

大型带筋薄壁圆管铝型材挤压成形数值模拟

王少华^{1,2}, 刘 惠^{1,2,3}, 陈宗强^{1,2}, 王海龙^{1,2}, 李占强^{1,2}, 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: 以某大型带筋薄壁圆管铝型材为研究对象, 建立了大型带筋薄壁圆管铝型材穿孔针挤压成形有限元数值模型。基于数值模拟结果, 开展了导流室轮廓和工作带长度优化。研究结果表明, 大型带筋薄壁圆管铝型材存在材料流速、断面温度极不均匀的问题, 型材筋部的材料流速极快, 最高达到了 $724 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 而型材圆弧部分的流速很慢, 最低仅为 $3.079 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。导流室轮廓经过优化后, 材料流速的控制范围为 $20.40 \sim 59.23 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 断面的温度范围为 $500.8 \sim 518.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 显著地改善了材料流速和温度分布的效果。工作带长度经过优化后, 材料流速和断面温度均匀性得到了进一步的提高, 材料流速控制范围为 $25.76 \sim 44.40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 断面的温度范围为 $504.5 \sim 517.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 获得了较为理想的材料流速与温度分布均匀性。

关键词: 铝型材; 穿孔针挤压成形; 导流室轮廓; 工作带长度; 材料流速; 断面温度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.025

中图分类号: TG146.21; TG379

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 04-0181-09

Numerical simulation on extrusion forming for large ribbed thin-walled circular tube aluminum profile

Wang Shaohua^{1,2}, Liu Hui^{1,2,3}, Chen Zongqiang^{1,2}, Wang Hailong^{1,2}, Li Zhanqiang^{1,2}, 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 ribbed thin-walled circular tube aluminum profile, a finite element numerical model of perforated needle extrusion forming for the large ribbed thin-walled circular tube aluminum profile was established, and based on the numerical simulation results, the induction chamber contour and working belt length were optimized. The research results show that the large ribbed thin-walled circular tube aluminum profile has the problems of extremely uneven material flow rate and cross-section temperature. The material flow rate in the rib part of profile is extremely fast with the maximum value of $724 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, while the material flow rate in the arc part of profile is very slow with the minimum value of only $3.079 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. After the induction chamber contour is optimized, the material flow rate is controlled within the range of $20.4 \sim 59.23 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the cross-section temperature is controlled within the range of $500.8 \sim 518.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, showing the significant effect of improving the material flow rate and temperature distribution. After the working belt length is optimized, the uniformity of the material flow rate and the cross-section temperature is further improved. The material flow rate is controlled within the range of $25.76 \sim 44.40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the cross-section temperature is controlled within the range of $504.5 \sim 517.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, achieving the ideal material flow rate and uniform temperature distribution.

Key words: aluminum profile; perforated needle extrusion forming; induction chamber contour; working belt length; material flow rate; cross-section temperature

铝合金具有密度低、比强度和比刚度高、耐腐蚀性能好、易于加工与回收等优良特性, 在轨道交通、工程机械、军工等领域应用广泛^[1-4]。挤压可获得具有一定断面特征的型材, 具有精度好、效率

高、流程短的突出优势^[5-7]。根据挤压原理和模具结构的不同, 可分为平模挤压、分流模挤压和穿孔针挤压等。平模挤压相对简单, 适用于实心型材。分流模挤压存在分流和焊合的过程, 焊缝质量的高低直接影响型材的整体性能^[8-10]。穿孔针挤压不存在分流和焊合的过程, 避免了型材焊合不良缺陷的产生, 主要应用于无缝空心铝型材的生产。

目前, 国内外学者针对铝合金穿孔针挤压成形

收稿日期: 2022-01-21; 修订日期: 2022-03-15

作者简介: 王少华 (1983-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: shaohuawang1983@163.com

已开展了一定工作。Li F 等^[11]基于有限元数值模拟,研究了挤压温度和挤压速度对 7075 铝合金无缝管材成形过程的影响,并利用优化后的工艺参数得到了组织致密、表面质量良好的型材。Liu L Y^[12]建立了铝合金穿孔针挤压有限元模型,分析了挤压针轴向压力、温度场和应力场的变化规律,研究结果为挤压针的设计与修复提供了重要参考。王力莉^[13]研究了 125 MN 双动铝挤压机穿孔针使用寿命较短的问题,提出了缩短穿孔针的长度、减小摩擦、控制升压速度等有效措施。Gao A J 等^[14]通过对穿孔针和挤压垫片进行优化设计,显著提高了挤出型材的内表面质量。Chen Q 等^[15]开展了 3003 铝合金无缝管材的穿孔针挤压试验,研究表明,无缝管材的塑性在退火后得到了明显改善。以上研究多针对断面尺寸小、形状简单的铝合金型材,较少涉及大型带筋薄壁铝型材的穿孔针挤压成形。

对于大型带筋薄壁铝型材,所需挤压力较高,对设备有严苛的要求,挤压过程中材料流动复杂,如模具结构设计不合理,容易出现波浪、扭拧、填充不良等缺陷。针对以上问题,本文借助有限元分析软件 HyperXtrude,建立了大型带筋薄壁圆管铝型材挤压成形的数值模型,对材料流动行为、型材截面温度、挤压力等方面进行了深入分析。基于数值模拟结果,对关键模具结构参数进行了优化设计,显著地改善了材料流速与温度分布均匀性。

1 模具设计及数值模型建立

1.1 大型带筋薄壁圆管铝型材与初始模具结构

大型带筋薄壁圆管铝型材,主要包括圆筒部分和 8 个筋部。圆筒外径达 $\Phi 554.8$ mm、壁厚仅为 3.35 mm,筋部长度约为 50.75 mm、最薄处壁厚为 3.55 mm,型材截面如图 1 所示。

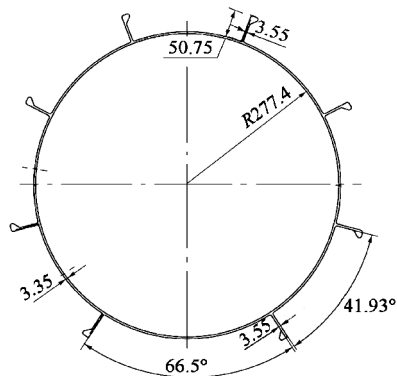


图 1 型材截面图

Fig. 1 Section diagram of profile

大型带筋薄壁圆管铝型材的穿孔针挤压模具主要由模面、模垫 1、模垫 2 这 3 部分组成。初始模具的模面上未设置导流室,但设计有 10 mm 等长的工作带,挤压模具三维造型如图 2 所示。

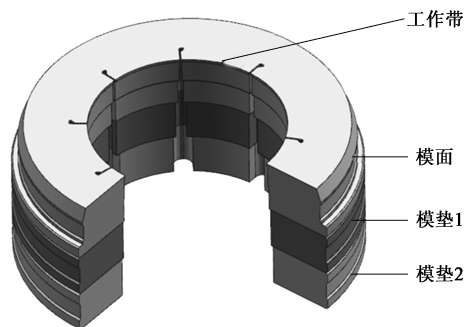


图 2 穿孔针挤压模具三维图

Fig. 2 3D drawing of perforated needle extrusion die

1.2 数值建模

将 STP 格式模具图导入 HyperXtrude 软件,抽取几何模型,仅保留材料流经的区域,即坯料、工作带和型材等部分。整个挤压过程中,挤压材料在挤压筒内只发生简单的镦粗变形,而在模具工作带处发生最为剧烈的塑性变形。因此,根据模具模腔内各处材料的变形程度情况,模具工作带位置的网格最为细密,原则上保证型材壁厚最薄的地方最少有 3 层网格单元。首先,对工作带部分进行面网格划分,网格类型为三角形,网格尺寸为 1 mm,并通过拉伸获得三棱柱网格,以保证工作带的网格与坯料网格接触良好。其次,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,最大网格尺寸为 16 mm,最小网格尺寸为 1 mm。网格划分后的模型如图 3 所示,图 3 中 ED 为挤压方向,网格总数量约为 325 万。

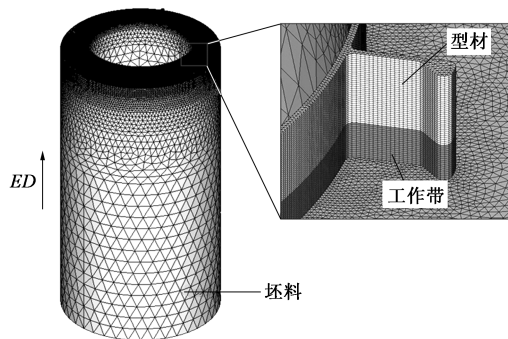


图 3 网格划分模型

Fig. 3 Meshing model

设定边界条件与初始工艺参数，挤压坯料为 5052 铝合金，模具材料为 H13 钢，两种材料的密度、比热容、热导系数、热膨胀系数、杨氏模量、泊松比等热力学参数如表 1 所示。

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)	热导系数/(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

本构模型是数值模拟结果准确性的关键因素，本文采用正弦型双曲函数描述材料的流动应力：

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

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， $A=4.24\times10^{10}\text{ s}^{-1}$ ， $\alpha=1.6\times10^{-8}\text{ Pa}^{-1}$ ， $n=5.24$ ， $Q=155.167\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

5052 铝合金的过烧点较高，且变形抗力较大，进行高温慢速挤压，坯料、模具、挤压筒的温度均设置为 460 ℃，挤压速度设定为 1.0 mm·s⁻¹，如表 2 所示。结合 Yu J Q 等^[16]的研究，本文边界条件的具体设置如表 3 所示。根据所用材料的属性，模具和坯料之间的传热系数为 3000 W·(m²·℃)⁻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的粘结作用很大，发生明显的粘结现象，所以摩擦类型设置为粘着摩擦^[17]。在最后的成形阶段，5052 铝合金快速流出模具工作带，金属变形十分剧烈，但仍可认为该处材料和模具之间发生的是滑动摩擦^[18]，因此，将模具工作带处的摩擦类型设置为粘塑性摩擦，摩擦因数 μ 取 0.3。

表 2 工艺参数设置
Table 2 Setting of process parameters

参数	数值
模具温度/℃	460
挤压速度/(mm·s ⁻¹)	1.0
坯料温度/℃	460
挤压筒温度/℃	460

2 初始模具的模拟结果及分析

通过有限元数值建模，分析初始模具的穿孔针挤压工艺过程。图 4 给出了型材断面的流速分布，从图 4 中可以看出，型材断面的材料流速极不均匀。型材筋部，尤其是其端部，材料流速极快，最大可

表 3 边界条件设置
Table 3 Setting of boundary conditions

坯料接触	摩擦类型	传热系数	温度/℃
挤压筒	粘着摩擦	对流系数=3000 W·(m ² ·℃) ⁻¹	450
模具	粘着摩擦	对流系数=3000 W·(m ² ·℃) ⁻¹	450
芯轴	粘着摩擦	对流系数=3000 W·(m ² ·℃) ⁻¹	450
工作带	粘塑性摩擦 ($\mu=0.3$)	热流密度=0 W·m ⁻²	—
型材	—	热流密度=0 W·m ⁻²	—

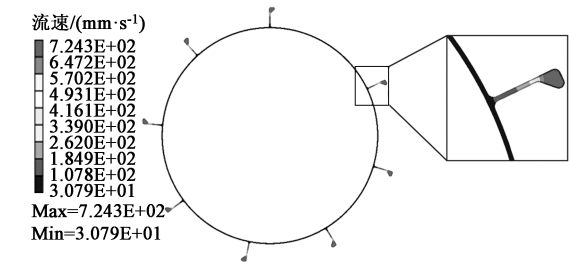


图 4 初始模具挤压型材断面流速分布
Fig. 4 Flow velocity distribution of extrusion profile section for initial die

达 724.3 mm·s⁻¹；而中间筒形的圆弧部分的材料流速很慢，基本都在 20 mm·s⁻¹ 以下，最低的材料流速为 30.79 mm·s⁻¹；最快和最慢的材料流速差为 693.51 mm·s⁻¹。从以上分析可知，初始模具在调整材料流速方面的效果不甚理想。图 5 为利用初始模具挤压时，型材断面的温度分布情况。从图 5 中可以看出，型材温度分布也存在不均匀性，最低温度为 575.6 ℃，最高温度为 606.9 ℃，二者相差 31.3 ℃。型材的出口温度远高于棒料、模具、挤压筒的加热温度，其主要原因为：在挤压过程中，由于剧烈的塑性变形产生了大量塑性变形热，造成了挤压温升。型材筋部与圆弧过渡处变形剧烈，塑性变形热量多，从而成为高温区；型材圆弧处的变形程度较小，塑性变形热量少，从而成为低温区。此外，型材断面的最低温度为 575.6 ℃，也已经达到了 5052 铝合金的过烧温度，在实际生产中属于不可接受的情况。最后，通过数值模拟结果来看，初始模具挤压时最大挤压力约为 251 MN。

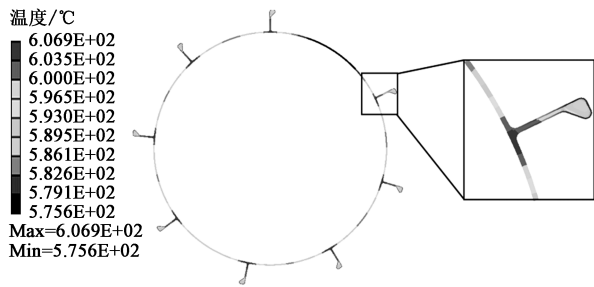


图 5 初始模具挤压型材断面温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of extrusion profile section for initial die

3 模具结构优化及分析

3.1 导流室优化及分析

在挤压模具上增设导流室，设计了 4 种不同轮廓形状的导流室，导流室的关键结构参数为导流室深度 H 、导流室与型材筋部的距离 A ，导流室与型材弧形的距离 B ，以平衡大型带筋薄壁圆管铝型材挤压成形的材料流速和温度均匀性。导流室的形状及结构参数分别如图 6 和表 4 所示。

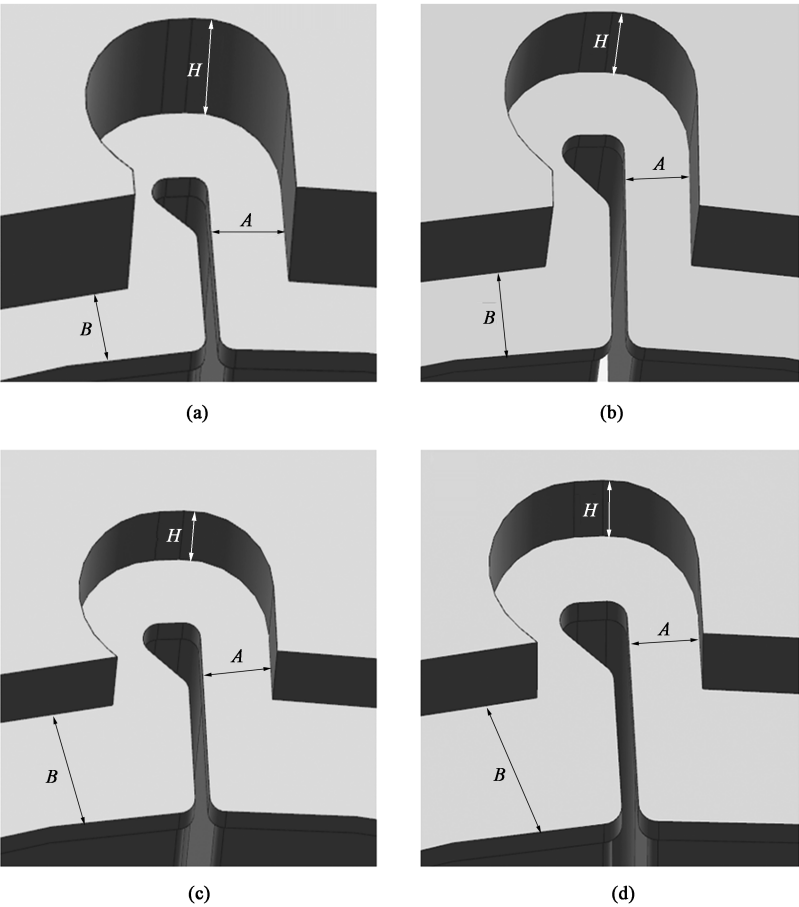


图 6 4 种导流室结构形状

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3 (d) 方案 4

Fig. 6 Shapes and structures for four kinds of diversion chamber

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3 (d) Scheme 4

表 4 导流室的结构参数 (mm)

Table 4 Structure parameters of diversion chamber (mm)

方案	H	A	B
1	50	19	20
2	50	15	20
3	30	17	30
4	30	15	30

基于不同方案的导流室轮廓形状，所获得的型材断面的材料流速和温度分布情况如图 7 所示，具体的流速和温度的数值在表 5 中列出。从图 7a 中可以看出，方案 1 所获得的型材断面的最快材料流速为 $80.00 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最慢材料流速为 $12.79 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，材料流速差为 $67.21 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与初始模具的型材断面的材料流速差相比，方案 1 的导流室表现出较好的平衡流速效果。此外，型材断面的最高温度为

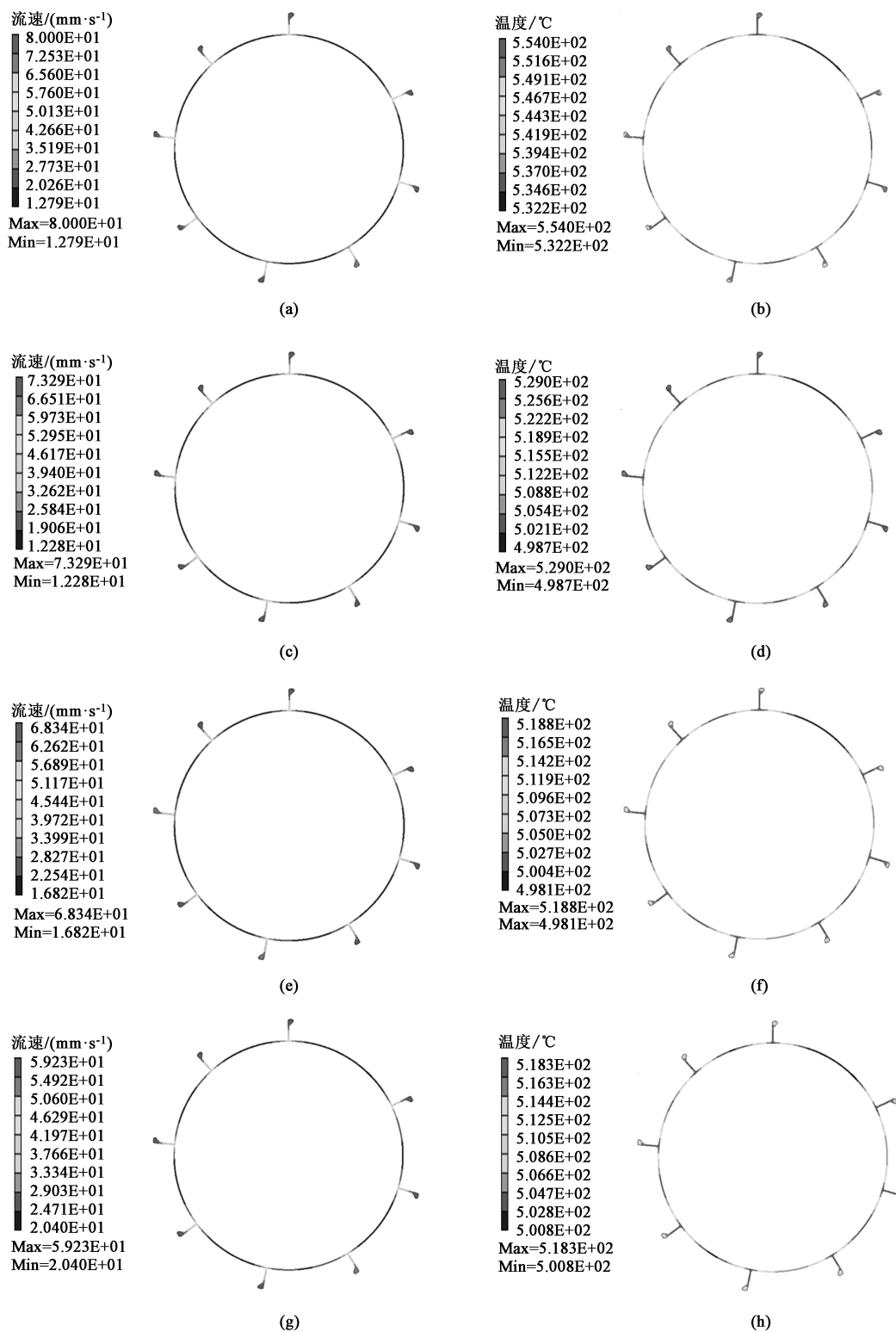


图7 基于不同导流室轮廓的型材断面流速和温度分布

(a) 方案1, 流速 (b) 方案1, 温度 (c) 方案2, 流速 (d) 方案2, 温度 (e) 方案3, 流速 (f) 方案3, 温度
(g) 方案4, 流速 (h) 方案4, 温度

Fig. 7 Flow velocity and temperature distributions of profile sections based on different diversion chamber outlines

(a) Scheme 1, flow velocity (b) Scheme 1, temperature (c) Scheme 2, flow velocity (d) Scheme 2, temperature
(e) Scheme 3, flow velocity (f) Scheme 3, temperature (g) Scheme 4, flow velocity (h) Scheme 4, temperature

554.0℃, 最低温度为532.2℃。与初始模具温度范围575.6~606.9℃相比, 温度总体下降、温差也

表 5 不同导流室方案对应的数值模拟结果

Table 5 Numerical simulation results of different diversion chamber schemes

方案	最快流速/ (mm · s ⁻¹)	最慢流速/ (mm · s ⁻¹)	最高温度/ ℃	最低温度/ ℃	挤压力/ MN
1	80.00	12.79	554.0	532.2	327
2	73.29	12.28	529.0	498.7	326
3	68.34	16.82	518.8	498.1	316
4	59.23	20.40	518.3	500.8	311

减小。增设导流室后,材料变形的剧烈程度得以缓解而且也更加均匀,从而有利于获得更理想的温度分布。

通过增设方案 1 的导流室后,材料流速得到了极大改善,但同时也能看出型材筋部位置的材料流速依然偏快,弧形部分的材料流速偏慢。为此,方案 2 在方案 1 的基础上,将导流室与筋部距离缩短至 15 mm,以进一步增加对型材弧形处材料流动的阻力。从图 7b 中可以看出,型材断面最快的材料流速为 73.29 mm · s⁻¹,最慢材料流速为 12.28 mm · s⁻¹,材料流速差为 61.01 mm · s⁻¹;型材断面的最高温度为 529.0 ℃,最低温度为 498.7 ℃。从结果来看,方案 2 基本达到预期目标,即进一步降低了型材筋部处的材料流速,其平衡流速效果优于方案 1。为研究导流室深度对挤压成形过程的影响,方案 3 将导流室深度减小至 30 mm,同时导流室与筋部的距离设置为 17 mm,导流室与弧形的距离设置为 30 mm。如图 7c 所示,型材断面的最快材料流速为 68.34 mm · s⁻¹,最慢材料流速为 16.82 mm · s⁻¹,材料流速差为 51.52 mm · s⁻¹;型材断面的最高温度为 518.8 ℃,最低温度为 498.1 ℃。从以上分析可知,当阻流块的高度减小至 30 mm 时,在平衡流速和温度均匀性方面的效果突出。最后,为进一步降低型材弧形处的材料流速,方案 4 在方案 3 的基础上,将导流室与筋部距离微调至 15 mm,其他尺寸保持不变。从图 7d 中可以看出,型材断面的最快材料流速为 59.23 mm · s⁻¹,最慢材料流速为 20.40 mm · s⁻¹,材料流速差为 38.83 mm · s⁻¹;型材断面的最高温度为 518.3 ℃,最低温度为 500.8 ℃。方案 4 的导流室轮廓为 4 个方案中的最优结果。

表 5 还给出了不同导流室轮廓所对应的最大挤压力。设置导流室后,材料的流动阻力也明显增大,造成了挤压力的上升。方案 1、方案 2、方案 3 和方

案 4 的挤压力分别为 327、326、316 和 311 MN,均高于不设置导流室的 251 MN。此外,方案 3 和方案 4 采用了较浅的导流室(深度为 30 mm),所对应的挤压力数值较低,也说明导流室深度是影响挤压力的关键因素。综上分析,增设导流室会造成挤压力增大,增大比例约为 20%。通过优化导流室轮廓,能够获得很好的材料流速均匀性和温度分布均匀性。

3.2 工作带优化及分析

大型带筋薄壁铝型材的弧形处、筋部直壁处、筋部端部处存在材料流速不均匀的现象,弧形处、筋部直壁处、筋部端部处所对应的工作带长度分别以 H_1 、 H_2 、 H_3 表示,设计了 4 种方案的不等长工作带。对于材料流速而言,型材弧形处<筋部直壁处<筋部端部处。因此,工作带设计遵循 $H_1 < H_2 < H_3$ 的原则,即材料流速快的位置设计较长的工作带,用于提供更大的阻力,以减缓材料流动,反之亦然。4 种方案的不等长工作带,以及其形状及对应的 H_1 、 H_2 、 H_3 的取值分别如图 8 和表 6 所示。

基于不同方案的工作带长度,所获得的型材断面的材料流速和温度分布情况如表 7 和图 9 所示。从图 9a 中可以看出,方案 A 工作带的型材断面的最快材料流速为 60.90 mm · s⁻¹,仍位于筋部端部处,最慢的材料流速为 24.47 mm · s⁻¹,材料流速差为 36.43 mm · s⁻¹。与导流室方案 4 优化后的结果相比(材料流速差为 38.83 mm · s⁻¹),经过不等长工作带调整后,材料流速均匀性有所改善,但效果不明显。此外,型材断面的最高温度为 517.6 ℃,最低温度为 503.1 ℃,与导流室方案 4 优化后的结果(500.8~518.3 ℃)相差不大。

为进一步降低筋部端部的材料流速,方案 B 和方案 C 分别将其所对应的工作带长度 H_3 增加至 25 和 28 mm,其他尺寸保持不变,模拟结果如图 9c 和 9d 所示。从图 9 中可以看出,方案 B 的材料流速范围为 23.75~58.25 mm · s⁻¹,材料流速差为 34.5 mm · s⁻¹;温度范围为 503.0~518.2 ℃,温度差为 15.2 ℃。方案 C 的材料流速范围为 26.33~48.89 mm · s⁻¹,材料流速差为 22.56 mm · s⁻¹;温度范围为 504.3~517.3 ℃,温度差为 13.0 ℃。以上结果表明,通过增加筋部端部的工作带长度,能够提供更高的阻力,降低了最快的材料流速,同时流动均匀性和温度均匀性也有所改善。

工作带过长,可能会导致型材表面划伤等质量问题。因此,方案 D 选择不继续增加 H_3 的值,

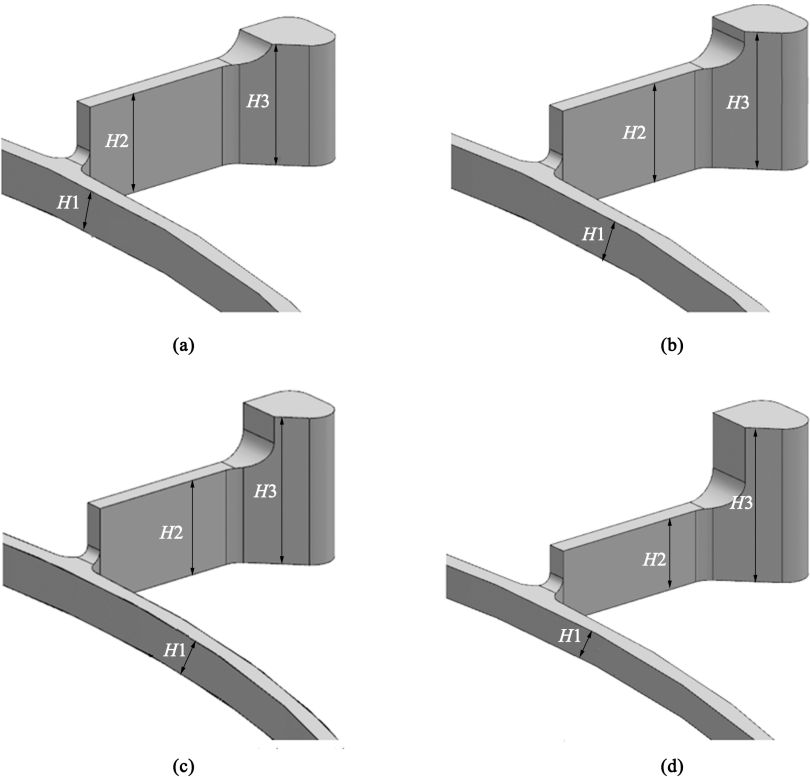


图 8 4 种不等长工作带形状
(a) 方案 A (b) 方案 B (c) 方案 C (d) 方案 D
Fig. 8 Shapes of four unequal-length working belts
(a) Scheme A (b) Scheme B (c) Scheme C (d) Scheme D

表 6 不等长工作带参数 (mm)

方案	H1	H2	H3
A	8	18	22
B	8	18	25
C	8	18	28
D	6	13	28

表 7 不同不等长工作带对应的数值模拟结果

方案	最快流速/ (mm · s ⁻¹)	最慢流速/ (mm · s ⁻¹)	最高温度/ ℃	最低温度/ ℃
A	60.90	24.47	517.6	503.1
B	58.25	23.75	518.2	503.0
C	48.89	26.33	517.3	504.3
D	44.40	25.76	517.5	504.5

仍保持 28 mm，但将 H1 和 H2 的值分别减小至 6 和 13 mm，从而减少对型材弧形和筋部直壁部分材料

流动的阻力。如图 9d 所示，方案 D 的材料流速范围为 25.76 ~ 44.40 mm · s⁻¹，材料流速差为 18.64 mm · s⁻¹；型材断面温度范围为 504.5 ~ 517.5 ℃，温度差为 13.0 ℃。由此可见，方案 D 的结果略优于其他方案。综上分析，调整工作带不同位置处的长度，可以实现对型材流速的微调作用，能够进一步提高材料流速和温度分布的均匀性。

4 试验验证

模具结构优化后，在 150 kN 双动卧式挤压机上进行大型带筋薄壁圆管铝型材穿孔针双动挤压验证，挤压速度为 0.2~0.3 mm · s⁻¹、挤压温度为 (500±10)℃，得到了流速均匀、无波浪、扭拧等缺陷的型材，试验结果如图 10 所示。

5 结论

(1) 大型带筋薄壁圆管铝型材的筋部材料流速极快，达到 724.00 mm · s⁻¹，而型材圆弧部分的材

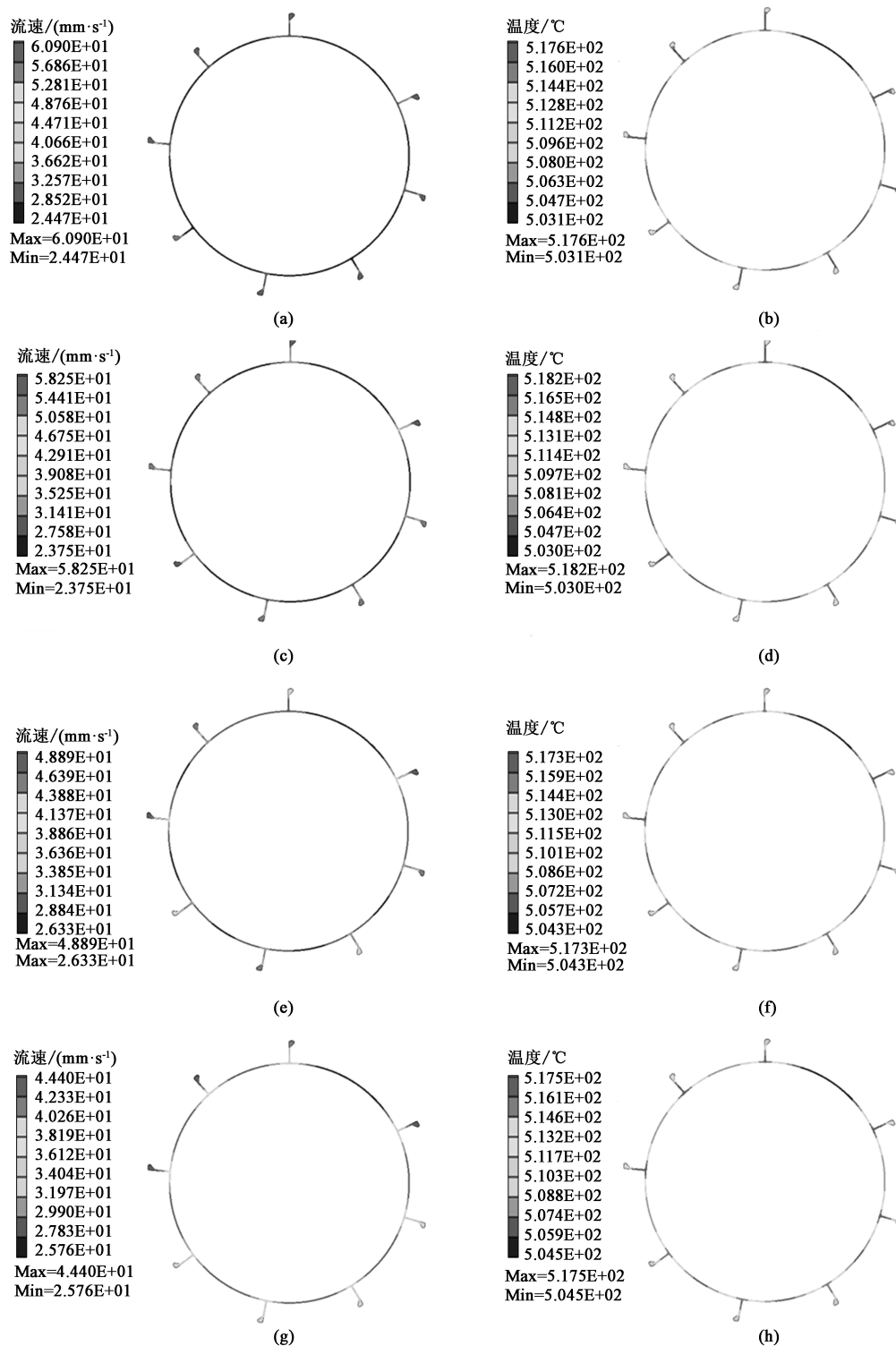


图9 不同不等长工作带下的型材断面流速和温度分布

(a) 方案 A, 流速 (b) 方案 A, 温度 (c) 方案 B, 流速 (d) 方案 B, 温度 (e) 方案 C, 流速 (f) 方案 C, 温度
(g) 方案 D, 流速 (h) 方案 D, 温度

Fig. 9 Flow velocity and temperature distributions of profile sections under different unequal-length working belts

(a) Scheme A, flow velocity (b) Scheme A, temperature (c) Scheme B, flow velocity (d) Scheme B, temperature
(e) Scheme C, flow velocity (f) Scheme C, temperature (g) Scheme D, flow velocity (h) Scheme D, temperature

料流速很慢, 最低仅为 $30.79 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。材料流速极不均匀, 而且温度分布均匀性也较差, 最大挤压

力达到了 251 MN 。

(2) 导流室轮廓经过优化后, 可将材料流速控



图10 大型带筋薄壁圆管铝型材

Fig. 10 Large ribbed thin-walled circular tube aluminum profile

制在 $20.40 \sim 59.23 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 材料流速差为 $38.83 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 另外断面的温度范围为 $500.8 \sim 518.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 表现出显著的改善材料流速和温度分布的效果。增设导流室会造成挤压力增大, 增大比例约 20%。

(3) 工作带的长度经过优化后, 实现了对材料流速的微调, 进一步将材料流速控制在 $25.76 \sim 44.40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 断面温度在 $504.5 \sim 517.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] Ding Q W, Zhang D, Zuo J R, et al. The effect of grain boundary character evolution on the intergranular corrosion behavior of advanced Al-Mg-3wt% Zn alloy with Mg variation [J]. *Materials Characterization*, 2018, 146: 47–54.
- [2] Aoba T, Kobayashi M, Miura H. Effects of aging on mechanical properties and microstructure of multi-directionally forged 7075 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 700: 220–225.
- [3] Wang X D, Pan Q L, Liu L L, et al. Characterization of hot extrusion and heat treatment on mechanical properties in a spray formed ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. *Materials Characterization*, 2018, 144: 131–140.
- [4] Lin L H, Liu Z Y, Ying P Y, et al. Improved stress corrosion cracking resistance and strength of a two-step aged Al-Zn-Mg-Cu alloy using taguchi method [J]. *Journal of Materials Engineering Performance*, 2015, 24 (12): 4870–4877.
- [5] Xu C, Zheng R X, Hanada S J, et al. Effect of hot extrusion and subsequent T6 treatment on the microstructure evolution and tensile properties of an Al-6Si-2Cu-0.5Mg alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 710: 102–110.
- [6] Li Y Q, Chen L, Tang J W, et al. Effects of asymmetric feeder on

microstructure and mechanical properties of high strength Al-Zn-Mg alloy by hot extrusion [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 749: 293–304.

- [7] Fan X H, Tang D, Fang W L, et al. Microstructure development and texture evolution of aluminum multi-port extrusion tube during the porthole die extrusion [J]. *Materials Characterization*, 2016, 118: 468–480.
- [8] Chen L, Yuan S W, Li Z G, et al. Influence of homogenization treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg alloy extruded by porthole die [J]. *Materials Characterization*, 2020, 161: 110148.
- [9] Chen L, Chen G J, Tang J W, et al. Evolution of grain structure, micro-texture and second phase during porthole die extrusion of Al-Zn-Mg alloy [J]. *Materials Characterization*, 2019, 158: 109953.
- [10] Chen L, Zhang J X, Zhao G Q, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy extruded by porthole die with different initial billets [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 718: 390–397.
- [11] Li F, Lin J F, Li C, et al. Optimization based on extrusion for seamless tube of super hardness aluminum alloy [J]. *Journal of Central South University*, 2011, 42 (10): 3020–3025.
- [12] Liu L Y. Analysis of fixed-mandrel in extrusion of al alloy seamless tube [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2010, 38: 22–23.
- [13] 王力莉. 125 MN 双动铝挤压机穿孔针的有限元分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
Wang L L. Finite Element Analysis on Perforation Needle of 125 MN Double-drive Aluminum Extruder [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007.
- [14] Gao A J, Ye P F. Optimum design of floating mandrel and dummy block for extrusion of Al alloy tube without lubricant [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2010, 38: 36–38.
- [15] Chen Q, Pan Q L, Liu C, et al. Change of microstructure and mechanical properties of 3003 aluminum alloy seamless tube during preparing [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36: 21–25.
- [16] Yu J Q, Zhao G Q, Chen L. Investigation of interface evolution, microstructure and mechanical properties of solid-state bonding seams in hot extrusion process of aluminum alloy profiles [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 153–166.
- [17] 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: 88–92.
- [18] Ma X, de Rooij M, Schipper D. Friction conditions in the bearing area of an aluminium extrusion process [J]. *Wear*, 2012, 278: 1–8.