



# 铝合金板材挤压自弯曲成形机理及 模具优化设计

闵范磊, 朱光明, 高绪杰, 岳博文, 刘惠苹, 郭娜娜, 翟晓庆

(山东理工大学 机械工程学院, 淄博 255000)

**摘要:** 对板材理想自弯曲挤出过程的平面应力分析得到出口速度分布与弯曲曲率半径的关系, 并提出一种铝合金板材自弯曲挤压新工艺, 通过设计异形导流腔结构, 使模腔内金属产生不均匀流动, 从而直接挤出弯曲型材; 采用有限元模拟, 分析了板材挤压过程的自弯曲变形机理、金属流动特点以及残余应变的分布; 通过选取型腔结构因子与挤压速度为设计变量, 采用拉丁超立方抽样方法结合模拟计算, 建立了挤出型材弯曲曲率半径的响应面预测模型, 在指定弯曲半径为 1900 mm 的条件下, 建立附带罚函数的目标函数优化模型, 利用粒子群算法得到最优模腔结构与工艺参数, 并进行挤压试模实验。实验结果显示, 板材挤出时弯弧稳定, 测得曲率半径为 2071 mm, 弯曲板材内外侧晶粒大小均匀。

**关键词:** 铝合金; 弯曲板材; 自弯曲成形; 关系推导; 机理分析; 优化设计

文章编号: 1004-0609(2021)-12-3508-12

中图分类号: TG379

文献标志码: A

**引文格式:** 闵范磊, 朱光明, 高绪杰, 等. 铝合金板材挤压自弯曲成形机理及模具优化设计[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3508–3519. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37638

MIN Fan-lei, ZHU Guang-ming, GAO Xu-jie, et al. Forming mechanism of extrusion self bending of aluminum alloy sheet profile and optimum design of die[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3508–3519. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37638

弯曲型材广泛应用于建筑、汽车、航空等制造领域。传统弯曲型材的成形工艺, 通常是先挤压后弯曲; 常用的弯曲加工方式主要有拉弯、绕弯和滚弯<sup>[1-3]</sup>, 在弯曲加工过程中, 易导致型材回弹、起皱、微裂纹、成形精度低等缺陷<sup>[4-7]</sup>; 传统弯曲加工方法的经验性较强, 成形缺陷也难以避免。

近年来, 在提高弯曲型材成形质量方面, 国内外学者开展了许多研究, 例如增设外部弯曲设备, 通过影响挤压模具出口处的材料流动, 使挤压弯曲一体化。KLEINER 等<sup>[8]</sup>提出了弯曲型材挤出工艺(CPE), 使金属挤压和弯曲连续进行, 从而提高弯曲型材的制造效率; MÜLLER<sup>[9]</sup>在挤压模后添加多个环形圆盘作为弯曲装置, 通过调整圆盘的位置, 实现了简单断面实心与空心型材的挤压弯曲一次

成形。另有研究通过改变模具结构, 使材料在挤压过程中发生不均匀流动, 型材挤出后自然弯曲成形, 此方法避免了传统弯曲加工造成的成形缺陷, 同时提高了制造效率。SHIRAISHI 等<sup>[10]</sup>利用倾斜导流腔结构的挤压模具, 挤压直接得到弯曲棒材和管材, 并研究了模具倾斜角、模具孔径高度和宽度对型材曲率的影响。弯曲管也可以通过多孔挤压(MHE)<sup>[11]</sup>形成, 此工艺基于模具的出口位置偏离对称中心轴的方法, 导致金属流动不均匀, 进而挤出弯曲型材。石磊等<sup>[12-13]</sup>通过在挤压模具内增设辅助挤压杆, 动态调控挤压过程中金属的不均匀流动, 实现了镁合金弯管件的挤出成形; ZHOU 等<sup>[14]</sup>通过差速侧向挤压工艺(DVSE), 使用两个相对的冲头直接一次性挤出弯曲管材。

**基金项目:** 山东省自然科学基金资助项目(ZR2017MEE036); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2017BEM003); 淄博市校城融合发展计划项目(2017ZBXC205); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME222)

**收稿日期:** 2019-11-07; **修订日期:** 2021-08-13

**通信作者:** 朱光明, 教授, 博士; 电话: 13853329826; E-mail: zgm@sdut.edu.cn

综上所述, 通过特殊的模具结构可以得到挤压弯曲的零件; 许多学者也研究了模具结构参数对弯曲曲率半径的影响。实际上, 挤压型材的曲率半径是由模具出口处的不均匀挤压速度分布决定的, 而出口速度分布与弯曲曲率半径之间的关系尚未建立, 自弯曲挤压模具也多凭经验设计, 所以, 自弯曲挤压成形工艺需要进一步理论化与量化, 以供深入的科学研究与实际工程应用。

本文通过连续介质力学理论, 对板材理想自弯曲挤出过程进行平面应力分析, 得到自弯曲挤出成型工艺下, 型材的挤出速度分布与自弯曲曲率半径的关系; 以板材自弯曲成形为例, 设计适用于板材自弯曲成形的挤压模具, 利用数值模拟手段, 分析自弯曲挤压的金属流动过程与成形机理; 利用响应面模型结合粒子群算法, 研究自弯曲挤压成形工艺的优化设计方法; 通过工业级实验制备出自弯曲铝合金板型材, 验证了模具结构的可行性与预测模型的可靠性。

### 1 板材自弯曲变形过程的数学模型

型材在模具出口处的挤出速度分布决定了挤出型材的形状, 所以挤出速度分布与型材的弯曲变形存在确定的函数关系; 当挤压模具能稳定挤出理想弯曲型材时, 挤出速度分布可以通过连续介质力学的方法求得。

通常在研究金属的塑性变形时, 体积力与面力相比可以忽略不计, 对于挤压自弯曲工艺, 金属挤出后在型材厚度方向无应力作用, 所以, 铝合金板材挤出自弯曲变形过程属于平面应力问题。

如图 1 所示, 在圆柱坐标系下, 挤出型材上微

$$\text{元体的应力张量如下: } \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_r & \tau_{r\theta} & 0 \\ \tau_{\theta r} & \tau_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 应变率}$$

$$\text{张量 } \dot{\epsilon}_{ij} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_r & \dot{\epsilon}_{r\theta} & 0 \\ \dot{\epsilon}_{\theta r} & \dot{\epsilon}_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 速度为 } \mathbf{v} = \mathbf{v}(v_r, v_\theta, 0)。$$

对微元体的动量方程为

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\tau_r - \tau_\theta}{r} \tag{1}$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} \tag{2}$$

连续性方程如下:

$$\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \tag{3}$$

应变率的几何方程如下:

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r} \tag{4}$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) \tag{5}$$

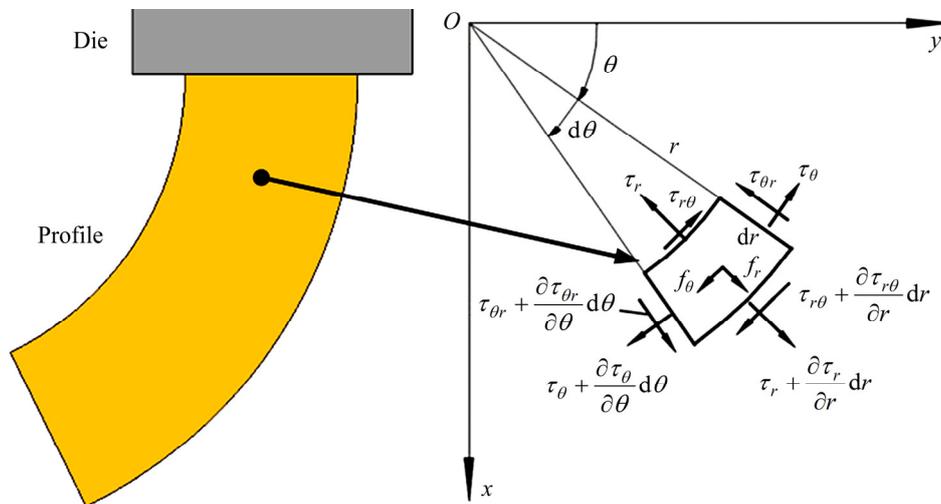


图 1 圆柱坐标系下型材上微元体的受力图

Fig. 1 Stress diagram of micro-element on profile in cylindrical coordinate system

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \dot{\epsilon}_{\theta r} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \quad (6)$$

式中： $\frac{DX}{Dt} = \frac{\partial X}{\partial t} + v_r \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial X}{\partial \theta}$ ， $X$ 为变量。

材料在塑性变形时，应变速率和流动应力之间的关系可用双曲正弦函数式的 Arrhenius 方程描述：

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\tau)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (7)$$

式中： $Q$ 为激活能； $R$ 为摩尔气体常数； $A$ 、 $n$ 和 $\alpha$ 为材料常数。

在稳定挤出标椎圆弧型材后，型材上质点的速度沿圆弧切线方向不再变化，所以，型材上质点的物质导数  $\frac{Dv}{Dt} = 0$ ，径向速度  $v_r = 0$ ，将此边界条件代入式(3)、(4)、(5)得到：

$$\dot{\epsilon}_r = 0, \quad \dot{\epsilon}_\theta = 0, \quad \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

由此可以知道，挤压稳定后型材在不同径向截面上质点的速度分布不变；然后由式(7)得

$$\tau_r = 0, \quad \tau_\theta = 0 \quad (9)$$

将此条件与  $\frac{Dv}{Dt} = 0$  代入式(1)、(2)、(7)得：

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = 0 \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)得：

$$v_\theta = C_1 r \quad (11)$$

式中： $C_1$ 为常数。

由式(11)可以看出，理想圆弧型材稳定自弯曲挤出时，型材径向质点的速度分布是线性的。

如图2所示，模具的出口速度分布是线性的，挤出型材内部的曲率半径为  $R$ ，型材内轮廓的挤压速度为  $v_{in}$ ，型材外轮廓的挤出速度为  $v_{out}$ ，型材的宽度为  $d$ ，所以出口速度分布的斜率为

$$K = \frac{v_{out} - v_{in}}{d} \quad (12)$$

理想弯曲条件下，型材内外侧具有相同角速度：

$$\frac{v_{out}}{d + R} = \frac{v_{in}}{R} \quad (13)$$

所以得：

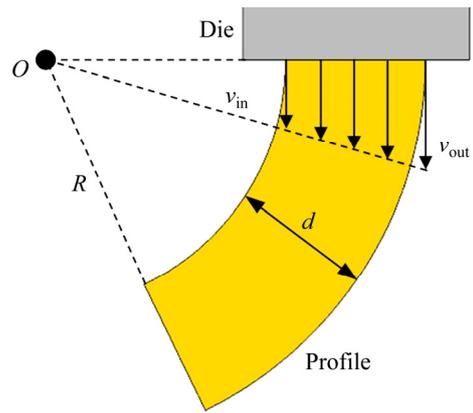


图2 板材理想自弯曲挤出的模具出口速度分布

Fig. 2 Die outlet velocity distribution of ideal self-bending extrusion forming of sheet profile

$$R = \frac{v_{in}}{K} \quad (14)$$

由式(14)可知，型材的自弯曲半径的大小受出口速度的均值和速度分布斜率的影响。挤出速度不均匀程度相同时，挤压比越大，即出口速度的均值越大，自弯曲半径越大；挤压比一定时，出口速度分布斜率越小，自弯曲半径越大，但在一定的模具结构条件下，挤出速度均值与速度分布的不均匀性存在耦合关系，挤压速度越大，挤压速度的不均匀性越明显，速度分布的斜率越大。所以，自弯曲曲率半径的大小需要从两方面综合考虑。同时出口速度分布的线性程度影响弯曲的精度，线性程度越高，型材的弯曲变形越接近标准圆弧。

## 2 板材自弯曲挤压成形模拟与分析

### 2.1 板材自弯曲挤压模具设计及有限元模型建立

本模拟以截面  $80 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  (宽度  $\times$  厚度) 的板材为研究对象。图3所示为板材自弯曲挤压模具结构。图3(a)所示为模具导流腔结构图，上下两侧轮廓呈一定倾斜角度  $\alpha$ ，在这里  $\alpha = 9.6^\circ$ ，挤压比  $\lambda = 20.7$ ，轮廓偏置厚度  $t = 5.5 \text{ mm}$ ，窄端宽度  $d = 20 \text{ mm}$ 。图3(b)所示为整个挤压模具结果示意图，包括导流板与挤压模。自弯曲挤压成形的有限元模型如图4所示。其中挤压杆、挤压筒、导流板、挤压模设置为刚体，坯料设置为塑性体，采用绝对网格控制法，在材料可能发生大变形的区域进行网格细化控制；坯料选用直径为  $120 \text{ mm}$  的 AA6063 铝合

金棒材, 坯料预热温度为 480 °C, AA6063 铝合金的应力应变本构关系参照文献[15]中的实验数据, 坯料与模具间采用剪切摩擦模型, 摩擦因子设置为 0.7, 坯料与工作带间采用库伦摩擦模型, 摩擦因子设为 0.3<sup>[15-19]</sup>, 具体挤压工艺参数如表 1 所示。

### 2.2 板材自弯曲挤压过程金属流动分析

通过有限元法计算后, 不同挤压阶段的金属流动行为如图 5 所示。整个自弯曲挤压变形过程, 在挤压杆的作用下, 坯料被压入模具, 开始填充模腔, 如图 5(a)所示。由于导流腔两端截面存在差异,

宽口侧金属流入量大, 导致导流腔内材料质点的流动速度不均匀, 宽口轮廓对应的模具出口速度较大, 由于金属的变形协调作用, 挤出的板型材向速度慢的一侧自然弯曲成形, 如图 5(b)所示。随着挤压行程的增加, 模具出口速度分布已达到稳定状态, 型材开始稳定挤出, 进入挤压稳定阶段, 如图 5(c)~(d)所示, 测得弯曲半径为 177.5 mm。

图 6 所示为挤出型材的速度分布与流线分布。稳定挤出后弯曲型材上速度分布如图 6(a)所示, 可以看出模具出口处的速度呈高度线性分布, 拟合得到速度分布斜率  $K=0.129$ , 由式(14)得  $R=165.9$  mm,

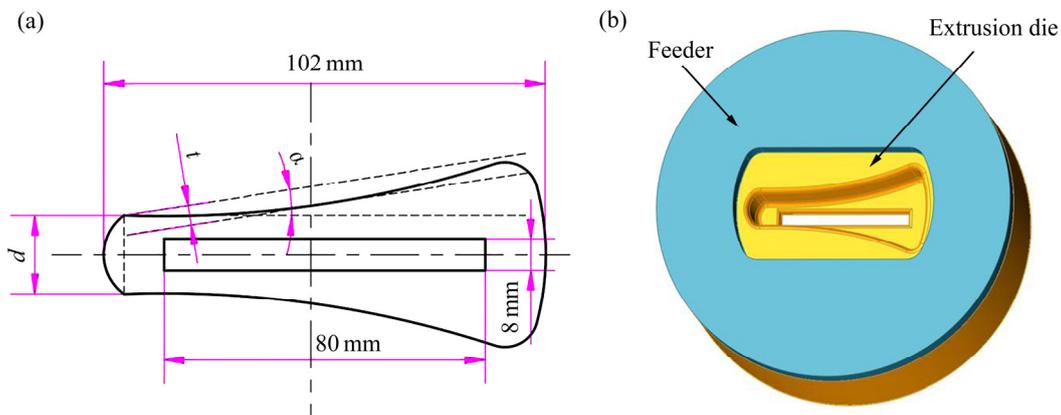


图 3 板材自弯曲挤压模具结构图

Fig. 3 Schematic diagram structure of self bending extrusion die for sheet profile: (a) Structure of cavity; (b) Self bending extrusion die

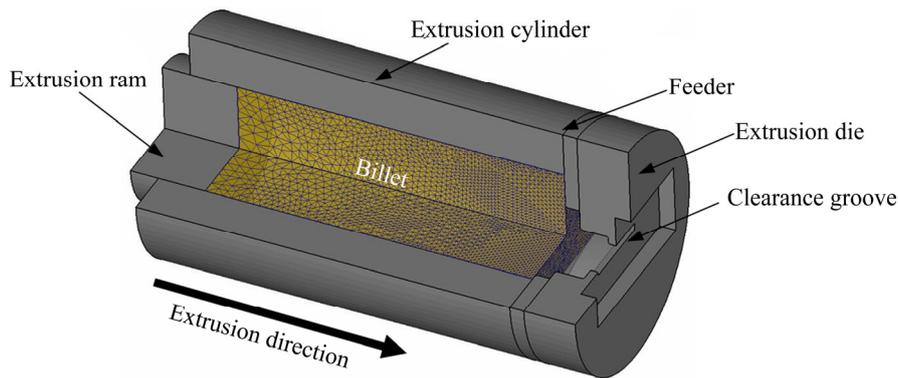


图 4 板材自弯曲挤压过程有限元模型

Fig. 4 Finite element model of self bending extrusion of sheet profile

表 1 挤压工艺参数

Table 1 Extrusion process parameters

Material	Billet diameter/mm	Extrusion ratio	Billet temperature/°C	Tool temperature/°C	Ram velocity/(mm·s <sup>-1</sup> )	Shear friction factor	Coulomb friction factor	Thermal conductivity/(N·s <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
AA6063	120	20.7	480	450	1.5	0.7	0.3	180.2

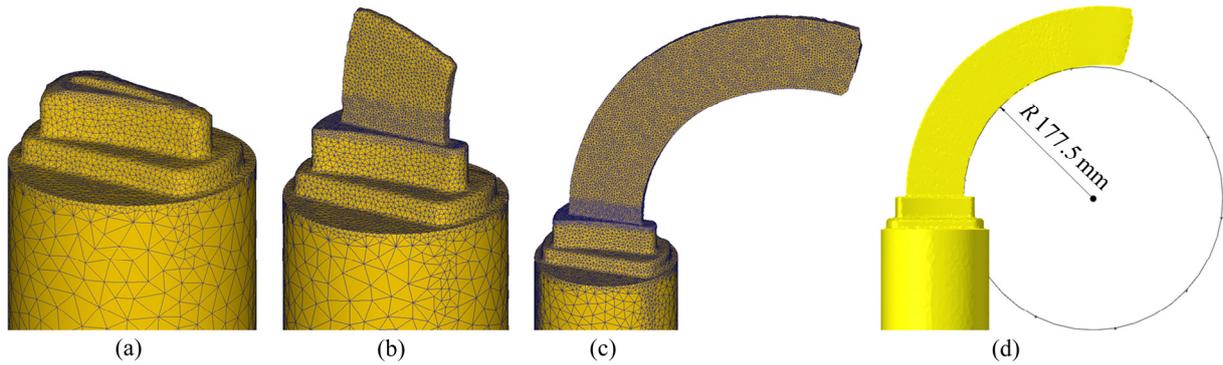


图5 板材挤压自弯曲变形过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing extrusion self bending process of sheet profile: (a) Billet filling stage; (b) Extrusion initial stage; (c) Extrusion stabilization stage; (d) Curvature radius measurement

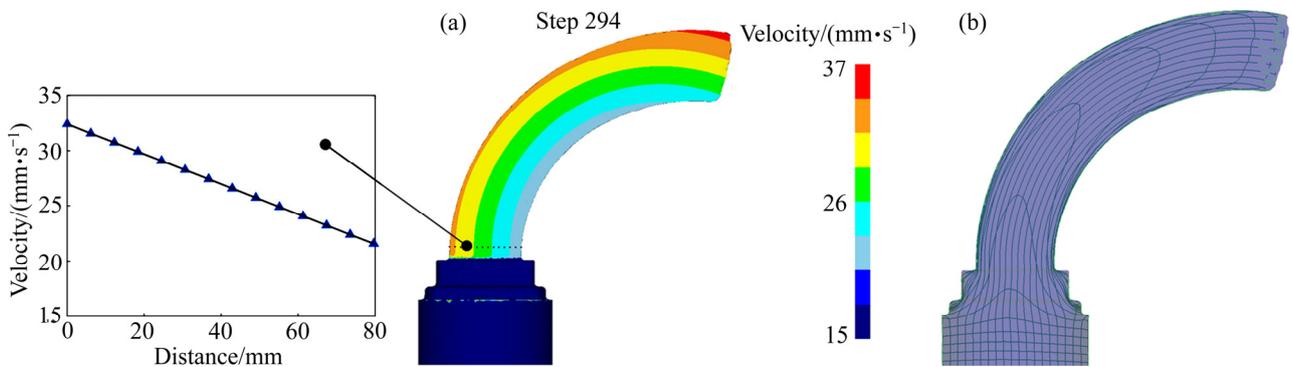


图6 挤出型材的速度分布与流线分布

Fig. 6 Velocity distribution and streamline distribution of extruded profiles: (a) Extrusion velocity distribution; (b) Material streamline distribution

与测量得到的弯曲半径相对误差为 6.54%，说明预测式(14)较为准确；出口速度的高度线性分布主要由模具结构所致，且金属的变形协调性也能促进金属由不均匀流动到速度线性分布的作用，所以自弯曲模具结构的设计具有一定的“设计弹性”。挤出稳定后材料的流线如图 6(b)所示，可以看出弯曲型材上的周向流线接近平行，除型材两端部分流线较密集，其他大部分流线间隔几乎相等，说明型材可以稳定挤出圆弧型型材而没有扭曲变形；由弯曲型材上的径向流线的突起峰略偏外侧，由此可知坯锭金属流向弯曲外侧比内侧多。

### 2.3 板材自弯曲成形机理分析

图 7(a)~(b)与图 8 所示分别为不同型材挤出时刻的应变速率云图，本文以应变率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  为界判定是否有塑性变形，进而分析板材自弯曲挤出成

形的机理。

挤压初期由于自弯曲挤压模具结构的特点，型材挤出速度分布不均匀，型材刚挤出后受内部剪切应力作用发生协调变形，形状向速度相对较小一侧弯曲，如图 7(a)所示。整个挤出型材在发生协调变形，在变形过程中内部剪切应力也随之削弱；随着型材不断挤出并弯曲变形，如图 8(a)~(c)所示。挤出一段时间后，型材的内应力消减至不足以发生剪切变形，型材截面速度不再发生变化，此段型材不再发生内部金属的协调变形，协调变形区迅速缩减至模具出口后一段距离，如图 7(b)所示。挤压进入稳定阶段，此后型材挤出总是由后面的金属推动前面，发生刚性平移，如图 7(c)所示为 Avrami 模型所得到的挤压件残余应变的中剖面图，削弱后的内应力以残余应力的形式储存在前段型材中。

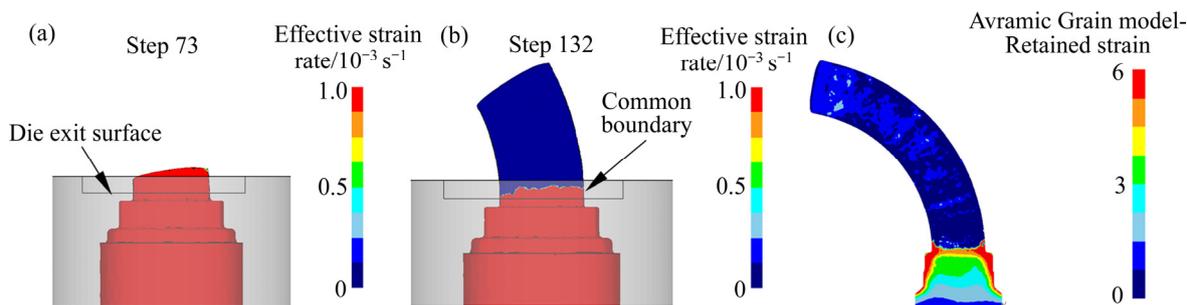


图 7 挤压的不同阶段与残余应变

Fig. 7 Different stages of extrusion and residual strain: (a) Extrusion initial stage; (b) Begin to stabilize stage; (c) Residual strain after stabilization

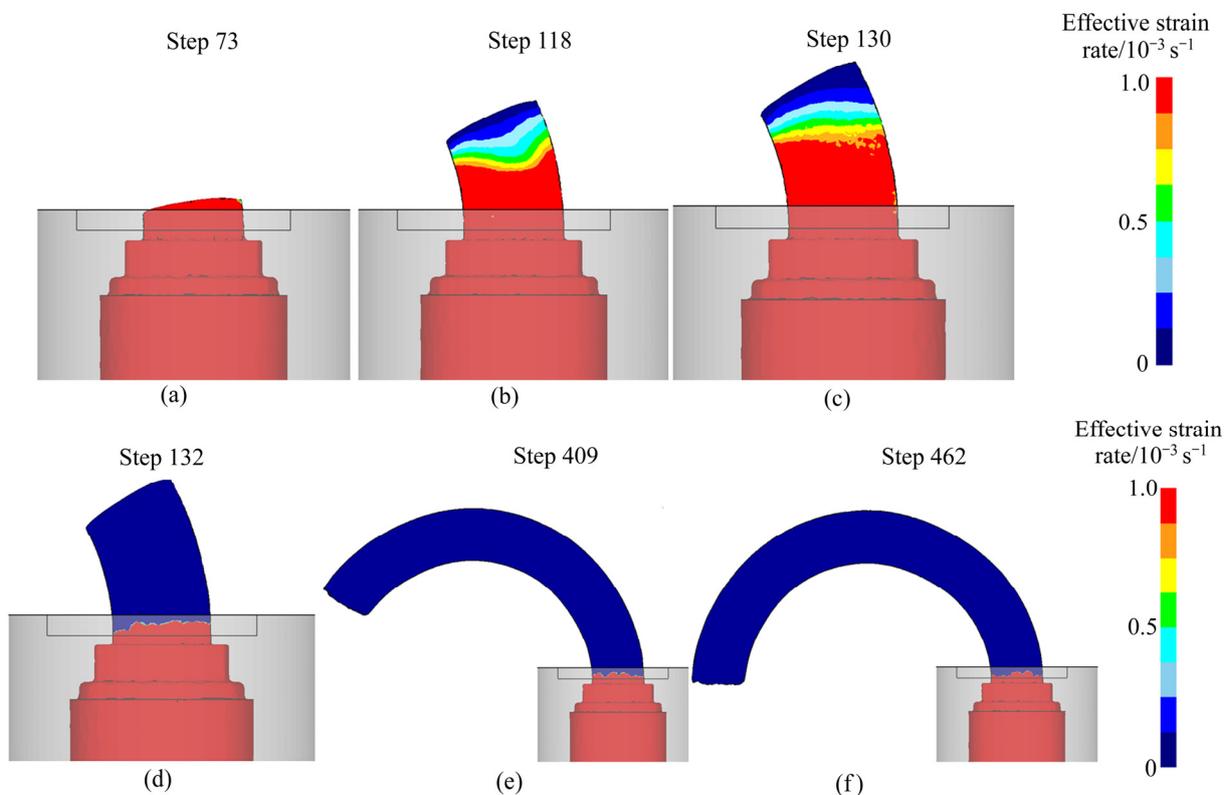


图 8 整个板材自弯曲挤压成形过程

Fig. 8 Schematic diagram showing process of self bending extrusion of sheet profile: (a) Step 73; (b) Step 118; (c) Step 130; (d) Step 132; (e) Step 409; (f) Step 462

挤出到一定阶段后, 因前端挤出型材的内应力不足以发生塑性变形, 所以材料的形状不再改变, 只做刚性转动; 在模具出口附近的材料与定型段型材之间存在一个变形区与非变形区的交界, 从模具出口端到此交界处为塑性变形区, 此交界前段的型材为刚性转动区; 如图 7(b)所示, 此交界大致在模具出口挤出后一小段距离上, 挤压过程中协调变形区保持相对稳定, 因此型材的挤出与弯曲较为稳

定, 如图 8(d)~(f)所示。

### 3 自弯曲挤压模具结构优化设计

#### 3.1 拉丁超立方试验设计

现自弯曲挤压模具的设计, 多用于定性分析工艺的可行性, 通过指定型材弯曲半径进行逆向设计自弯曲挤压模具结构的研究较少, 本文将优化算法

应用于自弯曲挤压成形的工艺优化设计,通过指定型材弯曲半径利用上文中的数学模型,优化模具结构参数。

式(14)已经建立了弯曲半径与出口速度分布参数的关系,而且其预测效果也较为可靠,所以,式(14)可以作为自弯曲模具设计的目标函数;由式(14)和板材自弯曲成形机理可知,只需由挤压稳定时的出口速度分布,即可预测型材的自弯曲曲率半径,而挤压大变形数值模拟算法中,有限体积法多用于求解挤压稳态过程,其求解计算效率比有限元法至少提高3倍<sup>[20-22]</sup>,所以,在模具优化设计中可以采用有限体积法进行数值模拟<sup>[23]</sup>,再进一步通过式(14)做出预测,进而缩短研发周期。

本文以弯曲半径1900 mm的板材为优化目标,结合响应面模型,对模具结构与挤压速度的优化设计,提取模具结构因子 $\alpha$ 、 $d$ 与挤压速度 $v$ 作为优化变量,其他模具尺寸按图3设计,试验所选因素与取值范围如表2所示;通过设计拉丁超立方随机抽样<sup>[24-25]</sup>程序,得到20组模拟试验方案,计算挤压稳态过程,得到各组试验下的仿真结果(见表3),各组模具出口处金属的挤出速度分布如图9所示。

### 3.2 响应面结合粒子群算法优化

选择二阶响应曲面方程来预测不同设计变量组合下的响应值,利用最小二乘法进行参数拟合,由表3的仿真试验数据得到的响应面函数为

$$\begin{aligned} \tilde{R} = & 4763.92 - 342.6\alpha - 319.30d - 138.4v + \\ & 3.81\alpha d - 1.43\alpha v + 4.82dv + 11.61\alpha^2 + \\ & 8.21d^2 + 4.78v^2 \end{aligned} \quad (15)$$

定义模型的决定系数 $\beta$ 为

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{20} (\tilde{R}_i - \bar{R})^2}{\sum_{i=1}^{20} (R_i - \bar{R})^2}$$

式中: $\tilde{R}_i$ 为响应面模型的预测值; $R_i$ 为型材弯曲半径值; $\bar{R}$ 为型材弯曲半径值的平均值;决定系数 $\beta$

表2 优化变量与取值范围

Variable	$\alpha/(\text{°})$	$d/\text{mm}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
Value range	3-9	20-35	1-10

表3 模拟试验结果表

Test No.	$\alpha/(\text{°})$	$d/\text{mm}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$K$	$R/\text{mm}$
1	5.56	34.57	2.57	0.020	2904.62
2	6.54	25.76	5.20	0.136	898.12
3	4.53	30.16	8.67	0.080	2439.08
4	3.67	26.21	6.52	0.118	1348.72
5	5.14	20.09	3.97	0.348	481.28
6	5.01	23.96	5.58	0.191	857.71
7	7.30	28.24	3.19	0.055	1422.33
8	7.00	24.74	9.52	0.273	851.71
9	6.86	22.67	9.96	0.415	646.07
10	3.48	33.92	7.23	0.037	3870.1
11	3.22	31.16	2.20	0.017	2102.9
12	5.78	31.39	3.56	0.034	2213.78
13	4.41	23.51	1.89	0.076	851.17
14	8.43	27.32	6.16	0.111	1274.36
15	8.75	32.49	7.71	0.073	2553.27
16	4.08	33.22	8.58	0.054	3423.9
17	7.65	29.34	4.32	0.060	1208.11
18	8.19	21.83	4.66	0.258	251.46
19	6.05	28.70	1.01	0.017	1480.04
20	7.92	21.20	7.94	0.465	269.5

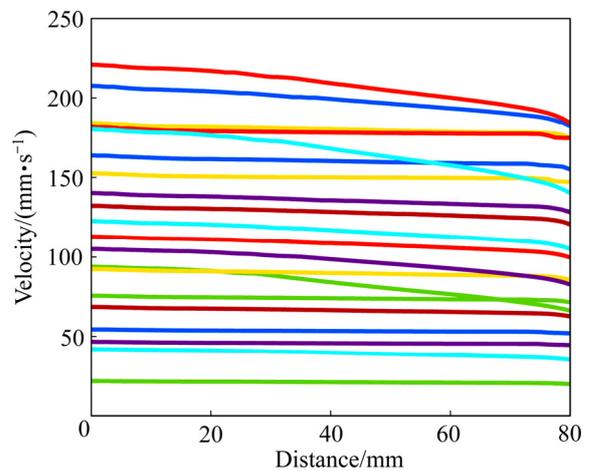


图9 各抽样试验的模具出口速度分布

Fig. 9 Velocity distribution of extrusion die exit in sampling test

的大小能反映响应面模型对试验观测值的拟合程度, $\beta$ 的取值范围为[0, 1]; $\beta$ 的值越接近1,说明响应面模型的拟合程度越好。采用计算模型得到决定系数 $\beta=0.95$ ,说明该响应面模型具有较好的预测效果。

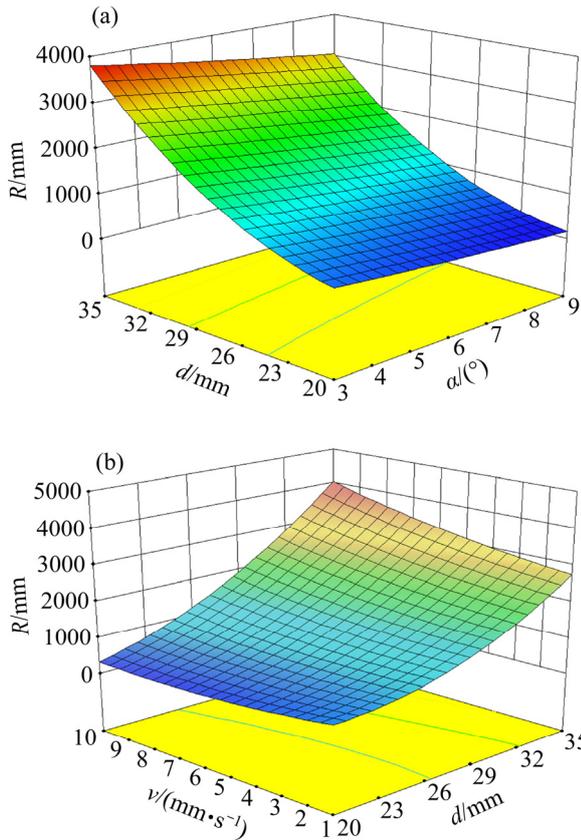


图 10 变量与板材弯曲半径的响应面  
**Fig. 10** Response surface of variable and sheet bending radius: (a) Influence of inclination angle and width on bending radius of sheet profile; (b) Influence of extrusion velocity and width on bending radius of sheet profile

各变量对板材弯曲半径响应面模型的三维曲面图如图 10 所示。由图 10(a)可知, 板材的弯曲半径随窄端宽度  $d$  的增大而增大, 随轮廓倾斜角  $\alpha$  的增大而减小, 这是因为窄端宽度  $d$  的减小和轮廓倾斜角  $\alpha$  的增大均会增大金属流动的不均匀性, 导致挤出速度分布梯度大, 进而板材弯曲会减小; 由图 10(b)可知, 当窄端宽度  $d$  较大时, 板材弯曲半径  $R$  随挤压速度  $v$  的增大而增大, 当窄端宽度  $d$  较小时, 挤压速度  $v$  对板材弯曲半径  $R$  无显著影响, 虽然增大窄端宽度  $d$  会减小金属流动的不均匀性, 使弯曲半径增大; 但挤压速度的增加又会增大金属流动流动的不均匀性, 同时由式(9)可知, 平均挤出速度的大小也对型材的自弯曲半径有影响, 所以 3 种因素的相互作用决定了板材弯曲半径的大小。

采用粒子群优化算法<sup>[26]</sup>对所建立的响应面模型进行快速寻优, 当板材的目标弯曲半径为 1900

mm 时, 板材弯曲半径容差范围定为(1900, 1905), 将该约束条件以罚函数形式加到目标函数后面, 使最优解限定于(1900, 1905)区间内。本次优化迭代, 设置初始种群粒子数为 30 个, 学习因子为 1.2, 最大迭代次数为 200 次。进化迭代次数与适应度值之间的关系如图 11 所示, 迭代 67 次后粒子达到最佳位置。得到最优参数组合为轮廓倾斜角  $\alpha=5.02^\circ$ , 窄端宽度  $d=30.55$  mm, 挤压速度  $v=3.69$  mm/s, 最优解为  $R=1900$  mm。

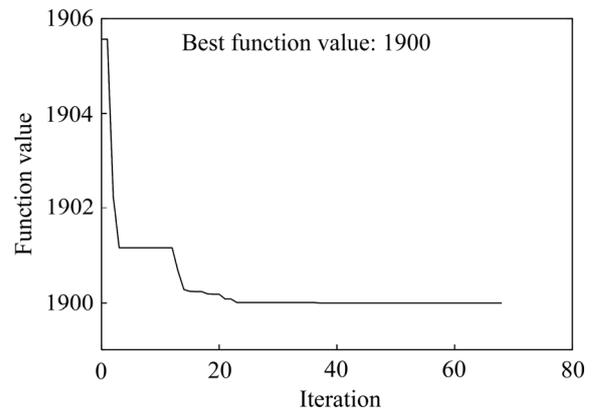


图 11 优化迭代曲线  
**Fig. 11** Optimize iteration curve

### 3.3 试模实验与金相组织观察

对优化之后的模具结构与挤压速度的最优参数组合, 设计自弯曲挤压模具, 并进行加工试模, 所得工业级挤压模具如图 12 所示; 挤压铝锭的材料与尺寸、挤压温度参照表 1 列出的数值, 对铝锭预热 3 h 后, 采用 1000 T 正向单动挤压机进行挤压试模实验, 结果如图 13 所示。由图 13 可以看出, 在挤压过程稳定后, 挤出的板材能够发生稳定的自弯曲变形, 得到板材的弯曲曲率半径为 2071 mm, 与响应面模型的预测值相差 8.25%, 说明该响应面预测模型较为可靠。

对挤出后弯曲板材宽面的内外两侧进行金相组织观察, 采用电解抛光同时附加超声波震动的方法, 抛光液为体积分数 15% 的高氯酸与无水乙醇混合溶液, 体积比为 1:5(10 mL:50 mL), 直流电压为 5 V, 抛光时间为 1 min, 采用 IE200M 型光学显微镜进行微观组织观察, 利用平均截线法多视场表征挤出方管弯曲件的平均晶粒尺寸  $s(s=1.74y, y$  为截线长度)<sup>[11]</sup>, 得到如图 14 所示的金相组织。由图 14 可知, 内外两侧均为等轴晶组织, 外侧板材晶粒大

小为  $85\ \mu\text{m}$  左右, 内侧板材晶粒大小为  $75\ \mu\text{m}$  左右, 可以看出晶粒组织尺寸略微偏大, 这可能是由于挤压温度过高和未及时冷却的原因所造成的。

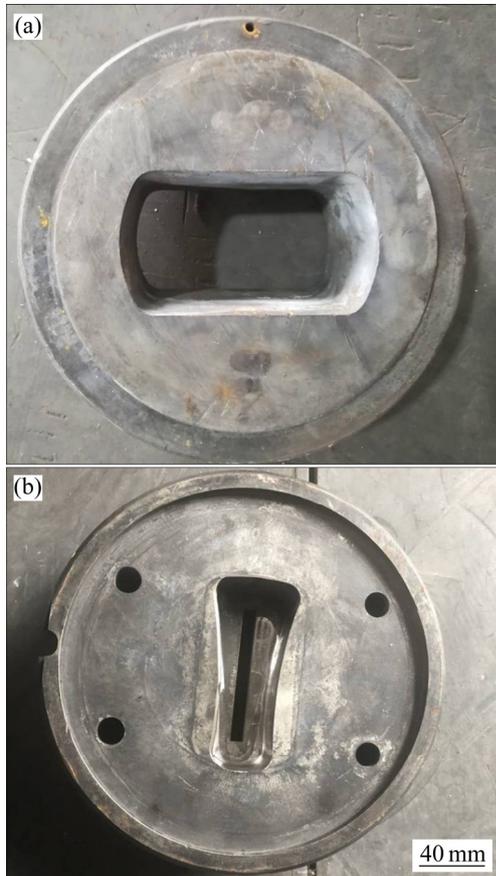


图 12 板材自弯曲挤压实验模具

Fig. 12 Experimental die for sheet profile self bending extrusion: (a) Deflector plate; (b) Deflector die



图 13 工业级挤压试验获得的弯曲板材

Fig. 13 Bending profile obtained by industrial grade extrusion experiment

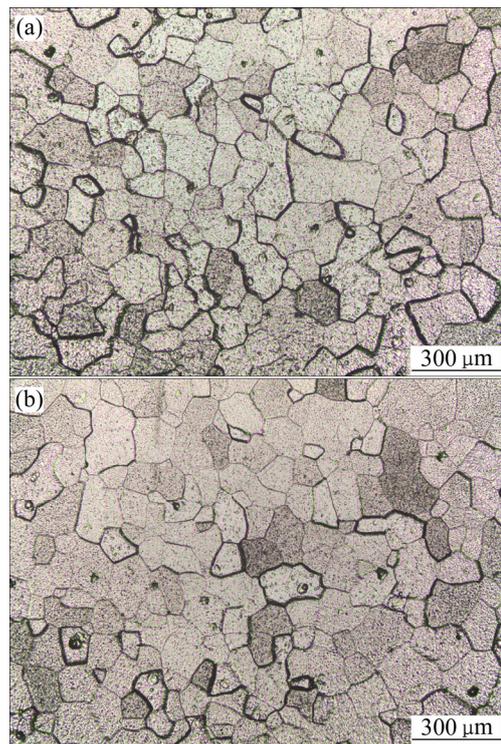


图 14 板材内外侧金相组织

Fig. 14 Metallographic structures of inner and outer sides of sheet profile: (a) Outside of sheet profile; (b) Inside of sheet profile

## 4 结论

1) 对于型材自弯曲挤压成形, 挤出型材的弯曲半径与出口速度存在函数关系, 通过连续介质力学的平面应力分析得到理想自弯曲挤出型材的曲率半径与挤出速度分布的函数关系为  $R = \frac{V_{in}}{K}$ 。

2) 通过基于异形导流腔结构, 提出了一种板材自弯曲挤压成形工艺, 得到自弯曲挤出成形的板材; 型材刚挤出时, 整个挤出型材在发生协调变形, 挤压稳定后协调变形区迅速缩减至模具出口后一段距离, 型材大部分不再发生塑性变形, 变形区与非变形区的交界在模具出口后一小段距离上, 并随挤压的进行交界面略有波动, 且挤出的型材附带残余应力。

3) 带罚函数形式的目标函数, 结合响应面模型与粒子群算法, 可用于型材自弯曲挤压成形的优化设计; 通过工业级挤压实验, 得到了弯曲板材, 板材在挤出后发生稳定自弯曲, 挤出型材组织均匀, 为自弯曲模具的研发设计提供理论与技术参考。

## REFERENCES

- [1] 刘志文, 李落星. 轻量化构件弯曲短流程工艺研究现状与进展[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8): 2003–2012.  
LIU Zhi-wen, LI Luo-xing. Review of bending short process for lightweight component[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(8): 2003–2012.
- [2] ZHAI R X, DING X H, YU S M, et al. Stretch bending and springback of profile in the loading method of prebending and tension[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 144: 746–764.
- [3] 张 弥, 王晓东, 苏亚东, 等. 钛合金点阵夹芯结构弯曲性能[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 457–464.  
ZHANG Mi, WANG Xiao-dong, SU Ya-dong, et al. Bending behavior of titanium truss core sandwich structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(3): 457–464.
- [4] 陈清根, 徐雪峰, 马媛媛, 等. 采用小弯曲半径弯头反向推直与正向推弯的管坯设计方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(3): 353–358.  
CHEN Qing-gen, XU Xue-feng, MA Yuan-yuan, et al. Tube design method with small bend radius in elbow forming using reverse push straight and forward forming simulation[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(3): 353–358.
- [5] 朱英霞, 刘郁丽, 杨 合, 等. 压块对 H96 矩形管绕弯成形回弹与截面变形的作用[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(1): 104–114.  
ZHU Ying-xia, LIU Yu-li, YANG He, et al. Impact of pressure die on spring back and section deformation of rotary-draw bending of rectangular H96 tube[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1): 104–114.
- [6] YANG H, LI H, ZHANG Z Y, et al. Advances and trends on tube bending forming technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 1–12.
- [7] 张 弥, 王晓东, 苏亚东, 等. 钛合金点阵夹芯结构弯曲性能[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 457–464.  
ZHANG Mi, WANG Xiao-dong, SU Ya-dong, et al. Bending behavior of titanium truss core sandwich structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(3): 457–464.
- [8] KLEINER M, ARENDES D. The manufacture of non-linear aluminum sections applying a combination of extrusion and curving[J]. Advanced Technology of Plasticity, 1996(2): 971–983.
- [9] MÜLLERKLAUS B. Bending of extruded profiles during extrusion process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(11): 1238–1242.
- [10] SHIRAIISHI M, NIKAWA M, GOTO Y. An investigation of the curvature of bars and tubes extruded through inclined dies[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(15): 1571–1578.
- [11] CHEN F K, CHUANG W C, SHAN T. Finite element analysis of multi-hole extrusion of aluminium alloy tubes[J]. Journal of materials processing technology. 2008, 201: 150–155.
- [12] 石 磊, 徐国辉, 任 畅, 等. 动态流量控制法挤出镁合金三维弯曲管件[J]. 材料科学与工艺, 2016(6): 8–13.  
SHI Lei, XU Guo-hui, REN Chang, et al. Three dimensional magnesium alloy bent pipe produced by dynamic flow control extrusion[J]. Materials Science and Technology, 2016(6): 8–13.
- [13] 石 磊, 文九巴, 姚 怀, 等. 钛合金弯管动态流量控制法挤压成形的模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(2): 380–387.  
SHI Lei, WEN Jiu-ba, YAO Huai, et al. Numerical simulation and experimental study of titanium alloy bending tube extruded by dynamic flow control technique[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(2): 380–387.
- [14] ZHOU W B, LIN J G, TREVOR A, et al. Feasibility studies of a novel extrusion process for curved profiles: Experimentation and modelling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 126: 27–43.
- [15] YU J Q, ZHAO G Q, CHEN L. Analysis of longitudinal weld seam defects and investigation of solid-state bonding criteria in porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 31–47.
- [16] JIE Y I, WANG Z H, LIU Z W, et al. FE analysis of extrusion defect and optimization of metal flow in porthole die for complex hollow aluminium profile[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28: 2094–2101.
- [17] 黄东男, 李静媛, 张志豪, 等. 方形管分流模双孔挤压过程中金属的流动行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3):

- 488–495.
- HUANG Dong-nan, LI Jing-yuan, ZHANG Zhi-hao, et al. Metal flowing behaviors during diplopore extrusion of square tube with porthole die[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(3): 488–495.
- [18] 王晓溪, 张翔, 金旭晨, 等. 新型等通道球形转角膨胀挤压过程模拟与实验验证[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(11): 2281–2287.
- WANG Xiao-xi, ZHANG Xiang, JIN Xu-chen, et al. Simulation and experimental validations of novel process entitled equal channel angular expansion extrusion with spherical cavity[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(11): 2281–2287.
- [19] 王晓溪, 张翔, 张磊, 等. 工业纯铝等通道球形转角挤压数值模拟与实验研究[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(7): 1360–1366.
- WANG Xiao-xi, ZHANG Xiang, ZHANG Lei, et al. Numerical simulation and experimental investigation of commercially pure aluminum during equal channel angular extrusion with spherical cavity[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(7): 1360–1366.
- [20] LI X R, FANG W L, TANG D, et al. Numerical simulation on hot extrusion forming of aluminum alloy micro-multiport profile[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24(5): 1–6, 31.
- [21] BRESSAN J D, MARTINS M M, BUTTON S T. Analysis of aluminium hot extrusion by finite volume method[J]. *Materials Today Proceedings*, 2015, 2(10): 4740–4747.
- [22] 张侠, 钱进浩, 龚小涛, 等. 6061 铝合金灯具散热底座芯轴挤压成形研究[J]. *锻压技术*, 2020, 45(1): 125–130.
- ZHANG Xia, QIAN Jin-hao, GONG Xiao-tao, et al. Research on extrusion forming of 6061 aluminum alloy spindle for lamp cooling holder[J]. *Forging and Stamping Technology*, 2020, 45(1): 125–130.
- [23] BRESSAN J, MARTINS M, BANDINI C. Validation of finite volume Method by hot extrusion analysis of aluminium alloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 10: 234–241.
- [24] FANG W L, TANG D, WANG H M, et al. Optimization of die design for thin-walled flat multi-port tube with the aid of finite element simulation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 277: 116418.
- [25] KEVIN B, PAMELA B, DIANE D, et al. Populations of models, experimental designs and coverage of parameter space by latin hypercube and orthogonal sampling[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 51: 1762–1771.
- [26] 任助理, 王李管, 贾明涛. 基于粒子群优化算法和 ANFIS 的矿体品位插值[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(1): 194–202.
- REN Zhu-li, WANG Li-guan, JIA Ming-tao. Grade interpolation of orebody based on particle swarm optimization algorithm and ANFIS[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(1): 194–202.

## Forming mechanism of extrusion self bending of aluminum alloy sheet profile and optimum design of die

MIN Fan-lei, ZHU Guang-ming, GAO Xu-jie, YUE Bo-wen, LIU Hui-ping, GUO Na-na, ZHAI Xiao-qing

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** Based on the theory of continuum mechanics, the relationship between the exit velocity distribution and the radius of curvature of the plate during the ideal self-bending process is obtained. A new process for the self-bending extrusion of aluminum alloy plates was proposed. By designing the structure of special-shaped guide cavity, the uneven flow of metal in the die cavity was produced, so the bent profile is directly extruded. By using numerical simulation, the self bending deformation mechanism, metal flow characteristics and distribution of residual strain in the process of sheet profile extrusion were analyzed. The response surface prediction model of each variable to the radius of curvature of extrusion self bending was established by using the Latin hypercube sampling method and the finite volume method. Under the condition of a specified bending radius of 1900 mm, an objective function optimization model with a penalty function was established. The algorithm obtains the optimal cavity structure and process parameters, and conducts trial experiments. The experimental results show that the self-bending sheet extrusion is stable, the measured radius of curvature is 2071 mm, the grain size inside and outside of the curved sheet is uniform.

**Key words:** aluminum alloy; bending sheet profile; self bending forming; relation derivation; mechanism analysis; optimal design

---

**Foundation item:** Project(ZR2017MEE036) supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China; Project(ZR2017BEM003) supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China; Project(2017ZBXC205) supported by Zibo City School City Integration Development, China; Project(ZR2021ME222) supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China

**Received date:** 2019-11-07; **Accepted date:** 2021-08-13

**Corresponding author:** ZHU Guang-ming; Tel: +86-13853329826; E-mail: zgm@sdut.edu.cn

(编辑 龙怀中)