

AA5182 铝合金两步高速拉伸的试样设计及其性能研究

郑月, 邓桦坤, 杨帅帅, 崔俊佳, 李光耀

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 提高铝合金塑性成形性能, 解决高速成形贴模缺陷。**方法** 设计一种两步高速拉伸试样, 在液压式伺服高速拉伸机上开展2次拉伸实验, 并采用非接触式光学测量技术(Digital image correlation, DIC)测量全场应变, 利用数值模型确定拉伸速度, 获得期望的预拉伸应变率和应变。将单次高速拉伸性能与2次不同应变率和预应变下的高速拉伸性能进行对比。**结果** 铝合金材料在2次高速拉伸下的性能明显好于单次拉伸, 抗拉强度增加了10%, 断裂应变增加了14.5%。**结论** 设计的试样能满足2次高速拉伸的要求, 试样预拉伸区域的尺寸和拉伸速度会影响试样的预应变、预应变率以及最终的断裂应变。

关键词: 铝合金; 高速拉伸; 多步成形; 断裂应变

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.004

中图分类号: TG146.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0023-06

Two-Step High Speed Tensile Method Design of AA5182 and Research on Its Tensile Property

ZHENG Yue, DENG Hua-kun, YANG Shuai-shuai, CUI Jun-jia, LI Guang-yao

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: This paper aims to improve the plasticity of aluminum alloy forming and to solve the defect of die fitting in high-speed forming. In this paper, two-step tensile experiments were carried out on a hydraulic servo high speed tensile machine with a designed two-step high-speed tensile specimen, and the filed strain was measured by digital image correlation (DIC) system with a high speed camera. The numerical model was used to guide the setting of tensile velocities in the experiment so as to obtain the desired strain rates and strains after pre-stretching. The tensile properties of the specimens were compared with those of the specimens under single high-speed tension and two steps of different strain rates and pre-strains. Conclusion could be made that the properties of aluminum alloy under two-step high speed stretching were better than that of single stretching. And the tensile strength increased by 10% and the fracture strain increased by 14.5%. The results showed that the designed specimen could meet the requirements of two-step stretching. The size and tensile speed of the specimen pre-tension area would affect the specimen pre-strain and pre-strain rate, as well as the final fracture strain.

KEY WORDS: aluminum alloy; high speed stretching; multi-step forming; fracture strain

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(51975202)

作者简介: 郑月(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为零部件电磁成形。

通讯作者: 李光耀(1963—), 男, 博士, 湖南大学教授, 主要研究方向为新能源汽车制造、异种材料高效连接技术、汽车轻量化、冲击动力学。

铝合金具有密度小、比强度高、资源储备丰富以及易于回收再利用等特点,因此,被广泛应用于汽车、航空航天、电子等领域^[1]。同时,铝合金的室温成形性能较差,在成形复杂零件时,局部区域容易发生破裂,卸载后回弹较大,且板件易出现扭曲变形等^[2-4]。铝合金汽车覆盖件的某些局部特征处在进行一次拉深成形时,容易在圆角处产生裂纹。李正芳等^[5]采用多步成形方法,并通过优化成形参数得到了合格的零件。阮尚文等^[6]在制备大胀形率复杂截面零件时,采用多步管材充液成形技术降低材料在高压成形阶段的减薄率,提高了成形精度,降低了设备负载。

此外,提高铝合金的成形速率也能有效改善铝合金的成形性能^[7-9]。结合多步成形和高速率成形工艺,Okoye等^[10]采用电磁辅助钣金冲压与增量式板件成形相结合的方法成形车门,利用内置在模具尖角的电磁线圈成形局部特征。Woodward等^[11]使用电磁力对2个简单的铝合金航空半成品件进行电磁校形,与传统校形技术相比,电磁校形技术在控制回弹与起皱方面具有巨大的优势。Yang等^[12]在Johnson-Cook(J-C)材料本构模型的基础上研究并建立了准静态加高速的两步成形类JC本构方程。金飞翔^[13]开展了板材在不同预拉伸条件下的准静态拉伸和动态拉伸实验,研究了不同预变形量和不同应变速率对6014铝合金力学性能的影响。

目前,关于准静态加高速两步成形的理论和工艺研究比较多,高速加高速两步成形的理论研究还处于空白阶段。文中拟设计一种两步拉伸试样,实现AA5182铝合金板材的两步高速拉伸;建立数值仿真模型指导实验中拉伸速度的设置。通过改变预拉伸区域的尺寸改变试样的应力状态,并分析2次拉伸区域在两步高速拉伸下的断裂应变。

1 实验

1.1 方法

1.1.1 试样设计

材料高速拉伸性能的测试设备主要有液压伺服式高速拉伸机和霍普金森杆。与准静态拉伸可以通过控制拉伸距离实现多次拉伸不同,试样在高速拉伸过程中不能随意中止,必须将试样拉断为止。综上,需要设计一种新的高速拉伸试样实现2次高速拉伸。

要实现2次高速拉伸,需满足2条设计准则:要严格区分2个拉伸区域,确保在不同拉伸速度下都是预拉伸区域先发生断裂;预拉伸区域断裂后,要保证第2次拉伸区域发生大变形。结合上述2条准则设计的两步拉伸试样的总长度为168 mm,宽为35 mm,厚度为1.2 mm,如图1所示。在一个试样上设计2个拉伸区域,以实现2次拉伸。第2次拉伸区域参照

标准单拉试样进行设计,长为18 mm,宽为15 mm,过渡圆角半径为25 mm。预拉伸区域与二次拉伸区域的形状相似,仅改变平行区的长度 L (以拉伸方向为试样的长度方向)和宽度 W 。文中设计了4组不同尺寸的预拉伸区域进行实验比较,分别为 $W=13.8$ mm, $L=0$ mm; $W=13.8$ mm, $L=2$ mm; $W=13.8$ mm, $L=4$ mm; $W=13.6$ mm, $L=2$ mm。

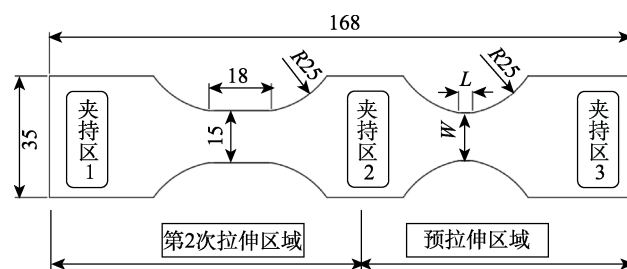


图1 两步高速拉伸试样

Fig.1 Two-step high speed tensile specimen

1.1.2 材料与方法

5系铝合金具有良好的成形性能、耐腐蚀性能、耐磨性能和疲劳强度,被广泛用于制备汽车的车门面板。文中的研究材料为AA5182铝合金(5系Al-Mg合金),各元素的质量分数如表1所示。

表1 AA5182 铝合金成分

Tab.1 AA5182 aluminum alloy composition						%
Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Cu	Al
4.0~5.0	0.4	0.018	0.3	0.10~0.15	0.15	余量

文中采用线切割制备了3种试样,即标准单次拉伸试样、只有预拉伸区域的单次拉伸试样以及拥有预拉伸区域的两步拉伸试样。在试样的平行区域制作不规则散斑,以便后续用高速相机测量应变。使用Instron 5900 试验机开展准静态拉伸实验,使用Zwick/Roell HTM 5020 高速拉伸机开展高速拉伸实验。由DIC系统和高速拉伸机组成的快速拉伸试验工装如图2a所示,通过DIC系统测量拉伸过程中试样的工程应变,同时通过HTM 5020 拉伸机测量试样的拉伸力,并利用式(1—3)将试样的工程应变和拉伸力转换成真实应变和真实应力。试样在应变率为 $10\sim 400$ s⁻¹时的真实应力-应变曲线如图2b所示。

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (1)$$

$$\sigma_e = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (3)$$

式中: ε_e 为工程应变; F 为拉伸力; A 为试样应变测试区的横截面积; σ_e , ε_t , σ_t 分别为工程应力、真实应变和真实应力。

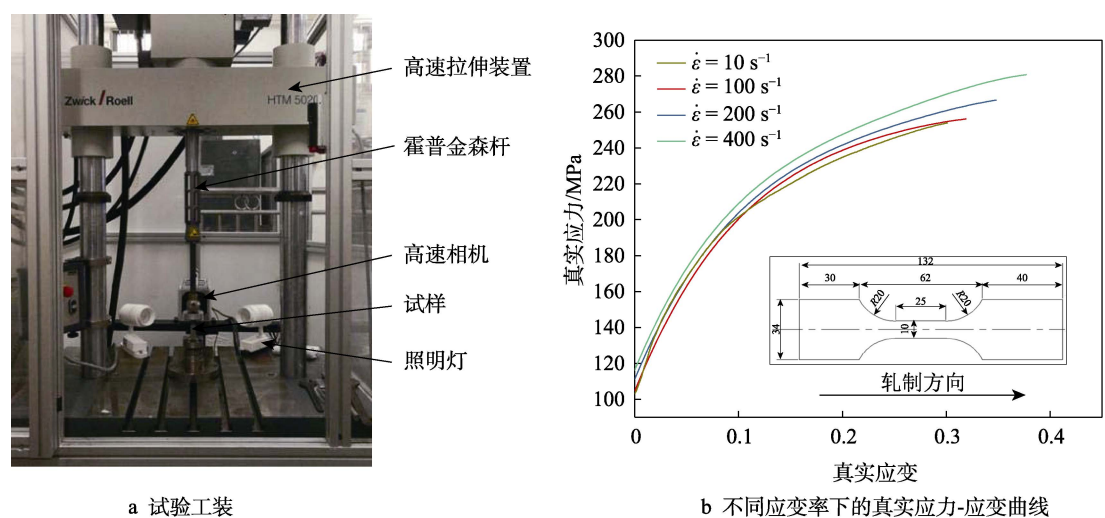


图 2 高速拉伸试验工装及拉伸性能

Fig.2 High speed tensile machine and the properties of specimens

两步高速拉伸的测试流程与标准单拉试样的测试流程相似。先准备好试样，在 2 个拉伸区域制作散斑点；然后用高速拉伸机的上下 2 个夹头分别夹紧夹持区 1 和夹持区 3，进行第 1 次高速预拉伸测试，并用高速相机拍摄记录 2 个拉伸区域的应变。试样断裂之后保持上夹头不动，用下夹头夹紧夹持区 2，进行第 2 次高速拉伸测试，最终得到第 2 次拉伸区域的应变。

1.2 数值模拟

为了验证设计的两步高速拉伸试样的可行性以及为后续实验提供指导，文中建立了不同尺寸试样的数值模型。J-C 模型^[14]全面考虑了应变硬化、应变速率和温度等 3 个因素的影响，是高速成形有限元建模中应用较广泛的材料模型之一。文中的高速拉伸实验都是在室温下进行的，实验过程中的温度升高不明显，可以忽略温升对材料的影响。综上所述，可以对 AA5182 铝合金采用简化版的 J-C 本构模型，其表达式为：

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}_*] \tag{4}$$

式中： σ 为材料的流动应力； ε 为材料的等效塑性应变； $\dot{\varepsilon}_* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲等效塑性应变速率； $\dot{\varepsilon}$ 为实验中试样的等效应变速率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率，一般取 0.001 s^{-1} ； A, B, n, C 分别为屈服强度、硬化系数、硬化指数以及应变速率灵敏系数。

将图 2b 中的数据用式 (4) 进行拟合，可以得到 4 个参数的值，即 $A=137.8 \text{ MPa}$ ， $B=285.0 \text{ MPa}$ ， $C=0.004 \text{ 03}$ ， $n=0.413 \text{ 25}$ 。

2 预拉伸部分结果分析

2.1 预拉伸区域单次拉伸试样断裂应变分析

为了探究试样的拉伸速度 v 、平行区宽度 W 、平

行区长度 L 等 3 个参数对断裂应变的影响，设计了几组参数值，并进行了编号，如表 2 所示。计算了试样断裂点 P 处的应变速率、真实应力和真实应变。

表 2 预拉伸试样参数

Tab.2 Parameters of pre-tension specimens

编号	拉伸速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平行区宽度/ mm	平行区长度/ mm	P 处应变速率/ s^{-1}
1 [#]	2	13.8	4	105
2 [#]	1.8	13.8	2	100
3 [#]	1.8	13.8	0	153
4 [#]	1	13.6	2	67
5 [#]	4	13.6	2	253

P 点的真实应力-真实应变曲线如图 3 所示。对比 4[#]和 5[#]曲线发现，材料的成形性能会随着变形速度的增大而提升。陈琳等^[15]也证实了这个说法。标准高速单拉试样的应变速率通常采用名义应变速率公式 ($\varepsilon=v/L$) 计算，计算结果与 P 处的实际应变速率差距较大，说明试样的应力状态非单拉，即应力三轴度

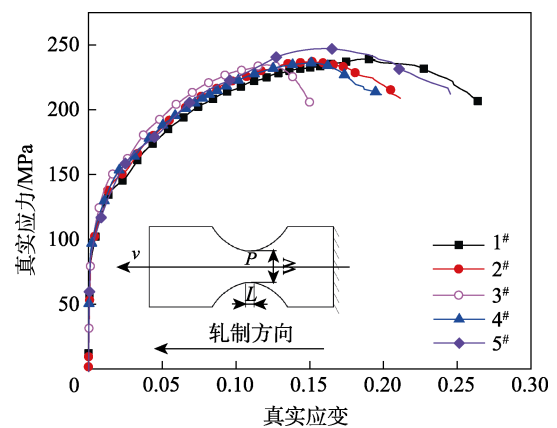


图 3 预拉伸试样真实应力-真实应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves of pre-tension specimens

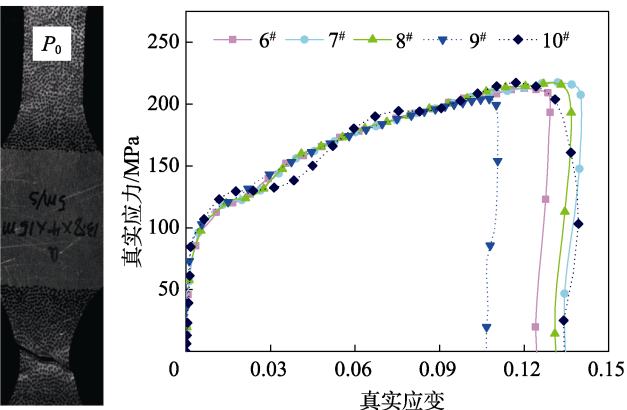
$\eta > 0.33$ 。对比 1[#], 2[#], 3[#]曲线和 2[#], 4[#], 5[#]曲线可以发现, 减小平行区长度会减小材料的断裂应变。毛云飞^[16]研究发现, 试样的断裂应变随应力三轴度的增加而减小。综上所述, 改变试样的 L 值会改变材料的应力状态, 即试样的应力三轴度随 L 的减小而增大。由图 3 还可得知, 2[#]与 4[#]曲线的重合度较高, 这说明拉伸速度与平行区宽度对断裂应变的影响关系相反。此外, L 的减小也使平行段参与变形的材料减少, 导致应力集中效应加强, 应变率提高。

2.2 两步拉伸试样预拉伸区域的性能分析

两步拉伸试样预拉伸时的实验参数如表 3 所示。两步高速拉伸试样进行预拉伸时的断裂情况如图 4a 所示; 在 DIC 分析平台中选取第 2 次拉伸区域应变集中的 P_0 点进行数据处理, 得到真实应力-应变曲线, 如图 4b 所示。比较 6[#], 7[#], 8[#]试样对应的曲线可以发现, 第 2 次拉伸区域的真实应变随预拉伸区域平行区长度的减小呈先增加后减小的趋势, 即当 L 减小到一定程度时, 应变达到最大值, 之后随之减小。

表 3 两步拉伸试样预拉伸实验参数
Tab.3 Parameters of pre-tensile test of two-step high-speed tensile specimens

编号	拉伸速度/(m·s ⁻¹)	平行区宽度/mm	平行区长度/mm
6 [#]	5	13.8	4
7 [#]	5	13.8	2
8 [#]	5	13.8	0
9 [#]	2.5	13.6	2
10 [#]	10	13.6	2



a 试样断裂
b P_0 处真实应力-应变曲线
图 4 试样断裂情况及第 2 次拉伸区域的真实应力-应变曲线
Fig.4 Fracture condition of the specimen and true stress-strain curves of the secondary tensile area

3 2 次拉伸结果分析

高速相机测得的应变是以记录的第 1 张照片, 即开始拉伸前的试样尺寸, 进行分析获得的。试样经过

了 2 次拉伸, 在第 2 次拉伸时, 试样的平行区长宽和横截面积较于原始尺寸已经发生了变化, DIC 获得的数据是以预拉伸后试样的尺寸为参数进行处理的。综上所述, 为了获得两步拉伸试样的真实应力-应变曲线, 需要结合式 (1—3) 进行数据转化, 并将第 2 次 DIC 系统获得的应力-应变曲线与第 1 次的拉伸曲线相接, 最终得到 2 次高速拉伸的真实应力-应变曲线, 如图 5 所示。11[#], 12[#], 13[#]标准单次拉伸试样的应变率分别为 100, 200, 400 s⁻¹, 两步拉伸试样的应变率如表 4 所示。

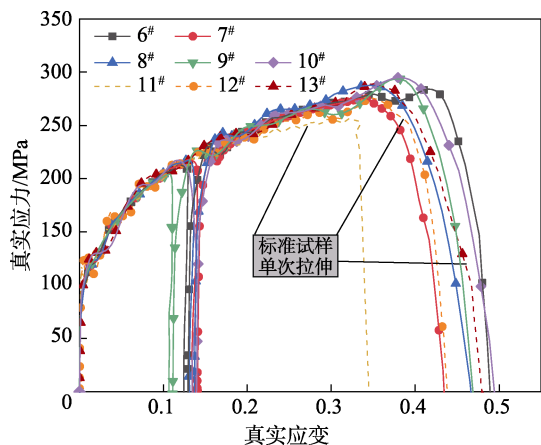


图 5 标准试样和两步拉伸试样的拉伸曲线
Fig.5 Tensile curves of the standard specimens and the two-step tensile specimens

表 4 两步拉伸试样的拉伸应变率
Tab.4 Strain rates of two-step high-speed tensile specimens

编号	第 1 次拉伸应变率/s ⁻¹	第 2 次拉伸应变率/s ⁻¹
6 [#]	150	300
7 [#]	100	400
8 [#]	100	600
9 [#]	60	400
10 [#]	300	650

比较标准单次拉伸试样和两步拉伸试样的真实应力-应变曲线可以发现, 两步拉伸试样预拉伸阶段的曲线与标准试样单次拉伸时的前半段曲线重合, 受应变率的影响很小。在第 2 次拉伸阶段, 标准试样在单次拉伸过程中依次经历了弹性变形、屈服、强化、紧缩、破裂等过程。两步拉伸试样在发生一定程度的强化后, 拉伸变形停止, 材料发生回弹, 导致材料硬化; 在进行第 2 次拉伸时, 材料的屈服强度增加, 抗拉强度也得到增加, 增幅为 10%左右; 断裂应变也得到显著增加, 增幅为 14.5%左右。

不同尺寸的高速拉伸试样在不同应变率下的 2 次拉伸曲线如图 6 所示。由图 6a 可知, 6[#], 7[#], 8[#]试样的断裂应变与预拉伸时第 2 次拉伸区域的变形情况正好相反, 最终 6[#]的拉伸断裂应变最大, 7[#]的断

裂应变最小。由图 6b 可知, 10[#]试样的断裂应变大于 8[#]试样的断裂应变, 这说明预拉伸的应变率会影响材料的损伤, 应变率越大, 材料的损伤值越低, 最终断裂应变也就越大。由图 6c 可知, 2 种试样前后 2 次的应变率相近, 在 7[#]试样预拉伸时, 由于预拉伸区域宽度大于 9[#]试样, 因此, 7[#]试样预拉伸阶段的

时间要比 9[#]试样长, 相应地, 第 2 次拉伸区域的应变比 9[#]试样大。第 2 次拉伸时的应变率大于预拉伸时的应变率, 9[#]试样的断裂应变大于 7[#]试样。由图 6d 可知, 10[#]试样的预拉伸应变率和二次拉伸应变率均大于 9[#]试样, 因此, 10[#]试样最终的断裂应变大于 9[#]试样。

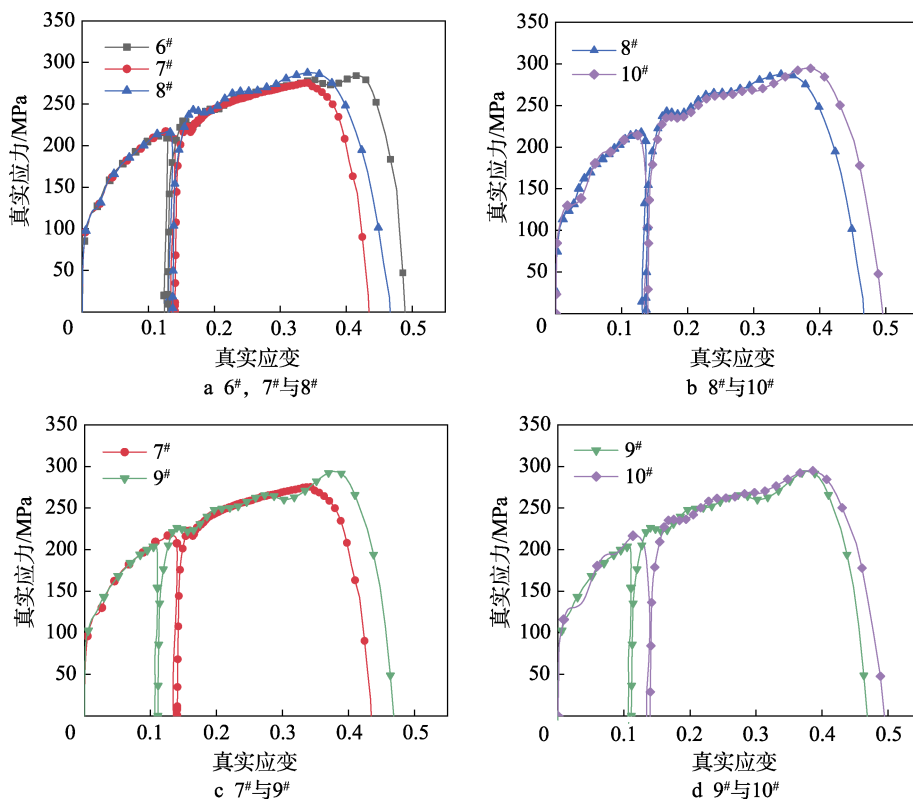


图 6 不同尺寸的两步拉伸试样在不同应变率下的材料性能

Fig.6 Comparison of material properties of different sizes two-step tensile specimens under different strain rates

4 结语

结合标准的拉伸试样和伺服式液压高速拉伸机的拉伸特点, 设计了一种两步高速拉伸试样, 并采用数值模型指导实验, 比较了不同尺寸的两步拉伸试样在不同应变率下的拉伸性能, 主要得到以下结论。

1) 设计的带有预拉伸区域的两步拉伸试样能够实现 2 次拉伸。

2) 改变试样预拉伸区域的尺寸能够改变相应的应力状态, 即沿拉伸方向的长度越小, 应力三轴度越大, 材料的断裂应变就越小。

3) 与单次高速拉伸相比, AA5182 铝合金材料在 2 次高速拉伸下的性能得到明显提升, 抗拉强度和断裂应变得到明显增加, 分别增长了 10% 和 14.5% 左右。

参考文献:

[1] 汪文芳, 孙成武. 汽车铝合金开发与应用[J]. 汽车实用技术, 2018(18): 258—259.

WANG Wen-fang, SUN Cheng-wu. Development and Application of Automobile Aluminum Alloy[J]. Automobile Applied Technology, 2018(18): 258—259.

[2] 詹志强. 铝合金汽车车身板应用现状及需求前景[J]. 有色金属加工, 2012, 41(6): 1—5.

ZHAN Zhi-qiang. Application Situation and Demand Prospect of Aluminum Automobile Body Sheet[J]. Nonferrous Metals Processing, 2012, 41(6): 1—5.

[3] 路洪洲, 王智文, 陈一龙, 等. 汽车轻量化评价[J]. 汽车工程学报, 2015, 5(1): 1—8.

LU Hong-zhou, WANG Zhi-wen, CHEN Yi-long, et al. Evaluation Methodology for Automotive Lightweight Design[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2015, 5(1): 1—8.

[4] 邱超斌, 江培成, 郎利辉, 等. 小曲率铝合金框形件弯胀成形数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(6): 106—112.

QIU Chao-bin, JIANG Pei-cheng, LANG Li-hui, et al. Numerical Simulation of Bending-Bulging Forming of Aluminum Alloy Frame-Shaped Part with Small Curvature[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020,

- 12(6): 106—112.
- [5] 李正芳, 安治国, 卢飞. 某汽车零件多工步成形的工艺参数多目标优化[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 92—94.
LI Zheng-fang, AN Zhi-guo, LU Fei. Multi-Objective Optimization of Process Parameters of Multi-Step Forming for Automobile Parts[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(17): 92—94.
- [6] 阮尚文, 郎利辉, 刘铮, 等. 多步管材充液成形技术在大胀形率复杂截面零件中的应用[J]. 锻压技术, 2018, 43(9): 68—74.
RUAN Shang-wen, LANG Li-hui, LIU Zheng, et al. Application of Multi-Step Tube Hydroforming Technology for Parts with Complex Cross Section[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(9): 68—74.
- [7] RAVI K D, SWAMINATHAN K. Formability of Two Aluminum Alloys[J]. Materials Science and Technology, 1999, 15(11): 1241—1252.
- [8] WEN W, ZHAO Y, MORRIS J G. The Effect of Mg Precipitation on the Mechanical Properties of 5xxx Aluminum Alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 392(1): 136—144.
- [9] ROMHANJI E, POPOVIC M, GLISIC D, et al. Effect of Annealing Temperature on the Formability of Al-Mg4.5-Cu0.5 Alloy Sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1): 386—389.
- [10] OKOYE C N, JIANG J H, HU Z D. Application of Electromagnetic-Assisted Stamping (EMAS) Technique in Incremental Sheet Metal Forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(11): 1248—1252.
- [11] WOODWARD S, WEDDELING C, DAEHN G, et al. Production of Low-Volume Aviation Components Using Disposable Electromagnetic Actuators[J]. 2011, 211(5): 886—895.
- [12] YANG S, SUN L, DENG H, et al. A Modified Johnson-Cook Model of AA6061-O Aluminum Alloy with Quasi-Static Pre-Strain at High Strain Rates[J]. International Journal of Material Forming, 2020(3): 1—13.
- [13] 金飞翔. 不同预变形不同应变速率铝合金板材变形行为及应用研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2017: 17—18.
JIN Fei-xiang. Research on Deformation Behavior and Application of Pre-Deformed Aluminum Alloy Sheet with Different Strain Rate[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2017: 17—18.
- [14] JOHNSON G R, COOK W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541—548.
- [15] 陈琳, 邓盛卫, 王游根, 等. 变形速度和温度对 5182 铝合金成形性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(6): 28—32.
CHEN Lin, DENG Sheng-wei, WANG You-gen, et al. Effect of Strain Rate and Temperature on the Formability of 5182 Aluminum Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(6): 28—32.
- [16] 毛云飞. AA5052 铝合金高速下本构及断裂模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 23—42.
MAO Yun-fei. Research on Constitutive Model and Ductile Fracture Criterion of AA5052 at High Work Piece Speed[D]. Changsha: Hunan University, 2019: 23—42.