

变形速率对 5 m 瓜瓣拉形成形的影响

李玉辰, 张下陆, 谷春杰, 白志刚, 李林桦

(天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

摘要: 利用有限元分析方法对 5 种不同变形速率对 5 m 球形瓜瓣拉形成形过程的影响进行了分析, 预测了零件应力及壁厚分布与变形速率之间的关系。通过试验验证, 得到真实拉形条件下变形速率对 5 m 瓜瓣的成形精度、力学性能等方面的影响。结果表明, 变形速率提高对产品的表面质量及型面精度无明显影响。变形速率小于 $0.3 \sim 0.4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随着变形速率的提高, 产品的力学性能出现波动, 下降趋势不明显。变形速率大于 $0.3 \sim 0.4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随着变形速率的提高, 产品的力学性能明显下降, 拉形钳口处出现断裂征兆。为了提高生产效率, 可采用平台范围内的变形速率。

关键词: 变形速率; 5 m 瓜瓣; 拉形; 力学性能; 断裂

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.017

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 07-0122-05

Influence of forming rate on stretch forming for 5 m melon petal

Li Yuchen, Zhang Xialu, Gu Chunjie, Bai Zhigang, Li Linhua

(Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China)

Abstract: The influences of five different forming rates on stretch forming process for 5 m melon petal were analyzed by finite element analysis method, and the relationship between stress and wall thickness distribution of part and forming rate was predicted. Then, through the experimental verification, the influences of forming rate on forming accuracy, mechanical performances and so on for 5 m melon petal were obtained under the condition of real stretch forming. The results show that the increasing of forming rate has no obvious effect on surface quality and profile accuracy of product. When the forming rate is less than $0.3 \sim 0.4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the mechanical performances of the product fluctuate with the increasing of forming rate, and the downward trend is not obvious. However, when the forming rate is greater than $0.3 \sim 0.4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the mechanical performances of the product decrease significantly with the increasing of forming rate, and there are signs of fracture at the clamp of melon petal. In order to improve the production efficiency, the forming rate within the platform range can be adopted.

Key words: forming rate; 5 m melon petal; stretch forming; mechanical performances; fracture

5 m 瓜瓣是中国新一代大型运载火箭贮箱的关键零件之一 (图 1), 是运载火箭运载能力的重要保障。瓜瓣采用双曲率拟合, 产品的生产流程较长, 质量控制点较多, 成形精度及力学性能要求较高。目前, 产品采用拉形成形工艺, 可以保证较高的产品一致性, 成形后修整量较小。

拉形成形工艺 (简称为拉形) 主要用于大尺寸、小曲率薄板蒙皮类零件的成形, 其成形原理见图 2。将板料绕过拉形模, 并用两排夹钳夹紧端头, 随着夹钳的移动, 带动板料沿弧线与拉形模产生弯曲变形, 在油缸的作用下, 使板料逐渐产生伸长变

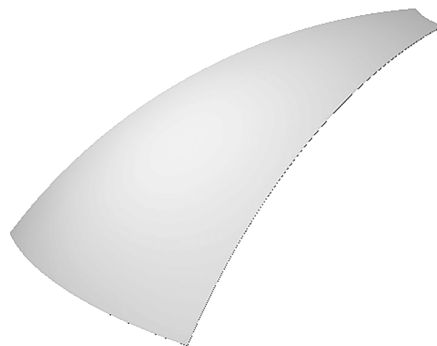


图 1 5 m 瓜瓣示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 5 m melon petal

形, 最后至贴靠模胎^[1-3]。随着瓜瓣生产任务日益增加, 其生产效率低下的问题日益凸显, 无法满足航天产品的进度要求。经过前期研究发现, 瓜瓣成形质量与拉形轨迹、润滑条件及变形速率均有关。

收稿日期: 2021-07-15; **修订日期:** 2021-10-18

基金项目: 天津市科技支撑项目 (17YFZCGX00530)

作者简介: 李玉辰 (1988-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: nxca2004.student@sina.com

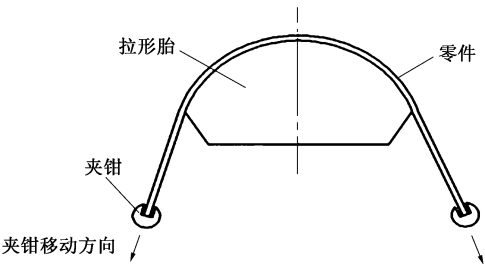


图 2 拉形成形工艺示意图
Fig. 2 Schematic diagram of stretch forming process

其中，拉形轨迹及润滑条件已固化，其对生产效率的影响相对较小。变形速率是影响生产效率的主要原因。

根据目前对拉形工艺的研究表明，拉形设备的钳口运行轨迹、钳口装夹方式、润滑条件、变形分布等对零件拉形成形的质量影响较大^[4-6]。目前，变形速率对铝合金加工影响的研究较少，而变形速率对 2219 铝合金瓜瓣拉形成形技术影响的研究在国内外仍为空白，从对其他材料（合金钢、钛合金等材料）的研究可以得出，变形速率对材料加工的影响主要体现在其内部组织结构的变化，表象上可体现在塑性方面，对力学性能等方面的影响不大。但在变形抗力方面，采用较小的变形速率更有利于产品的实际生产加工^[7-12]。

本文利用有限元分析方法，选取 5 组不同的变形速率对瓜瓣拉形成形后的应力及壁厚分布情况进行分析。以模拟仿真结果为依据，开展成品试验，摸索并固化工艺参数。为保证瓜瓣拉形成形质量、提高生产效率提供生产依据。

1 有限元分析

瓜瓣材料为 2219 铝合金，厚度为 6 mm，其材料参数见表 1，应力-应变曲线见图 3。构建的瓜瓣拉形成形数控模型见图 4。定义型胎与板料之间的接触，其中型胎设置为刚体，板材为变形体，拉形机钳口部分对应板料不产生变形，可等效耦合为刚体。润滑条件选取库伦摩擦模型，摩擦因数取 0.1。板材变形量较大，采用 Explicit、S4R 类型网格，设置种子大小 Size 为 20，后对板料剖分网格（Mesh->Part），网格数量为 20200。型胎不参与变形，网格类型与板料一致同为 Explicit、S4R 类型网格，设置种子大小 Size 为 60，对毛料剖分网格（Mesh->Part），网格数量为 11280。钳口运行轨迹按照实际情况的参数确定。

表 1 板材的材料参数

Table 1 Material parameters of plate

参数	壁厚/ mm	屈服强度/ MPa	摩擦因数 μ	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比
数值	6	136	0.1	2.77	64	0.38

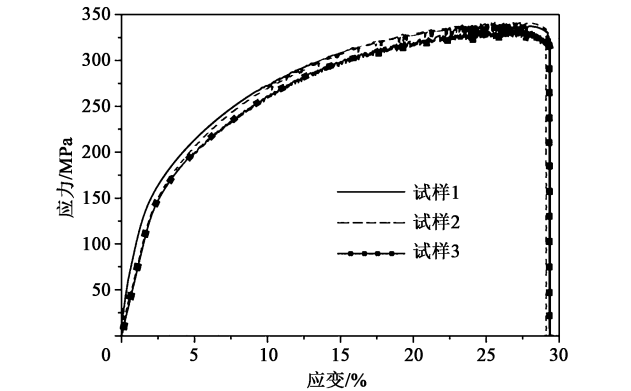


图 3 应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves

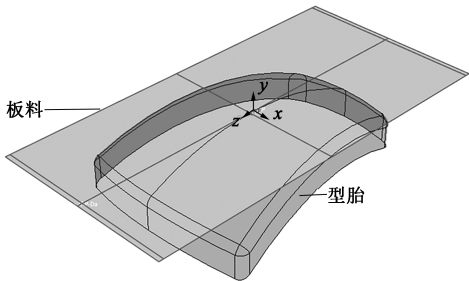


图 4 瓜瓣拉形装配图
Fig. 4 Assembling diagram of melon petal stretch forming

本文选取 5 组变形速率进行模拟。以实际生产过程中的变形速率为基础值，设定为 V ，之后不断提高变形速率，设定另 4 组变形速率，分别为 4 V 、8 V 、16 V 、32 V ，模拟仿真时间按相应倍数缩短，分别获得变形速率对应力分布及壁厚分布的影响，从而探究在变形速率不断提高的条件下，瓜瓣拉形成形质量的变化情况。

根据模拟仿真结果，随着变形速率的升高，以 8 倍速 8 V 为拐点，拐点之前的应力分布情况变化不明显，拐点之后应力值下降，贴胎部分应力分布均匀，钳口部分的应力值升高，钳口两端的应力值升高明显，在 32 倍速 32 V 情况下，预计钳口端部断裂。钳口部分应力升高的原因为拉形机钳口为平直钳口，无法随形调节。模拟过程中钳口夹持区域为刚体，不变形，钳口中间区域距离贴胎位置近，两端区域距离贴胎位置远，导致两端区域的变形量明显高于中间区域，出现应力集中区，应力最大值可达 340~350 MPa。变形速率对应力分布的影响情况见图 5。

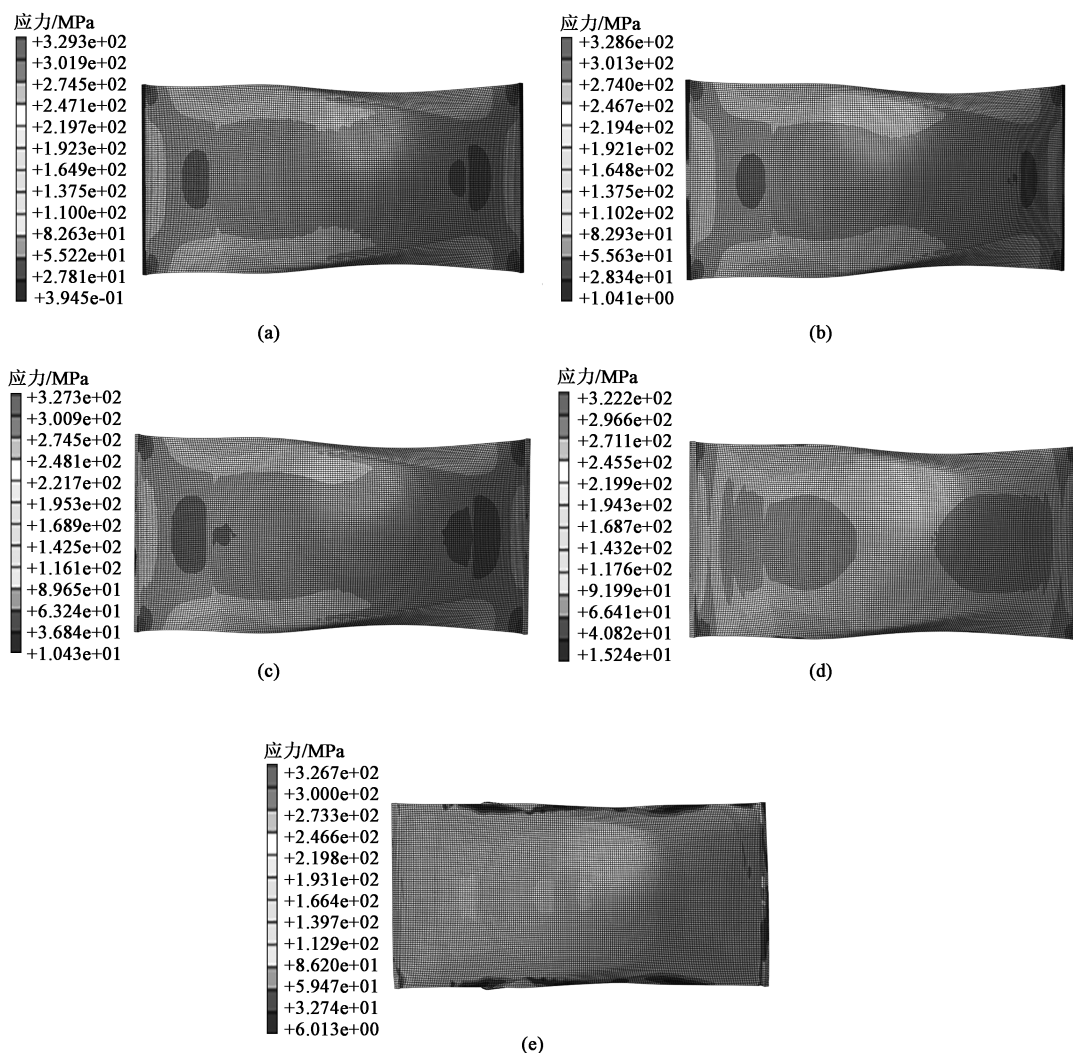


图 5 不同变形速率下瓜瓣应力分布图

(a) V (b) 4V (c) 8V (d) 16V (e) 32V

Fig. 5 Stress distribution diagrams of melon petal under different forming rates

根据模拟仿真结果,随着变形速率的升高,以 8 倍速 8V 为拐点,拐点之前壁厚分布情况变化不明显,拐点之后壁厚值上升,贴胎区域的壁厚分布均匀,钳口端部壁厚减薄明显,在 32 倍速 32V 情况下,预计钳口端部断裂。变形速率对壁厚分布的影响情况见图 6。

2 试验验证情况

基于模拟仿真结果,变形速率与瓜瓣拉形成形质量的关系存在拐点的情况,开展 1:1 模拟成品试验,见图 7。依据生产现场设备状态,采取 4 种不同的变形速率,分别为 0.075、0.300、0.400 和 0.550 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验用板材为 2219 铝合金,厚度为 7 mm,板材尺寸为 2100 mm×4000 mm。试验件

拉形成形后,查看表面质量,测量型面精度,并进行本体剖切,检测力学性能。

通过试验,发现在不同变形速率条件下,试验件的表面质量良好。通过测量贴胎间隙采集试验件的型面精度,发现试验件四周边缘 50 mm 范围内间隙值为 1.0~1.5 mm,型面内部间隙值为 2.0~4.0 mm,分布情况一致性良好,型面精度数据无明显偏差。通过试验件本体剖切试验,采集试验件型面范围内的材料力学性能数据,通过比对分析发现,随着变形速率的升高,材料力学性能存在小范围波动,总体呈下降趋势。当变形速率为 0.075 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,试验件的力学性能最高,当变形速率为 0.550 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其力学性能最差,在变形速率为 0.300~0.400 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,出现平台,之后强度再次明显下降,伸长率略有提升。试验件的力学性能变化见图 8。

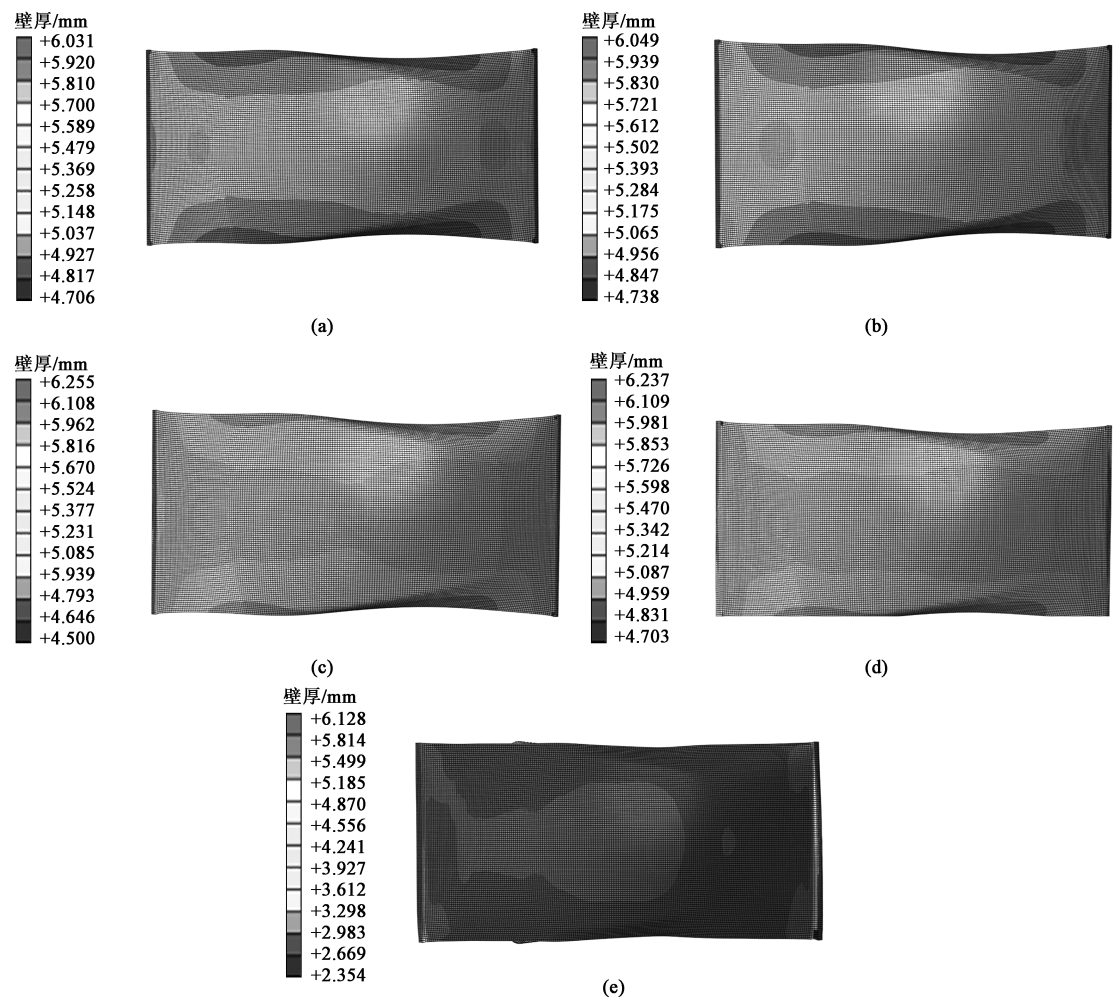


图 6 不同变形速率下瓜瓣壁厚分布图

(a) V (b) 4V (c) 8V (d) 16V (e) 32V

Fig. 6 Wall-thickness distribution diagrams of melon petal under different forming rates



图 7 成品试验照片

Fig. 7 Product test photo

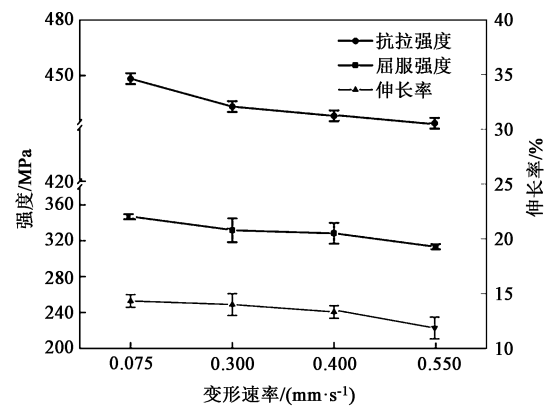


图 8 力学性能变化图

Fig. 8 Variation diagram of mechanical performances

3 结论

- (1) 变形速率提高对 2219 铝合金瓜瓣拉形成形后的表面质量及型面精度无明显影响。
- (2) 小变形速率条件下，2219 铝合金瓜瓣的力学性能值最高，提高变形速率后，出现平台，之后

力学性能再次下降。实际生产过程中,在保证产品力学性能指标的前提下,为了提高生产效率,可采用平台范围内的变形速率。

(3) 瓜瓣拉形过程中变形速率过大时,存在断裂风险。

参考文献:

- [1] 韩金全,陈石平,徐龙. 某复杂蒙皮拉形中起皱缺陷的消除[J]. 精密成形工程, 2015, 7 (2): 55-59.
Han J Q, Chen S P, Xu L. Elimination of wrinkle defects from a certain complex aircraft skin during stretching [J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2015, 7 (2): 55-59.
- [2] 陈雪,王瑶,李明哲. 基于可变形面模具的蒙皮件柔性夹钳拉形技术研究[J]. 机床与液压, 2015, 43 (5): 60-62.
Chen X, Wang Y, Li M Z. Research on flexible gripper stretch forming technology for skin parts based on reconfigurable forming die [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43 (5): 60-62.
- [3] 房涛涛,李晓星,郎利辉. 大厚度双曲度铝合金飞机蒙皮拉伸成形工艺优化[J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 29-36, 42.
Fang T T, Li X X, Lang L H. Optimization on stretch forming process for hyperbolic aluminum alloy aircraft skin with large thickness [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 29-36, 42.
- [4] 谢洪志,王玲,赵天章,等. 基于数字化的蒙皮拉形加载轨迹优化与应用[J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 56-59.
Xie H Z, Wang L, Zhao T Z, et al. Optimization and application of loading trajectory in stretch forming of skin based on digital [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 56-59.
- [5] 张彦敏,周贤斌. 蒙皮拉形加载轨迹优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33 (2): 201-202.
Zhang Y M, Zhou X B. Optimization of loading trajectory in skin stretch forming process [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33 (2): 201-202.
- [6] 房娃,杨程,赵鸿飞,等. 预拉伸变形量对 2219 铝合金组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44 (10): 38-42.
Fang W, Yang C, Zhao H F, et al. Effect of pre-tension deformation on microstructure and properties of 2219 aluminum alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44 (10): 38-42.
- [7] 金淳,黄亮,李建军,等. 不同热处理状态下成形速率对 2219 铝合金成形极限的影响[J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 125-132.
Jin C, Huang L, Li J J, et al. Influence of forming rate on forming limit of 2219 aluminum alloy under different heat treatment conditions [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 125-132.
- [8] 朱浩,朱亮,陈剑虹,等. 不同应力状态下铝合金变形及损伤机理的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36 (4): 597-601.
Zhu H, Zhu L, Chen J H, et al. The study of deformation and damage mechanism of aluminum alloy (6063) under different stress states [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36 (4): 597-601.
- [9] 张冬冬,王勇,任祥,等. 6016 铝合金变形应变场研究新方法[J]. 长春工业大学学报, 2014, 35 (2): 206-211.
Zhang D D, Wang Y, Ren X, et al. A new method analyzing 6016 aluminum alloy changing strain field [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2014, 35 (2): 206-211.
- [10] 刘万辉,鲍爱莲,崔新. 变形速率对 7075 铝合金流变应力的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2005, 15 (6): 358-360.
Liu W H, Bao A L, Cui X. Effect of strain rates on flow stress feature of 7075 aluminum alloy [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2005, 15 (6): 358-360.
- [11] 张孜昭,许晓嫦,刘志义,等. 应变速率对强变形 Al-Cu 合金中析出相低温回溶速度的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2010, 25 (2): 15-18.
Zhang Z Z, Xu X C, Liu Z Y, et al. Effect of strain rate on redissolution rate of precipitated phase at low temperature in severely plastically deformed Al-Cu alloy [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2010, 25 (2): 15-18.
- [12] 刘明朴,彭晓东,刘军威,等. 大塑性变形下变形速率对 AZ31 合金成形性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39 (21): 115-117.
Liu M P, Peng X D, Liu J W, et al. Effect of deformation rate on formability of AZ31 alloy under large plastic deformation [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (21): 115-117.

《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益,坚决抵制学术不端行为,积极倡导优良学风,努力为学术创新营造良好氛围,本刊郑重声明:对一稿多投,重复发表,存在署名有争议,引用他人著述未注明出处,抄袭、剽窃、弄虚作假,或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章,坚决拒绝刊登。一经发现,立即撤稿,并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚,情节严重者,将以适当方式予以公布,该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部