



方管铝型材自弯曲挤压工艺

闵范磊¹, 朱光明¹, 常 征², 岳博文¹, 郭娜娜¹, 王宗申¹, 杨振宇¹, 翟晓庆¹

(1. 山东理工大学 机械工程学院, 淄博 255049;

2. 山东理工大学 计算机科学与技术学院, 淄博 255049)

摘 要: 提出一种方管自弯曲挤压新工艺, 通过设计倾斜分流桥结构, 使金属在型腔内产生不均匀流动, 从而直接挤出弯曲方管型材。利用外部网格重构方法, 实现金属在型腔内分流焊合过程的模拟分析, 得到自弯曲挤压过程金属流动规律、等效应力应变场分布; 研究分流桥倾斜角和挤压速度对方管型材自弯曲成形性的影响, 并通过挤压实验制备出自弯曲方管。结果表明: 自弯曲模具结构可挤出形状规则、曲率一致的弯曲方管件, 型材应力应变分布均匀, 随分流桥倾斜角或挤压速度的增加, 型材曲率半径呈非线性递减, 挤压后弯曲方管的上表面、侧面和下表面的晶粒均匀且为等轴晶, 晶粒尺寸分别为 64.3、61.7 和 58.3 μm 。

关键词: 分流焊合模拟; 自弯曲挤压成形; 倾斜分流桥; 型材微观组织

文章编号: 1004-0609(2020)-09-2032-09

中图分类号: TG379

文献标志码: A

弯曲管型材广泛应用于机械、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^[1], 此类加工方式模具简单, 工艺较成熟, 但弯曲加工易导致型材成形缺陷, 如拉弯工艺存在底部起皱、贴模差、成形精度低等缺陷^[2]; 绕弯工艺的弯曲曲率不均匀, 成形精度较低^[3]; 滚弯工艺的回弹半径大, 需多次成形和反复校正, 且易出现内层起皱、内陷等问题^[4]。因此, 传统弯曲加工方法带有较强的经验性, 并且成形缺陷较多。

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: 一种方法是增设外部弯曲设备, 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^[5]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^[6]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“Z”型材与管材的挤压弯曲一次成形。另一种方法是通过改变模具结构, 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。石磊等^[7]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; KAYA 等^[8]通过在挤压模具出口处增设阻流销, 以控制材料在此处的不均匀流动, 并由计算机控制阻流销位置, 实现了不同弯曲曲率陶瓷管的挤出成形; ZHOU 等^[9]通过差速侧向挤压工艺(DVSE), 使用两个相对的冲头直接一次挤出弯曲管材。但这两种方法需要设计专门的挤压设备与装置, 且模具设计难度大, 一定程度上限制了其应用与推广。

本文提出一种方管自弯曲挤压新工艺, 该工艺可用于传统挤压设备, 通过将分流桥倾斜设置的方法, 改变了挤压模具的分流结构, 使金属在挤压过程中产生稳定可控的不均匀流动, 从而实现方管的自然弯曲成形; 利用数值模拟, 分析自弯曲挤压过程金属流动行为、等效应力应变场分布, 研究分流桥倾斜角和挤压速度对方管型材自弯曲成形性的影响, 通过现场试验, 制备出了自弯曲方管型材, 并分析了不同部位的组织形态及晶粒度。

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2017E MM036); 山东省自然科学基金博士基金资助项目(ZR2017BEM003); 淄博市校城融合发展计划项目(2017ZBXC205)

收稿日期: 2019-08-26; **修订日期:** 2020-04-30

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

1 研究方法

1.1 斜分流桥方管自弯曲挤压成形工艺

图 1 所示为方管自弯曲挤压模具结构示意图。图 1(a)所示为模具剖视图, 分流桥呈一定倾斜角度 α ; 图 1(b)所示为分流孔的分布形态。整个自弯曲挤压成形过程如图 2 所示。在挤压杆的作用下, 坯料被压入

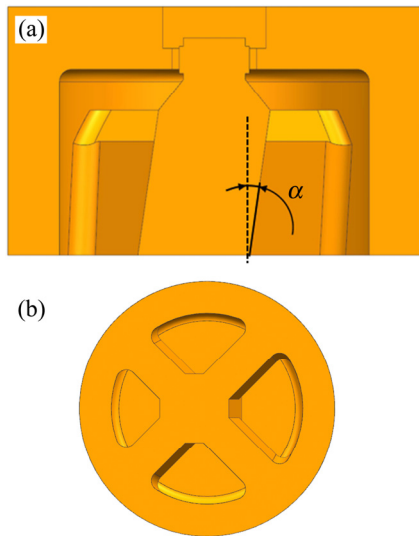


图 1 自弯曲挤压模具结构图
Fig. 1 Structural diagrams of self-bending extrusion die: (a) Section view of die; (b) Distribution of portholes

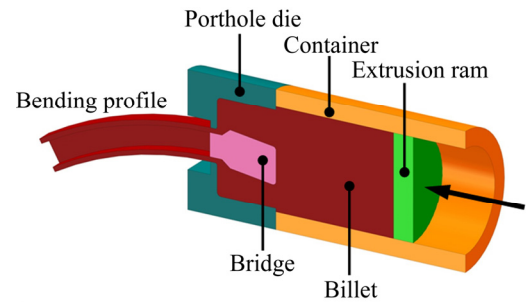


图 2 自弯曲成形过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of self-bending extrusion process

模具, 由于分流桥倾斜, 各分流孔入口截面积存在差异, 导致型材挤出速度呈梯度分布, 从而使方管自然弯曲成形。

1.2 数值模拟中的网格重构技术

本文采用拉格朗日增量算法进行模拟, 在分流焊合过程中, 焊合区网格会发生穿透, 导致模拟无法继续^[10]。为此, 需先对穿透网格进行修补与重构, 再继续执行运算。整个分流焊合过程如图 3 所示。因分流孔金属流量不同, 流量大的一侧先形成焊合面, 流量小的一侧后形成焊合面, 故需要两次网格修补, 如图 3 所示。图 3(a)~(e)所示分别为金属进入分流孔、第一次焊合面形成、第一次网格重构、第二次焊合面形成以及第二次网格重构后的网格分布图。

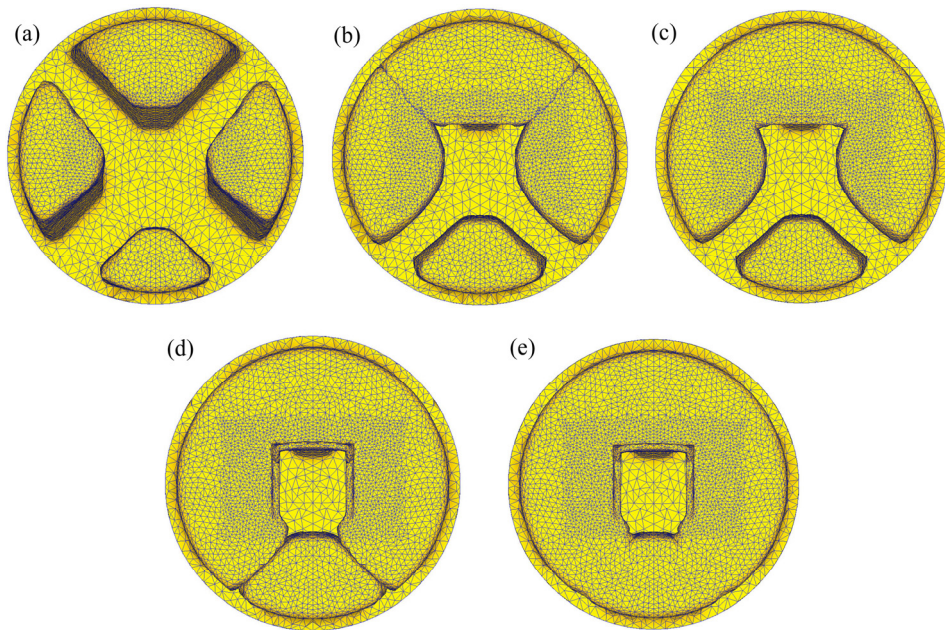


图 3 金属的分流焊合与网格重构过程
Fig. 3 Metal shunt welding process and mesh reconstruction: (a) Metal flow into shunt hollows; (b) First welding; (c) First repair of penetrating mesh; (d) Second welding; (e) Second repair of penetrating mesh

1.3 挤压实验与金相观察

实验材料选用 AA6063 铝合金铸锭，其化学成分^[11]如表 1 所示。为消除铸造组织的偏析，提高合金成分的均匀性和塑性，对 AA6063 铝合金铸锭在 480 ℃下进行 6 h 的均匀化处理，挤压筒预热温度为 470 ℃，模具预热温度为 460 ℃。

表 1 AA6063 铝合金的化学成分^[11]

Table 1 Chemical composition of AA6063 aluminum alloy (mass fraction%)^[11]

Si	Fe _{max}	Cu _{max}	Mn _{max}	Mg
0.2–0.6	0.35	0.10	0.10	0.45–0.90
Cr _{max}	Zn _{max}	Ti _{max}	Al	
0.10	0.10	0.10	Bal.	

采用 1000T 正向单动挤压机进行挤压试验。对挤出的方管弯曲件，采用电解抛光法进行金相组织观察，抛光液为 15%(体积分数)的高氯酸与无水乙醇的混合溶液，体积比为 10:50，直流电压为 10 V，抛光时间为 3 min，采用 IE200M 型光学显微镜进行微观组织观察^[12]，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 $d(d=1.74L, L$ 为截线长度)。

2 数值模拟模型

本模拟以 $L50\text{ mm}\times t3\text{ mm}$ (其中 L 表示边长， t 表示厚度)的方管为研究对象，坯料选用直径为 140 mm 的 AA6063 铝合金棒材，模具材料选用 H13 模具

钢，其物理性能^[11, 13]如表 2 所示。挤压比为 27.3，坯料预热温度为 480 ℃，AA6063 铝合金的应力应变本构关系参照文献[11]中的实验数据，坯料与模具间采用剪切摩擦模型，摩擦因数设置为 0.7，坯料与工作带间采用库伦摩擦模型，摩擦因数设为 0.3^[11–14]，建立型材挤压过程的有限元模型，如图 4 所示。有限元模型包括挤压垫片、挤压筒、坯料、倾斜分流桥、分流组合模具，为提高计算效率，按照对称性对整个模型的 1/2 进行模拟^[15–17]。所有组件均划分为四面体单元^[18–23]。

首先研究挤压过程中的金属流动特点，分析挤压稳定后的等效应力、等效应变和残余应力的分布，然后将分流桥倾斜角分别设置为 3.3°、4.9°、6.5°、8.1° 和 11.3°，挤压速度分别设置为 0.5、1 和 5 mm/s，研究分流桥倾角和挤压速度，对方管型材自弯曲成形性的影响规律。挤压工艺参数如表 3 所示。

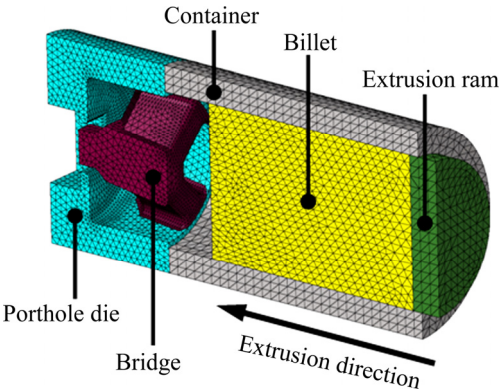


图 4 型材挤压过程的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of profile extrusion process

表 2 坯料与挤压工模具材料的物理性能

Table 2 Physical properties of materials used for billet and extrusion tools

Material	Elastic modulus/Pa	Poisson's ratio	Density/(kg·m ⁻³)	Thermal conductivity/(N·s ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	Heat capacity/(N·mm ⁻² ·℃ ⁻¹)
AA6063	6.9×10^{10}	0.33	2700	180.2	2.27
H13	2.1×10^{11}	0.30	7760	28.4	5.6

表 3 有限元模拟过程工艺参数

Table 3 Process parameters used in numerical simulation

Billet temperature/℃	Tool temperature/℃	Extrusion ratio	Shear friction factor	Coulomb friction factor	Inclination angle of shunt bridge/(°)	Ram velocity/(mm·s ⁻¹)
480	470	27.3	0.7	0.3	3.3, 4.9, 6.5, 8.1, 11.3	0.5, 1, 5

3 结果与讨论

3.1 自弯曲挤压过程的金属流动行为分析

不同挤压阶段的金属流动行为如图5所示。图5(a)所示为挤压分流阶段,金属经分流桥被拆分为4股。由于分流孔入口面积不同,在填充焊合阶段,位于下侧的最小分流孔内的金属,首先与焊合室底面接触,随后发生径向流动,并围绕模芯填充焊合室(见图5(b))。虽然下侧金属先与焊合室底面接触,但由于上侧分流孔面积大,孔内金属流量大,所以,上侧三股金属首先汇合,发生第一次焊合,如图5(c)所示。金属继续填充焊合室,上侧与下侧的金属流发生第二次焊合,形成焊合面如图5(d)所示,此时焊合室已被金属填满。挤压行程继续增加,型材开始进入稳定挤压阶段,挤出弯曲方管型材如图5(e)所示,此时金属流动矢量图如图5(f)所示。由图5(f)可知,分流桥倾斜导致金属的入口流量不同,分流孔大的一侧对应的挤出速度快于另一侧,在合金的变形协调作用下,型材发生弯曲成形。

3.2 自弯曲挤压过程的应力应变场分析

方管自弯曲挤压过程的等效应力场分布如图6所示。图6(a)所示为挤压分流阶段的等效应力分布。由

图6(a)可知,等效应力随着金属被拆分为4股,分流桥两侧的等效应力值迅速增大;由于分流孔结构不同,各股金属沿轴向通道发生了不同程度的塑性变形;小分流孔内的金属,由于没有与模具接触,处于自由挤出状态,而较大分流孔内的金属处于三向受压状态。图6(b)所示为挤压焊合阶段的等效应力分布,合金充满焊合室,大部分变形区域的等效应力增加明显,尤其模孔处等效应力值较高。图6(c)所示为挤出稳定阶段的等效应力分布,模具出口处的金属变形较为剧烈,在变形协调作用下,金属发生自由弯曲变形,进而挤出弯曲方管型材;挤出型材在再结晶和回复机制的作用下,等效应力迅速消除^[24-25],等效应力大小及分布特征也趋于稳定。

方管自弯曲挤压过程的等效应变场分布如图7所示。图7(a)所示为分流阶段的等效应变分布,分流孔越小,内部合金的等效应变值越大,其原因是模具内表面的摩擦切应力使变形合金表面等效应力高于内部;图7(b)所示为焊合阶段的等效应变分布,合金充满焊合室后,大部分变形区域的等效应变值明显增加,尤其模孔处等效应变值较高。图7(c)所示为挤出稳定阶段的等效应变分布,在模具出口处的应变值达到最大;沿型材径向,外侧的等效应变值略大于内侧;沿型材周向,弯曲方管的等效应变分布特征及大小趋于稳定。

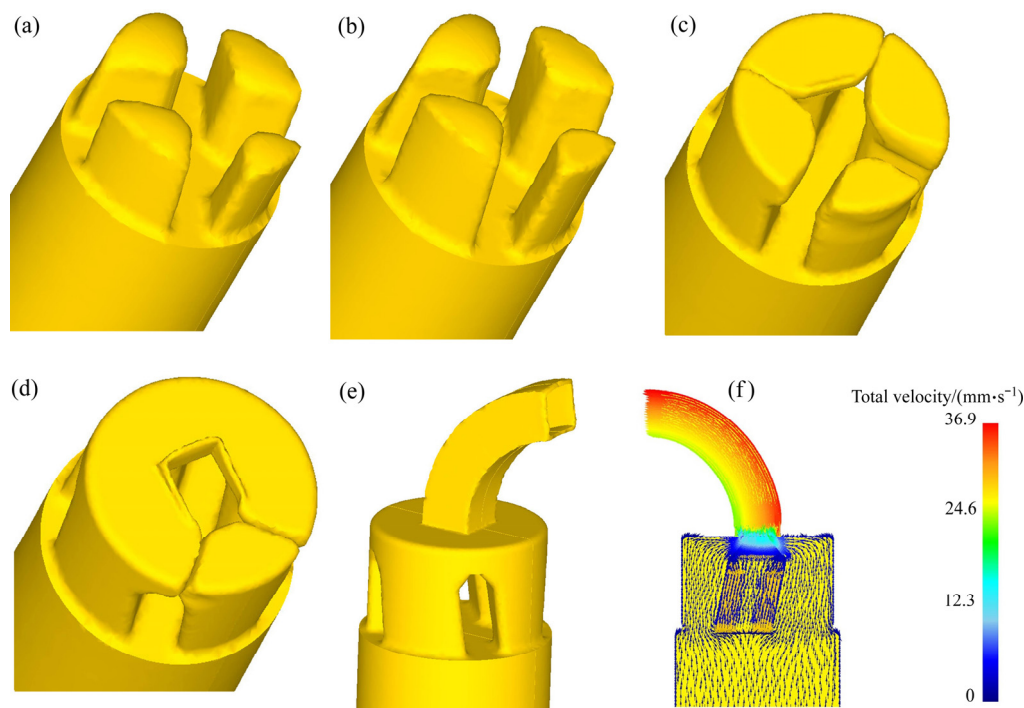


图5 挤压过程金属的流动行为

Fig. 5 Flow behavior of metals during extrusion: (a) Dividing stage; (b) Welding stage; (c) First welding; (d) Second welding; (e) Extrusion stabilization stage; (f) Velocity vector of metal flow

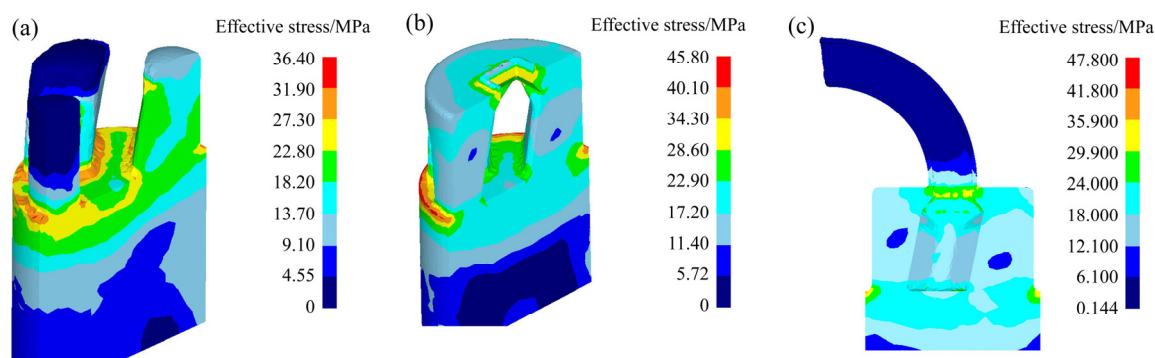


图 6 不同挤压阶段的等效应力分布图

Fig. 6 Contours of effective stress at different extrusion stages: (a) Dividing stage; (b) Welding stage; (c) Extrusion stabilization stage

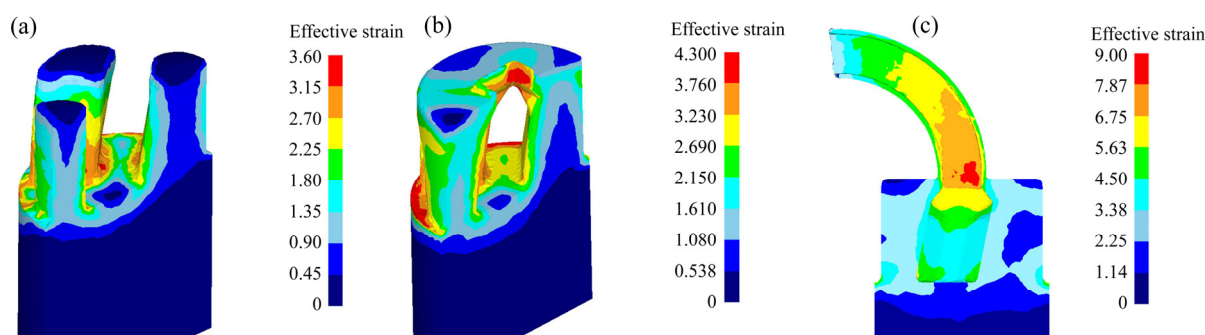


图 7 不同挤压阶段的等效应变分布图

Fig. 7 Contours of effective strain at different extrusion stages: (a) Dividing stage; (b) Welding stage; (c) Extrusion stabilization stage

3.3 分流桥倾角与挤压速度对自弯曲挤出过程的影响

分流桥倾斜角变化时方管自弯曲变形如图 8 所示。图 8(a)~(e)所示为不同倾斜角时的挤出型材变形图(挤压速度为 1 mm/s)。由图 8 可知,在一定的挤压速度下,不同的倾斜角时,均能得到稳定规则的弯曲方管型材。随着分流桥倾角增大,金属流动的不均匀程度增加,挤出型材的曲率半径明显减小;通过设置不同挤压速度,得到型材曲率半径与分流桥倾斜角的关系曲线如图 9 所示。分流桥倾斜角与挤压速度的增加均能增大金属的不均匀流动,使挤出型材的曲率半径减小;倾斜角与挤压速度对型材曲率半径的影响呈明显的非线性变化,分流桥倾斜角较小时,各因素对型材曲率半径的影响敏感,成形精度较难控制;倾斜角超过一定角度后,倾斜角与挤压速度对挤出型材的曲率半径已无显著影响,金属流动的不均匀程度达到“峰值”,挤出型材的曲率半径达到某一“谷值”附近。基于响应面法对曲线数据进行的多项式拟合,得到的响应面模型如图 10 所示,其拟合方程如下:

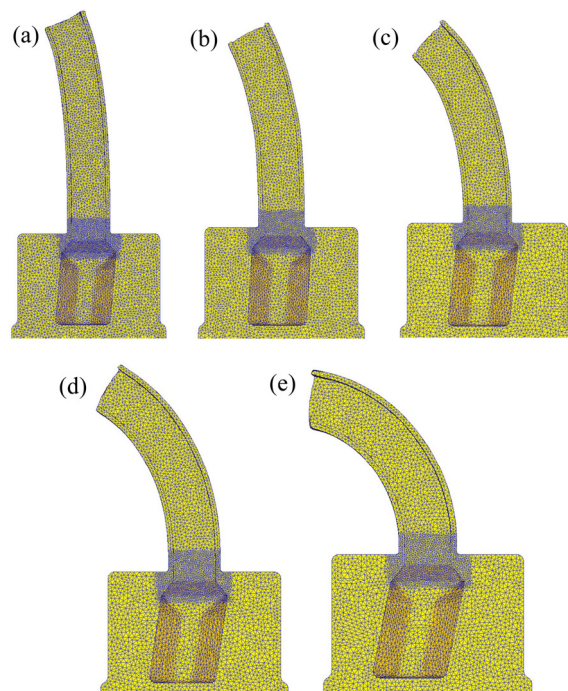


图 8 不同分流桥倾角下的型材挤出变形示意图

Fig. 8 Schematic diagrams showing deformation of profiles at different inclination angles of shunt bridges: (a) 3.3°; (b) 4.9°; (c) 6.5°; (d) 8.1°; (e) 11.3°

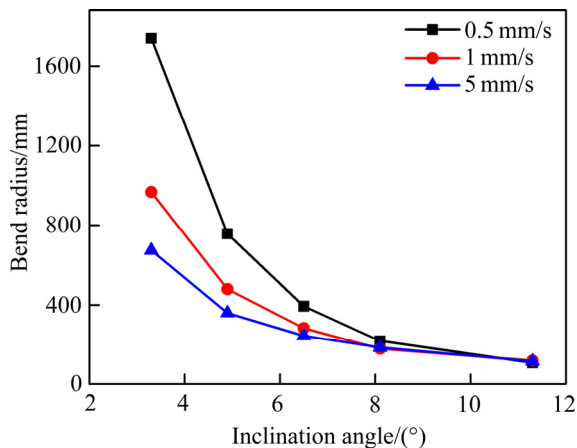


图 9 不同挤压速度与分流桥倾角对挤出型材曲率半径的影响

Fig. 9 Effect of ram velocity and inclination angle of shunt bridge on curvature radius of extruded profiles

$$R = 5121.45 - 1553.83A - 463.31B + 103.94AB + 162.73A^2 - 5.60A^2B - 5.70A^3 \quad (1)$$

式中: R 为弯曲型材内侧的曲率半径; A 为分流桥倾斜角度; B 为挤压速度。

3.4 挤出型材晶粒度分析

设计分流桥倾斜角为 3.3° 的方管自弯曲挤压模具, 以挤压速度为 0.5 mm/s 进行挤压试模实验如图 11(a)所示, 得到的弯曲方管型材如图 11(b)所示。去除不稳定的料头段, 型材其他部分能够发生稳定的自弯曲。

截取弯曲型材稳定段的一段型材如图 12(a)所示, 测得其曲率半径为 1880 mm ; 有限元模拟结果如图

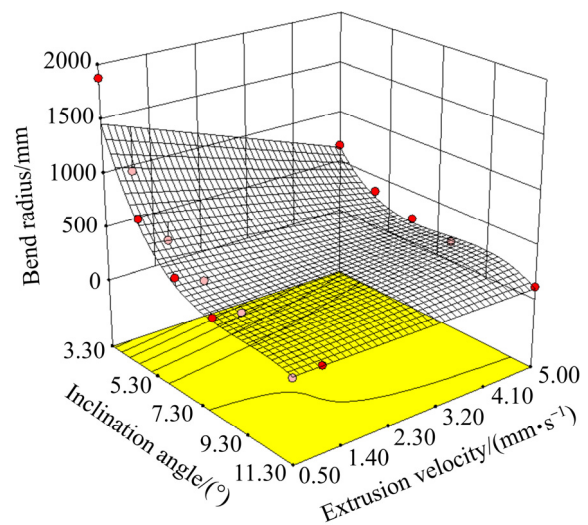


图 10 挤压速度、分流桥倾斜角与挤出型材曲率半径之间的响应面模型

Fig. 10 Response surface model between extrusion velocity, diversion bridge inclination angle and radius of curvature of extruded profiles

12(b)所示, 型材曲率半径的实验值与模拟计算值相差 7.5% , 故有限元模拟的结果较为可靠。

型材不同表面上的金相组织如图 13 所示, 图 13(a)~(c)所示为弯曲型材外侧表面、弯曲型材侧表面、弯曲型材内侧表面的晶粒组织分布。由图 13 可知, 各部位组织均匀且为等轴晶, 型材内侧表面上的晶粒略细于外侧表面上的晶粒, 其中型材外表面的晶粒尺寸为 $64.3 \mu\text{m}$, 型材侧表面的晶粒尺寸为 $61.7 \mu\text{m}$, 型材内表面的晶粒尺寸为 $58.3 \mu\text{m}$ 。由于挤压温度较高, 高温高压下金属发生冶金焊合, 所以在挤出的方管断面上无焊缝特征存在。

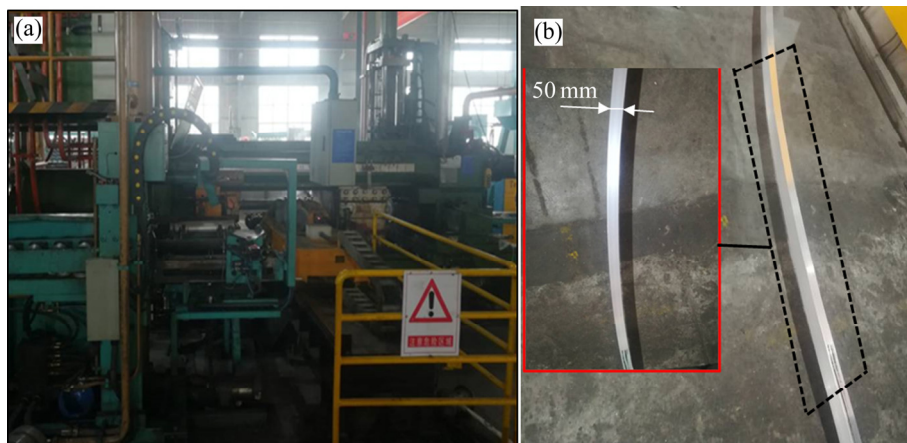


图 11 方管自弯曲挤压试模实验

Fig. 11 Square tube self-bending extrusion experiment: (a) Experiment of extrusion process; (b) Extruded curved square tube profiles

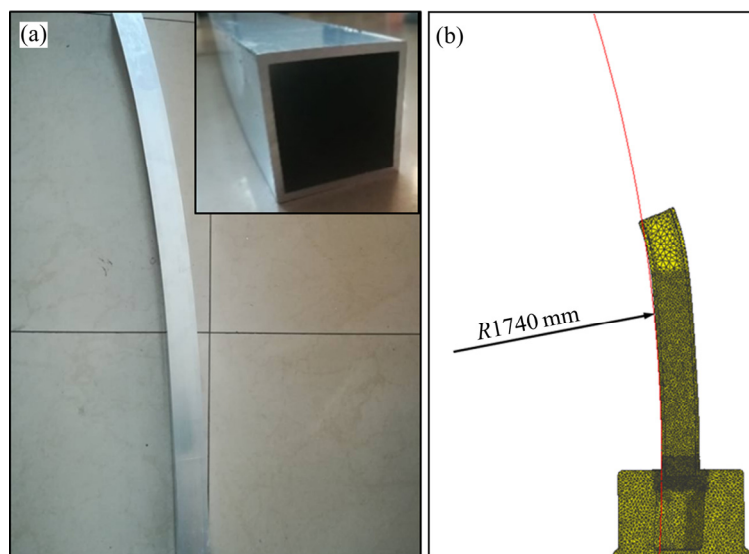


图 12 自弯曲方管型材稳定段图

Fig. 12 Self-curving square tube stabilizing segment profile: (a) Experiment result; (b) FEM simulated result

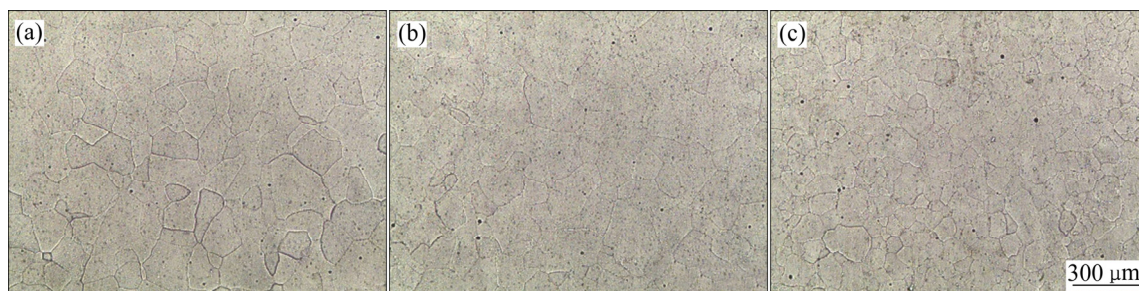


图 13 弯曲方管型材不同表面上的金相组织

Fig. 13 Metallographs on different surfaces of curved square tube profiles: (a) Outside surface; (b) Side surface; (c) Inside surface

4 结论

1) 基于倾斜分流桥结构, 提出一种方管自弯曲挤压成形工艺, 通过数值模拟和挤压实验, 得到稳定规则的弯曲方管型材, 且在横截面没有缺陷, 挤出弯曲型材的等效应力、应变场分布均匀。

2) 挤压速度与分流桥倾斜角对自弯曲成形性有不同程度的影响, 随着挤压速度或分流桥倾斜角的增大, 型材挤出的曲率半径减小; 当分流桥倾斜角较小时, 各因素对型材曲率半径的影响显著, 分流桥倾斜超过一定角度后, 倾斜角与挤压速度对挤出型材的曲率半径影响较小, 挤出型材的曲率半径达到一个最小值。

3) 通过挤压实验得到了弯曲方管型材, 金相分析表明, 挤出型材各表面组织由等轴晶构成且分布均匀,

弯曲方管内侧表面上的晶粒略细于外侧表面上的晶粒, 弯曲方管型材外表面、侧表面和内表面的晶粒大小分别为 64.3、61.7 和 58.3 μm 。

REFERENCES

- [1] VOLLERTSEN F, SPRENGER A, JÜRGEN KRAUS, ARNET H. Extrusion, channel, and profile bending: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 87(1/3): 1–27.
- [2] MILLER J E, KYRIAKIDES S, BASTARD A H. On bend-stretch forming of aluminum extruded tubes— I : Experiments[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(5): 1283–1317.
- [3] SUN Z Z, CHEN S G, JING Y. Numerical simulation of push-bending process of aluminum section profile[J]. Advanced Materials Research, 2010, 97/101: 90–95.

- [4] YANG H, LI H, ZHANG Z Y, ZHANG M, LIU J, LI G J. Advances and trends on tube bending forming technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 1–12.
- [5] 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.
- [6] MÜLLER K B. Bending of extruded profiles during extrusion process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(11): 1238–1242.
- [7] 石磊, 徐国辉, 任畅, 金文中, 王玉江, 王利剑. 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, JIN Wen-zhong, WANG Yu-jiang, WANG Li-jian. Three dimensional magnesium alloy bent pipe produced by dynamic flow control extrusion[J]. Materials Science and Technology, 2016(6): 8–13.
- [8] KAYA C, BLACKBURN S. Extrusion of alumina ceramic tubes with controlled bends[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(8): 2007–2011.
- [9] ZHOU W B, LIN J G, TREVOR A. DEAN, WANG L L. Feasibility studies of a novel extrusion process for curved profiles: Experimentation and modeling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 126: 27–43.
- [10] IRANI M, JOUN M. A study of plastic deformation behavior of AA1050 aluminum alloy during pure shear extrusion with back pressure[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2017, 58(6): 632–638.
- [11] 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.
- [12] WEN J F, TANG Z W, ZHANG Z, ZHANG H, LUO F H. Effects of aging on microstructure and mechanical properties of spray forming and extruded 7055 aluminum alloys[J]. Transactions of Materials & Heat Treatment, 2017, 38(3): 49–53.
- [13] 李世康, 李落星, 刘志文, 王冠. 挤压速度对6063铝合金管材焊合强度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(9): 1775–1784.
LI Shi-kang, LI Luo-xing, LIU Zhi-wen, WANG Guan. Effect of extrusion speed on weld strength of 6063 square tube[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(9): 1775–1784.
- [14] JIE Y I, WANG Z H, LIU Z W, ZHANG J M, HE X. FE analysis of extrusion defect and optimization of metal flow in porthole die for complex hollow aluminium profile[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28: 2094–2101.
- [15] 黄东男, 李静媛, 张志豪, 谢建新. 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, XIE Jian-xin. Metal flowing behaviors during diplopore extrusion of square tube with porthole die[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 488–495.
- [16] SHI L, YANG H, GUO L G, DANG L, ZHANG J. Large-scale manufacturing of aluminum alloy plate extruded from subsize billet by new porthole-equal channel angular processing technique[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24: 1521–1530.
- [17] YU J, ZHAO G, 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(1): 153–166.
- [18] LI X R, FANG W L, TANG D, QIAO Y, SUN Y L, LI D Y. Numerical simulation on hot extrusion forming of aluminum alloy micro-multiport profile[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(5): 1–6, 31.
- [19] ZHANG J, XIAO X B, WANG R Q, JIN X S. Vibro-acoustic characteristics measurement and equivalent modeling of aluminum extrusion of high-speed trains[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(3): 545–553.
- [20] MIN K C, PARK C G, CHOI Y, WON T Y. Aluminum tube extrusion with the porthole die for deconcentrated welding lines[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(5): 2245–2251.
- [21] ÖNDER A. A forming load analysis for extrusion process of AZ31 magnesium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29: 741–753.
- [22] TEIMOURI R, BASERI H. Forward and backward predictions of the friction stir welding parameters using fuzzy-artificial bee colony-imperialist competitive algorithm systems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 26(2): 307–319.

- [23] BAI S W, FANG G, ZHOU J. Integrated physical and numerical simulations of weld seam formation during extrusion of magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 82–95.
- [24] YU J, ZHAO G, CUI W, ZHANG C, CHEN L. 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.
- [25] ZHANG C S, ZHAO G Q, CHEN Z R, CHEN H, KOU F J. Effect of extrusion stem speed on extrusion process for a hollow aluminum profile[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2012, 177(19): 1691–1997.

Self-bending extrusion process for square tube aluminum profiles

MIN Fan-lei¹, ZHU Guang-ming¹, CHANG Zheng², YUE Bo-wen¹, GUO Nana¹,
WANG Zong-shen¹, YANG Zhen-yu¹, ZHAI Xiao-qing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;
2. School of Computer Science and Technology, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: This paper concerned a novel method for curved square tube profiles self-bending extrusion forming. By designing the inclined shunt bridge structure, the metal can generate internal differential flow, thereby directly extruding the curved square tube profile. Using external mesh reconstruction methods, the numerical simulation of shunt welding extrusion process was realized. The metal flow behavior, stress and strain field distribution in the self-bending extrusion process were obtained. The effects of inclination angle and extrusion ram velocity on the self-bending forming of square tube profiles were studied. The bent square tube profiles were obtained from the extrusion experiment. The results show that the regular and stable bending square tube can be extruded by the self-bending die structure. The distribution of stress and strain is uniform. With the increase of the inclination angle or extrusion ram velocity, the curvature radius of the profile is nonlinearly decreasing. After extrusion, the grains on the upper surface, side surface and lower surface of the curved square tube are uniform and equiaxed, and the grain sizes are 64.3, 61.7 and 58.3 μm , respectively.

Key words: shunt welding simulation; self-bending extrusion; inclined shunt bridge; profile microstructure

Foundation item: Project(ZR2017E MM036) supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China; Project(ZR2017BEM003) supported by the Ph.D. Programs Foundation of Natural Science Foundation of Shandong Province, China; Project(2017ZBXC205) supported by the Zibo City School City Integration Development, China

Received date: 2019-08-26; **Accepted date:** 2020-04-30

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

(编辑 龙怀中)