

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

刘 惠^{1,2,3}, 刘腾飞^{1,2}, 陈宗强^{1,2}, 王海龙^{1,2}, 高康军^{1,2}, 周志宇^{1,2},
田昌仁³, 陈 良³

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095;
3. 山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 以某大型带筋薄壁铝型材为研究对象, 基于 BBD 试验设计、响应曲面法以及有限元模拟仿真, 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, 开展了穿孔针挤压成形工艺优化。研究结果表明: 挤压速度是影响大型带筋薄壁铝型材穿孔针挤压成形材料流速的均匀性和挤压力大小的最显著因素。挤压成形工艺优化后, 最优坯料温度为 509.2 °C、最优模具温度为 506.1 °C、最优挤压筒温度为 518.8 °C、最优挤压速度为 0.2 mm·s⁻¹, 所对应的铝型材流速范围为 5.393~8.910 mm·s⁻¹、温度范围为 509.1~510.3 °C、最大挤压力为 119.4 MN, 获得了理想的材料流速与温度分布均匀性, 型材圆筒部分和筋部组织均匀, 晶粒大小形貌相近, 并显著降低了挤压力, 满足了实际生产需求。

关键词: 铝型材; 穿孔针挤压; 大型带筋薄壁铝型材; 响应曲面法; 挤压速度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.022

中图分类号: TG146.21; TG379

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0144-09

Optimization on extrusion process for large reinforced thin-walled aluminum profile based on experimental design and response surface method

Liu Hui^{1,2,3}, Liu Tengfei^{1,2}, Chen Zongqiang^{1,2}, Wang Hailong^{1,2}, Gao Kangjun^{1,2}, Zhou Zhiyu^{1,2},
Tian Changren³, Chen Liang³

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Aluminum Alloys and Application, Beijing 100095, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: For a large reinforced thin-walled aluminum profile, based on BBD test design, response surface method and finite element simulation, the response function relationships between mean square deviation of flow velocity for the profile section at the outlet of working belt, maximum extrusion force and design variable were established, and the optimization of perforated needle extrusion forming process was carried out. The research results show that the extrusion speed is the most significant factor affecting the uniformity of material flow rate and the extrusion force for large reinforced thin-walled aluminum profile during perforated needle extrusion forming. After extrusion process optimization, the optimal combination of process parameters is the billet temperature of 509.2 °C, the die temperature of 506.1 °C, the extrusion container temperature of 518.8 °C and the extrusion speed of 0.2 mm·s⁻¹, and the corresponding material flow rate range is 5.393~8.910 mm·s⁻¹, the temperature range is 509.1~510.3 °C, the maximum extrusion force is 119.4 MN. Thus, the ideal material flow rate and temperature distribution uniformity are obtained, the structures of cylinder and rib for the profile are uniform, the grain size and appearance are similar, and the extrusion force is significantly reduced, which meets the actual production demand.

Key words: aluminum profile; perforated needle extrusion; large reinforced thin-walled aluminum profile; response surface method; extrusion speed

铝合金广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车

等领域, 是目前最重要的轻量化材料之一^[1-4]。挤压成形是铝合金材料的主要加工方式, 可获得具有一定截面形状的铝合金型材。在挤压过程中, 待成形的铝合金在模具内承受三向压应力, 有利于获得良好的成形性能和微观组织。此外, 挤压成形还具

收稿日期: 2021-12-17; 修订日期: 2022-03-18

作者简介: 刘 惠 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: liuhuisdu@126.com

有生产效率高、材料利用率高、可成形复杂断面型材等突出优点^[5-9]。作为关键的挤压工艺参数, 挤压速度和挤压温度对挤压效率、型材质量有直接影响。为了获得较为理想的工艺参数, 国内外学者针对铝合金型材挤压成形开展了一定的研究工作。李玉强^[10]研究了挤压温度和挤压速度对 7075 高强铝合金挤压板材组织性能的影响, 发现高的挤压温度和挤压速度能够促进动态回复和动态再结晶, 在挤压温度为 480 ℃ 和挤压速度为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下获得了最高的型材抗拉强度。Yu J Q 等^[11]在不同挤压温度和挤压速度条件下开展了 6063 铝合金分流模挤压试验, 发现挤压温度和挤压速度的提高有利于焊缝界面处新晶粒的形成和微孔洞的闭合。Liang J M 等^[12]将 Al-7Si-0.3Mg 合金切削碎片挤压为棒材, 并研究了挤压温度对棒材组织的影响, 发现随着挤压温度的升高晶粒尺寸有所增加。Tavighi K 等^[13]开展了 Al_4Sr 颗粒增强铝基复合材料的挤压试验, 通过优化挤压温度获得了抗拉强度为 145 MPa 的挤压棒材。与分流模挤压相比, 穿孔针挤压不存在分流和焊合的过程, 避免了型材纵向焊缝及缺陷的产生, 是无缝空心铝型材的主要生产方式, 但目前关于型材穿孔针挤压工艺参数优化的研究较少。为此, 本文借助有限元分析软件 HyperXtrude, 建立了大型带筋薄壁铝型材穿孔针挤压成形的数值模型。借助 Box-Behnken Design (BBD) 试验设计和响应曲面法, 以挤压速度、模具温度、棒料温度、挤压筒温度等参数为变量, 以提高材料流速均匀性和降低挤压力为目标, 研究工艺参数的多目标优化方法, 获得适合于大型带筋薄壁铝型材的最佳工艺参数组合。

1 数值模拟建模

大型带筋薄壁铝型材主要包括圆筒部分和 8 个筋部, 型材外接圆直径达 $\Phi 654.8 \text{ mm}$ 、圆筒部分壁厚仅为 3.35 mm, 筋部的最薄处壁厚仅为 3.55 mm, 型材截面如图 1 所示。大型带筋薄壁铝型材的穿孔针挤压模具如图 2 所示。

本文基于 HyperXtrude 软件建立了大型带筋薄壁铝型材穿孔针挤压的数值分析模型。为了提高计算效率, 根据模具模腔内各处的材料变形程度进行网格划分。其中, 挤压筒内材料仅经历了微细粗变形, 此处网格尺寸最大; 模具工作带处变形非常剧烈, 此处网格尺寸取最小值, 保证型材壁厚处至少有 3 层网格。首先, 工作带部分进行三角形面网格

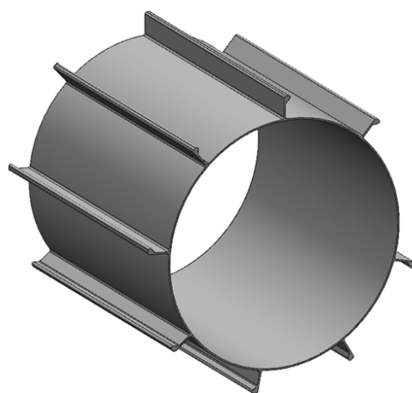


图 1 型材截面图

Fig. 1 Diagram of profile section

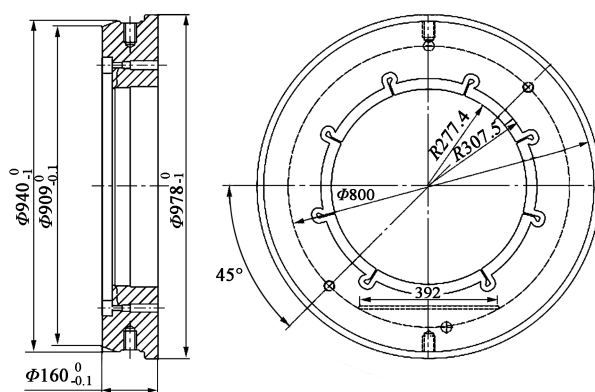


图 2 穿孔针挤压模具图

Fig. 2 Drawing of perforated needle extrusion die

划分, 网格尺寸为 1 mm, 通过拉伸获得三棱柱网。然后, 对工作带网格进行拉伸, 得到 2 倍于工作带长度的型材三棱柱网格。最后, 按照沿挤压方向网格尺寸逐渐变细的原则, 对坯料部分进行四面体网格划分, 网格尺寸为 1~16 mm。网格划分后的模型如图 3 所示。挤压空心管材为 5052 铝合金, 模具材料为 H13 钢, 两种材料的密度、热导系数、杨氏模量、泊松比等热力学参数如表 1 所示。

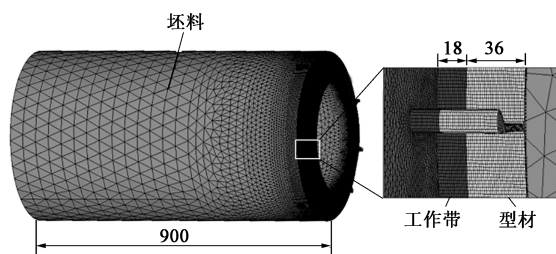


图 3 网格划分模型

Fig. 3 Meshing model

采用正弦型双曲函数描述材料的流动应力:

表 1 5052 铝合金与 H13 钢的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of 5052 aluminum alloy and H13 steel

材料	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	热膨胀系数/K ⁻¹	杨氏模量/MPa	泊松比
5052 铝合金	2680	880	137.0	0.00001	40000	0.35
H13 钢	7870	460	24.3	—	210000	0.35

$$\dot{\epsilon} = A' [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中： $\dot{\epsilon}$ 为应变速率； σ 为流动应力； Q 为热变形激活能； T 为绝对温度； R 为理想气体常数； A' 、 α 、 n 为材料常数。对于 5052 铝合金而言， $A'=4.24\times10^{10}\text{ s}^{-1}$ ， $\alpha=1.6\times10^{-8}\text{ Pa}^{-1}$ ， $n=5.24$ ， $Q=155.167\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

根据材料的属性，模具和坯料之间的换热系数为 $3000\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ 。在高温高压的热挤压条件下，5052 铝合金流经挤压筒与模具型腔时发生明显的粘结现象，摩擦类型确定为粘滞摩擦^[14]。在最后成形阶段，5052 铝合金快速流出模具工作带，发生滑动摩擦，因此，将模具工作带处摩擦类型设置为粘塑性摩擦^[15]，摩擦因子 μ 取 0.3，如表 2 所示。

表 2 边界条件设置

Table 2 Setting of boundary conditions

坯料接触	摩擦类型	系数
挤压筒	粘滞摩擦	换热系数 = $3000\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$
模具	粘滞摩擦	换热系数 = $3000\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$
芯轴	粘滞摩擦	换热系数 = $3000\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$
工作带	粘塑性摩擦 ($\mu=0.3$)	热流密度 = $0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
型材	—	热流密度 = $0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

2 BBD 试验设计和响应曲面模型拟合

2.1 优化目标 and 设计变量的确定

(1) 优化目标的确定

当铝型材从工作带出口处挤出时，出口处型材断面流速的均匀性对型材性能影响较大，如果流速均匀性差，则会引起扭拧、波浪、壁厚超差等成形缺陷。因此，首先选用工作带出口处型材断面流速均匀性作为优化目标。为了能够进行准确评价，利用材料流速均方差 SDV (Standard Deviation of Velocity) 来衡量材料流速均匀性的优劣。 SDV 值越小则材料流速均匀性越好，其值越大则材料流速均匀性越差。

大型带筋薄壁铝型材穿孔针挤压时突破挤压力

过大，可能会造成挤压机闷车、模具寿命低、穿孔针折断等问题。因此，将降低最大挤压力 F 作为第 2 个优化目标。

(2) 设计变量的确定

将模具温度 T_M 、坯料温度 T_B 、挤压筒温度 T_C 以及挤压速度 V 作为设计变量，取值范围如表 3 所示。

表 3 设计变量及其取值范围

Table 3 Design variables and value ranges

设计变量	取值范围
模具温度/ $^\circ\text{C}$	460~520
坯料温度/ $^\circ\text{C}$	460~520
挤压筒温度/ $^\circ\text{C}$	460~520
挤压速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.2~1.2

2.2 试验设计分组

采用 BBD 试验设计方法，将设计变量分为 29 组，每组对应不同的工艺参数。随后，对 29 组试验设计方案分别建立大型带筋薄壁铝型材穿孔针挤压有限元数值模型，并开展数值模拟。模拟后，计算工作带出口处型材断面的 SDV 值以及最大挤压力 F 值，数据见表 4。

表 4 试验分组及模拟结果

Table 4 Experiment groups and simulation results

分组	设计变量				模拟结果	
	$T_B/^\circ\text{C}$	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_M/^\circ\text{C}$	$T_C/^\circ\text{C}$	$SDV/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	F/MN
1	460	0.2	490	490	1.03	132.11
2	520	0.2	490	490	1.03	129.14
3	460	1.2	490	490	4.51	270.65
4	520	1.2	490	490	4.51	257.01
5	490	0.7	460	460	3.23	264.71
6	490	0.7	520	460	3.24	233.64
7	490	0.7	460	520	3.25	240.07
8	490	0.7	520	520	2.83	212.41
9	460	0.7	490	460	2.78	257.01

续表 4

分组	设计变量				模拟结果	
	$T_B/^\circ\text{C}$	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_M/^\circ\text{C}$	$T_C/^\circ\text{C}$	$SDV/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	F/MN
10	520	0.7	490	460	3.24	242.99
11	460	0.7	490	520	3.25	228.80
12	520	0.7	490	520	3.26	219.23
13	490	0.2	460	490	1.03	144.21
14	490	1.2	460	490	5.15	276.37
15	490	0.2	520	490	1.03	119.02
16	490	1.2	520	490	4.58	248.82
17	460	0.7	460	490	3.23	256.85
18	520	0.7	460	490	3.24	246.62
19	460	0.7	520	490	3.24	226.05
20	520	0.7	520	490	2.82	218.73
21	490	0.2	490	460	1.03	135.35
22	490	1.2	490	460	5.13	274.17
23	490	0.2	490	520	0.88	129.41
24	490	1.2	490	520	4.54	251.29
25	490	0.7	490	490	3.25	234.79
26	490	0.7	490	490	3.25	234.79
27	490	0.7	490	490	3.25	234.79
28	490	0.7	490	490	3.25	234.79
29	490	0.7	490	490	3.25	234.79

2.3 响应曲面模型拟合

基于模拟结果和 BBD 试验设计，将设计变量与优化目标的关系函数化，并在设计变量的取值范围内利用三维曲面分析方法，定量分析各变量及其交互作用对优化目标的影响规律。选择二阶线性方程拟合不同设计变量组合下的函数关系，其表达式 y 为：

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{p=1 \\ p < i}}^n \sum_{i=1}^n \beta_{pi} x_p x_i + \varepsilon$$

(2)

式中： β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{pi} 均为待定系数； x_p 、 x_i 为第 p 、 i 个设计变量； i 、 $p=1, 2, \cdots, n$ ， $p < i$ ； n 为自然数； ε 为残余误差。

工作带出口型材截面流速均方差 SDV 和最大挤压力 F 与各设计变量的响应函数关系为：

$$SDV = -136.363 + 0.236T_B + 13.816V + 0.140T_M + 0.172T_C + 1.965 \times 10^{-5}T_BV - 1.193 \times 10^{-4}T_BT_M - 1.261 \times 10^{-4}T_BT_C - 9.604 \times 10^{-3}VT_M - 7.322 \times 10^{-3}VT_C - 1.202 \times 10^{-4}T_MT_C - 1.184 \times 10^{-4}T_B^2 - 1.284V^2 - 2.112 \times 10^{-5}T_M^2 - 4.973 \times 10^{-5}T_C^2$$

(3)

$$F = 378.767 - 0.382T_B + 107.858V - 0.485T_M - 0.513T_C - 0.032T_BV + 1.447 \times 10^{-4}T_BT_M + 2.257 \times 10^{-4}T_BT_C - 7.045 \times 10^{-3}VT_M - 0.051VT_C + 1.727 \times 10^{-4}T_MT_C + 1.980 \times 10^{-4}T_B^2 - 28.162V^2 + 2.540 \times 10^{-4}T_M^2 + 2.957 \times 10^{-4}T_C^2$$

(4)

2.4 变异数分析

利用变异数分析法，评估试验结果的准确性和所建立函数关系的可靠性。型材截面材料流速均方差响应模型的变异数分析结果如表 5 所示。模型 P 值 <0.0001 ，表示回归模型与响应值强相关；校正拟合度为 0.9802，表示仅 1.98%响应值的变化无法通过该模型解释；拟合度为 0.9901，表示拟合程度良好；模型的信噪比为 32.4280，远大于 4，表明该模型分辨能力很高。由表 5 中 P 值可知， V 和 T_M 的变化对 SDV 的影响是显著的， T_B 和 T_C 的变化对 SDV 的影响是非显著的。

表 5 型材截面材料流速均方差响应模型的变异数分析结果

Table 5 Variance analysis results of mean square deviation response model for material velocity in profile section					
因素	偏差平方和	自由度	均方差	F_1 值	P 值
模型	43.000	14	3.070	100.080	<0.0001
$A-T_B$	2.521×10^{-4}	1	2.521×10^{-4}	8.220×10^{-3}	0.9291
$B-V$	41.820	1	41.820	1362.860	<0.0001
$C-T_M$	0.160	1	0.160	5.250	0.0380
$D-T_C$	0.034	1	0.034	1.120	0.3071
AB	0.003×10^{-4}	1	0.003×10^{-4}	0.113×10^{-4}	0.9974
AC	0.046	1	0.046	1.500	0.2402
AD	0.052	1	0.052	1.680	0.2159
BC	0.083	1	0.083	2.710	0.1223
BD	0.048	1	0.048	1.570	0.2304
CD	0.047	1	0.047	1.530	0.2370
A^2	0.074	1	0.074	2.400	0.1435
B^2	0.670	1	0.670	21.780	0.0004
C^2	2.346×10^{-3}	1	2.346×10^{-3}	0.076	0.7862
D^2	0.013	1	0.013	0.420	0.5257
残差	0.430	14	0.031		
标准偏差		0.1800	拟合度	0.9901	
平均值		3.0500	校正拟合度	0.9802	
信噪比		32.4280	预测拟合度	0.9430	

最大挤压力 F 的响应模型的变异数分析结果如表 6 所示。模型 P 值 <0.0001 , 表示回归模型与响应值强相关; 校正拟合度为 0.9973, 表示仅有 0.27% 的响应值变化无法通过该模型解释; 拟合度为 0.9987, 拟合程度良好; 模型信噪比为 87.6440, 远大于 4, 表示该模型分辨能力很高。由表 6 中 P 值可知, T_C 、 T_B 、 V 和 T_M 的变化对挤压力 F 的影响均是显著的。

表 6 最大挤压力 F 响应模型的变异数分析结果

Table 6 Variance analysis results of maximum extrusion force F response model

因素	偏差平方和	自由度	方差	F_1 值	P 值
模型	2211.130	14	157.940	740.290	<0.0001
$A-T_B$	9.180	1	9.180	43.020	<0.0001
$B-V$	1715.550	1	1715.550	8041.150	<0.0001
$C-T_M$	79.750	1	79.750	373.810	<0.0001
$D-T_C$	44.300	1	44.300	207.630	<0.0001
AB	0.950	1	0.950	4.450	0.0534
AC	0.068	1	0.068	0.320	0.5815
AD	0.170	1	0.170	0.770	0.3938
BC	0.045	1	0.045	0.210	0.6543
BD	2.370	1	2.370	11.120	0.0049
CD	0.097	1	0.097	0.450	0.5118
A^2	0.210	1	0.210	0.970	0.3424
B^2	321.540	1	321.540	1507.140	<0.0001
C^2	0.340	1	0.340	1.590	0.2281
D^2	0.460	1	0.460	2.150	0.1642
残差	2.990	14	0.210		
标准偏差		0.4600	拟合度	0.9987	
平均值	220.3300	校正拟合度	0.9973		
信噪比	87.6440	预测拟合度	0.9922		

3 响应曲面分析

3.1 工艺参数对 SDV 影响的响应曲面分析

借助三维响应曲面分析各工艺参数对材料流速均方差 SDV 、最大挤压力 F 的影响规律。图 4 给出了设计变量对 SDV 影响的三维响应曲面图。在图 4a 中, 当坯料温度取 490 °C 时, SDV 最小值为 0.884, 最大值为 4.723; 在图 4b 中, 当坯料温度取 490 °C 时, SDV 最小值为 3.066, 最大值为 3.298; 在图 4c 中, 当坯料温度取 490 °C 时, SDV 最小值为 3.109, 最大值为 3.208; 在图 4d 中, 当模具温度取 490 °C

时, SDV 最小值为 1.095, 最大值为 4.793; 在图 4e 中, 当挤压筒温度取 490 °C 时, SDV 最小值为 1.085, 最大值为 4.720; 在图 4f 中, 当挤压筒温度取 490 °C 时, SDV 最小值为 3.072, 最大值为 3.295。由图 4 a、图 4d 和图 4e 可知, 当坯料温度、模具温度、挤压筒温度分别保持不变时, SDV 值随 V 值增大而明显增大, 即挤压速度对 SDV 影响较大, 其余 3 个设计变量对 SDV 的影响较小。当挤压速度增大时, 工作带出口型材截面处材料流速均衡性降低, 这说明在允许的范围内, 挤压速度越小, 材料流动越均衡。

3.2 工艺参数对最大挤压力影响的响应曲面分析

图 5 给出了模具温度、坯料温度、挤压筒温度和挤压速度 4 个设计变量对最大挤压力 F 的响应曲面分析图 (为便于绘图, 取 $1/5.5$ 的最大挤压力为纵坐标)。在图 5a 中, 当坯料温度取 490 °C 时, $F/5.5$ 最小值为 23.820, 最大值为 47.690; 在图 5b 中, 当坯料温度取 490 °C 时, $F/5.5$ 最小值为 40.345, 最大值为 45.446; 在图 5c 中, 当坯料温度取 490 °C 时, $F/5.5$ 最小值为 41.049, 最大值为 44.839; 在图 5d 中, 当模具温度取 490 °C 时, $F/5.5$ 最小值为 23.908, 最大值为 47.594; 在图 5e 中, 当挤压筒温度取 490 °C 时, $F/5.5$ 最小值为 23.749, 最大值为 47.622; 在图 5f 中, 当挤压筒温度取 490 °C 时, $F/5.5$ 最小值为 40.338, 最大值为 45.458。由图 5a 和图 5d 和图 5e 可知, 当模具温度、坯料温度和挤压筒温度分别保持不变时, 最大挤压力 F 的值随着挤压速度的增大而明显增大, 即挤压速度对最大挤压力 F 影响最大。而模具温度、坯料温度和挤压筒温度 3 个设计变量对最大挤压力 F 有一定的影响, 但是均远小于挤压速度的影响。

4 验证

4.1 数值模拟验证

结合 BBD 试验设计、数值模拟结果和响应曲面分析结果, 最终确定了适用于大型带筋薄壁铝型材穿孔针挤压的最佳工艺参数组合, 即坯料温度为 509.2 °C、模具温度为 506.1 °C、挤压筒温度为 518.8 °C、挤压速度为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。基于最优工艺参数组合, 所预测的工作带出口处型材断面流速均方差 SDV 为 $0.884 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大挤压力为 119.1 MN。以上最优工艺参数及预测结果如表 7 所示。

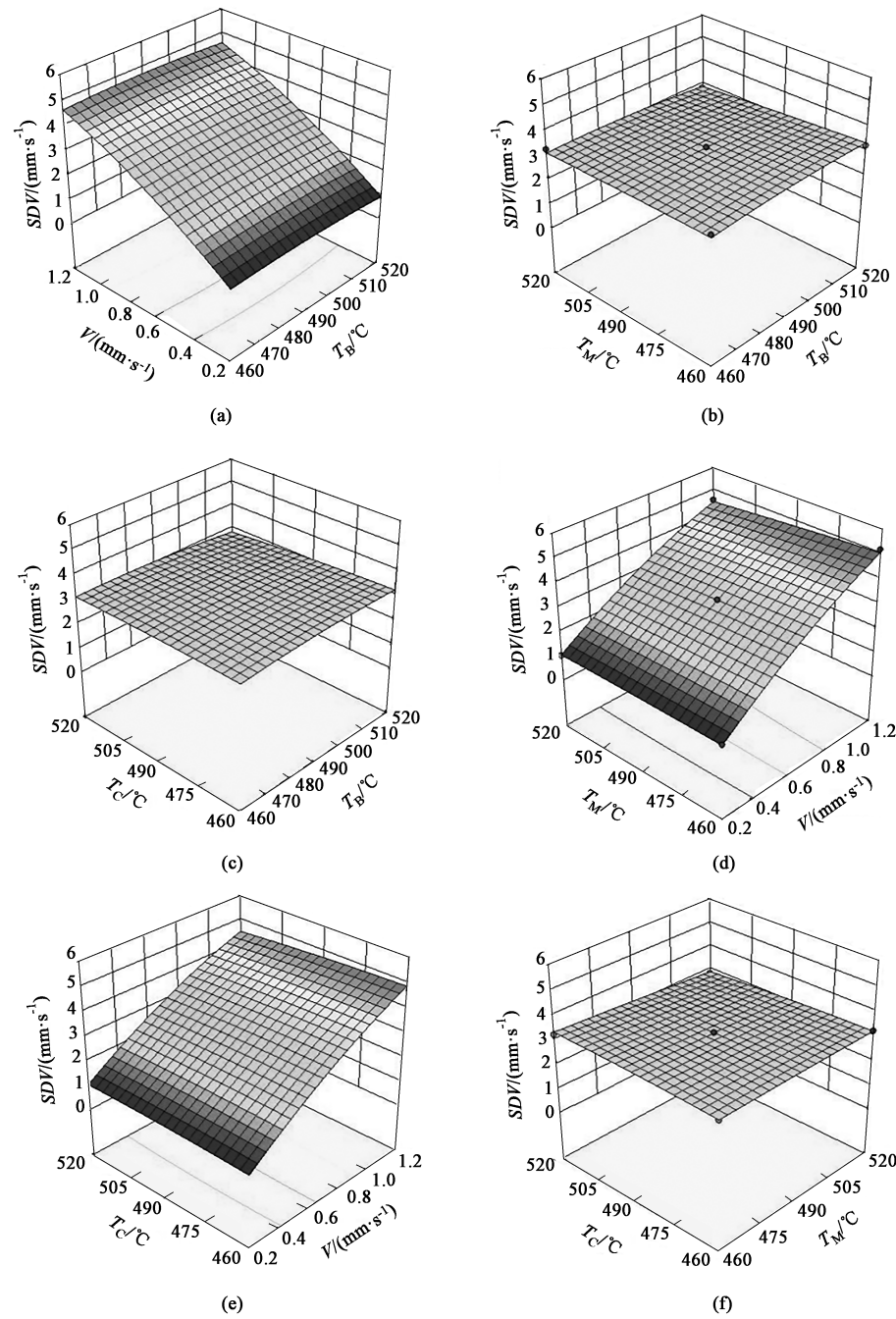


图 4 工艺参数对 SDV 的响应曲面分析图

(a) V 和 T_B 的交互作用 (b) T_M 和 T_B 的交互作用 (c) T_C 和 T_B 的交互作用 (d) T_M 和 V 的交互作用
(e) T_C 和 V 的交互作用 (f) T_C 和 T_M 的交互作用

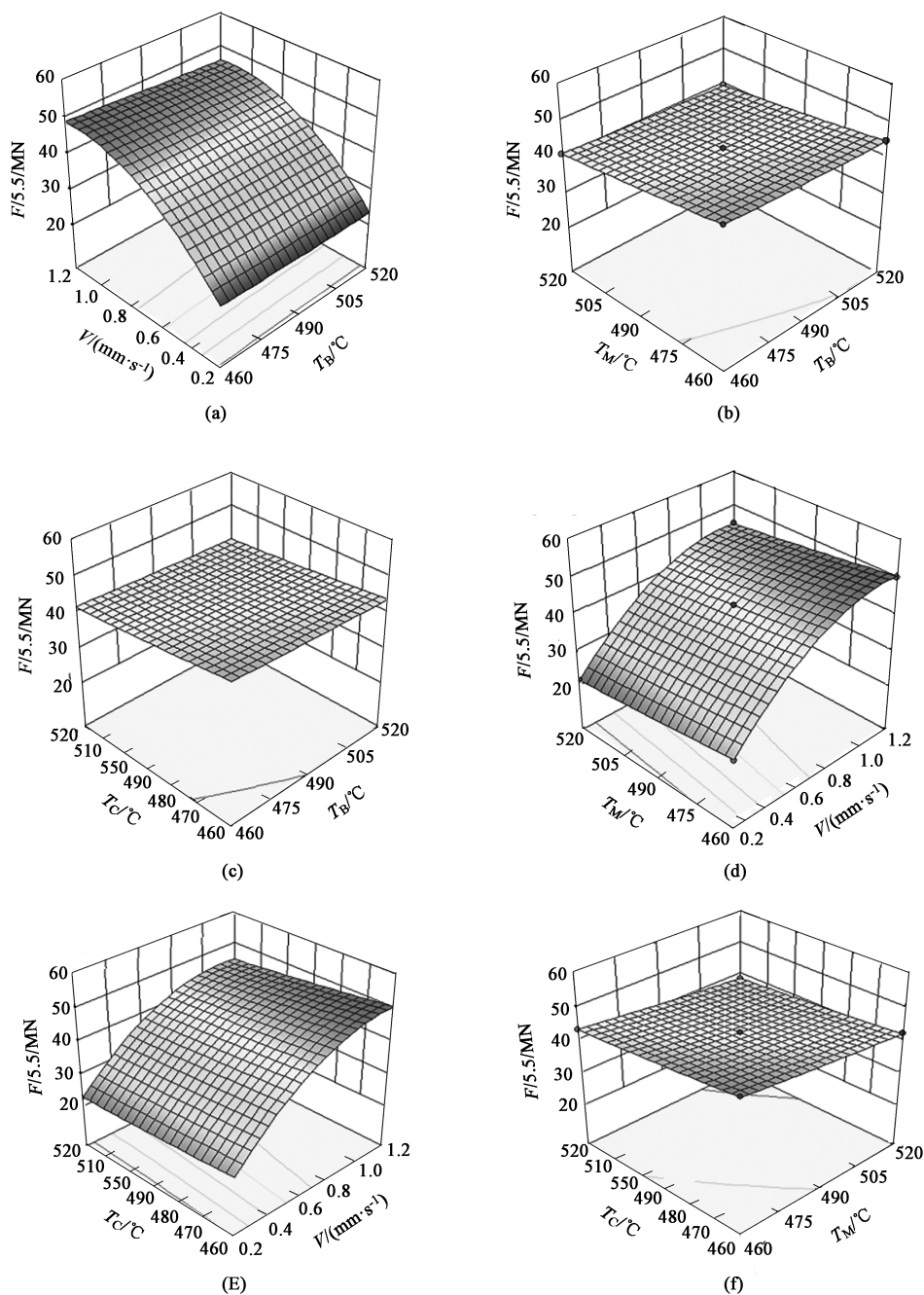
Fig. 4 Response surface analysis diagrams of process parameters to SDV

(a) Interaction between V and T_B (b) Interaction between T_M and T_B (c) Interaction between T_C and T_B (d) Interaction between T_M and V
(e) Interaction between T_C and V (f) Interaction between T_C and T_M

表 7 最优工艺参数及预测结果

Table 7 Optimal process parameters and predicted results						
参数	最优工艺参数				预测结果	
	$T_B/^\circ\text{C}$	$T_M/^\circ\text{C}$	$T_C/^\circ\text{C}$	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$SDV/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	F/MN
数值	509.2	506.1	518.8	0.2	0.997	119.1

为验证工艺参数优化结果的可靠性，借助有限元模拟软件 HyperXtrude 建立大型带筋薄壁铝型材数值模型，并导入最优工艺参数，获得型材断面流速和温度分布结果分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 中可以看出，型材断面最快流速为 $8.910\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最慢流速

图 5 工艺参数对最大挤压力 F 的响应曲面分析图

(a) V 和 T_B 的交互作用 (b) T_M 和 T_B 的交互作用 (c) T_C 和 T_B 的交互作用 (d) T_M 和 V 的交互作用
(e) T_C 和 V 的交互作用 (f) T_C 和 T_M 的交互作用

Fig. 5 Response surface analysis diagrams of process parameters to maximum extrusion force F

(a) Interaction between V and T_B (b) Interaction between T_M and T_B (c) Interaction between T_C and T_B (d) Interaction between T_M and V
(e) Interaction between T_C and V (f) Interaction between T_C and T_M

为 $5.393 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 流速差仅为 $3.517 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 断面最高温度为 510.3°C , 最低温度为 509.1°C , 温度差仅为 1.2°C 。通过工艺参数优化, 获得了较为理想的材料流速均匀性和温度分布的均匀性。

基于数值模拟结果计算了型材断面流速均方差和最大挤压力, 并与优化预测结果进行了对比, 结果如

表 8 所示。其中, SDV 模拟值为 $1.034 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 优化预测值为 $0.997 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 仅相差 3.70% ; 最大挤压力模拟值为 119.4 MN , 优化预测值为 119.1 MN , 仅相差 0.25% 。因此, 拟合函数的预测值和挤压成形数值模拟结果高度吻合, 拟合函数对挤压成形工艺参数优化具有重要作用。

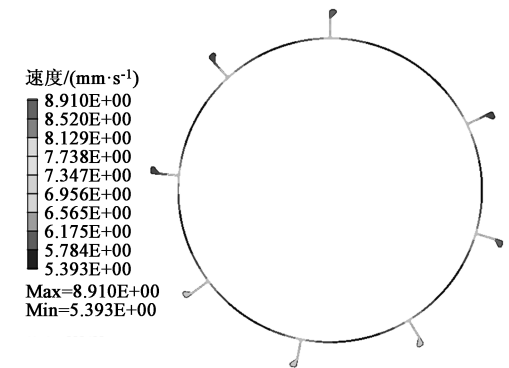


图 6 基于最优工艺参数组合的大型带筋薄壁铝型材断面流速分布

Fig. 6 Flow velocity distribution in section of large reinforced thin-walled aluminum profile based on optimal process parameters combination

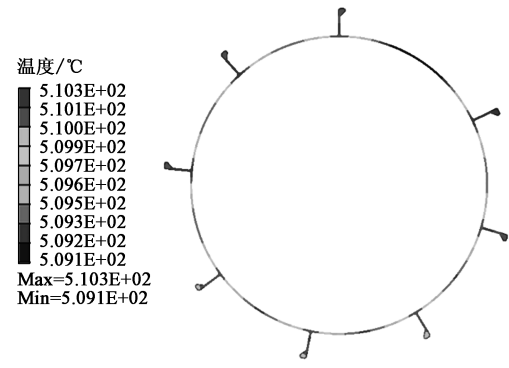


图 7 基于最优工艺参数组合的大型带筋薄壁铝型材断面温度分布

Fig. 7 Temperature distribution in section of large reinforced thin-walled aluminum profile based on optimal process parameters combination

表 8 优化预测值和模拟结果对比

Table 8 Comparison between optimized prediction values and simulation results

参数	$SDV/(mm \cdot s^{-1})$	最大挤压力 F/MN
优化预测值	0.997	119.1
模拟值	1.034	119.4
差异	3.70%	0.25%

4.2 试验验证

基于最优工艺参数组合，在卧式双动挤压机上进行试验验证，得到了无波浪、无扭曲的大型带筋薄壁铝型材，如图 8 所示。选取铝型材圆筒和筋部两处典型位置进行微观组织分析，圆筒部分和筋部的晶粒大小、形貌相近，均以挤压变形组织为主，存在少量细小的再结晶晶粒，铝型材

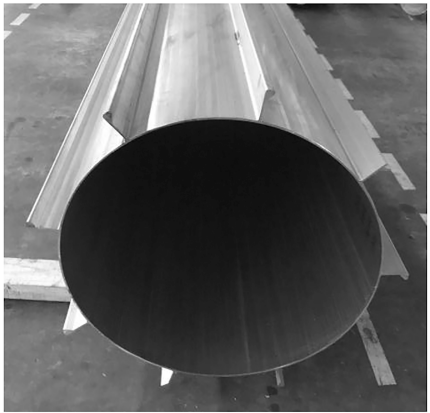
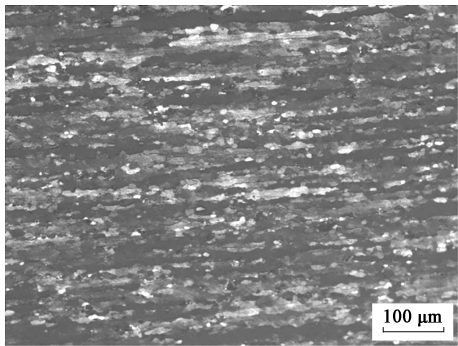


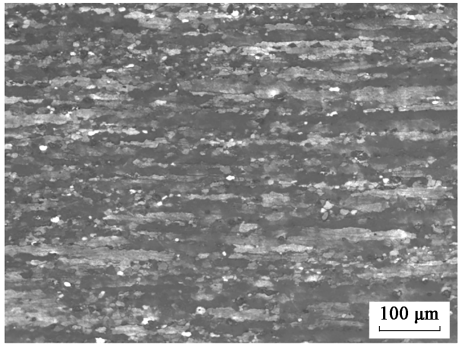
图 8 大型带筋薄壁铝型材

Fig. 8 Large reinforced thin-walled aluminum profile

圆筒和筋部两处均获得了较为理想的微观组织，如图 9 所示。



(a)



(b)

图 9 大型带筋薄壁铝型材晶粒形貌

(a) 圆筒部分 (b) 筋部

Fig. 9 Grain morphologies of large reinforced thin-walled aluminum profile

(a) Cylinder (b) Rib

5 结论

(1) 依据 BBD 试验设计方法和三维曲面分析方法，定量分析了各设计变量及其交互作用对评价

目标的影响规律,得到了工作带出口型材截面流速均方差 SDV 、最大挤压力 F 与各设计变量的响应函数关系。

(2) 基于响应曲面法分析,挤压速度是影响大型带筋薄壁铝型材穿孔针挤压成形材料流速和最大挤压力的最主要因素,而模具温度、坯料温度和挤压筒温度对二者的影响较小。

(3) 确定了最优挤压成形工艺参数组合,即坯料温度为 $509.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模具温度为 $506.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、挤压筒温度为 $518.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、挤压速度为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,所对应的铝型材流速范围为 $5.393\sim 8.910\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,温度范围为 $509.1\sim 510.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,所需最大挤压力为 119.4 MN ,获得了理想的材料流速与温度分布均匀性,并显著降低了挤压力。

参考文献:

- [1] Krishnan P K, Christy J V, Arunachalam R, et al. Production of aluminum alloy-based metal matrix composites using scrap aluminum alloy and waste materials: Influence on microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 1047-1061.
- [2] Belov N A, Korotkova N Q, Akopyan T K, et al. Phase composition and mechanical properties of Al-1.5% Cu-1.5% Mn-0.35% Zr (Fe, Si) wire alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 782: 735-746.
- [3] 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. A glimpse at the development and application of aluminum alloys in aviation industry [J]. Materials Review, 2005, 19 (2): 76-80.
- [4] Kumar M, Ross N G. Influence of temper on the performance of a high-strength Al-Zn-Mg alloy sheet in the warm forming processing chain [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 189-198.
- [5] Zhang Y D, Jin S B, Trimby P W, et al. Dynamic precipitation, segregation and strengthening of an Al-Zn-Mg-Cu alloy (AA7075) processed by high-pressure torsion [J]. Acta Materialia, 2019, 162: 19-32.
- [6] 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.
- [7] Tang J W, Chen L, Zhao G Q, et al. Study on Al/Mg/Al sheet fabricated by combination of porthole die co-extrusion and subsequent hot rolling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 727-738.
- [8] 刘建峰. 6005A 铝合金热变形行为及大截面多腔型材挤压成形技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.

Liu J F. Research on Hot Deformation Behavior of 6005A Aluminum Alloy and Extrusion Forming Technology of Large Section Multi Cavity Profile [D]. Jinan: Shandong University, 2021.

- [9] 石磊. 铝合金等通道转角分流大宽展挤压成形机理研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
Shi L. Investigation on Deformation Mechanism of Aluminum Alloy During Porthole ECAP Spread Extrusion [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [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]. 济南: 山东大学, 2019.
Li Y Q. Optimization Design of 7075 Aluminum Alloy Flat Extrusion Die and Research on Microstructure and Mechanical Property of Extruded Profiles [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [11] Yu J Q, Zhao G Q, Cui W C, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of welding seams in aluminum alloy profiles extruded by a porthole die under different billet heating temperatures and extrusion speeds [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 214-222.
- [12] Liang J M, Guo X Q, Zheng Y F, et al. Effect of extrusion temperature on microstructural evolution and intergranule bonding of Al-7Si-0.3Mg (wt%) alloy rods produced by extrusion of granule compacts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 232: 78-89.
- [13] Tavighi K, Emamy M, Emami A R. Effects of extrusion temperature on the microstructure and tensile properties of Al-16wt% Al_4Sr metal matrix composite [J]. Materials & Design, 2013, 46: 598-604.
- [14] Schikorra M, Donati L, Tomesani L, et al. The role of friction in the extrusion of AA6060 aluminum alloy, process analysis and monitoring [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191 (1-3): 288-292.
- [15] Ma X, Rooij M B, Schipper D J. Friction conditions in the bearing area of an aluminium extrusion process [J]. Wear, 2012, 278-279: 1-8.

《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益,坚决抵制学术不端行为,积极倡导优良学风,努力为学术创新营造良好氛围,本刊郑重声明:对一稿多投,重复发表,存在署名有争议,引用他人著述未注明出处,抄袭、剽窃、弄虚作假,或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章,坚决拒绝刊登。一经发现,立即撤稿,并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚,情节严重者,将以适当方式予以公布,该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部