

挤压与拉拔

## 6XXX系铝合金分流模挤压焊合质量和横向焊缝模拟研究

王昭河<sup>1</sup>, 高文林<sup>2</sup>, 王继成<sup>2</sup>, 刘中秋<sup>1</sup>, 李宝宽<sup>1</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 核兴航材(天津)科技股份有限公司, 天津 300300)

**摘要:** 对6XXX系铝合金集流管的分流模挤压过程进行了模拟研究, 并通过实际挤出型材不同截面上的横向焊缝分布验证了模型的准确性, 分析了挤压速度和挤压温度对金属流动速度、温度分布、挤压过程所需挤压力、焊合质量和横向焊缝长度的影响。结果表明: 提高挤压速度可提升型材的生产效率, 但挤压速度超过 $1.2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 后焊合质量下降, 挤压速度为 $1.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时型材的局部温度超限; 挤压温度由 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 峰值挤压力由 $17.08\text{ MN}$ 降低至 $15.17\text{ MN}$ , 但焊合界面的结合性能下降。横向焊缝长度主要受材料流动速度分布的影响, 而挤压温度对焊缝演化影响不显著; 在 $1.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 的高挤压速度下, 流动死区由挤压速度为 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的 $19.4\%$ 降低至 $13.9\%$ , 使焊缝缩短了 $26.5\%$ 。

**关键词:** 6XXX系铝合金; 分流模挤压; 焊合质量; 横向焊缝; 挤压工艺参数; 流动死区

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.019

中图分类号: TG376 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940(2025)05-0155-10

## Simulation study on welding quality and transverse weld of 6XXX series aluminum alloy during porthole die extrusion

Wang Zhaohe<sup>1</sup>, Gao Wenlin<sup>2</sup>, Wang Jicheng<sup>2</sup>, Liu Zhongqiu<sup>1</sup>, Li Baokuan<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Hexing Aeronautical Materials (Tianjin) Technology Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The porthole die extrusion process for 6XXX series aluminum alloy collector tube was simulated, and the accuracy of the model was validated by the distribution of transverse welds on different sections of the actual extruded profiles. Then, the influences of extrusion speed and extrusion temperature on metal flow velocity, temperature distribution, extrusion force required for the extrusion process, welding quality and transverse weld length were analyzed. The results indicate that increasing the extrusion speed can improve the production efficiency of profiles. However, when the extrusion speed exceeds  $1.2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , the welding quality decreases, and when the extrusion speed is  $1.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , the local temperature of profiles exceeds the limit. When the extrusion temperature is elevated from  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the peak extrusion force decreases from  $17.08\text{ MN}$  to  $15.17\text{ MN}$ , but the bonding performance of the welding interface deteriorates. Furthermore, the length of the transverse weld is mainly affected by the distribution of the material flow velocity, while the extrusion temperature has a less significant effect on the evolution of welds. At a high extrusion speed of  $1.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , the flow dead zone decreases from  $19.4\%$  at an extrusion speed of  $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  to  $13.9\%$ , which shortens the welds by  $26.5\%$ .

**Key words:** 6XXX series aluminum alloy; porthole die extrusion; welding quality; transverse weld; parameters of extrusion process; flow dead zone

6XXX系铝合金以其轻质、高强度、耐腐蚀和易成形的特性, 在轨道交通、航空航天、船舶、建

筑和基础设施等多个领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。常见的铝合金加工工艺有挤压、轧制、拉拔、锻造等。其中, 挤压工艺是制造铝合金型材的主要方法之一, 尤其是对于结构复杂的空心型材, 在生产时多采用分流模挤压工艺以确保型材的质量和性能<sup>[3]</sup>。

在分流模挤压过程中, 当铸锭被挤入模具时, 金属沿分流孔流动并在分流桥下方的焊合室内重新焊合, 形成纵向焊缝; 由于焊缝处焊合压力不足或材料流动不均匀, 型材的失效往往首先发生在焊缝

收稿日期: 2024-05-21; 修订日期: 2024-08-30

基金项目: 辽宁省兴辽人才-青年拔尖人才项目(XLYC2203064);

辽宁省优秀青年基金资助项目(2023JH3/10200001)

作者简介: 王昭河(1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2271902@stu.neu.edu.cn

通信作者: 刘中秋(1986-), 男, 博士, 教授

E-mail: liuzq@smm.neu.edu.cn

位置<sup>[4]</sup>。Liu G 等<sup>[5]</sup>采用瞬态和稳态三维有限元模拟方法,研究了纵向焊缝的形成机理,并评估了影响焊缝质量的因素,发现随着挤压速度增加,焊合室内焊合面上的平均应力和温度升高,有利于焊缝处的固态结合。He Y F 等<sup>[6]</sup>研究了焊合高度、焊合角度、焊合室、分流桥形状等模具结构对型材焊合质量的影响,发现增大焊合室高度和减小分流桥的焊合角度可以提高焊合质量。侯文荣等<sup>[7]</sup>采用焊合区网格重构技术,分析挤压速度和坯料温度对模孔出口处型材最高温度及型材横断面温度分布的影响,发现挤压速度对模孔出口处型材横断面温度分布不均匀性的影响较大,而挤压温度的影响较小。李世康等<sup>[8]</sup>研究了不同挤压速度下挤压力、焊合面温度、焊合压力和有效应力等参数的演变规律及其对焊合质量的影响,发现随着挤压速度的增大,焊合面温度、焊合压力和有效应力逐渐升高,焊合质量系数  $k$  值逐渐降低,管材更容易焊合。赵茂密等<sup>[9]</sup>采用正交实验法分析了挤压工艺对铝合金型材焊合质量的影响,并通过一系列实验对焊合不良的形成机制进行研究,发现挤压比对焊合质量的影响最大,其次为挤压速度,最后为挤压温度,导致焊合不良的主要原因为模腔内金属的焊合压力及焊合时间不足。

此外,挤压过程中产生的废料严重影响了成材率。欧洲铝业协会的一项调查显示:多达 22%~24%的坯料在挤压过程中被废弃<sup>[10]</sup>。在每个挤压行程开始时,模具内的旧坯料与挤压筒中新坯料的前端相互作用,这些坯料通常被氧化物、灰尘或润滑剂污染,从而产生一定长度的过渡区,即横向焊缝区,这部分型材的力学性能低于基材。因此,横向焊缝是挤压过程中产生废料的最主要来源之一。Li Q 等<sup>[11]</sup>发现横向焊缝长度在很大程度上取决于死区材料流出的速度,模具圆角有利于局部金属流动,从而可以更快地去除死区的材料,以缩短横向焊缝的废料长度。Mahmoodkhani Y 等<sup>[12]</sup>采用改进的拉格朗日方法建立了二维和轴对称有限元模型,分析了棒材挤压过程中横向焊缝的演变过程。Bakker A J D 等<sup>[13]</sup>揭示了横向焊缝对铝型材损伤失效过程的影响,发现横向焊缝的力学性能基本由焊缝界面上的氧化物颗粒控制。Zhang C S 等<sup>[14]</sup>从分流孔高度、焊合室圆角半径、分流桥下沉深度等方面对模具设计效果进行了深入研究,发现随着焊合室高度增加,材料的挤压速度在型材横截面的分布更加均匀,有利于减少横向焊缝

长度;另外,增加分流桥下沉深度和焊合室圆角半径,可以使留在模具中的旧坯料更容易流出,缩短横向焊缝长度。Yu J Q 等<sup>[15]</sup>研究了分流模挤压工艺中纵向焊缝、横向焊缝和缩尾对型材耐腐蚀性能和力学性能的影响。Tang J W 等<sup>[16]</sup>研究了横向焊缝区对挤出型材局部力学性能的影响及横向焊缝区沿挤压方向的组织演变。

目前,6XXX 系铝合金集流管主要通过分流模挤压工艺生产,存在焊合质量差及横向焊缝长度难以预测等问题。本文采用任意拉格朗日-欧拉法(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)模拟了 6XXX 系铝合金集流管分流模挤压过程,研究了挤压速度和挤压温度对挤出型材速度分度、温度分布、挤压力、焊合质量和横向焊缝长度的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 几何建模

图 1 展示了用于生产该集流管分流模的三维剖面图和集流管的截面尺寸。由图 1 可知,在上模对称分布 4 个分流孔,分流模外径为  $\Phi 240$  mm,高度为 115 mm,利用模芯成形集流管内部小孔,并由 4 个交叉的分流桥支撑,在分流桥的底部设计了一个 25°的倒角,从而减少金属流动阻力。下模由焊合室、阻流块、工作带和后空刀组成,下模高度为 125 mm,焊合室高度为 20 mm。在焊合室底面布置 3 个阻流块,用来平衡焊合室底部材料的流动速度,并采用非等长工作带平衡型材挤出速度<sup>[17]</sup>。集流管横截面长度为 62 mm,宽度为 69 mm,截面积为 3051.97 mm<sup>2</sup>,在集流管上方有一个直径为  $\Phi 25$  mm 的圆孔。

### 1.2 数学模型

质量守恒方程、动量方程和能量方程用 ALE 公式描述如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \Big|_{\xi} + \frac{\partial \rho w_i}{\partial \xi_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} \Big|_{\xi} + \rho w_j \frac{\partial v_i}{\partial \xi_j} = \frac{\partial T_{ji}}{\partial \xi_j} + \rho f_i \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} \Big|_{\xi} + \rho w_i \frac{\partial E}{\partial \xi_i} = T_{ji} \frac{\partial v_i}{\partial \xi_j} - \frac{\partial q_i}{\partial \xi_i} \quad (3)$$

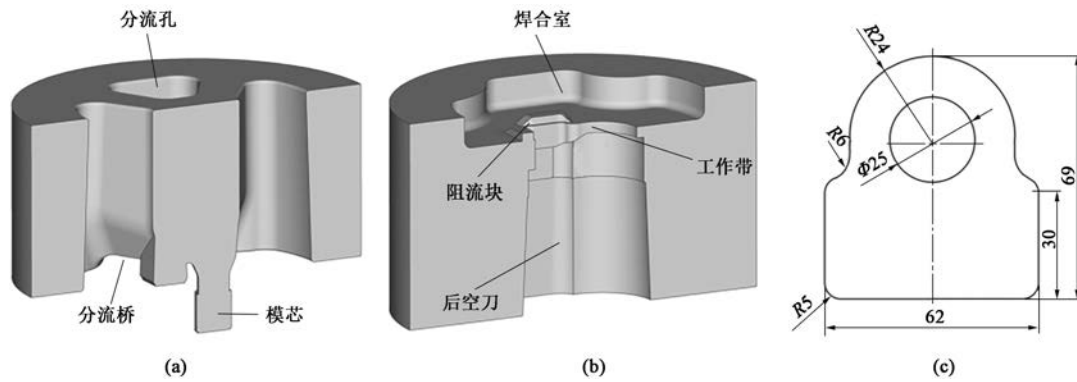


图 1 分流模剖面图和集流管截面尺寸  
(a) 上模 (b) 下模 (c) 集流管横截面

Fig. 1 Cross-sectional views of porthole die and section sizes of collector tube  
(a) Upper die (b) Lower die (c) Cross section of collector tube

式中： $\rho$  和  $T_{ji}$  分别为密度张量和拉格朗日应力张量； $t$  为时间变量； $\xi$  为参考坐标系， $\xi_i$  和  $\xi_j$  分别为参考系的第  $i$  和第  $j$  分量； $w_i$ 、 $w_j$  分别为参考坐标系下粒子速度的第  $i$  和第  $j$  分量； $v_i$  为空间坐标下的物质速度分量； $f_i$  为单位质量力的第  $i$  分量； $E$  为单位质量的内能； $q_i$  为热流矢量的第  $i$  分量。

### 1.3 材料本构方程

采用 ALE 方法，需要引入合适的材料本构方程<sup>[18]</sup>。在本研究中采用 Sellar-Tegart 模型来描述 6XXX 系铝合金的流动应力<sup>[19]</sup>：

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \sinh^{-1} \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} \quad (4)$$

$$Z = \dot{\epsilon} e^{Q/RT} \quad (5)$$

式中： $\sigma$  为流动应力； $n$  为应力指数； $A$  为常数； $\beta$  为与温度无关的材料参数； $Z$  为 Zener-Hollomon 参数； $\dot{\epsilon}$  为有效应变率； $Q$  为活化能； $R$  为通用气体常数； $T$  为绝对温度。

本文取 6XXX 系铝合金的以上参数值为： $Q = 1.45 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ， $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ， $A = 2.41 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ， $n = 3.55$ ， $\beta = 4.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ <sup>[20]</sup>。计算过程中，采用的 6XXX 系铝合金的密度为  $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，热导率为  $180 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ，比热容为  $896 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ，杨氏模量为  $40 \text{ GPa}$ ，泊松比为  $0.35$ 。

### 1.4 网格化与边界条件

在网格划分时，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（型材网格与工作带网格一致）<sup>[21]</sup>。如图 2 所示，工作带、焊合室、分流孔、初始坯料网格分别设置为  $1.0$ 、 $1.5$ 、 $3.0$  和  $8.0 \text{ mm}$ 。

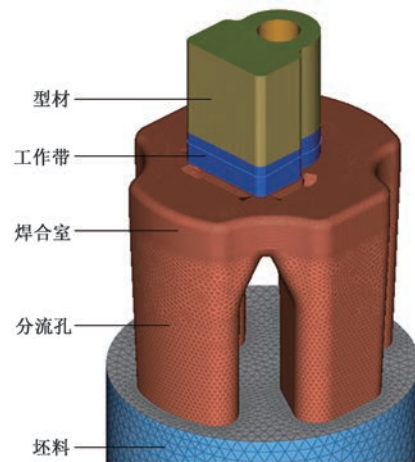


图 2 网格划分  
Fig. 2 Meshing

模拟中使用的挤压筒直径为  $\Phi 180 \text{ mm}$ ，初始坯料直径为  $\Phi 172 \text{ mm}$ ，长度为  $650 \text{ mm}$ ，压余长度为  $50 \text{ mm}$ ，挤压比（坯料横截面面积与挤出型材横截面面积之比）为  $8.34$ ，模具和挤压筒的初始温度为  $425 \text{ }^\circ\text{C}$ ，模具、挤压筒与坯料之间的换热系数为  $10000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。坯料与工作带接触表面设置为滑动剪切摩擦条件，摩擦因数设定为  $0.3$ ，坯料与模具和挤压筒之间的所有界面均设置为粘着条件，模拟时设置的挤压参数如表 1 所示。

表 1 挤压参数设置

Table 1 Setting of extrusion parameters

编号	挤压速度/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	挤压温度/ $^\circ\text{C}$
1	0.6、0.8、1.0、1.2、1.5	500
2	1.0	480、490、500、510、520

## 2 结果和讨论

### 2.1 挤出型材速度和温度分布

在实际挤压过程中,工作带出口横截面流速分布的均匀性对挤压质量有很大影响。如果流速分布不均匀,铝型材内部流动应力会增大且挤出型材的端面不平整。采用相对速度差  $VRD$  来描述型材截面上速度分布的均匀程度。

$$VRD = \frac{\sum_{m=1}^N \frac{|V_m - V_a|}{V_a}}{N} \times 100\% \quad (6)$$

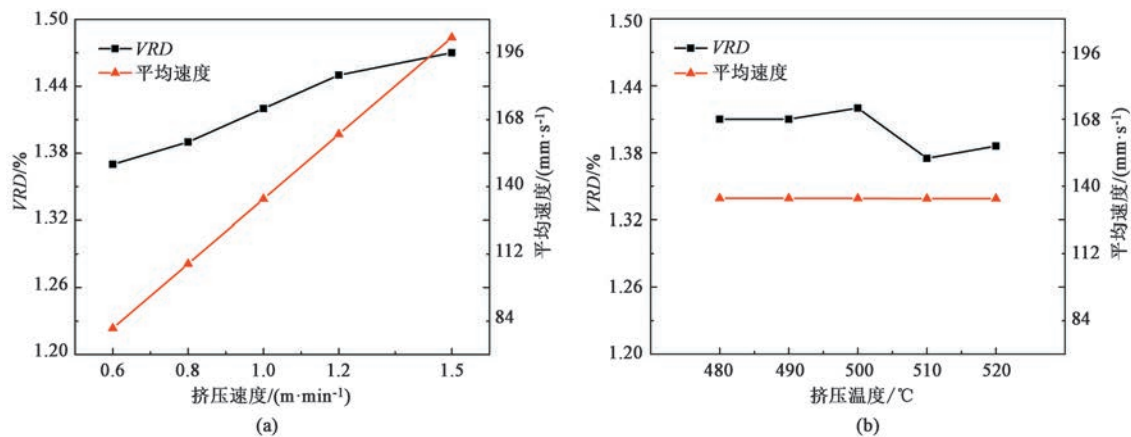


图3 工艺参数对工作带出口截面流速分布的影响

(a) 挤压速度 (b) 挤压温度

Fig. 3 Influence of process parameters on flow velocity distribution at outlet cross-section of working belt

(a) Extrusion velocity (b) Extrusion temperature

对于挤压生产来说,型材温度对产品质量、生产效率、模具寿命等均有很大影响。在挤压过程中,挤压件的温度主要受传热、摩擦热和塑性变形热的影响。图4显示了不同参数下工作带出口截面的最大、最小和平均温度。从图4a中可以看出,随着挤压速度增加,挤出型材的温度逐渐升高,这是因为在较大的挤压速度下,塑性变形产生的热量变得更加显著,且与模具的换热时间减少,从而使挤出型材温度升高。同时截面上最大温度和最小温度的差值也更大,温度分布更不均匀。值得注意的是,在  $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  的挤压速度下,型材最高温度达到  $566.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,通常对于6XXX系合金,挤出型材的最高温度不应超过临界温度  $562 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,否则会出现过烧、热裂等表面缺陷,因此,挤压速度应小于  $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。从图4b中可以看出,挤压温度对挤出型材温度分布影响不大。

### 2.2 挤压力

挤压力是确定挤压工艺、选择挤压设备和设计

式中:  $V_m$  为节点  $m$  处的速度,  $m=1, \dots, N$ ;  $N$  为型材横截面上的节点数;  $V_a$  为所有节点的平均速度。

$VRD$  值越小,流速分布越均匀,使得挤出型材的内部流动应力减小且端面平整,挤出型材的质量越好。有研究表明,当  $VRD < 2\%$  时,可以认为金属流动平衡<sup>[19]</sup>。图3a为不同挤压速度下工作带出口截面上的  $VRD$  值和平均速度,随着挤压速度增加,型材挤出速度也增加,提高了生产效率,  $VRD$  值升高,  $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  挤压速度下  $VRD$  值最大,为  $1.46\% < 2\%$ 。图3b中可看出,不同挤压温度下工作带出口截面平均流速相差不大,  $510 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下工作带出口截面上速度分布最均匀,  $VRD$  值为  $1.375\%$ 。

挤压模具的重要力学参数。较大的挤压力能以较高的挤压速度完成挤压过程,从而有效地提高生产效率。另一方面,过高的挤压力将造成挤压机的震动,引起挤压失稳<sup>[22]</sup>。

挤压速度对挤压力的影响主要有两方面:一方面,随着挤压速度增大,应变率增加,变形抗力提高;另一方面,挤压速度越大,坯料温升越高,降低了挤压材料的流动应力。图5a为不同挤压速度下挤压力随挤压垫压下量的变化曲线。在模拟中未考虑坯料填充模具的过程,因此挤压开始时,挤压力很快达到峰值,并伴随着急剧温升,达到峰值后由于铝的动态回复,挤压力突然下降;在压力骤降后,挤压进入稳态阶段,压力开始缓慢下降,这主要是由于坯料长度减少,从而降低了挤压筒与坯料接触面的摩擦阻力。挤压过程中峰值挤压力随着挤压速度的增大而增大,  $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  的挤压速度下所需的最大挤压力为  $16.26 \text{ MN}$ ,所选

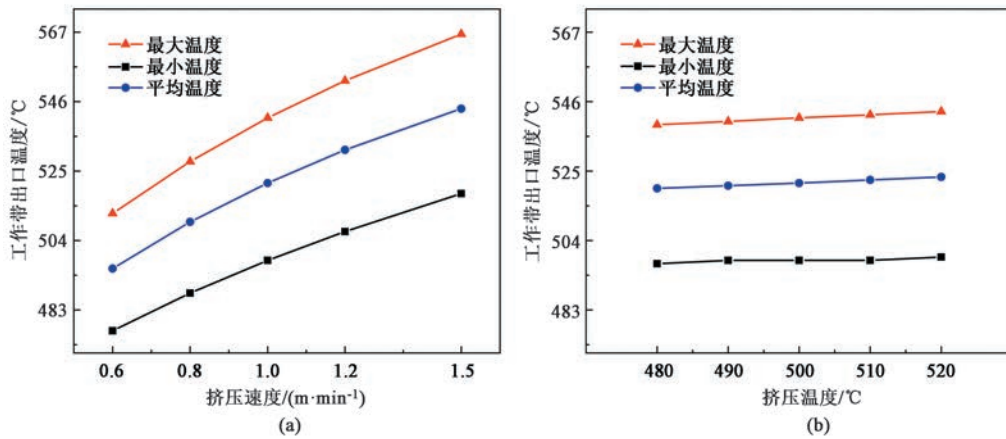


图 4 工艺参数对挤出型材温度分布的影响

(a) 挤压速度 (b) 挤压温度

Fig. 4 Influence of process parameters on temperature distributions of extruded profiles

(a) Extrusion velocity (b) Extrusion temperature

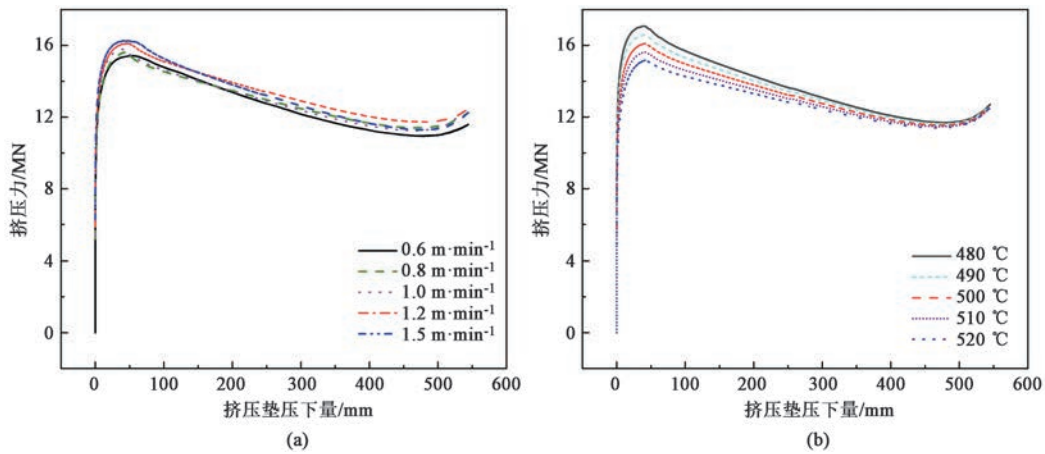


图 5 工艺参数对挤压力的影响

(a) 挤压速度 (b) 挤压温度

Fig. 5 Influence of process parameters on extrusion force

(a) Extrusion velocity (b) Extrusion temperature

的 18 MN 正向挤压机可以满足需求。图 5b 为不同温度下挤压力随挤压垫压下量的变化。随着挤压温度升高，材料的流动应力降低，挤压力也降低，这与姜玖华等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。在 480 °C 时所需挤压力最大，为 17.08 MN，选用的 18 MN 正向挤压机可以满足需求。

### 2.3 焊合质量

Donati L 等<sup>[24]</sup>结合物理实验和有限元模拟，评估了不同焊合标准的预测精度，发现随着挤压速度增加，Q 准则的精度降低，当压力小于某一阈值时，P 准则无法使用。相比之下，K 准则在模拟和实验之间表现出良好的相关性，因此，选择参数 K 定量表示焊合质量，其值为焊合面焊合压力与材料有效应力比值对焊合路径的积分值，即：

$$K = \int_l \frac{P}{\sigma} dt \cdot v_h = \int_l \frac{P}{\sigma} dl \geq \text{Cost} \quad (7)$$

式中： $P$  为焊合压力； $v_h$  为焊合速度，表示焊合过程中材料的流动速度； $l$  为焊合路径； $\text{Cost}$  为常数阈值，表示焊合质量的最低要求。

实际计算中  $K$  值可以表示为：

$$K = \sum_{a=1}^l \sum_{b=1}^o \frac{P_{ab}}{\sigma_{ab} v_{ab}} \cdot v_{ab} = \sum_{a=1}^l \sum_{b=1}^o \frac{P_{ab}}{\sigma_{ab}} \geq \text{Cost} \quad (8)$$

式中： $P_{ab}$  为第  $a$  段焊合路径上第  $b$  点的焊合压力； $\sigma_{ab}$  为第  $a$  段焊合路径上第  $b$  点的材料有效应力； $v_{ab}$  为第  $a$  段焊合路径上第  $b$  点的焊合速度； $a=1, \dots, l$ ； $b=1, \dots, o$ ； $o$  为焊合路径上的离散点数；

挤压焊缝的形成机制为塑性变形机制，焊合面焊合压力  $P$  和材料流动应力  $\sigma$  对焊缝形成具有显著

的影响,静水压力越高,材料流动应力越小,越有利于挤压焊缝处微观孔洞的闭合,焊缝的焊接质量也越好<sup>[25]</sup>。焊接质量受许多参数影响,如挤压比、挤压速度、挤压温度和模具结构等。首先研究了挤压速度为  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  时焊接面的焊接质量,图 6a

为焊接面上的静水压力分布,可见焊接室壁面附近的静水压力较高,模芯附近静水压力较低;图 6b 为焊接面上的材料流动应力分布,可见焊接室壁面附近的材料变形较小,流动应力较低,远离焊接室壁面,则材料流动应力变高。

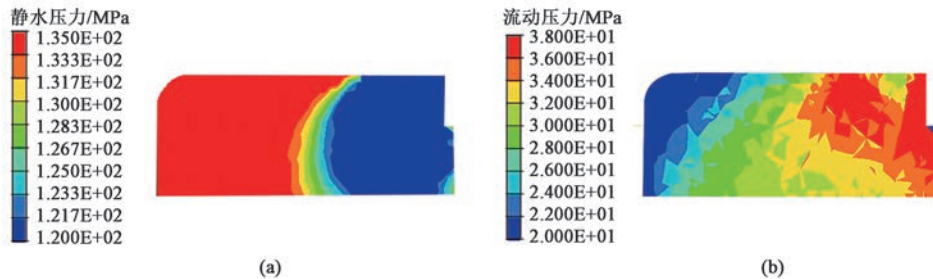


图 6 焊接面的静水压力 (a) 和流动应力 (b) 分布

Fig. 6 Distributions of hydrostatic pressure (a) and flow stress (b) at welding surface

图 7 为不同工艺参数下焊接面的焊接质量 (焊接准则为 K 准则)。随着挤压速度增加,焊接面焊接压力先增大后减小,焊接质量先增加后降低,当挤压速度为  $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  时,焊接质量最高,为

4.65。随着挤压温度升高,挤压力降低,焊接面焊接压力降低,材料流动应力也降低,焊接力的降低幅度大于材料流动应力的降低幅度,焊接质量下降,480 °C 下焊接质量最高,为 4.348。

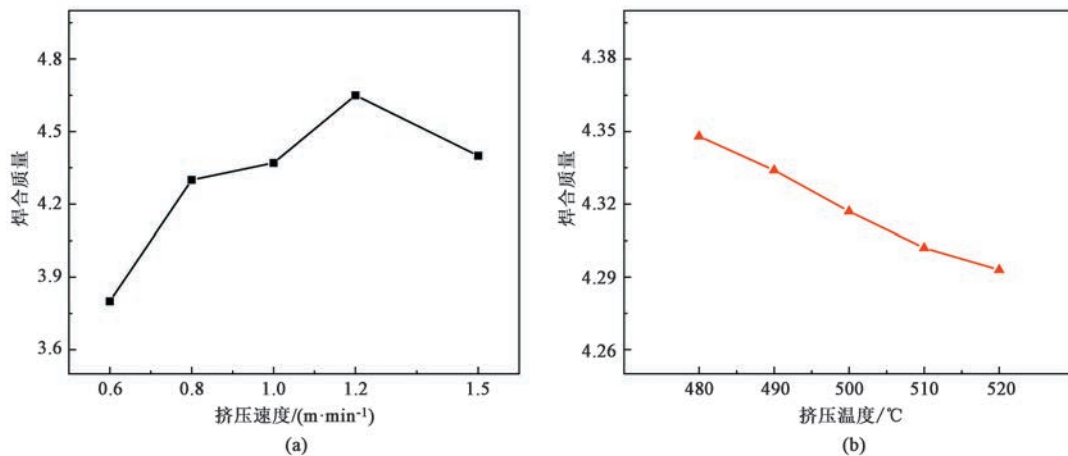


图 7 工艺参数对焊接质量的影响

(a) 挤压速度 (b) 挤压温度

Fig. 7 Influence of process parameters on welding quality

(a) Extrusion velocity (b) Extrusion temperature

## 2.4 横向焊缝的形成和演化

在连续挤压过程中,新坯料被压入模腔并与旧坯料牢固结合,然后在型材上形成横向焊缝。在本研究中,新坯料总是先出现在左右两侧,然后向下方扩散,最后出现在上方。图 8 为  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 、500 °C 工况下,不同时刻在分流孔、焊接室和工作带位置的新坯料分布和速度场,其中,  $ND$  为法线方向,  $TD$  为横向方向。图 8 中,上方云图展示了新旧坯料交界面,当新料面积占比为 100% 时代表新

坯料,当新料面积占比为 0% 时表示旧坯料;下方云图则为对应时刻的速度分布。图 8a 观察到,新坯料优先流入左右两个分流孔,其次是下方分流孔。同样,图 8b 中新坯料首先出现在焊接室的左右两侧及下方,最后从工作带流出。从速度场的分布来看,分流孔、焊接室的左右两侧流速相对较高,其次是下方,最后是上方。由此可以得出,材料的流动速度是影响横向焊缝演化的关键因素,新坯料首先出现在挤压过程中流速较大的区域。

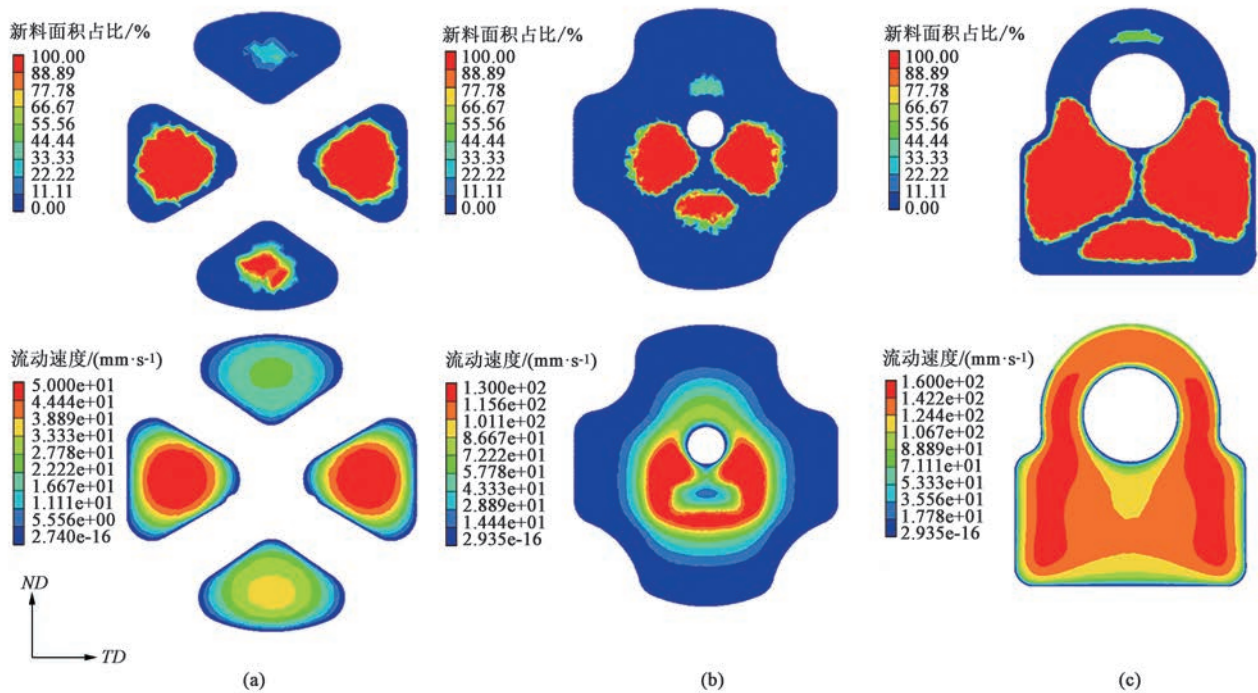


图 8 不同截面处新坯料分布和速度场分布

(a) 分流孔 (b) 焊合室 (c) 工作带

Fig. 8 Distributions of new blank and velocity field at different cross sections

(a) Porthole (b) Welding chamber (c) Working belt

图 9 显示了不同时间步长时新坯料在分流模内的流动情况。如图 9b 所示，横向焊缝初始界面为平界面（时间步长为 0 s），然后逐渐弯曲，如图 9c 和图 9d 所示。由于流动死区的存在，挤压完成后仍有少量旧坯料黏着在焊合室壁面（图 9e）。

由于横向焊缝区的力学性能普遍低于基材，通常要切除挤出型材头部，因此，对横向焊缝区长度

的预测至关重要。图 10 为不同挤压速度下新料面积占比随着距停车印位置的变化曲线，当新料面积占比达到 99.5% 后，横向焊缝的影响可以忽略不计。随着挤压速度增加，横向焊缝长度减小，当挤压速度为 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.5  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  时，横向焊缝长度分别为 1347.1、1172.9、1080.9、1015 和 990 mm。图 11 为不同挤压温度下新料面积占比随着距停车印位置的变化曲线，从图 11 中可以看出，挤

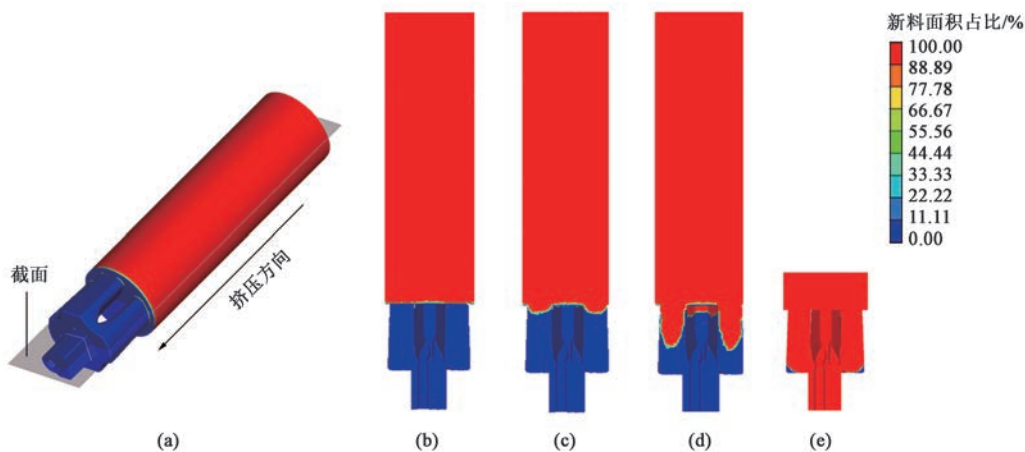


图 9 不同时刻截面处横向焊缝的演化

(a) 截面位置 (b) 0 s (c) 1.16 s (d) 3.16 s (e) 35.2 s

Fig. 9 Evolution for transverse welds of cross section at different moments

(a) Section position (b) 0 s (c) 1.16 s (d) 3.16 s (e) 35.2 s

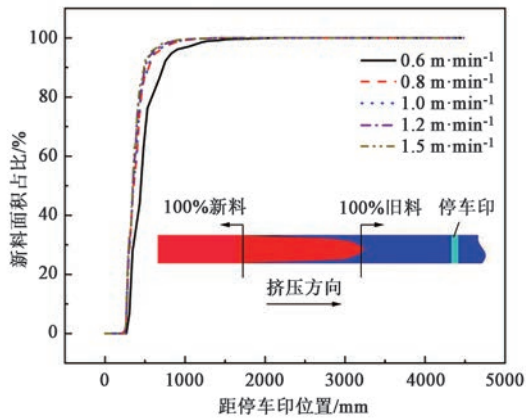


图 10 挤压速度对横向焊缝长度的影响

Fig. 10 Effect of extrusion velocity on length of transverse weld

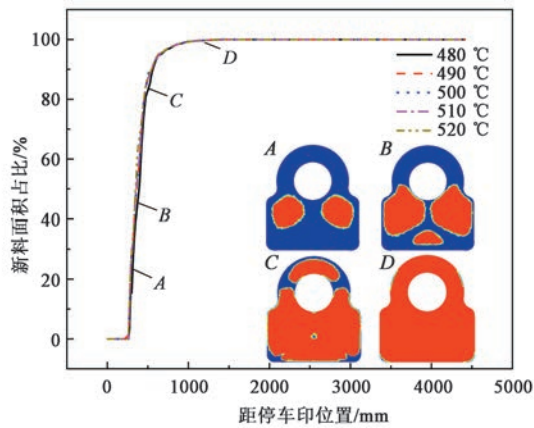


图 11 挤压温度对横向焊缝长度的影响

Fig. 11 Effect of extrusion temperature on length of transverse weld

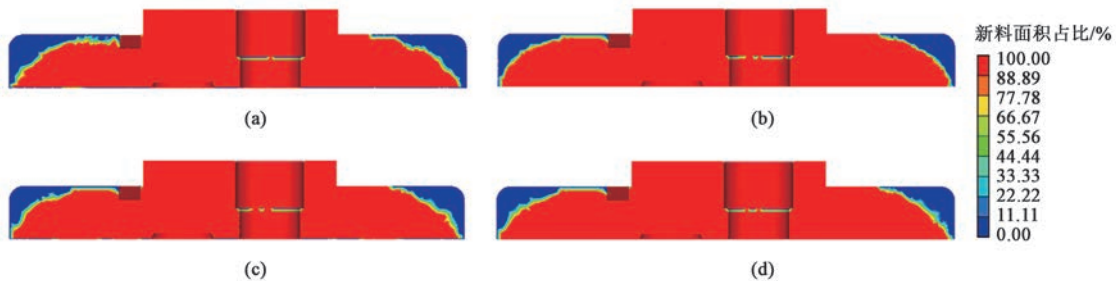


图 12 不同工艺参数下焊合室内流动死区分布

(a) 500 °C, 0.6 m·min<sup>-1</sup> (b) 500 °C, 1.5 m·min<sup>-1</sup> (c) 480 °C, 1.0 m·min<sup>-1</sup> (d) 520 °C, 1.0 m·min<sup>-1</sup>

Fig. 12 Flow dead zone distribution in welding chamber under different process parameters

在所选 4 个位置 (410、660、830 和 1340 mm 处) 进行切割取样, 对样品横截面进行了一系列制备步骤, 包括使用砂纸研磨、抛光、蚀刻, 其中, 蚀刻溶液为浓度为  $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaOH 溶液, 溶液加热至  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 蚀刻时间为  $15 \sim 20 \text{ s}$ 。样品腐蚀后截面上横向焊缝的宏观形貌清晰可见, 随后使用相机对样品表面进行拍摄, 并与相同挤压参数下的数值

模拟结果进行对比, 如图 13 所示。观察不同截面处横向焊缝的宏观形貌, 可以看到新坯料首先出现在集流管左右两侧, 然后是集流管下方, 最后是上方。当焊缝长度  $L = 1340 \text{ mm}$  时, 腐蚀样品表面几乎观察不到横向焊缝。观察数值模拟对应截面处横向焊缝的宏观形貌, 发现数值模拟结果与实验结果吻合较好。

压温度对横向焊缝长度几乎没有影响。以  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  为例, 选取曲线上的 A、B、C、D 这 4 点, 得到截面处的 4 个新旧坯料交界示意图, 可见新料流入过程。当挤压温度为  $480$ 、 $490$ 、 $500$ 、 $510$  和  $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 横向焊缝长度分别为  $1073.8$ 、 $1073.6$ 、 $1080.9$ 、 $1074.9$  和  $1075 \text{ mm}$ 。为了理解这一现象背后的机理, 研究了最小和最大挤压速度及挤压温度下, 挤压完成后焊合室内形成的流动死区。图 12 为焊合室纵截面上流动死区分布, 使用图像分析软件 Image J 测量该截面上流动死区占比。由图 12a 和图 12b 可知, 当挤压温度一定 ( $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时, 随着挤压速度从  $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  升高至  $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , 焊合室纵截面上流动死区占比从  $19.4\%$  减小至  $13.9\%$ ; 由图 12c 和图 12d 可以看出, 当挤压速度为  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 、挤压温度为  $480 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 截面上流动死区占比为  $14.2\%$ , 挤压温度升高至  $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$  后, 流动死区占比为  $14.7\%$ , 挤压温度对流动死区的影响很小。当坯料继续挤压时, 产生的流动死区表现为锥形表面, 由于摩擦作用, 导致流动死区周围的坯料流速减小<sup>[26]</sup>。因此, 在较高的挤压速度下, 流动死区较小, 从而导致相对较短的横向焊缝长度。图 12c 和图 12d 观察到不同挤压温度下的流动死区相似, 因此横向焊缝长度没有显著变化。

实际挤压过程是在一台  $18 \text{ MN}$  的正向挤压机上, 为了验证数值模拟的正确性, 选取  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下的挤出型材进行实验。从停车印处收集了一个长度为  $1500 \text{ mm}$  的过渡段,



图 13 不同横截面处横向焊缝分布

(a)  $L=410\text{ mm}$  (b)  $L=660\text{ mm}$  (c)  $L=830\text{ mm}$  (d)  $L=1340\text{ mm}$

Fig. 13 Distributions of transverse weld at different cross sections

使用图像分析软件 Image J 测量不同截面上新料面积占比，如图 14 所示。最大误差在  $L=660\text{ mm}$  处，为 3.6%。当  $L=1340\text{ mm}$  时，横截面上只能观察到纵向焊缝，此时数值模拟截面上新料面积占比达到 99.5%，可以忽略横向焊缝的影响<sup>[26]</sup>。

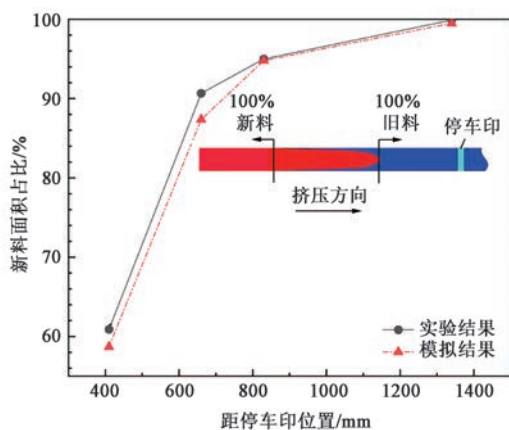


图 14 不同横截面处新料面积占比

Fig. 14 Percentage of new material area at different cross sections

### 3 结论

(1) 随着挤压速度的增加，型材挤出速度也增加，提高了生产效率，但在  $1.5\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  挤压速度下，型材最高温度为  $566\text{ }^\circ\text{C}$ ，超过过烧温度，故挤压速度需小于  $1.5\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ；挤压温度对挤出型材速度和温度分布影响较小， $510\text{ }^\circ\text{C}$  下 VRD 值最小，为 1.375%。

(2) 挤压过程中峰值挤压力随着挤压速度增大

而增大， $1.5\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  速度下所需的最大挤压力为 16.26 MN；随着挤压温度升高，材料的流动应力降低，挤压力也降低。在  $480\text{ }^\circ\text{C}$  时所需挤压力最大，为 17.08 MN，选用的 18 MN 正向挤压机可以满足需求。

(3) 采用静水压力与流动应力之比来评价焊合质量。随着挤压速度从  $0.6\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  增加至  $1.5\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ，焊合质量先增加后减少，在  $1.2\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  速度下焊合质量最高为 4.65；随着挤压温度从  $480\text{ }^\circ\text{C}$  增加至  $520\text{ }^\circ\text{C}$ ，焊合质量逐渐降低， $480\text{ }^\circ\text{C}$  下焊合质量最高，为 4.348。

(4) 材料的流动速度是影响横向焊缝演化的关键因素，新坯料首先出现在挤压过程中流速较大的区域。随着挤压速度从  $0.6\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  增加至  $1.5\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ，焊合室纵截面上的流动死区占比从 19.4% 减少至 13.9%，横向焊缝长度变短， $1.5\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  速度下横向焊缝长度最短，为 990 mm；不同挤压温度下焊合室内流动死区相差不大，因此，挤压温度对横向焊缝长度影响不大。

#### 参考文献：

[1] 孙祥彬, 王洪伟, 董颖, 等. 均匀化温度对 6xxx 系铝合金组织与性能的影响 [J]. 有色金属加工, 2020, 49 (5): 24-28. Sun X B, Wang H W, Dong Y, et al. Effect of homogenization temperature on microstructure and properties of 6xxx aluminum alloy [J]. Nonferrous Metals Processing, 2020, 49 (5): 24-28.

[2] Bhat K U, Panemangalore D B, Kuruveri S B, et al. Surface modification of 6xxx series aluminum alloys [J]. Coatings, 2022, 12 (2): 180.

[3] Chen H, Zhao G Q, Zhang C S, et al. Numerical simulation of ex-

- trusion process and die structure optimization for a complex aluminum multicavity wallboard of high-speed train [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, 26 (12): 1530–1538.
- [4] 刘志文, 李落星, 符纯明, 等. 薄壁中空型材分流模挤压缺陷产生机理及出口流速精确控制 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31 (4): 917–930.
- Liu Z W, Li L X, Fu C M, et al. Defects formation mechanism and precision control of exit flow velocity in porthole die extrusion of hollow thin-walled aluminum profile [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31 (4): 917–930.
- [5] Liu G, Zhou J, Duszczak J. FE analysis of metal flow and weld seam formation in a porthole die during the extrusion of a magnesium alloy into a square tube and the effect of ram speed on weld strength [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 200 (1–3): 185–198.
- [6] He Y F, Xie S S, Cheng L, et al. FEM simulation of welding quality in porthole die extrusion [J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2011, 26 (2): 292–295.
- [7] 侯文荣, 张志豪, 谢建新, 等. 铝合金空心型材分流模挤压成形全过程温度场的数值模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2013 (10): 2769–2778.
- Hou W R, Zhang Z H, Xie J X, et al. Numerical simulation of temperature field during whole extrusion process of aluminum hollow profile with porthole die extrusion forming [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013 (10): 2769–2778.
- [8] 李世康, 李落星, 刘志文, 等. 挤压速度对 6063 铝合金管材焊接强度的影响 [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 weld strength of 6063 square tube [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27 (9): 1775–1784.
- [9] 赵茂密, 姜小龙, 兰天虹, 等. 工艺参数对分流组合模挤压 6005A 铝合金型材焊接质量的影响 [J]. *轻合金加工技术*, 2018, 46 (4): 20–25, 38.
- Zhao M M, Jiang X L, Lan T H, et al. Effect of extrusion parameters on the welding quality of 6005A aluminum hollow profiles with porthole dies [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2018, 46 (4): 20–25, 38.
- [10] Oberhausen G J, Christopher A A A, Cooper D R. Reducing aluminum extrusion transverse weld process scrap [A]. Daehn G, Cao J, Kinsey B, et al. *Forming the Future: Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity [C]*. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [11] Li Q, Harris C, Jolly M R. Finite element modelling simulation of transverse welding phenomenon in aluminium extrusion process [J]. *Materials & Design*, 2003, 24 (7): 493–496.
- [12] Mahmoodkhani Y, Wells M A, Parson N, et al. Numerical modelling of the material flow during extrusion of aluminium alloys and transverse weld formation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214 (3): 688–700.
- [13] Bakker A J D, Katgerman L, Zwaag S V D. Analysis of the structure and resulting mechanical properties of aluminium extrusions containing a charge weld interface [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 9–21.
- [14] Zhang C S, Dong Y Y, Wang C X, et al. Evolution of transverse weld during porthole extrusion of AA7N01 hollow profile [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 248: 103–114.
- [15] 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.
- [16] Tang J W, Chen L, Li Z G, et al. Evolution mechanisms of charge weld during porthole die extrusion of ZK60 Mg profile [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 300: 117401.
- [17] 刘国勇, 陈泽民, 朱世安, 等. 多孔薄壁铝型材挤压模具结构 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (6): 162–170.
- Liu G Y, Chen Z M, Zhu S A, et al. Structure of extrusion mold for porous thin-walled aluminum profiles [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (6): 162–170.
- [18] Codina R, Houzeaux G, Coppola-Owen H, et al. The fixed-mesh ALE approach for the numerical approximation of flows in moving domains [J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228 (5): 1591–1611.
- [19] Truong T, Hsu Q, Tong V. Effects of solid die types in complex and large-scale aluminum profile extrusion [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10 (1): 263.
- [20] Lou S M, Wang Y X, Liu C X, et al. Analysis and prediction of the billet butt and transverse weld in the continuous extrusion process of a hollow aluminum profile [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26 (8): 4121–4130.
- [21] 王鸿鼎, 何凯波, 刘洪, 等. 基于 HyperXtrude 的大型空心铝型材挤压模具优化 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (8): 194–201.
- Wang H D, He K B, Liu H, et al. Optimization on extrusion mold for large hollow aluminum profile based on HyperXtrude [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (8): 194–201.
- [22] 付博文, 李冰, 陈星合, 等. 连续流变挤压与热处理对 6061 合金线材组织性能的影响 [J]. *稀有金属*, 2023, 47 (8): 1070–1078.
- Fu B W, Li B, Chen X H, et al. Mechanical properties and microstructure evolution in 6061 alloy wire with continuous rheo-extrusion and heat treatment [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2023, 47 (8): 1070–1078.
- [23] 姜玖华, 刘中秋, 李宝宽. 7XXX 系铝合金棒材挤压工艺的有限元模拟 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42 (11): 1337–1341.
- Jiang J H, Liu Z Q, Li B K. Finite element simulation of extrusion process of 7XXX series aluminum alloy bar [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2022, 42 (11): 1337–1341.
- [24] Donati L, Tomesani L. The prediction of seam welds quality in aluminum extrusion [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153–154: 366–373.
- [25] 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.
- [26] Sariyarlioglu E C, Negozio M, Welo T, et al. Charge weld evolution in hollow aluminum extrusion: Experiments and modeling [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2024, 49: 14–27.