤压的省力成形和提高模具寿命提供依据。

关键词: 薄壁矩形管; 6063 铝合金; 分流挤压; 挤压力; 主应力法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.018

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0129-09

Study on influence of extrusion force during split extrusion process for thin-walled rectangular tube aluminum profile

Chen Fei¹, Wei Ke¹, Dang Li², Li Pingsheng¹, Ye Hei¹

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. School of Aeronautical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: For 6063 aluminum alloy thin-walled rectangular tube, firstly, the changing rules and causes of material flow and extrusion force during the forming process were analyzed by simulation software Deform-3D, and secondly, based on orthogonal test, the influences and significance of different process parameters on the extrusion force were investigated. The results show that in the early state of extrusion, the material is in a state upsetting and filling, and the extrusion force increases significantly. The material is welded after entering the welding chamber through the shunt hole, and the shunt metal contacts the bottom of welding chamber and continues to gather and move laterally in the welding chamber, which causes the extrusion force to increase sharply. The extrusion force decreases with the increasing of billet temperature and mold temperature, and increases with the increasing of extrusion speed. Finally, based on the preferred factors and levels, the lower extrusion force is obtained by the simulation. This value is compared with the theoretical maximum extrusion force obtained based on the principal stress method, and the error between the simulation and theoretical values is 5.6%. Thus, the research results provides the basis for realizing labor-saving forming of porous split extrusion for aluminum profile and improving the life of mold.

Key words: thin-walled rectangular tube; 6063 aluminum alloy; split extrusion; extrusion force; principal stress method

铝合金具有密度低、力学性能佳、加工性能好及抗腐蚀性优良等特点, 在空天、船舶、化工和交

通等领域应用广泛^[1-2]。铝在挤压过程中处于较强烈的三向压应力状态, 可充分发挥其塑性且获得大变形量。通过挤压获得的型材具有尺寸精度高、表面质量好、生产效率高、材料利用率高以及截面形状复杂等特征^[3-4]。挤压时的金属流动规律可视为挤压筒内各部分金属体积的相互转移规律。由于挤压时金属的流动规律对型材的组织、性能、表面质量及工模具设计等均具有重要影响, 因此, 研究金属在挤压时的流动规律对改善挤压过程、提高挤压型材的性能和质量具有重要意义^[5]。模具是铝合金产生挤压变形并传递挤压力的关键部件, 其结构复

收稿日期: 2023-04-11; 修订日期: 2023-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005241); 中国国家留学基金委资助项目 (NO. 202208360107); 南昌航空大学 2021 年校级教改课题 (JY21028); 江西省自然科学基金资助项目 (20232BAB204050)

作者简介: 陈飞 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1101682809@qq.com

通信作者: 魏科 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: weike@nchu.edu.cn

杂并要求较高的尺寸精度；此外，挤压时模具的应力状态较为复杂，会直接影响产品的形状、尺寸及表面质量等^[6]。在挤压过程中，凹模裂纹或模具型腔的磨损均会导致挤压型材尺寸产生误差，偏离允许值。降低挤压力是延长模具寿命并控制挤压生产成本的重要因素，这不仅需要合理地设计与制造模具，而且应选取合适的模具材料、热处理与挤压工艺及润滑条件等^[4]。

近年来，国内外学者针对铝合金型材挤压工艺开展了一系列研究，并取得了较多成果。Fang G 等^[7]利用 Deform-3D 软件分析了挤压速度和工作带长度对型材温度分布、尺寸精度和挤压力的影响规律。党利等^[8]建立了基于耦合韧性断裂准则的 Inconel625 合金大型厚壁管挤压有限元模型，揭示了坯料初始温度、挤压速度、挤压比和凹模半角等关键挤压参数对型材挤压过程中损伤的影响规律，结果表明：随着坯料初始温度、挤压速度和挤压比的增大，管材表面的最大损伤值减小，有效防止了裂纹的产生。李世康等^[9]研究了不同挤压速度下挤压力、温度和焊合压力的变化对焊合质量的影响，建立并预测了铝合金方管焊合质量的评价模型。刘惠等^[10]以某大型带筋薄壁铝型材为研究对象，采用响应曲面法，利用 HyperXtrude 软件建立了工作带出口处型材截面流速均方差、最大挤压力与设计变量的响应函数关系，优化了穿孔针挤压成形工艺。Solomon N 等^[11]发现模具的几何形状会直接影响挤压过程中的材料流动、宏观成形质量与力学性能。Fletta I 等^[12]模拟预测了模具参数对最大挤压力的影响，详细描述了不同截面形状的材料流动；马国欣等^[13]对铜锌合金的热挤压过程进行了数值模拟，获得了材料流动、应力和应变情况。上述研究对降低铝合金薄壁挤压件挤压成形过程中的挤压力提供了一定参考。然而，现阶段研究大都集中在工艺参数对挤压力的影响方面，还需进一步综合考虑模具参数及其他工艺参数等多因素影响下的挤压力大小及其影响因素。

本文借助有限元软件 Deform-3D，以矩形管铝型材为研究对象，首先研究分流挤压过程中材料流动及挤压力的变化特征；其次，借助于正交试验设计方法，以挤压速度、模具温度、坯料温度、坯料直径、焊合室高度及工作带长度为变量，探究不同参数对最大挤压力的影响及显著性；最后，获取了较优的参数组合，并基于主应力法对模拟所获得的最大挤压力进行理论验证，为实现铝型材多孔分流挤压的省力成形并提高模具寿命提供参考。

1 构建有限元模型

1.1 模具设计

所用的矩形管铝型材二维截面如图 1 所示，其长度为 30 mm，壁厚为 2 mm。因该型材为空心截面，挤压过程通常采用多孔分流组合模，主要设计要点包括分流孔的形状及大小、工作带、上下模和焊合室等。上、下模的尺寸均为 $\Phi 150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ，上模主要由分流孔、分流桥及模芯组成。上模设 4 个分流孔，并且分流孔略外倾一定角度，以利于平衡金属材料流速。下模由焊合室、工作带和模孔组成。根据型材截面的形状特点，设计如图 2 所示的三维模具结构。

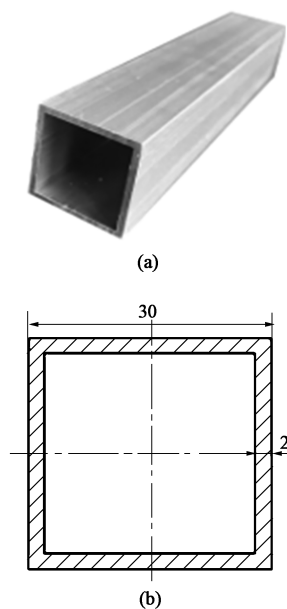


图 1 矩形管铝型材 (a) 及其截面图 (b)

Fig. 1 Rectangular tube aluminum profile (a) and its cross section diagram (b)

1.2 有限元模型

基于 UG 造型软件建立矩形管铝型材及模具几何模型，再以 STL 格式将其导入 Deform-3D 模拟软件前处理中，具体过程如下。

(1) 单元网格划分。采用刚粘塑性有限元法，由于模具变形小而坯料变形大，故将坯料设为变形体，模具设为刚性体。坯料采用四面体离散单元，这种单元可准确地离散并逼近复杂的几何形状^[14]。由于坯料、挤压垫、挤压筒等挤出型材均为对称结构，为提高软件计算效率和模拟精度，采用 1/4 模型进行计算；对称面设置为刚性面，以抑制材料外流；网格划分采用绝对网格法。坯料的初始直径为 $\Phi 85 \text{ mm}$ ，长度为 170 mm，网格划分后的几何模型

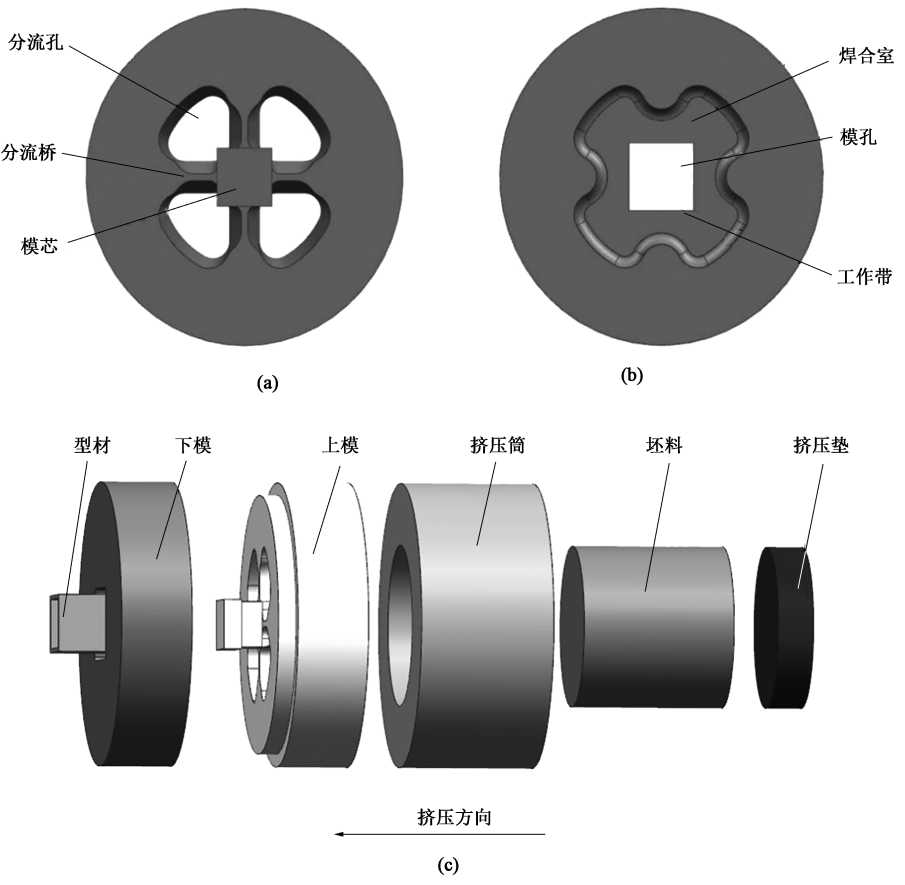


图 2 模具三维模型
(a) 上模 (b) 下模 (c) 整体模型
Fig. 2 Three-dimensional models of dies
(a) Upper die (b) Lower die (c) Entire model

如图 3 所示，单元数量为 20 万左右。

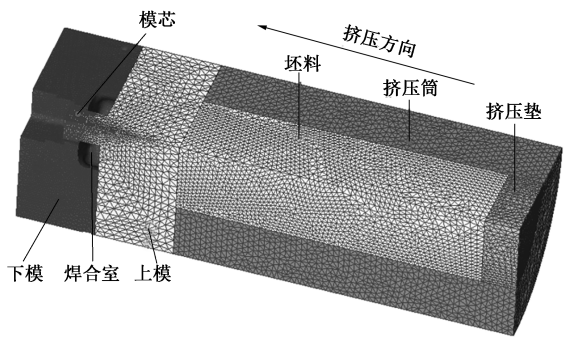


图 3 网格划分后的几何模型
Fig. 3 Geometric model after meshing

(2) 挤压材料选取。挤压模拟过程中，所有模具近似为传热刚性体，坯料不考虑弹性变形，视为纯塑性体^[15]。材料选用 6063 铝合金^[16]，其具有良好的焊接性及高强度比。模具、挤压筒和挤压垫材料为 H13 钢，其具有强韧兼备的力学性能。坯料和模具材料的热力学参数如表 1 所示^[17]。

表 1 6063 铝合金及 H13 钢的热力学参数
Table 1 Thermodynamic parameters of 6063 aluminum alloy and H13 steel

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热传导系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$)	弹性模量/ Pa	泊松比	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)
AA6063 铝合金	2690	180.2	6.89×10^{10}	0.33	898
H13 钢	7800	24.3	2.10×10^{11}	0.30	460

(3) 工艺参数与边界条件。挤压筒温度与模具的预热温度设为 400 ℃；坯料的温度范围定为 420~500 ℃；挤压速度为 1~5 mm·s⁻¹；边界条件包含摩擦边界与传热边界，其中摩擦边界的类型选择剪切摩擦模型，摩擦因数的选取范围为 0.3~0.7，模具与坯料表面间的传热系数为 11 N·(s·mm·℃)⁻¹。

铝型材挤压的有限元模型是材料在成形过程中实际物理变形的近似数学描述。有限元模型反映材料在挤压过程中的真实变形行为。杨志高等^[17]建立了方管铝型材分段变速挤压有限元模型，实现了型

材出口温度差恒定于 8 ℃ 左右的等温挤压, 并根据分段变速数据进行了小批量生产验证, 发现型材的各项性能指标均比等速挤压好。高伟等^[18]建立了方管传统分流模和拱形分流模有限元模型, 对比了挤压载荷曲线, 通过试验验证了拱形分流模有限元模型的可靠性。这些铝型材挤压研究所采用的热力耦合有限元模型均得到了试验验证, 可以用来描述并预测本文所建立的薄壁矩形管铝型材分流挤压过程中的材料流动与挤压力。

2 材料流动过程分析

2.1 挤压各阶段材料流动分析

在薄壁矩形管铝型材分流挤压过程中, 材料主

要沿挤压方向-Z轴流动, 并分成了如图 4 所示的 4 个阶段: I 镦粗阶段、II 分流阶段、III 焊合阶段和 IV 成形阶段。具体分析如下。

图 4a 为镦粗阶段, 因坯料直径小于挤压筒直径, 材料首先在挤压筒内径向流动, 并逐渐充满挤压筒; 随后, 坯料逐渐流入分流孔, 此时分流孔内的材料流速小于挤压垫速度, 其原因是镦粗和分流同时进行, 导致分流速度变小。

图 4b 为分流阶段, 金属材料在分流桥的作用下被拆分为 4 股, 分别流入对应分流孔中。此时, 分流孔内的材料流速远大于挤压垫速度; 同时, 挤压筒中心金属流动的阻力小, 且挤压筒内壁的摩擦力较小, 使得分流孔内侧流速大于外侧。

图 4c 为焊合阶段, 此时 4 股金属材料相继与焊

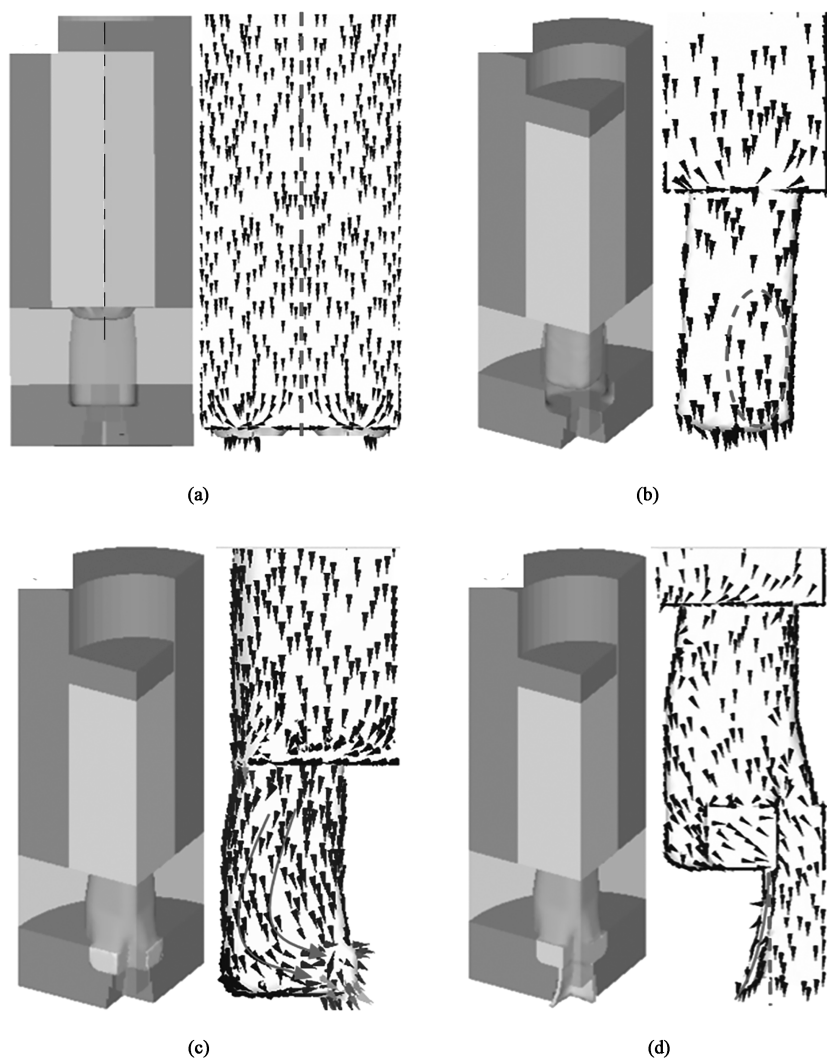


图 4 薄壁矩形管铝型材分流挤压过程中的材料流动

(a) 镦粗阶段 (b) 分流阶段 (c) 焊合阶段 (d) 成形阶段

Fig. 4 Material flow in port-hole extrusion process for thin-walled rectangular tube aluminum profile

(a) Upsetting stage (b) Diversion stage (c) Welding stage (d) Forming stage

合室底面接触, 发生横向流动, 填充焊合室。在填充焊合室过程中, 材料先流向焊合室四周, 当该区域逐渐充满后, 材料向模具中心流入, 而其余材料会直接流入焊合室中心区域, 导致焊合室内材料流速不均。

图 4d 为成形阶段, 该阶段继承了焊合阶段流速不均的材料, 因矩形管外侧材料流速快, 且工作带长度过短, 支撑力不够, 型材离开模孔后向外侧弯曲, 形成一定弧度, 并与模具触碰, 易损坏模具。

工作带垂直于模具工作的端面, 其目的是调整挤压金属的流速, 保证挤压型材成形和固定铝型材的尺寸及表面质量。若工作带长度过短, 会导致金属材料在流动过程中阻力过小, 不能稳定控制型材尺寸, 同时工作带更易磨损, 导致模具损坏; 若工作带过长, 会加剧材料与其之间的摩擦, 增大挤压力, 易使型材产生划伤和毛刺等缺陷。根据图 4 所示采用初始模具设计方案模拟的型材可以看出, 挤压型材向外侧弯曲, 因此, 有必要改进下模的工作带, 以避免型材弯曲。合理设计工作带尺寸可保证型材截面金属流速均匀、降低载荷, 并防止型材变形。改进前后的工作带对比如图 5 所示。

模拟结果表明, 工作带改进后的材料流速均匀, 型材表面质量较好, 未发生外侧弯曲缺陷。在挤压过程中, 焊合面的压应力越大, 型材的焊合质量越

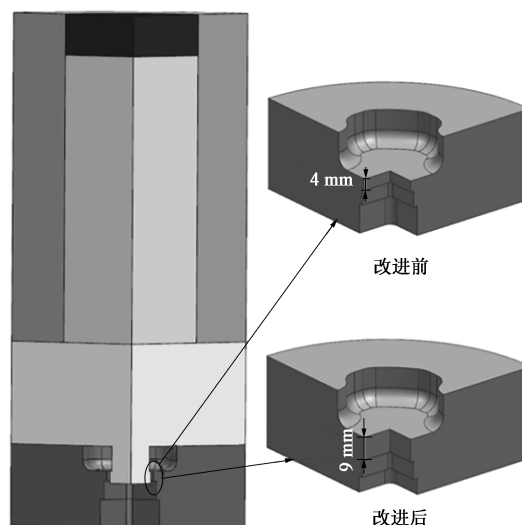


图 5 工作带改进前后对比

Fig. 5 Comparison of working belt before and after improvement

好^[19]。如图 6 所示, 在整个焊合室中, 封闭区域内的静水压力较大, 高于 150 MPa, 流动应力在 30 MPa 左右。Akeret R^[20]认为获得良好焊合质量的条件为焊合压力是流动应力的 3 倍以上, 且模孔附近的压力与焊合室的压力不能相差过大, 否则易导致模芯失稳, 型材壁厚不均。据此, 可以判定本文研究的铝型材分流挤压焊合压力能够满足要求。

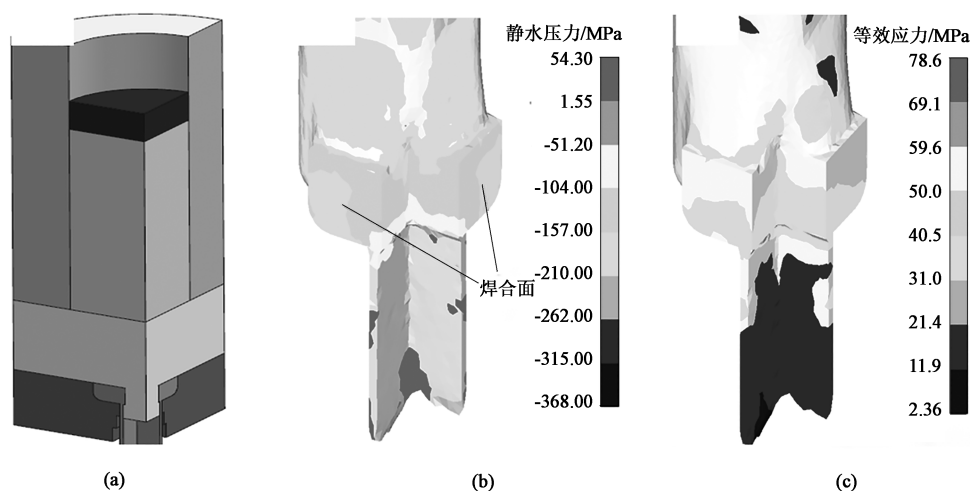


图 6 工作带改进后的成形结果

(a) 型材稳定挤出 (b) 静水压力分布 (c) 等效应力分布

Fig. 6 Forming results after working belt improvement

(a) Stable extrusion of profile (b) Distribution of hydrostatic pressure (c) Distribution of equivalent stress

2.2 材料流动过程中挤压力变化

在挤压过程中, 材料经分流桥进入焊合室, 随后通过工作带定形, 其主要有 4 个过程, 如图 7 所示。

(1) 镦粗阶段。挤压时, 为便于将坯料放入挤压筒中, 常使坯料的外径小于挤压筒内径 1 ~ 15 mm^[21], 因此, 在挤压力的作用下, 材料首先径向流动, 充满挤压筒, 同时有少量金属流入模孔。

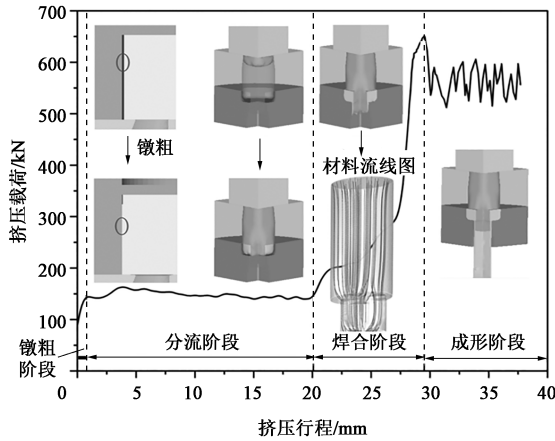


图 7 挤压过程中的材料流动

Fig. 7 Materia flow during extrusion process

(2) 分流阶段。伴随分流的金属材料经分流孔流入焊合室后，在焊合室内重新焊合。

(3) 焊合阶段。当金属材料经分流道进入焊合室底部后，在焊合室底部不断地集聚和横向移动。这一过程发生在金属从模孔流出的瞬间，此时静水压力不断上升，导致挤压力急剧增加。材料的流动基本上不发生交错或反向流动。

(4) 成形阶段。随着挤压垫与上模具之间的间距缩小，变形区金属被迫沿挤压轴线方向由周围向中心发生急剧横向运动，挤压载荷在这一阶段也到达峰值。随后，金属材料从模孔中稳定流出，挤压力逐渐降低后趋于某一水平波动。

2.3 材料流动过程中挤压力的计算

挤压力是挤压过程最重要的参数之一。为选择合适的设备、拟定合理的工艺、设计合理的模具，均需精确计算挤压力的大小。直接或间接影响挤压力的因素众多。经实测与分析，确定主要因素有：材料自身属性、挤压温度、挤压速度、变形程度、工模具形状和结构与表面接触条件等。惠恬静等^[22]采用主应力法推导了大口径厚壁无缝钢管挤压过程中的挤压力，并利用有限元模拟对大口径厚壁无缝钢管的挤压力进行了模拟计算，两者的平均相对误差仅为 7.7%。王忠堂等^[23]采用主应力法确定了管材挤压力的理论计算公式，经试验验证，其理论计算结果与试验结果差异不大。目前，计算挤压力的公式较多，本文使用皮尔林公式^[5]，此公式同样基于主应力法进行推导，如式 (1) 所示：

$$P = P_1 + \lambda_k P_2 = P_1 + \frac{F_1}{n F_k} \cdot P_2 \quad (1)$$

式中： P 为挤压力； P_1 为坯料由挤压筒进入分流孔

的变形力； λ_k 为挤压筒进入分流孔的延伸系数； P_2 为金属由焊合室进入模孔的变形力； F_1 为挤压筒断面积； F_k 为一个分流孔的断面积； n 为分流孔数目。

$$P_1 = R_s + T_{zh} + T_f + T_l \quad (2)$$

$$R_s = 0.785 (\ln \lambda + \ln \sqrt[4]{\sum F_1 \bar{t}^{-2}}) \cdot \left(\cos^{-2} \frac{\alpha}{2} \right) \times D_0^2 \cdot 2 \bar{S}_{zh} \quad (3)$$

$$T_{zh} = 0.785 \cdot i \cdot \sin \alpha \cdot D_0^2 \cdot f_{zh} \cdot \bar{S}_{zh} \quad (4)$$

$$T_l = \pi \cdot D_0 \cdot (L_0 - h_s) \cdot f_l \cdot S_{zh1} \quad (5)$$

$$T_f = \lambda \cdot \left(\sum F_g \right) \cdot f_g \cdot S_{zh1} \quad (6)$$

$$P_2 = 3 F_h \cdot \left(\ln \frac{F_{k1}}{F_1} + \ln \frac{Z_z}{Z_u} \right) \bar{\tau} + \lambda \cdot F_f \cdot \tau_2 + 1.8 (D_h^2 - d_1^2) \ln \frac{D_h - d_1}{D_1 - d_1} \cdot \bar{\tau} + 0.5 \lambda (Z_n + Z_w) l_1 \cdot \tau_2 \quad (7)$$

式中： R_s 为塑性变形作用在挤压垫上的力； T_{zh} 为克服挤压筒中塑性变形压缩锥面上的摩擦所需要的力； T_f 为克服分流道中的摩擦所需要的力； λ 为挤压比，且 $i = \ln \lambda$ ； T_l 为克服挤压筒壁上的摩擦所需要的力； D_0 为坯料的直径； \bar{t} 为坯型材平均厚度； f_{zh} 为变形区内的表面摩擦因数，且 $f_{zh} \approx 1$ ； \bar{S}_{zh} 为塑性变形区压缩锥内的平均塑性剪切应力； α 为压缩锥角； S_{zh1} 为变形区压缩锥出口处金属塑性剪切应力； f_g 为挤压工作带上的摩擦因数； F_g 为摩挤压垫克服工作带表面的力； L_0 为坯料初始长度； h_s 为死区高度； f_l 为挤压筒内部摩擦因数； F_h 为焊合室的断面积； D_h 为焊合室的直径； F_{k1} 为焊合室一端分流孔的总断面积； F_f 为分流孔道的总侧面积； Z_z 和 Z_u 为型材断面周长及断面圆周长； Z_n 和 Z_w 为周制断面内周长和外周长； l_1 为工作带长度； F_1 为挤压型材断面积； D_1 和 d_1 为型材的外径和内径； λ 为挤压比； $\bar{\tau}$ 为塑性变形区压缩锥内的金属平均剪切应力； τ_2 为塑性变形区压缩锥出口处的金属剪切应力。

选取坯料直径为 $\Phi 85$ mm、坯料长度为 170 mm、工作带长度为 9 mm、焊合室高度为 13 mm、挤压速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.3、坯料温度为 500 °C。采用与有限元模拟同样的 1/4 模型进行求解，将式 (2)~式 (7) 计算后依次代入式 (1) 中，利用 MATLAB 软件进行编辑计算，求解出材料在挤压过程中受到的最大挤压力 F 为 481.9 kN。

3 挤压力影响因素研究

3.1 正交试验设计

挤压过程中的挤压力过大，可能会造成设备闷车和损坏模具等问题。挤压力上限由挤压机决定，但可通过改进挤压工艺参数来降低型材所需的挤压力，以此提升现有挤压机的成形能力，提高模具使用寿命。因此，有必要研究不同挤压参数对最大挤压力 F 的影响。

采用正交试验方法，选取坯料直径 D 、挤压速度 V 、摩擦因数 m 、坯料温度 T 、工作带长度 L 、焊合室高度 H 作为设计变量。采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表作为试验方案，研究挤压过程中 6 个变量对最大挤压力的影响。因最大挤压力出现在如图 7 所示的焊合与成形的过渡阶段，因此，采用该阶段所得到的最大挤压力作为衡量指标，变量的具体取值范围如表 2 所示，正交试验方案如表 3 所示。

表 2 挤压参数及其取值范围

水平	因素					
	坯料直径	挤压速度 V	摩擦因数	坯料温度	工作带长	焊合室高
	D/mm	$(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	m	$T/^{\circ}\text{C}$	度 L/mm	度 H/mm
1	$\Phi 85$	1	0.3	420	8	13
2	$\Phi 87$	3	0.4	440	9	14
3	$\Phi 89$	5	0.5	460	10	15
4	$\Phi 91$	7	0.6	480	11	16
5	$\Phi 93$	9	0.7	500	12	17

3.2 工艺和模具因素对最大挤压力的影响

根据 25 组试验设计方案，更改有限元模型中前处理的可控变量参数，并分别提交模拟计算，获取最大挤压力 F 的值，具体数值如表 3 所示。

图 8 为正交试验材料在挤压过程中受到的最大挤压力与皮尔林公式^[5]计算的最大挤压力对比图。可以得出，模拟挤压力与理论挤压力的变化趋势基本一致，平均误差为 6.1%，且最大误差为 10.4%，因此，进一步证明了所建立的有限元模型能够预测材料在挤压成形过程中的实际挤压力大小。

3.3 挤压力影响因素敏感性分析

对表 3 中的最大挤压力进行极差分析，计算结果如表 4 所示，其中 $K_1 \sim K_5$ 因素为在相应水平下的最大挤压力之和，对于最大挤压力，影响因素的主次顺序为坯料直径>挤压速度>坯料温度>摩擦因数>焊合室高度>工作带长度。根据分析结果绘制各因素对试验因素的影响趋势，图9给出了坯料直径、挤

表 3 正交试验设计方案

Table 3 Design schemes of orthogonal test

方案	因素						最大挤压力 F/kN
	坯料直径/mm	挤压速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	摩擦因数	坯料温度/ $^{\circ}\text{C}$	工作带长度/mm	焊合室高度/mm	
1	85	1	0.3	420	8	13	548.03
2	85	3	0.4	440	9	14	513.58
3	85	5	0.5	460	10	15	580.81
4	85	7	0.6	480	11	16	516.37
5	85	9	0.7	500	12	17	552.34
6	87	1	0.4	460	11	17	516.31
7	87	3	0.5	480	12	13	585.63
8	87	5	0.6	500	8	14	538.72
9	87	7	0.7	420	9	15	613.58
10	87	9	0.3	440	10	16	662.82
11	89	1	0.5	500	9	16	555.28
12	89	3	0.6	420	10	17	636.32
13	89	5	0.7	440	11	13	707.98
14	89	7	0.3	460	12	14	669.27
15	89	9	0.4	480	8	15	672.25
16	91	1	0.6	440	12	15	610.53
17	91	3	0.7	460	8	16	667.34
18	91	5	0.3	480	9	17	645.18
19	91	7	0.4	500	10	13	645.64
20	91	9	0.5	420	11	14	734.31
21	93	1	0.7	480	10	14	605.87
22	93	3	0.3	500	11	15	624.69
23	93	5	0.4	420	12	16	721.04
24	93	7	0.3	440	8	17	713.44
25	93	9	0.6	460	9	13	709.65

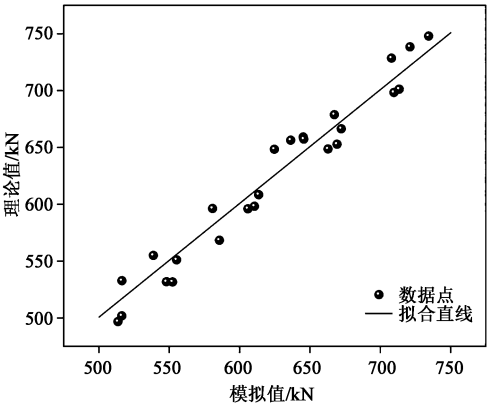


图 8 最大挤压力的模拟值与理论值的比较
Fig. 8 Comparison between simulation and theoretical values of maximum extrusion force

表 4 最大挤压力的极差分析结果 (kN)

Table 4 Range analysis results of maximum extrusion force (kN)

参数	因素					
	坯料直径	挤压速度	摩擦因数	坯料温度	工作带长度	焊合室高度
K_1	542.23	567.2	609.99	650.66	617.95	609.39
K_2	583.41	605.51	613.76	641.67	607.45	612.35
K_3	628.22	628.75	623.89	628.67	616.29	620.37
K_4	660.60	641.66	620.32	605.06	619.93	624.57
K_5	674.94	666.27	629.42	583.33	627.76	632.71
极差 R	132.71	90.07	31.57	67.32	20.5	27.04

压速度、摩擦因数、坯料温度、工作带长度及焊合室高度对最大挤压力的极差分析结果。

由图 9 可以看出, 以挤压力为优化指标时, 优选的参数组合为: 坯料直径为 $\Phi 85$ mm、挤压速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.3、坯料温度为 500°C 、工作带长度为 9 mm、焊合室高度为 13 mm。极差结果表明坯料直径、挤压速度和坯料温度对最大挤压力的影响较大。经模拟得出, 优选参数下的最大挤压力为 510.4 kN。而通过皮尔林公式^[5]计算得出的挤压力为 481.9 kN, 两者平均相对误差为 5.6%, 与所有正交试验方案的挤压力相比均为最小。因此, 在铝型材挤压实际过程满足宏观质量的前提下, 应尽量采用直径较小的坯料、较慢的挤压速度并尽可能提高坯料变形温度, 应采用较好的润滑剂以减小摩擦, 可有效降低挤压成形载荷, 提高模具的使用寿命。

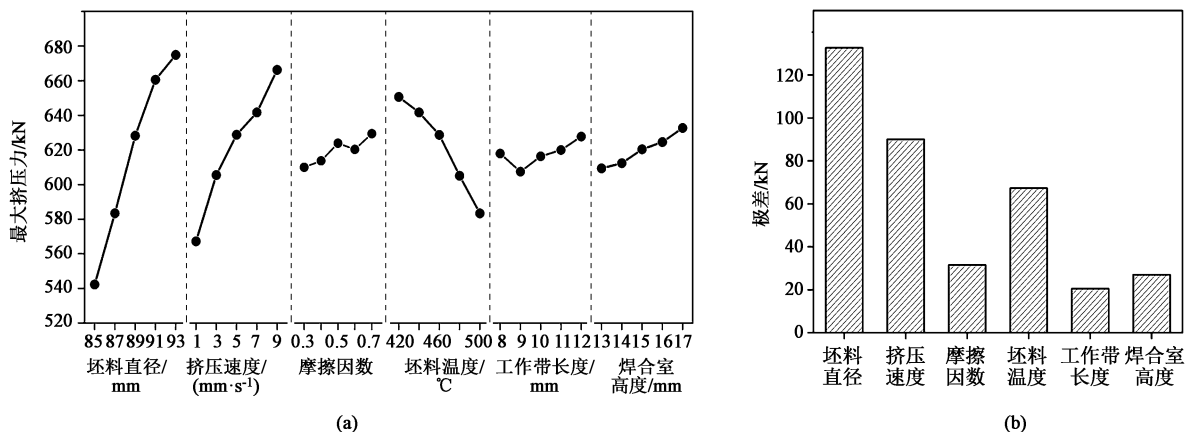


图 9 最大挤压力的极差分析结果

(a) 各因素对最大挤压力的影响 (b) 极差分析结果

Fig. 9 Range analysis results on maximum extrusion force

(a) Influence of various factors on maximum extrusion force (b) Range analysis results

4 结论

(1) 薄壁矩形管铝型材分流挤压过程主要分为锻粗、分流、焊合和成形 4 个阶段。随着材料流入分流孔, 汇聚于焊合室, 最后经过工作带流出, 挤压力逐渐升高。当材料到达工作带处时达到峰值, 随后由于材料与挤压筒之间的摩擦力降低和温升软化效应, 挤压力减小后趋于某一水平波动。

(2) 在挤压过程中, 如果工作带过长, 会导致摩擦阻力增加; 工作带长度过短, 会导致金属材料在流动过程中的阻力过小, 不能稳定控制型材尺寸, 同时工作带更易磨损, 导致模具损坏。

(3) 对比了不同参数组合下的挤压力大小, 优选组合 (坯料直径为 $\Phi 85$ mm、挤压速度为

$1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.3、坯料温度为 500°C 、工作带长度为 9 mm、焊合室高度为 13 mm) 的最大挤压力均为最小, 且与理论计算值的相对误差仅为 5.6%。证实了在铝合金挤压过程中应选择尽量小的坯料直径、尽量小的挤压速度且尽可能提高坯料变形温度。

参考文献:

- [1] 白志玲. 铝合金的研究现状及应用 [J]. 科技广场, 2015, (12): 18-20.
Bai Z L. Research status and application of aluminum alloy [J]. Science Mosaic, 2015, (12): 18-20.
- [2] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望 [J]. 材料导报, 2005, 19 (2): 76-80.
Yang S J, Dai S L. Review and prospect of the development of aviation aluminum alloy [J]. Materials Reports, 2005, 19 (2): 76-80.

- [3] Yu J Q, Zhao G Q, Zhao X T, et al. Microstructures of longitudinal/transverse welds and back-end defects and their influences on the corrosion resistance and mechanical properties of aluminum alloy extrusion profiles [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 267: 1-16.
- [4] 曾文浩, 魏刚, 邓小亮, 等. 翻窗上扇框薄壁空心铝型材挤压过程数值模拟与挤压参数优化 [J]. *西华大学学报*, 2017, 36 (4): 70-77.
- Zeng W H, Wei G, Deng X L, et al. Numerical simulation of extrusion process and optimization of extrusion parameters for thin-walled hollow aluminum profile in upper window frame [J]. *Journal of Xihua University*, 2017, 36 (4): 70-77.
- [5] 刘莹莹, 王庆娟. 金属挤压、拉拔工艺及公模具设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
- Liu Y Y, Wang Q J. *Metal Extrusion, Drawing Process and Tooling Design* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2020.
- [6] 王泽宁, 孙金全, 崔洪芝. 影响铝型材挤压模具寿命因素的分析 [J]. *热处理技术与装备*, 2014, 35 (5): 22-30.
- Wang Z N, Sun J Q, Cui H Z. Analysis of factors affecting life of extrusion die for aluminum profile [J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2014, 35 (5): 22-30.
- [7] Fang G, Zhou J, Duszczek 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.
- [8] 党利, 杨合, 郭良刚, 等. Inconel625 大型厚壁管挤压损伤行为仿真 [J]. *塑性工程学报*, 2015, 22 (5): 29-34.
- Dang L, Yang H, Guo L G, et al. Simulation on extrusion damage behavior of Inconel625 large thick wall tube [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2015, 22 (5): 29-34.
- [9] 李世康, 李落星, 刘志文, 等. 挤压速度对 6063 铝合金管材焊合强度的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27 (9): 1775-1784.
- Li S K, Li L X, Liu Z W, et al. Effect of extrusion speed on welding strength of 6063 aluminum alloy pipe [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27 (9): 1775-1784.
- [10] 刘惠, 刘腾飞, 陈宗强, 等. 基于试验设计和响应曲面法的大型带筋薄壁铝型材挤压工艺优化 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (5): 144-152.
- Liu H, Liu T F, Chen Z Q, et al. Optimization of extrusion process for large thin wall aluminum profile with rib based on experimental design and response surface method [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (5): 144-152.
- [11] Solomon N, Solomon I. Effect of die shape on the metal flow pattern during direct extrusion process [J]. *Revista de Metalurgia*, 2010, 46 (5): 396-404.
- [12] Flitta I, Sheppard T. Material flow during the extrusion of simple and complex cross-sections using FEM [J]. *Materials Science and Technology*, 2005, 21 (6): 648-656.
- [13] 马国欣, 曹高旺, 邱胜宝. 基于 Deform-3D 的铜锌合金支架热挤压成形数值模拟 [J]. *有色金属加工*, 2011, 40 (2): 29-31.
- Ma G X, Cao G W, Qiu S B. Numerical simulation of hot extrusion forming of Cu-Zn alloy support based on Deform-3D [J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2011, 40 (2): 29-31.
- [14] 李亚智, 赵美英, 万小朋. 有限元法基础与程序设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Li Y Z, Zhao M Y, Wan X P. *Foundation and Programming of Finite Element Method* [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [15] 惠恬静, 雷步芳, 贾璐, 等. 大口径厚壁无缝钢管热挤压过程中挤压力的求解 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24 (4): 110-116.
- Hui T J, Lei B F, Jia L, et al. Solution of extrusion pressure in hot extrusion process of large diameter thick wall seamless steel pipe [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24 (4): 110-116.
- [16] Donati L, Segatori A, Gamberoni B, et al. Extrusion benchmark 2017: Effect of die design on profile quality and distortions of thin C-shaped hollow profiles [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 10: 171-184.
- [17] 杨志高, 徐永礼, 庞祖高, 等. 基于 Deform-3D 方管铝合金型材等温挤压的变速挤压数值模拟 [J]. *锻压技术*, 2015, 40 (4): 152-157.
- Yang Z G, Xu Y L, Pang Z G, et al. Numerical simulation of variable speed extrusion of aluminum alloy profiles based on Deform-3D square tube isothermal extrusion [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2015, 40 (4): 152-157.
- [18] 高伟, 王雷刚, 黄瑶, 等. 基于 Deform-3D 的方管挤压模模桥结构优化研究 [J]. *轻合金加工技术*, 2017, 45 (8): 40-45.
- Gao W, Wang L G, Huang Y, et al. Structure optimization of square tube extrusion die bridge based on Deform-3D [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2017, 45 (8): 40-45.
- [19] 赵茂密, 姜小龙, 兰天虹, 等. 工艺参数对分流组合模挤压 6005A 铝合金型材焊合质量的影响 [J]. *轻合金加工技术*, 2018, 46 (4): 20-25.
- Zhao M M, Jiang X L, Lan T H, et al. Effect of process parameters on welding quality of 6005A aluminum alloy profile by porthole die extrusion [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2018, 46 (4): 20-25.
- [20] Akeret R. Properties of pressure welds in extruded aluminium alloy sections [J]. *Journal of the Institute of Metals*, 1972, 10: 202-208.
- [21] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- Xie J X, Liu J A. *Theory and Technology of Metal Extrusion* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [22] 惠恬静, 雷步芳, 贾璐, 等. 大口径厚壁无缝钢管热挤压过程中挤压力的求解 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24 (4): 110-116.
- Hui T J, Lei B F, Jia L, et al. Solution of extrusion force during hot extrusion processes for large caliber thick wall seamless steel tube [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24 (4): 110-116.
- [23] 王忠堂, 郑洁, 张士宏, 等. 管材挤压力能参数物理模型 [J]. *塑性工程学报*, 2003, (4): 49-51.
- Wang Z T, Zheng J, Zhang S H, et al. Physical model of extrusion force energy parameters for pipes [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2003, (4): 49-51.