

引文格式: 李贤睿, 方文利, 唐 鼎, 等. 铝合金微通道扁管热挤压成形数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (5): 1-6, 31. LI Xian-rui, FANG Wenli, TANG Ding, 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.

铝合金微通道扁管热挤压成形数值模拟

李贤睿¹, 方文利¹, 唐 鼎^{1,3}, 乔 毅², 孙岳林², 李大永^{1,3}

(1. 上海交通大学 机械动力与工程学院, 上海 200240; 2. 江苏杭钢精密铝业有限公司, 江苏 溧阳 213314;
3. 上海市高效冷却系统工程中心, 上海 200240)

摘 要: 铝合金微通道扁管热挤压成形中温度变化对成形质量有重要的影响。通过 Gleeble 热压缩试验, 研究了 AA3102 铝合金的流变应力关系, 并基于带线性软化项的修正的 Voce 硬化模型建立了该合金的本构关系。基于此模型, 利用 Qform-Extrusion 软件平台建立了微通道扁管挤压成形的有限元模型, 并通过与现场生产试验对比验证了模型的准确性。利用验证的有限元模型, 以峰值挤压力和模孔出口处产品温度为目标变量, 进行了仿真模拟正交试验研究。研究结果表明, 峰值挤压力随着坯料温度梯度的增大而增大, 模孔出口处扁管峰值温度随着挤压速度的增大而增大, 调整挤压速度可以减小扁管温差。

关键词: 微通道扁管; 铝合金; 有限元模型; 挤压力; 挤压速度

中图分类号: TG376 文献标识码: A 文章编号: 1007-2012 (2017) 05-0001-007

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2017.05.001

Numerical simulation on hot extrusion forming of aluminum alloy micro-multiport profile

LI Xian-rui¹, FANG Wen-li¹, TANG Ding^{1,3}, QIAO Yi², SUN Yue-lin², LI Da-yong^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Jiangsu Hangzhou Steel Precision Aluminum Corporation, Liyang 213314, China;
3. Shanghai High Efficiency Cooling System Engineering Center, Shanghai 200240, China)

Abstract: Temperature changing has important influence on the forming quality for aluminum alloy micro-multiport profile extrusion. The flow stress behavior of aluminum alloy AA3102 was studied by the Gleeble high temperature compression tests, and the constitutive was modeled by the modified Voce hardening model with linear softening term. Based on the constitutive model, a finite element model of micro-multiport profile extrusion was established by the Qform-Extrusion software, and the model was verified by the comparison with experimental forming results. The virtual orthogonal experiments were executed on the basis of the verified FEM model, taking the maximum extrusion load and the profile temperature as the objectives. The results show that with the increase of the billet temperature gradient, the maximum extrusion load increases, furthermore, the maximum profile temperature increases with the increase of the extrusion speed, and adjusting the extrusion speed can reduce temperature difference of the profile.

Key words: micro-multiport profile; aluminum alloy; finite element model; extrusion load; extrusion speed

引 言

平行流式微通道换热器作为一种高效、环保的新型换热器, 已在汽车空调系统中得到应用^[1]。铝

合金微通道扁管作为平行流式换热器的核心部件, 其成形质量对换热器性能和寿命有重要的影响。微通道扁管的热挤压成形是一个多变量、强耦合的复杂高温变形过程, 工艺参数设计困难导致模孔出口处产品温差等相关参数超标, 影响扁管质量和模具

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575346); 上海市科委标准专项资助项目 (16DZ0502701); 上海市自然科学基金资助项目 (15ZR1424100)

通讯作者: 李大永, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事金属塑性成形理论及模拟研究, E-mail: dyli@sjtu.edu.cn

作者简介: 李贤睿, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事金属塑性成形研究, E-mail: jklotppkk@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2016-10-17; 修订日期: 2017-05-25

寿命。

铝合金微通道扁管热挤压成形中温度变化对成形质量有重要的影响。整个挤压循环过程中,模孔出口处扁管温度的变化影响扁管的组织性能均匀性,与扁管质量密切相关^[2]。在设备安全承载范围内,一般采用等温挤压工艺来减少或消除挤压过程中模孔出口处扁管温差较大而造成的质量问题。国内外众多学者对铝合金挤压工艺进行了研究, Li L X 等^[3]通过 Deform-3D 软件模拟 7075 铝合金十字型材的挤压过程,发现等速挤压使坯料出口温度持续提升,高速挤压将造成较高的产品温度。吴向红等^[4]采用 MSC /Super Forge 软件对异形铝型材挤压进行仿真,研究了挤压速度和摩擦系数对挤压流程的影响,发现挤压件温度主要受变形程度影响,挤压速度越高,挤压件温升越大。Chanda T 等^[5]通过有限元方法进行了 6061 铝合金等温挤压研究,发现高速挤压虽能加大生产效率,但造成产品温度过高。Zhou J 等^[6]通过 Deform-3D 软件研究了 7075 铝合金的变速挤压工艺,将产品温度稳定在 500 ℃ 左右。吴锡坤等^[7]指出设定坯料温度梯度在一定程度上能降低铝合金型材挤压中模孔出口处产品的温差,但高性能的铝锭梯温加热炉成本昂贵。Bastani A F 等^[8]通过设置铝棒轴向梯温,采用有限元仿真实现了 U 形件的等温挤压。微通道扁管的挤压比高达 500 以上,超大的挤压比对生产工艺控制有着极大的技术要求,对有限元模拟仿真也带来了较大的挑战,目前针对微通道扁管这种复杂截面型材的热挤压研究涉及较少。

本文通过有限元方法,以大挤压比的铝合金微通道扁管的热挤压成形过程为研究对象,采用 Qform-Extrusion 软件建立有限元模型,对挤压过程进行仿真模拟。使用 Qform 有限元软件模拟复杂截面扁管的成形过程,采用 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 方法进行数值模拟计算全坯料的挤压过程,变形体体积损失较小,运算精度较高,获得了坯料的温度分布和挤压力数值,并与实际生产试验进行比较,验证了模型的准确性。基于验证的有限元模型,选取挤压速度、坯料温度梯度、挤压筒温度和挤压垫温度等重要成形参数为影响因素,以峰值挤压力和模孔出口处产品温度为目标变量,进行了仿真模拟正交试验研究,研究成果对现场生产具有指导作用。

1 挤压过程有限元模型建立

1.1 材料模型建立

在 Gleeble-3500 热模拟机上对 AA3102 铝合金进行高温压缩试验,分析其高温变形时流变应力的变化规律。试验用铝合金铸锭化学成分如表 1 所示,压缩试样为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,试验前铸锭经均匀化处理,并在圆柱试样两端用石墨片进行润滑以减少端面摩擦力对试验精度的影响。试验压缩温度分别为 400、500 和 600 ℃; 应变速率分别为 0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} ; 总压缩量为 0.6; 加热速度为 $3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,保温时间为 2 min。

表 1 AA3102 铝合金的化学元素组成 (% , 质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of Al alloy AA3102
(% , mass fraction)

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
含量	0.93	0.165	0.056	0.454	0.65	0.117	0.002	0.03	余量

高温压缩试验获得的在不同温度和不同应变速率条件下的真应力-真应变曲线如图 1 所示,由图可知,相同应变速率下流变应力随着温度的上升而减小; 相同温度下流变应力随着应变速率的上升而增大。流变应力在变形开始时快速增大,达到特定应变时出现峰值应力,之后应力随应变增大而逐渐减小,由于动态再结晶与动态回复的影响展现出一种软化的趋势。

文献 [9] 引入了带线性软化项的修正的 Voce 硬化模型,并结合 Zener-Hollomon 参数法有效的建立了铝合金高温变形本构关系,其模型描述方程如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \sigma_{\text{flow}} = \sigma(1 - e^{-b\varepsilon}) - k\varepsilon \\ b = b_0 + b_1 T + b_2 \ln \dot{\varepsilon} + b_3 T \ln \dot{\varepsilon} \\ k = k_0 + k_1 T \\ \dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \\ Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \\ \sigma = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \ln \left[\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}} + \sqrt{\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{2}{n}} + 1} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{flow} 为流变应力; σ 为峰值应力; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; b 为上升系数; k 为下降系数; A 、 α 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 k_0 、 k_1 、 n 为材料常数; Q 为应

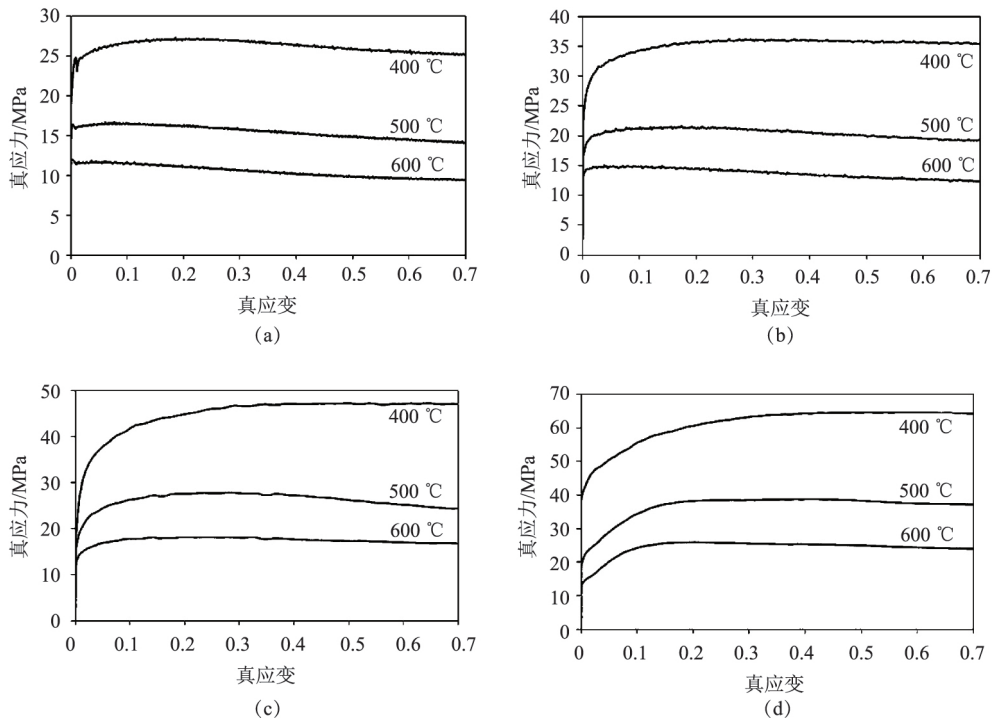


图 1 不同温度与应变速率下的真应力 - 真应变曲线

(a) 应变速率 0.01 s^{-1} (b) 应变速率 0.1 s^{-1} (c) 应变速率 1 s^{-1} (d) 应变速率 10 s^{-1}

Fig. 1 True stress-true strain curves at different temperatures and strain rates

(a) Strain rate of 0.01 s^{-1} (b) Strain rate of 0.1 s^{-1} (c) Strain rate of 1 s^{-1} (d) Strain rate of 10 s^{-1}

变激活能; T 为绝对温度; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$ 。

基于该方法, 通过线性回归求解得出了 AA3102 铝合金本构模型中的各个参数, 如表 2 所示。图 2 所示的 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 符合线性关系, 在应变速率为 0.1 s^{-1} 、压缩温度为 600 °C 下的真应力 - 真应变预测结果如图 3 所示, 该方法有效的描述了 AA3102 铝合金高温压缩变形时的流变行为。

表 2 修正的 Voce 硬化模型中各个参数拟合结果

Tab. 2 Parameters and values of the modified

Voce hardening model					
参数名称	b_0	b_1 / K^{-1}	b_2	b_3 / K^{-1}	k_0 / MPa
数值	-533.4723	1.0148	68.6842	-0.1332	-3.6232
参数名称	k_1 / MPa	$Q / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	A / s^{-1}	α / MPa^{-1}	n
数值	0.0079	193703.7	3.61×10^{12}	0.03399	6.2607

1.2 有限元模型建立

针对 16 孔、壁厚和筋厚分别为 1.3 mm 和 0.3 mm 规格 (其横截面尺寸如图 4 所示) 的微通道扁管进行热挤压成形研究。

通过三维建模软件 UG 建立了坯料、模具和挤

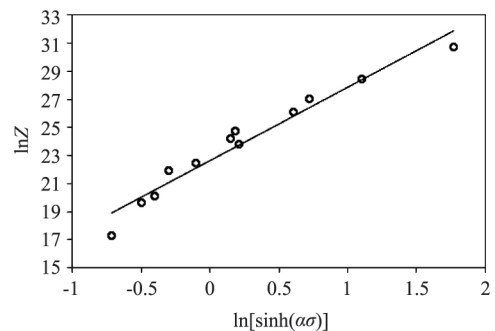
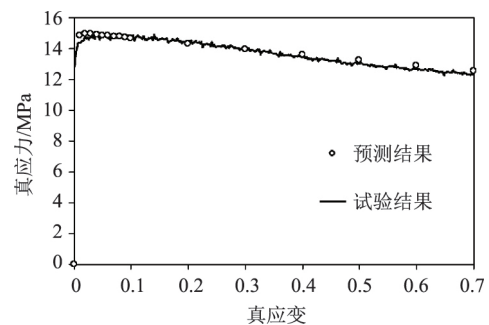


图 2 $\ln Z$ 与 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig. 2 Relationship between $\ln Z$ and $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$



3 $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$, $T = 600 \text{ °C}$ 时试验与预测真应力 - 真应变结果对比

Fig. 3 Comparison of true stress-strain results between test and

prediction with strain rate of 0.1 s^{-1} at 600 °C

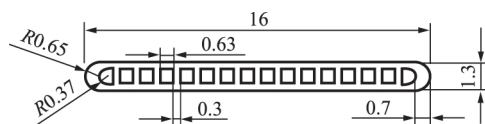


图 4 16 孔 1.3 mm × 16 mm 规格微通道扁管截面尺寸图

Fig. 4 Cross-section dimension of 16 holes micro-multiport profile with specification 1.3 mm × 16 mm

压筒等挤压工件的几何模型。工业上常采用分流模进行微通道扁管的挤压成形，金属经分流后会在分流桥下方的焊合室内进行焊合以实现多孔内腔的成形^[10]。图 5 为挤压工件导入 Qform 后的有限元模型，采用全模型建模研究一出六流扁管挤压工艺，坯料设为粘塑性材料，模具及其余工件设为刚体，对坯料前端与模具接触部位进行网格细化，总网格数达 300 万个。挤压模拟参数设定如表 3 所示。

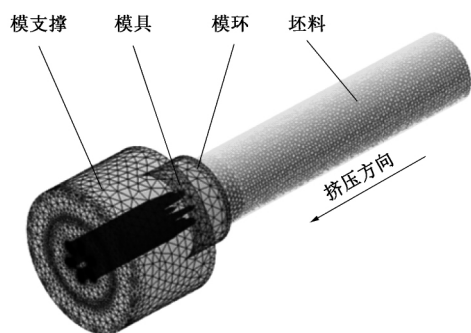


图 5 一出六流有限元模型

Fig. 5 FEM model for one billet with six profiles

表 3 挤压模拟初始参数

Tab. 3 Initial parameters of extrusion simulation

挤压参数	名称/数值
坯料材料	AA3102
模具材料	AISI H13
坯料前端温度/℃	500
坯料温度梯度/℃	100
模具预热温度/℃	480
挤压杆速度/(mm · s ⁻¹)	3
粘着摩擦系数	0.8
坯料与模具间换热系数/(W · (K · m ²) ⁻¹)	5000
坯料与空气间换热系数/(W · (K · m ²) ⁻¹)	20

2 挤压过程温度场分析及模型验证

模拟挤压过程的 3 个不同阶段如图 6 所示。在填充挤压阶段，由于铝锭直径通常较挤压筒直径小 3 ~ 5 mm，故铝锭受热后发生膨胀填充挤压筒间隙；之后，坯料逐渐流入模具型腔，进入平流挤压阶段，该阶段坯料在模芯处发生大变形，应变能逐渐转化

为热能造成坯料温度上升，并伴随有坯料与空气、模具和挤压筒之间的热传递；随着挤压的进行，铝锭长度逐渐变短，表面含杂质坯料逐步进入成形区，坯料温度场与速度场逐渐紊乱，进入紊流挤压阶段。

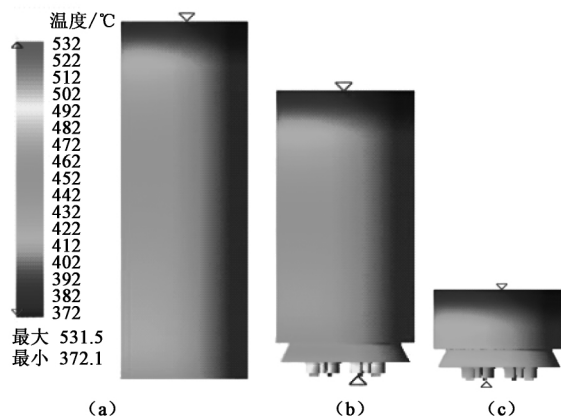


图 6 挤压模拟过程中的 3 个阶段

(a) 填充挤压阶段 (b) 平流挤压阶段 (c) 紊流挤压阶段

Fig. 6 Three stages in extrusion simulation process

(a) Expansion extrusion stage (b) Steady extrusion stage

(c) Turbulence extrusion stage

挤出扁管的温度场分布如图 7 所示，随着挤压的进行，坯料由挤压筒逐渐进入模具分流孔内，应变能转化为热能造成了分流孔内坯料温度高于挤压筒内坯料温度，之后分流孔内坯料进入模具型腔后发生较大应变导致模孔出口处扁管温度高于分流孔处坯料温度。提取不同挤压行程下挤压力及出口温度变化历程，并与现场生产试验数据曲线进行对比，如图 8 所示，数值误差如表 4 所示。从结果中可以看出，在填充挤压阶段，变形量小，挤压力较小；当坯料流进模具在模芯附近发生较大变形时，挤压力急剧升高达到峰值，且应变能大量转化为热能，坯料出口温度急速上升；在平流挤压阶段，随着挤压行程的增大，坯料长度减小，坯料与挤压筒壁之

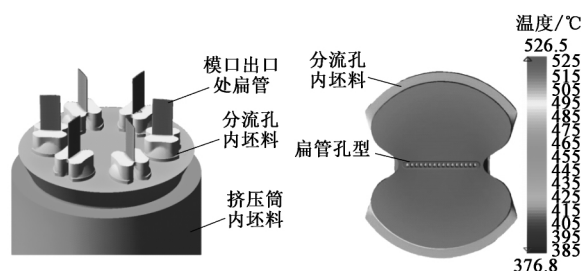


图 7 挤出扁管温度场分布

(a) 挤压方向温度场分布 (b) 挤出扁管截面温度场分布

Fig. 7 Temperature field distribution of extrusion profile

(a) Temperature field distribution in the extrusion direction

(b) Temperature field distribution of cross-section

间的接触摩擦面积减小, 挤压力逐渐减小。整个挤压过程的有限元模拟结果与实际生产试验结果趋势一致, 峰值挤压力与模孔出口处扁管温度存在一定误差但在误差允许范围之内。

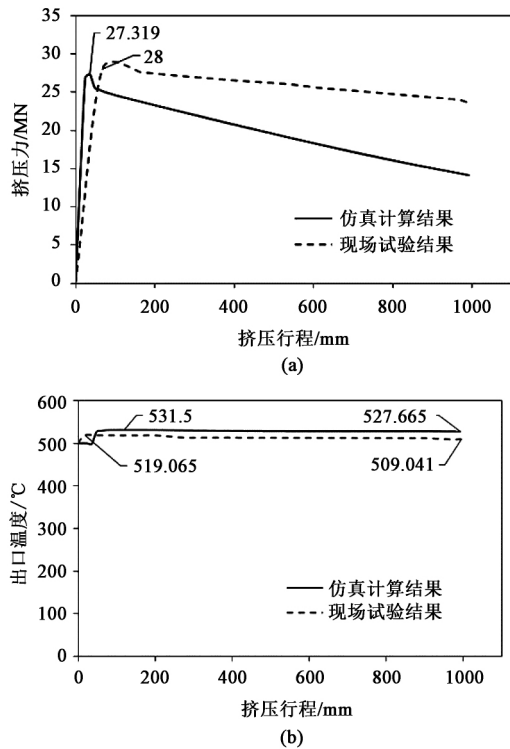


图 8 模拟结果与试验结果变化曲线对比
(a) 挤压力曲线对比 (b) 出口温度曲线对比
Fig. 8 Comparison of curves between simulation and experiment
(a) Comparison of extrusion load
(b) Comparison of outlet profile temperature

表 4 模拟结果与试验结果的数值误差
Tab. 4 Errors between simulation values and experimental values

类别	最大挤压力/MN	最高温度/℃	尾料温度/℃
模拟结果	27.319	531.500	527.665
试验结果	28.000	519.065	509.041
误差/%	2.43	2.40	3.66

3 正交试验及仿真结果分析

3.1 正交试验

微通道扁管挤压过程中, 需严格控制挤压成形参数, 一方面保证挤压力处于设备安全范围内, 另一方面确保扁管力学性能稳定均匀。基于验证的有限元模型, 选取挤压速度、坯料温度梯度、

挤压筒温度和挤压垫温度等重要成形参数为影响因素, 以峰值挤压力和模孔出口处产品温度为目标变量, 进行仿真模拟正交试验研究, 试验方案如表 5 所示。

表 5 正交试验因素水平表
Tab. 5 Table of factor level for orthogonal experiment

试验号	因素			
	挤压速度 $A/(mm \cdot s^{-1})$	温度梯度 $B/℃$	挤压筒温度 $C/℃$	挤压垫温度 $D/℃$
1	1.5	60	380	350
2	1.5	80	420	400
3	1.5	100	460	450
4	2	60	420	450
5	2	80	460	350
6	2	100	380	400
7	3	60	460	400
8	3	80	380	450
9	3	100	420	350

3.2 坯料温度梯度对峰值挤压力的影响

根据仿真模拟正交试验, 由极差 R_i 分析可以得到影响峰值挤压力的因素主次顺序为: $R_B > R_A > R_D > R_C$ 。扁管挤压过程中, 坯料温度梯度对峰值挤压力的影响最为严重, 因此针对坯料温度梯度对峰值挤压力的影响进行进一步的有限元分析, 以获得不同挤压速度下峰值挤压力随温度梯度的变化情况如图 9 所示。

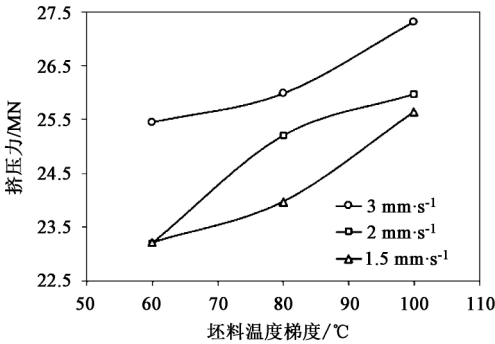


图 9 不同挤压速度下峰值挤压力随坯料温度梯度的变化
Fig. 9 Variation of maximum extrusion load with billet temperature gradient at different extrusion speeds

由图 9 可知, 在相同挤压速度下, 随着坯料温度梯度的增加, 峰值挤压力逐渐上升, 这是由于坯料温度梯度越小, 铝锭整体平均温度越高, 其变形抗力越小, 扁管挤压过程中设备所载荷荷越小, 峰

值挤压力越低; 在相同坯料温度梯度下, 随着挤压速度的增大, 峰值挤压力也逐渐上升。

3.3 挤压速度对模孔出口处产品温度的影响

根据仿真模拟正交试验, 由极差 R_2 分析可以得到影响模孔出口处扁管温度的因素主次顺序为: $R_D > R_C > R_A > R_B$ 。扁管挤压过程中, 坯料与挤压筒和挤压垫等挤压构件发生热交换, 挤压筒温度和挤压垫温度对扁管在模孔附近温度的影响最为严重。在 3 个水平的成形参数中, 正交试验结果显示挤压筒温度为 380 °C、挤压垫温度为 350 °C 是最优工艺参数。挤压速度对模孔出口处扁管温度也存在较大影响, 所以针对挤压速度对模孔出口处扁管温度的影响进行分析。在坯料温度梯度为 100 °C、挤压筒温度为 380 °C 及挤压垫温度为 350 °C 的条件下, 获得不同挤压速度下扁管的峰值温度与温差的变化情况如图 10 所示。

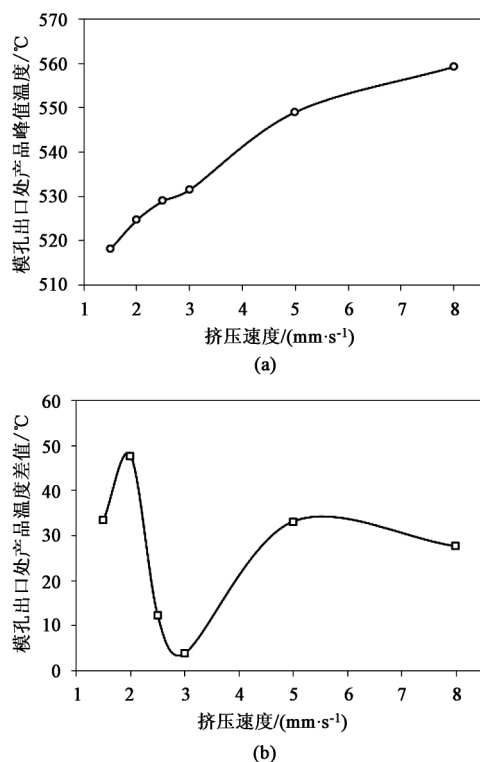


图 10 不同挤压速度下模孔出口处温度的变化
(a) 峰值温度 (b) 温差

Fig. 10 Temperature of outlet profile at different extrusion speeds
(a) Peak temperature (b) Temperature difference

由图 10 可知, 随着挤压速度的增大, 模孔出口处扁管峰值温度增大; 挤压速度与扁管温度差值关系复杂, 在挤压速度为 3 mm·s⁻¹ 时, 存在一个极小的温差值, 在生产中应调节挤压速度使温差存在于该极小值附近, 避免较低或较高的挤压速度打破

热量生成与热量耗散间的平衡, 使整个挤压过程中挤出扁管温度保持均匀稳定。

4 结 论

(1) 铝合金在高温下由于动态再结晶与动态回复的作用产生软化效应, 拟合结果表明, 引入带线性软化项的修正的 Voce 硬化模型并结合 Zener-Hollomon 参数法建立的本构方程能有效描述 AA3102 铝合金高温压缩变形时的流变应力行为。

(2) 微通道扁管挤压过程中, 坯料温度梯度对峰值挤压力的影响最为严重。在相同挤压速度下, 随着坯料温度梯度的增加, 峰值挤压力逐渐上升; 在相同坯料温度梯度下, 随着挤压速度的增大, 峰值挤压力也逐渐上升。

(3) 微通道扁管挤压过程中, 挤压速度对模孔出口处扁管温度存在较大影响。随着挤压速度的增大, 模孔出口处扁管峰值温度增大; 通过调整挤压速度, 可以减小模孔出口处扁管的温差。

参考文献:

- [1] 张志伟, 张卿卿, 唐鼎, 等. 多层微通道平行流式换热器绕弯成形工艺 [J]. 塑性工程学报, 2011, 18 (4): 106 - 111.
ZHANG Zhiwei, ZHANG Qingqing, TANG Ding, et al. Study on bending process of multi-layer micro-channel parallel flow heat exchanger [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18 (4): 106 - 111.
- [2] 范晓慧, 唐鼎, 方文利, 等. 铝合金微通道扁管 EBSD 晶粒度和织构分析 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (1): 51 - 54.
FAN Xiaohui, TANG Ding, FANG Wenli, et al. Grain size and texture analysis of aluminum multi-pipe extrusion tube by electron backscattered diffraction technique [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (1): 51 - 54.
- [3] LI L X, ZHOU J, DUSZCZYK J, et al. Prediction of temperature evolution during the extrusion of 7075 aluminum alloy at various ram speeds by means of 3D FEM simulation [J]. Journal of Material Processing Technology, 2004, 145 (3): 360 - 370.
- [4] 吴向红, 赵国群, 孙胜, 等. 挤压速度和摩擦状态对铝型材挤压过程的影响 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14 (1): 36 - 41.
WU Xianghong, ZHAO Guoqun, SUN Sheng, et al. The influence of extrusion speed and frictional status on aluminum profile extrusion processes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14 (1): 36 - 41.

(下转第 31 页)

- Technology, 2016, 83 (9): 2071–2082.
- [2] ZHANG X, YU H P, LI J, et al. Microstructure investigation and mechanical property analysis in electromagnetic riveting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78 (1): 613–623.
- [3] CHEN N J, THONNERIEUX M, DUCLOUX R, et al. Parametric study of riveted joints [J]. International Journal of Material Forming, 2014, 7 (1): 65–79.
- [4] CAO Z Q, CARDEW-HALL M. Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates [J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10 (4): 327–330.
- [5] AL-ZUBAIDY H, AL-MAHAIDI R, ZHAO X L. Experimental investigation of bond characteristics between CFRP fabrics and steel plate joints under impact tensile loads [J]. Composite Structure, 2012, 94 (2): 510–518.
- [6] 曹增强. 应对我国大飞机研制的装配连接技术 [J]. 航空制造技术, 2009, 324 (2): 88–91.
CAO Zengqiang. Assembly connecting technology for the research of china large aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 324 (2): 88–91.
- [7] 邓将华, 李春峰, 于海平, 等. 电磁铆接技术 [J]. 锻压技术, 2010, 35 (3): 1–6.
DENG Jianghua, LI Chunfeng, YU Haiping, et al. Electromagnetic rivet technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35 (3): 1–6.
- [8] 李春峰. 高能率成形技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
LI Chunfeng. High energy-rate forming technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [9] 殷俊清, 王仲奇, 康永刚, 等. 自动钻铆环境下铆接工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2014, 445 (Z1): 79–83.
- YIN Junqing, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Research on riveting process in automatic rivet [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 445 (Z1): 79–83.
- [10] PSYK V, RISCH D, KINSEYET B L, et al. Electromagnetic forming—a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (5): 787–829.
- [11] 王仲奇, 常正平, 郭飞燕, 等. 大型飞机壁板无头铆钉干涉连接技术 [J]. 航空制造技术, 2015, 473 (4): 34–40.
WANG Zhongqi, CHANG Zhengping, GUO Feiyan, et al. Interference fit technology of slug rivet in large aircraft panel [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 473 (4): 34–40.
- [12] REPETTO E A, RADOVITZKY R, ORTIZ M. A finite element study of electromagnetic riveting [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121 (1): 61–68.
- [13] 牟伟强, 李原, 张开富, 等. 无头铆钉压力数学建模与仿真分析 [J]. 西北工业大学学报, 2010, 28 (5): 742–747.
MOU Weiqiang, LI Yuan, ZHANG Kaifu, et al. Mathematical modeling for and simulation analysis of flush rivet pressing force [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28 (5): 742–747.
- [14] 宋丹龙, 李原, 骆彬, 等. CFRP/Al 复合构件无头铆钉压力建模与仿真分析 [J]. 西北工业大学学报, 2012, 30 (4): 558–564.
SONG Danlong, LI Yuan, LUO Bin, et al. An effective mathematical modeling for and simulation analysis of flush rivet pressing force of CFRP/Al components [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30 (4): 558–564.
- [15] 金秀, 于春海. 统计学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
JIN Xiu, YU Chunhai. Statistics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.

(上接第6页)

- [5] CHANDA T, ZHOU J, DUSZCZYK J, et al. A comparative study on iso-speed extrusion and isothermal extrusion of 6061 Al alloy using 3D FEM simulation [J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 114 (2): 145–153.
- [6] ZHOU J, LI L X, DUSZCZYK J, et al. Computer simulated and experimentally verified isothermal extrusion of 7075 aluminium through continuous ram speed variation [J]. Journal of Material Processing Technology, 2004, 146 (2): 203–212.
- [7] 吴锡坤, 梁奕清, 冷文兵. 工业铝型材等温挤压技术的研究进展 [J]. 轻合金加工技术, 2009, 37 (12): 11–14.
WU Xikun, LIANG Yiqing, LENG Wenbing, et al. Research progress of isothermal extrusion technology of industrial aluminum profiles [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2009, 37 (12): 11–14.
- [8] BASTANI A F, AUKRUST T, BRANDAL S, et al. Optimisation of flow balance and isothermal extrusion of aluminium using finite-element simulations [J]. Journal of Material Processing Technology, 2011, 211 (4): 650–667.
- [9] GUO J H, ZHAO S D, MURAKAMI R, et al. Modeling the hot deformation behavior of Al alloy 3003 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 566 (4): 62–67.
- [10] 方文利, 唐鼎, 李大永, 等. 微通道扁管挤压成形模拟及焊接质量的预测 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (1): 12–17.
FANG Wenli, TANG Ding, LI Dayong, et al. Extrusion forming simulation of microchannel flat tube and welding quality prediction [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (1): 12–17.