

铝合金排材挤压工艺仿真模拟研究

吴镇宇¹, 梁洪铭^{1*}, 王玉文¹, 陈小玲²

¹广西南南铝加工有限公司, 广西铝合金材料与加工重点实验室, 广西 南宁

²广西广投新材料集团有限公司, 广西 南宁

收稿日期: 2022年9月26日; 录用日期: 2022年11月12日; 发布日期: 2022年11月22日

摘要

为了优化高强度铝合金排材的生产工艺, 通过模具、工艺等要素分析, 利用有限元仿真软件进行正交模拟试验研究。结果表明: 当工作带长度为8 mm、导流深度为38 mm、挤压杆速为1.0 mm/s、铸锭温度为340°C时, 挤压出口金属流速、温度最均匀, 挤压内筒比压最小。利用该最优参数组合进行实际生产, 挤出了合格的7075铝合金排材, 证明了模拟结果的可靠性。

关键词

7075铝合金, 挤压排材, 挤压速度, 有限元仿真模拟, 正交法

Simulation Study on Extrusion Process of Aluminum Alloy Strips

Zhenyu Wu¹, Hongming Liang^{1*}, Yuwen Wang¹, Xiaoling Chen²

¹Guangxi Key Laboratory of Materials and Processes of Aluminum Alloy, ALG Aluminum Inc., Nanning Guangxi

²GIG Advance Materials Group, Nanning Guangxi

Received: Sep. 26th, 2022; accepted: Nov. 12th, 2022; published: Nov. 22nd, 2022

Abstract

In order to optimize the extrusion process of high-strength aluminum alloy strips, the orthogonal simulation tests were carried out by using finite element software by analyzing the die and process factors. The results show that when the thickness of die bearing was 8 mm, the depth of the flow-guiding hole was 38 mm, the speed of extrusion rod was 1.0 mm/s and the temperature of billet was 340°C, the metal flow rate and temperature of the extrusion strips were the most uniform, and the specific pressure of the extrusion inner cylinder was the lowest. The optimal para-

*通讯作者。

meter was used for the actual production, and the qualified 7075 aluminum alloy strips were extruded to prove the reliability of the simulation results.

Keywords

7075 Aluminum Alloy, Strips, Extrusion Speed, Finite Element Simulation, Orthogonal Test

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

7075 属于 Al-Zn-Mg-Cu 系高强高硬铝合金, 因具有密度低、强韧性高、易加工、可焊性优良等特点, 广泛应用于航空航天、轨道交通和高端民用等领域[1] [2] [3]。但由于其合金化程度高、变形抗力较大, 不仅需要更大吨位的挤压设备, 而且为避免挤压过程中出现开裂、尺寸形位超差等缺陷, 其挤压速度不能过快, 通常只能控制在 5~8 mm/s。因此, 7075 的挤压过程属于慢挤压[4]。以 75 MN 挤压机生产截面规格为 26 * 310 mm 的 7075 排材为例, 挤压铸锭长度为 1200 mm, 挤出长度为 15.4 m 的排材耗时约 35 min。以此推算, 单日产量不足 14 t, 严重影响生产效率和产能发挥。

本文通过要素分析, 利用有限元软件对铝合金排材的挤压过程进行正交模拟试验, 研究不同要素组合对挤压出口速度、温度以及挤压内筒比压的影响, 为 7075 排材的生产工艺优化提供理论参考。

2. 要素分析

2.1. 模具要素分析

模具是影响铝材挤压生产的主要因素之一。在挤压过程中, 坯料金属先填充导流孔进行一次预成形, 然后流入工作带进行二次成形, 从而得到成品尺寸规格。在这个过程中, 由于挤压力在模具中呈非均匀分布, 导致模具出口各部位的金属以不同的速度流出。当速度差异过大时, 排材内应力加剧, 从而出现开裂、扭拧、波浪、弯曲、尺寸超差等缺陷[5] [6]。因此, 为保证模具出口金属均匀流出, 需要合理设计并匹配导流孔深度和工作带厚度这两个参数。模具结构如图 1 所示。

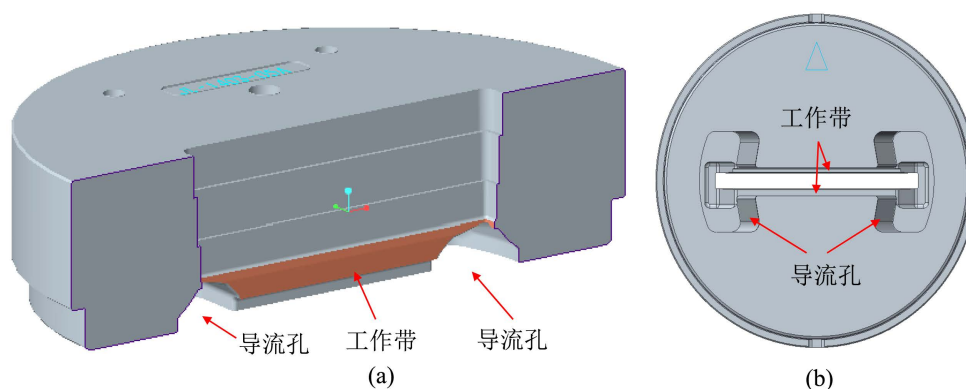


Figure 1. Die structure. (a) Cross section view; (b) Top view

图 1. 模具结构示意图。(a) 截面图; (b) 俯视图

导流孔深度直接影响着模具中金属流的体积[7]。当导流孔过深时, 模具内金属的体积随之增加, 有利于平衡金属流动, 尺寸形位稳定可控, 但由于金属与模具之间的接触面积增大, 摩擦力显著增加, 从而导致排材升温快、挤压载荷过大, 这不仅增大了排材开裂的风险, 也降低了模具的使用寿命。反之, 当导流孔过浅时, 尺寸精度和平面的稳定性得不到保证, 容易出现塌边现象。

工作带是挤压成形最后环节, 其厚度直接影响着排材的形状尺寸和表面质量[8]。工作带厚度越大, 在工作带堆积的金属增多且流速变慢, 在一次预成形阶段形成的死区增大, 虽对挤出排材的表面和尺寸有利[7], 但金属与模具之间的接触面积增大, 摩擦力随之增大, 导致排材温度升高, 容易开裂。反之, 工作带厚度越小, 虽然挤压载荷有所降低、排材升温有限, 但容易带来排材表面质量不稳定, 尾部尺寸不合格等问题。

2.2. 工艺要素分析

挤压过程中的铸锭温度和挤压杆速是对挤压成形过程影响最大的两个工艺参数[9]。首先, 铸锭温度和挤压杆速决定了金属的变形抗力和摩擦力, 从而决定了实际挤压力和模具载荷的大小, 最终影响挤出件的质量与模具寿命。其次, 铸锭温度和挤压杆速也在很大程度上决定了金属的微观组织, 这对最终产品的性能与质量尤为关键[10]。因此, 合理设定铸锭温度和挤压杆速, 是挤压排材优质高效生产的前提和基础。挤压过程示意图如图2所示。

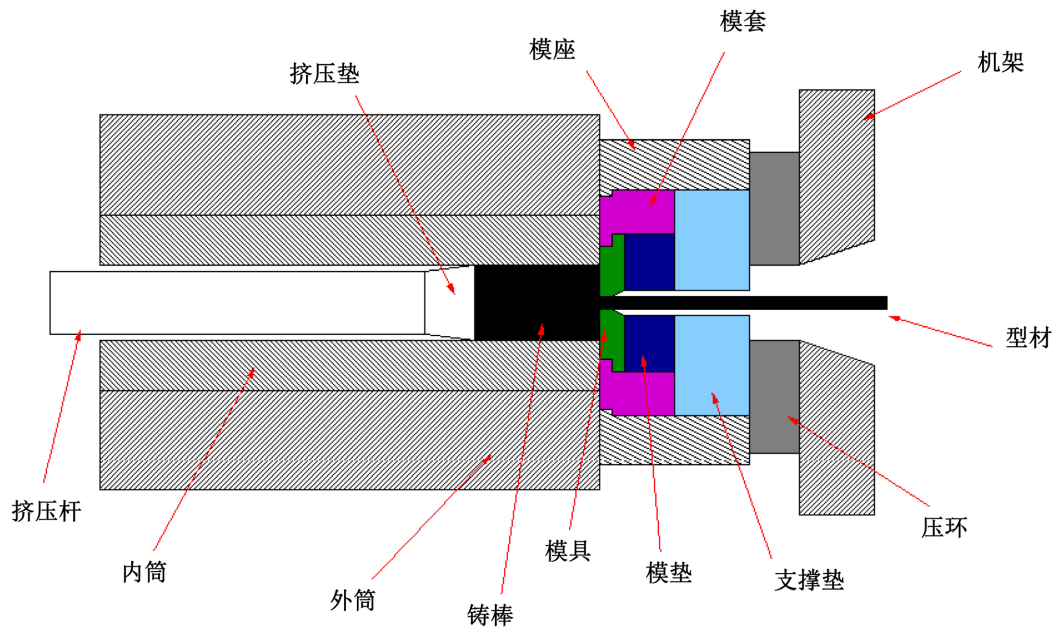


Figure 2. Extrusion process

图2. 挤压过程示意图

铸锭温度对挤压过程中金属变形的影响极大。铸锭温度越高, 金属的强度越低, 这使得挤压力减小, 容易挤压; 但金属与模具之间的摩擦力增大, 金属流动的不均匀性增加, 从而导致挤出产品更容易产生裂纹、粗晶环等缺陷[11]。反之, 铸锭温度越低, 金属的变形抗力越大, 挤压载荷增大, 容易造成挤压闷车(满压挤)、模具寿命缩短等问题的出现。

挤压杆速同样也影响着挤压时金属的变形, 决定了金属的流出速度(排材的挤压速度 = 挤压杆速 × 挤压比) [12]。挤压杆速越快, 生产效率越高, 但金属温升迅速, 容易超出金属的塑性温度区间, 从而产

生裂纹；并且变形抗力也会越大，容易造成挤压闷车。反之，挤压杆速越慢，生产效率越低，但金属的温升相对缓慢，有利于避免挤压裂纹的出现；同时变形抗力相对较小，有利于延长模具寿命[13]。

3. 试验方法

为寻求 7075 排材挤压过程的最优参数组合，本文对工作带长度、导流孔深度、挤压杆速和铸锭温度等 4 因素 4 水平进行试验设计(具体参数见表 1)，选用 L16 (4⁴)正交表确定具体模拟试验方案(详见表 2)。

Table 1. Test factors and levels

表 1. 试验因素与水平

水平	试验因素			
	A 工作带长度/mm	B 导流孔深度/mm	C 挤压杆速/ mm/s	D 铸锭温度/°C
1	6	38	0.6	320
2	8	40	0.8	340
3	10	42	1.0	360
4	12	44	1.2	380

Table 2. Orthogonal simulation test

表 2. 正交模拟试验方案

试验编号	工作带长度/mm	导流孔深度/mm	挤压杆速/ mm/s	铸锭温度/°C
1	6	38	1.0	360
2	8	40	0.6	340
3	10	44	1.0	380
4	12	40	0.6	320
5	6	42	0.6	380
6	8	38	1.0	340
7	10	38	0.6	360
8	12	42	1.0	340
9	6	38	1.2	320
10	8	42	0.8	360
11	10	42	1.2	320
12	12	38	0.8	380
13	6	44	0.8	320
14	8	42	1.2	380
15	10	42	0.8	340
16	12	44	1.2	360

4. 模型建立

将三维建模软件中创建的挤压模具模型导入有限元软件中，并对模型进行几何清理，然后进行网格划分。本模型整体网格总数约为 25 万，网格划分的大小由变形程度决定，变形程度越大网格越小数目越多，变形程度越小网格越大数目越少。划分网格后的排材挤压有限元模型如图 3 所示。

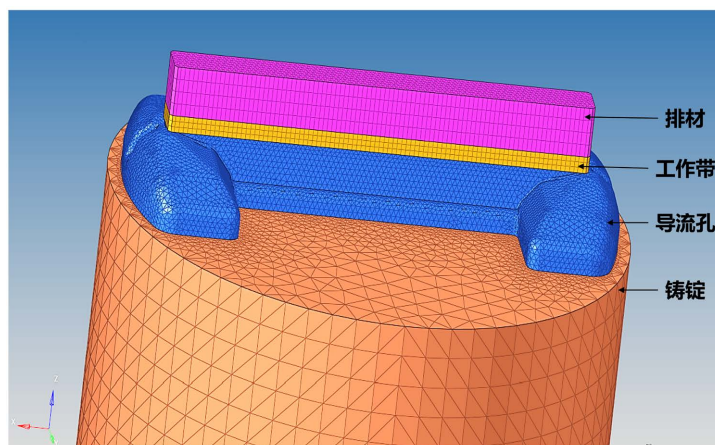


Figure 3. Finite element model for strip extrusion
图 3. 排材挤压有限元模型图

4.1. 材料本构模型

挤压排材为 7075 铝合金，采用反双曲正弦函数模型(Sine Hyperbolic Inverse) [14]，即：

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arcsinh} \left[\frac{\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)}{A} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中： σ 为流动应力； α 为材料参数，与温度有关； $\dot{\varepsilon}$ 为应变率； Q 为活化能； R 为气体常数； T 为温度； A 是应变因子倒数； n 是应力指数。

对于选用的 7075 铝合金， $\alpha = 1.41 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ ， $Q = 1.294 \times 10^5 \text{ J/mol}$ ， $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ， $A = 1.027 \times 10^9$ ， $n = 5.41$ 。材料的杨氏模量 $Y = 4 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ，泊松比为 $\nu = 0.35$ ，密度 $\rho = 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，比热 $C = 960 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，传导率 $k = 17.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。通过计算得到 7075 铝合金的本构关系曲线，如图 4 所示。

4.2. 模拟参数与边界条件

在模拟挤压成形的过程中，模拟参数和边界条件反映了挤压材料与模具之间的受载与约束情况，参数设置越合理，模拟越接近现实。本文的工艺参数、模具参数与边界条件如表 3~5 所示。

5. 模拟结果与讨论

5.1. 挤压速度

图 5 为试验 1~试验 16 的排材挤压速度的模拟结果，显示了排材在挤出模具出口时其横截面上的金属流速分布。可见，排材两端部金属流出速度最快，越往中部金属流出速度越慢。

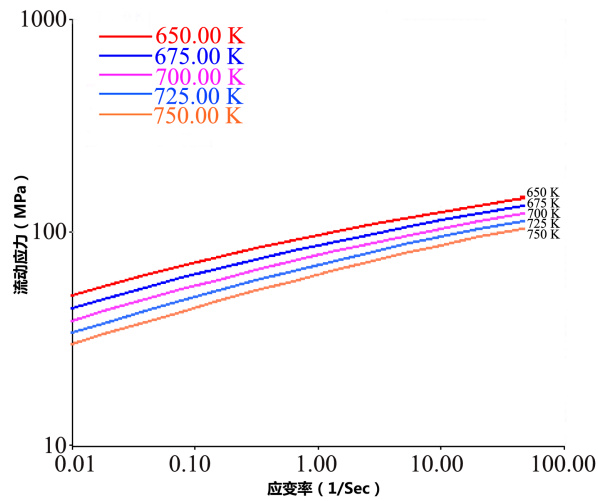


Figure 4. Constitutive relation curves of 7075 aluminium alloy
图 4. 7075 铝合金的本构关系曲线

Table 3. Process parameters
表 3. 工艺参数

项目	参数
挤压筒直径	390 mm
挤压筒温度	400℃
铸锭长度	705 mm
铸锭直径(墩粗前)	380 mm
铸锭温度梯度(纵向)	20℃
铸锭温度梯度(横向)	0℃
压余长度	25 mm
模具温度	400℃
挤压比	14.8

Table 4. Die parameters
表 4. 模具参数

项目	参数
材料	H13钢
密度	$7.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
比热	460 J/(kg·K)
X传导率	24.3 W/(m·K)
Y传导率	24.3 W/(m·K)
Z传导率	24.3 W/(m·K)
体积热源	0 W/m ³
杨氏模量	$2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$
泊松比	0.35

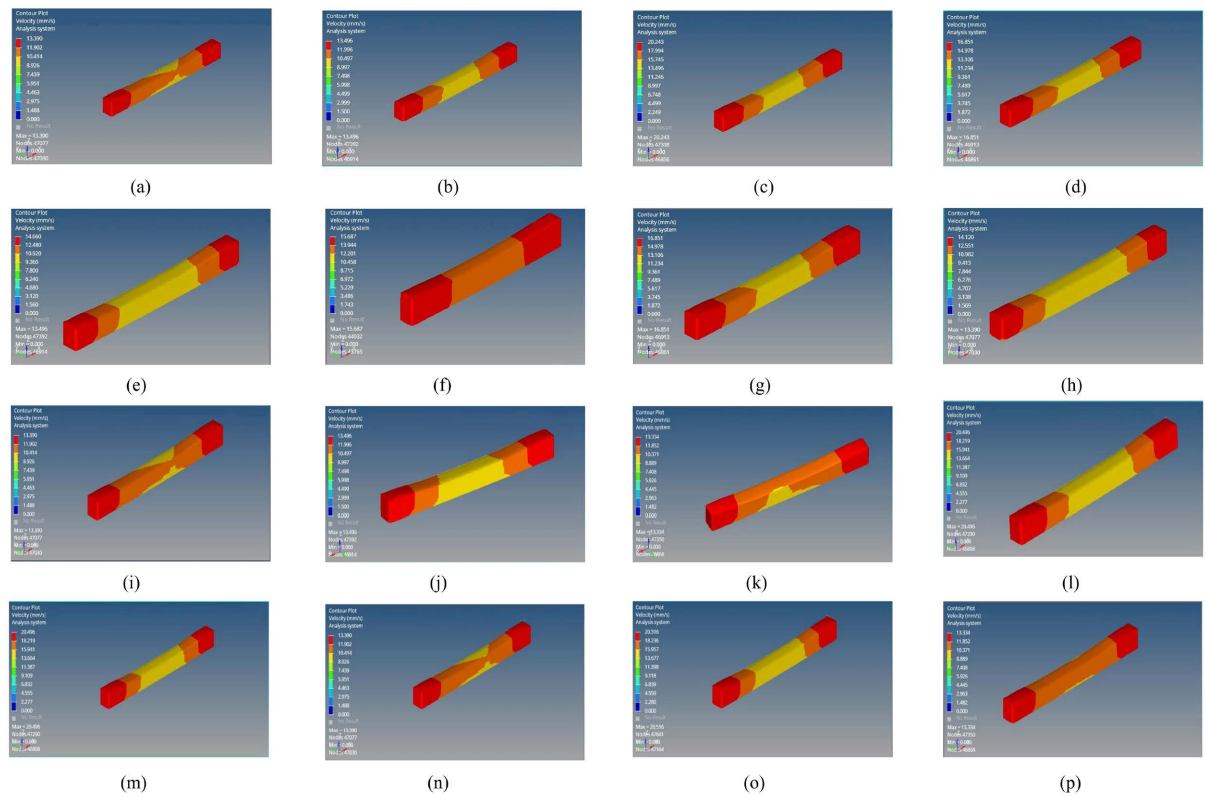


Figure 5. Simulation of extrusion velocity distribution of strip's cross section. (a) Test 1; (b) Test 2; (c) Test 3; (d) Test 4; (e) Test 5; (f) Test 6; (g) Test 7; (h) Test 8; (i) Test 9; (j) Test 10; (k) Test 11; (l) Test 12; (m) Test 13; (n) Test 14; (o) Test 15; (p) Test 16

图 5. 排材截面挤压速度分布模拟结果。(a) 试验 1; (b) 试验 2; (c) 试验 3; (d) 试验 4; (e) 试验 5; (f) 试验 6; (g) 试验 7; (h) 试验 8; (i) 试验 9; (j) 试验 10; (k) 试验 11; (l) 试验 12; (m) 试验 13; (n) 试验 14; (o) 试验 15; (p) 试验 16

Table 5. Boundary conditions

表 5. 边界条件

项目	摩擦类型	系数	传热系数W/(m ² ·°C)
挤压垫与铸锭		无	
铸锭与挤压筒	库仑	0.4	3000
导流孔与模具	库仑	0.4	3000
铸锭与模具	库仑	0.4	3000
工作带与模具	库仑	0.4	3000
排材自由面		无	
出口		无	

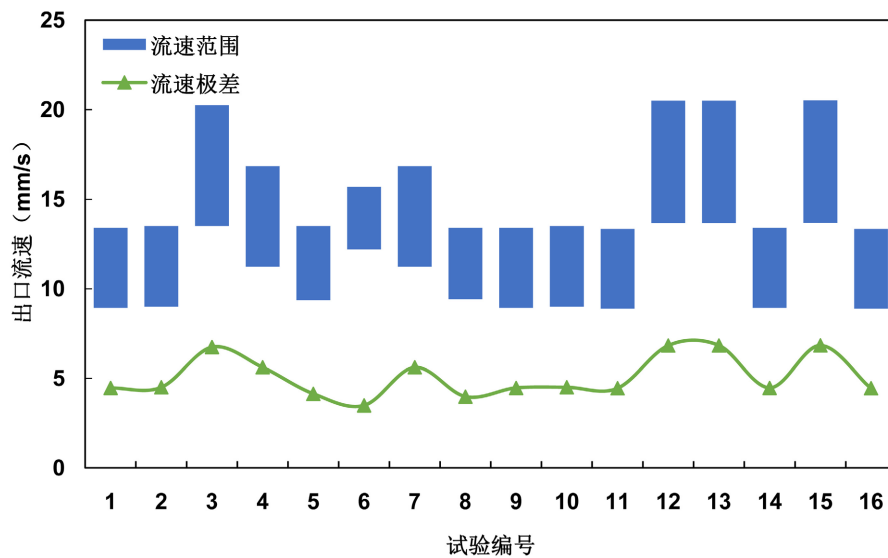
为准确比较试验的模拟结果，需对金属流出速度的均匀性进行评价，即对排材横截面由外至内的 50 个测量点的流速进行极差和均方差[15]计算，公式如下：

$$v_r = v_{\max} - v_{\min} \tag{2}$$

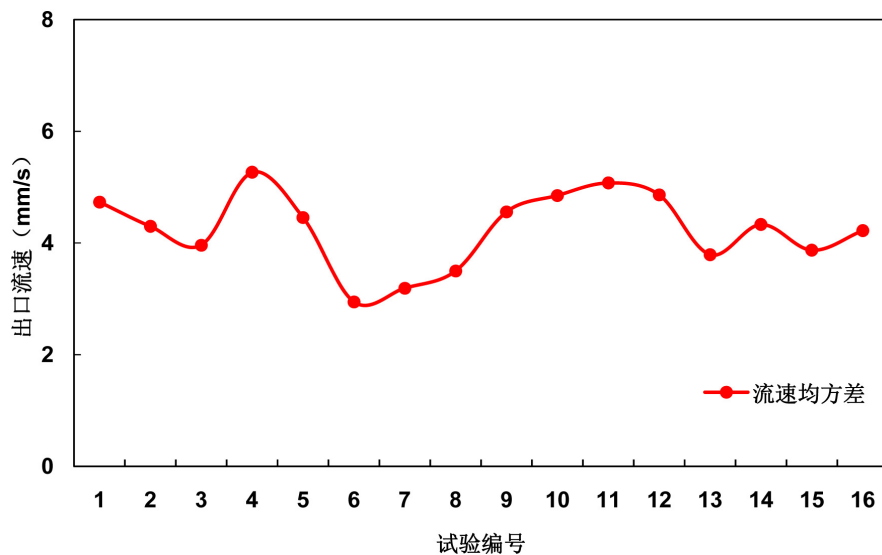
$$v_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n}} \quad (3)$$

式中： v_r 为排材金属流速的极差， v_{\max} 为排材金属流速的最大值， v_{\min} 为排材金属流速的最小值。 v_s 为排材金属流速的均方差， v_i 是测量点 i 处的金属流速， $i=1,2,\dots,n$ ； n 是所选的测量点数量， \bar{v} 是所有测量点的平均流速。

图 6 为各试验流速范围、极差以及均方差。可见，试验 5、试验 6、试验 8 的流速极差相对较小，分别为 4.14 mm/s、3.49 mm/s、3.98 mm/s；试验 6、试验 7、试验 8 的流速均方差相对较小，分别为 2.95 mm/s、3.19 mm/s、3.5 mm/s。其中，试验 6 的金属流速相对较高，且极差值与均方差值均最小。



(a)



(b)

Figure 6. The range and standard deviation of the strip's extrusion velocity. (a) Extrusion velocity range; (b) Standard deviation of extrusion velocity

图 6. 排材流速范围、极差与均方差图。(a) 排材流速范围与极差；(b) 排材流速均方差

5.2. 挤压温度

对试验 5~试验 8 进行挤压温度模拟, 并参照公式(2)和公式(3)对温度进行均方差和极差计算。图 7 显示了排材在挤出模具出口时其横截面上的温度分布, 图 8 为排材挤压温度范围、极差值与均方差值。可见, 试验 5~8 的排材最高温度在都 460℃~470℃ 的范围内, 均低于 7075 过烧温度。其中, 试验 5、7、8 的排材两端温度明显较低; 试验 6 的排材温度区间为 451℃~465℃, 其极差值与均方差值均为最小, 温度分布更为均匀。

5.3. 挤压内筒比压

比压是作用在挤压内筒横截面上的单位压力, 是评价挤压载荷的重要指标, 公式如下:

$$P_{\text{比}} = \frac{F}{S_{\text{筒}}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{比}}$ 为比压; F 为挤压机的挤压力; $S_{\text{筒}}$ 为挤压内筒的横截面面积。

对试验 5~8 进行挤压内筒比压模拟, 并参照公式(2)和公式(3)对比压进行均方差和极差计算。图 9 和图 10 分别为挤压内筒比压分布, 比压范围、极差值与均方差值。由图可知, 4 组试验的最大比压均不超过 625 MPa (换算后小于 75 MN), 且比压范围与极差值均十分接近。其中, 试验 6 的比压均方差最小, 其最大比压值为 595.62 MPa, 比其他 3 组试验的最大比压值低 10~20 MPa。

综合考虑排材挤压速度、温度分布的均匀性, 以及挤压内筒比压的情况, 通过模拟可知, 试验 6 的参数组合为最优, 即工作带长度为 8 mm, 导流孔深度为 38 mm, 挤压杆速为 1.0 mm/s, 铸锭温度为 340℃。在此参数组合的模拟下, 排材的最大挤压速度可达到 15.69 mm/s。

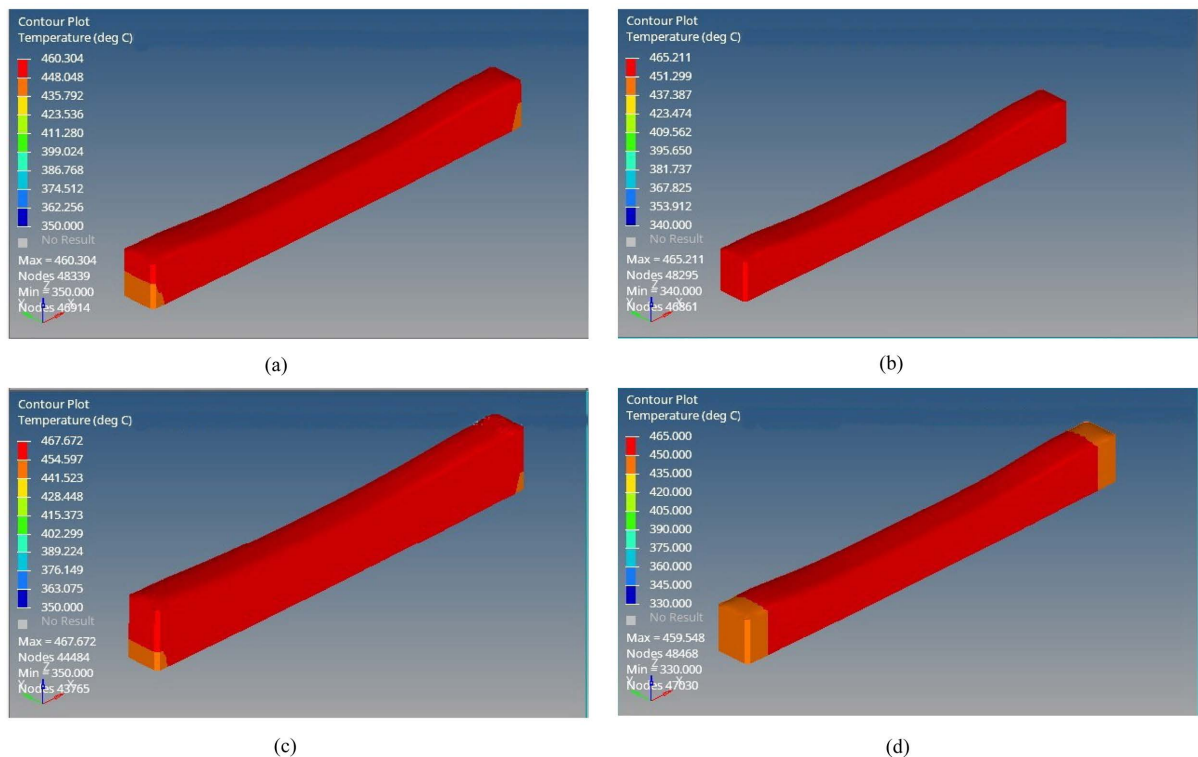


Figure 7. Simulation of extrusion temperature distribution of strip's cross section. (a) Test 5; (b) Test 6; (c) Test 7; (d) Test 8
图 7. 排材截面挤出温度分布模拟结果。(a) 试验 5; (b) 试验 6; (c) 试验 7; (d) 试验 8

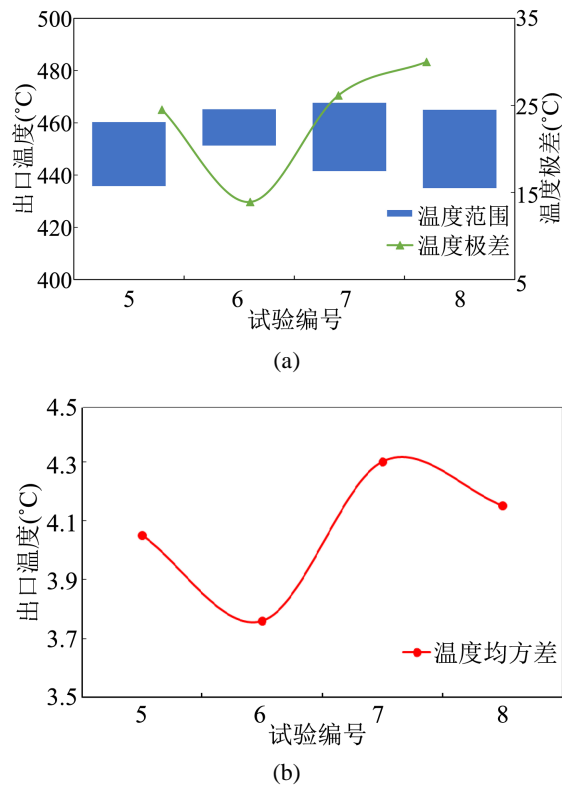


Figure 8. The range and standard deviation of the strip's extrusion temperature. (a) Extrusion temperature range; (b) Standard deviation of extrusion temperature

图 8. 排材温度范围、极差与均方差图。(a) 排材温度范围与极差；(b) 排材温度均方差

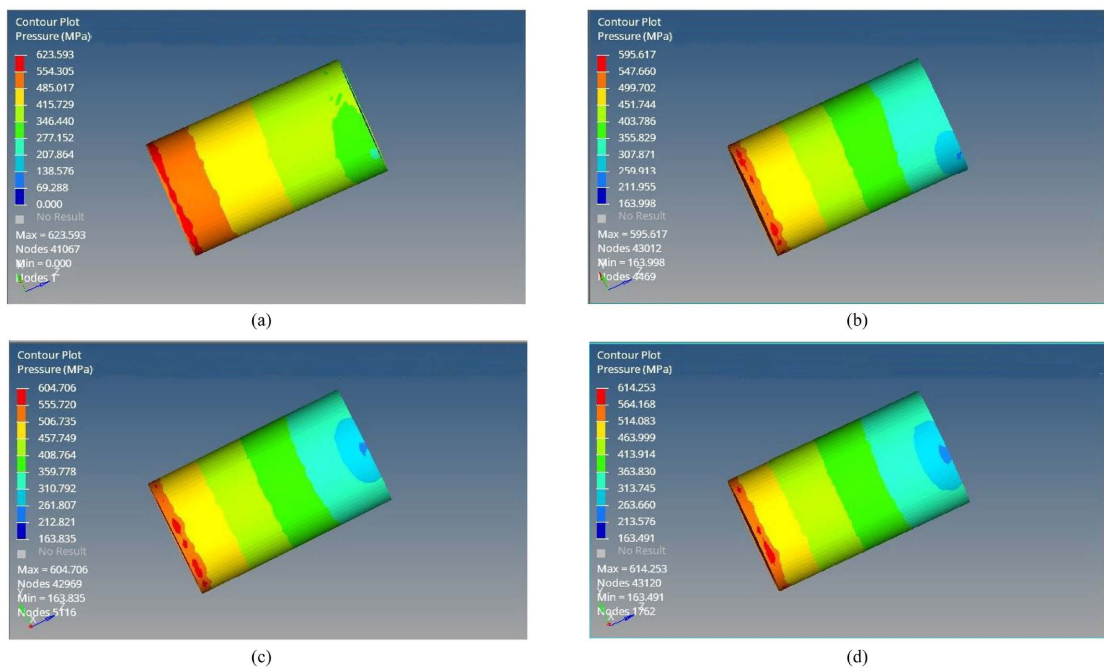


Figure 9. Simulation of specific pressure distribution of extrusion cylinder (side view). (a) Test 5; (b) Test 6; (c) Test 7; (d) Test 8

图 9. 挤压内筒比压分布模拟结果(挤压内筒侧视图)。(a) 试验 5；(b) 试验 6；(c) 试验 7；(d) 试验 8

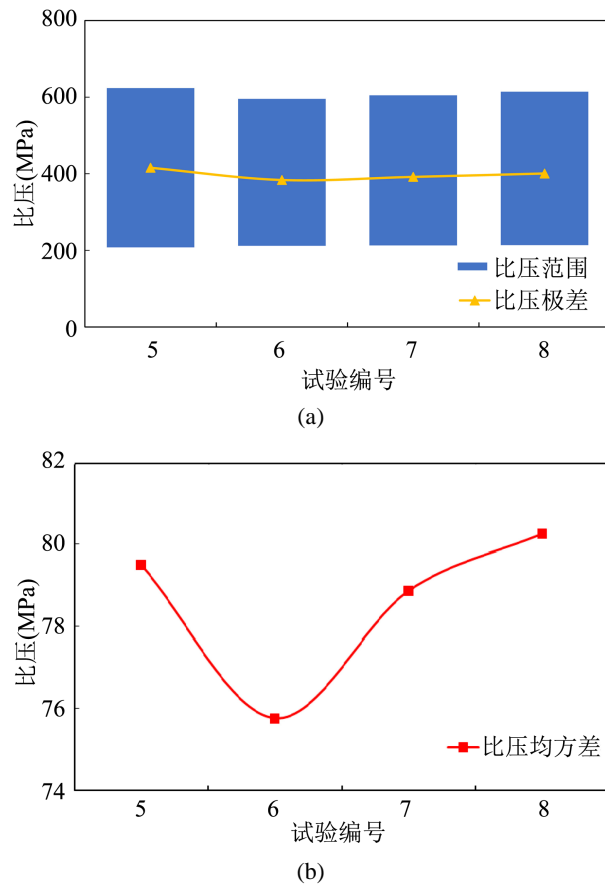


Figure 10. The range and standard deviation of the extrusion cylinder’s specific pressure. (a) Specific pressure range; (b) Standard deviation of specific pressure

图 10. 挤压内筒比压范围、极差与均方差图。(a) 挤压内筒比压范围与极差；(b) 挤压内筒比压均方差

6. 生产验证

采用模拟得到的最优参数组合，在 75 MN 挤压机上进行生产试验。挤出的 7075 排材(截面规格为 26 * 310 mm)表面质量好，力学性能、形位尺寸合格稳定，如图 11 所示。排材挤压速度从之前的 5~8 mm/s 提升到了 15 mm/s，挤压时间也从之前 35 min 缩短至 20 min，大大提高了生产效率。

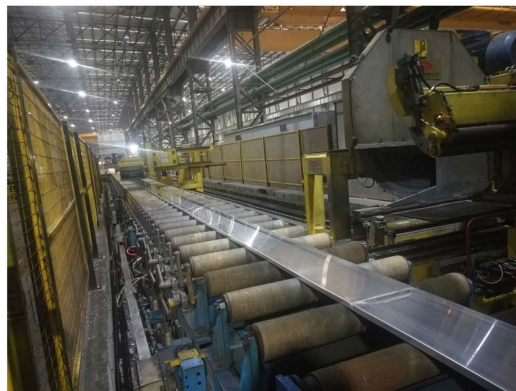


Figure 11. Extrusion of 7075 aluminum alloy strip after parameter optimization

图 11. 优化后挤出的 7075 排材

7. 结论

通过对 7075 铝合金型材的挤压过程进行仿真模拟研究, 得出以下结论:

1) 工作带长度、导流孔深度、挤压杆速和铸锭温度等参数之间的耦合匹配, 决定了型材在挤压过程中其横截面金属的流动速度、温度的分布均匀性, 以及挤压内筒比压的大小。

2) 7075 型材在 75 MN 挤压机的最优参数组合为: 工作带长度为 8 mm, 导流孔深度为 38 mm, 挤压杆速为 1.0 mm/s, 铸锭温度为 340℃。

3) 采用正交法和有限元仿真模拟得出的参数进行生产, 挤出的型材满足技术标准要求, 表明数值模拟能为高强高硬铝合金型材的挤压工艺优化提供有效指导, 降低生产试验成本。

参考文献

- [1] 朱永博. 7075 铝合金挤压工艺及变形行为研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [2] 李飞庆, 王超. 7075 铝合金型材黑线缺陷原因分析[J]. 有色金属加工, 2021, 50(4): 38-42.
- [3] 姜义. 挤压速度对双通道挤压 7003 铝合金组织和性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [4] 袁航, 陆政, 孙刚, 等. 7xxx 铝合金挤压技术及设备研究现状[J]. 航空制造技术, 2022, 65(8): 84-92.
- [5] 黄翔, 陈文亮, 谢洪典. 铝型材挤压模工作带长度和模孔配置的优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 1996(2): 247-252.
- [6] 林高用, 周佳, 张永宁, 等. 铝型材挤压模具导流孔结构优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 225-231.
- [7] 黎业生, 朱俊, 吴子平, 等. 模具工作带及导流孔对铝棒挤压模拟的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 7(4): 67-72.
- [8] 董桂伟, 温道胜, 赵国群. 铝合金型材挤压模工作带长度优化方法研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2012, 47(6): 75-78.
- [9] 邢艳辉. 挤压速度对 Al-Zn-Mg-Cu 高强铝合金显微组织与硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(21): 88-90.
- [10] 李玉强. 7075 铝合金挤压平模优化设计与型材组织性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.
- [11] 韩冰. 7075z 铝合金高温塑性变形行为研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2003.
- [12] Nicolae A tanasiu, 张正国. 加工铝管材时的挤压速度[J]. 轻合金加工技术, 1982(8): 17-20.
- [13] 颜建辉, 柳瑞清. 正确选择铝型材挤压速度的方法[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(7): 36-37.
- [14] 潘健怡. 铝合金型材挤压的数值模拟及模具结构优化研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [15] 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.