

汽车用 6061 铝型板温冲压减薄预测模型及实验验证

方 雅¹, 卢燕会^{1,2}, 任 燕¹, 卢东亮³, 姜 奎⁴

(1. 河南工业职业技术学院 机械工程学院, 河南 南阳 473000; 2. 同济大学 中德工程学院, 上海 201804;
3. 国电投南阳热电有限责任公司, 河南 南阳 473000; 4. 南阳长弓机械科技有限公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 选择 Autoform 对 6061 铝型板开展模拟测试, 对比不同温冲压工艺下的板材成形性能, 构建了预测型板温成形件的减薄参数模型, 并设计了验证实验方案, 零件合格率得到显著提升。研究表明: 板料温度提升过程中, 型板温成形件的减薄率先降低再升高。逐渐提高压边力后, 成形件形成了更大的减薄率。提高摩擦因数后, 各点的减薄率的变化均增大。板料温度、摩擦因数、压边力均会引起减薄率的明显变化, 在三元二次回归方程基础上构建减薄预测模型。预测和实测减薄率对比结果误差的最大值与最小值分别为 6.6% 与 1.4%, 说明经过修正处理的模型可以实现对危险区减薄量的准确预测。该研究为优化 6061 铝板料温冲压工艺提供了理论参考。

关键词: 6061 铝合金; 温冲压; 成形性能; 减薄预测; 减薄率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.010

中图分类号: TG156.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0079-06

Thinning predictive model and experimental verification on warm stamping of 6061 aluminum plate for car

Fang Ya¹, Hu Yanhui^{1,2}, Ren Yan¹, Hu Dongliang³, Jiang Kui⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China;
2. Sino-German School of Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. SDIC Nanyang Thermal Power Co., Ltd., Nanyang 473000, China;
4. Nanyang Changbow Machinery Technology Co., Ltd., Nanyang 473000, China)

Abstract: 6061 aluminum plate was simulated and tested by Autoform, and comparing the forming properties of plates under different warm stamping processes, the model that could predict the thinning parameters of warm-formed parts for plate was constructed. Then, the verification experiment scheme was designed, and the qualified rate of parts was improved significantly. The results show that in the process of the temperature increasing for sheet metal, the thinning rate of the warm-formed parts for plate decreases first and then increases. When the blank holder force is gradually increased, the formed part forms a larger thinning rate. When the friction coefficient is increased, the thinning rates of all points increases. The sheet metal temperature, the friction factor and the blank holder force can cause the significant changes of thinning rate, and a thinning prediction model is constructed on the basis of ternary quadratic regression equation. The maximum and minimum errors of the comparison results between the predicted and actual tested thinning rates are 6.6% and 1.4%, respectively, indicating that the modified model can accurately predict the thinning amount in the dangerous area. This study provides a theoretical reference for optimizing the warm stamping process of 6061 aluminum alloy sheet metal.

Key words: 6061 aluminum alloy; warm stamping; forming property; thinning prediction; thinning rate

6061 铝合金是一种比强度高、抗腐蚀的轻型结构材料, 在汽车支撑架等方面得到广泛应用^[1-3]。

受 6061 铝合金本身组织结构特征的影响, 其在室温环境中无法达到很高的伸长率, 不能将其加工为复杂外形的部件, 但对其进行升温后则可以大幅降低板料的变形抗力, 使各区域金属组织均形成均匀流动的状态^[4-5], 因此, 通常选择温冲压方法来完成 6061 铝合金的加工处理过程。

由于加工过程中受到热力耦合作用, 产品的外形尺寸与力学特性会发生明显改变, 目前已有学者对这

收稿日期: 2022-08-25; 修订日期: 2022-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51675383); 河南省科技攻关项目 (182102310706); 南阳市科技攻关项目 (KJGG019)

作者简介: 方 雅 (1982-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: fangya1104@163.com

通信作者: 卢燕会 (1982-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: hyh850805@126.com

方面进行了深入分析^[6-9]。例如：刘克威等^[10]在铝合金成形加工中利用热压缩方法分析了变形抗力与应变速率、温度之间的关系，在此基础上构建得到了变形抗力的仿真模型；Li Y 等^[11]测试了铝合金受到轴向与扭转作用力时的抗疲劳能力，利用扫描电镜表征了试样断裂区域的微观结构；朱永博等^[12]以低温剪切浇注式工艺制得 7075 铝合金试样，之后依次对其实施均匀化、热挤压以及 T6 时效处理，表征了铝合金的组织与拉伸性能；Milkereit B 等^[13]以硬度测试与差示扫描量热法相结合的形式分析了 EN-AW-7021 与 EN-AW-6061 铝合金经过升温与冷却处理后发生的组织相转变情况，由此确定两种合金试样的最佳固溶退火工艺参数及其临界降温速度，之后通过实验测试了不同热处理工艺下试样的力学性能差异性。以上研究主要报道了以不同变形工艺制备得到的 6061 铝合金的微观组织形态与力学特性参数，但并未对 6061 铝合金温冲压件开展减薄分析。在进行冲压加工的过程中，板料减薄状态将会对模具的可靠性与冲压件寿命造成直接影响^[14]。

根据以上分析，本文选择 Autoform 对 6061 铝型板开展模拟测试，对比了不同温冲压工艺下的板材成形性能，构建得到了可以预测型板热成形件减薄参数的仿真模型，之后设计了上述模型的验证实验方案，使零件合格率获得了显著提升，也为优化 6061 铝合金板料温冲压工艺提供了理论参考。

1 汽车型板有限元模型建立

本文选择 Autoform 软件为汽车型板加工过程构建仿真模型，以弹塑性板料为研究对象进行变形加工测试，将其厚度加工为 1.6 mm，设置了刚性的上、下模具与压边圈。同时结合型板自身结构，在凹模中心区域开设了一个能够移动控制的小凹模，开始进入成形阶段时，此处相对两侧区域先发生变形，然后跟随凹模一起下降至其他部位。图 1 为型板温冲压减薄模型。本实验对 6061 铝合金型板进行了测试分析。

本文选择高温电子力学测试机表征了 6061 铝合金试样在高温状态下的拉伸性能，依次得到应变速率为 0.1、0.01 和 0.001 s⁻¹ 与变形温度为 440、460 和 480 ℃ 的真实应力-真实应变曲线。图 2 为不同条件下的热拉伸真实应力-真实应变曲线。共测试了 18 条真实应力-真实应变曲线，之后将数据以材料卡的形式进行保存，再将结果导入 Autoform 软件内，控制弹性模量 $E=7.0 \text{ GPa}$ ，比热为 $955 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ，密度为 $2.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，泊松比为 $\nu=0.31$ ，传导系数为

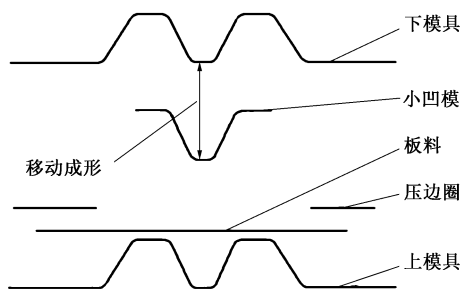
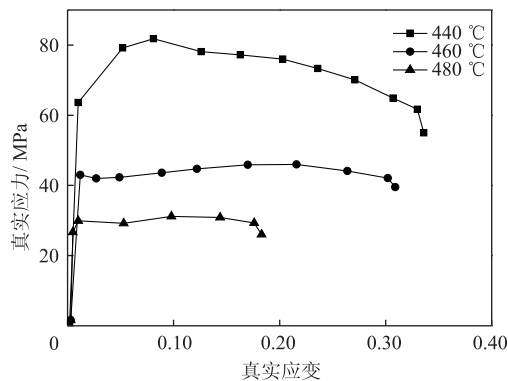
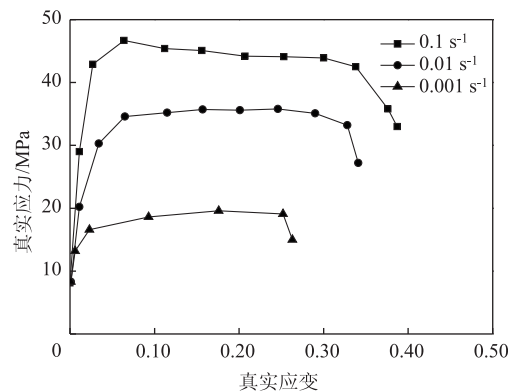


图 1 型板温冲压减薄模型

Fig. 1 Thinning model of warm stamping for plate



(a)



(b)

图 2 6061 铝合金热拉伸真实应力-真实应变曲线

(a) 应变速率为 0.1 s⁻¹ (b) 变形温度为 460 ℃

Fig. 2 True stress-true strain curves of 6061 aluminum alloy during hot tensile

(a) Strain rate of 0.1 s⁻¹ (b) Deformation temperature of 460 ℃

$126 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

按照升温、冲压、降温与回弹顺序设定 Autoform 的成形加工流程^[15]。结合前期 6061 铝合金的加工条件，设定表 1 所示的工艺参数。

2 模拟结果与分析

2.1 板料温度对减薄率的影响

将压边力设定为 20 kN、摩擦因数设定为 0.1，

表 1 工艺参数设置

Table 1 Setting of process parameters

参数	数值
板料温度/℃	440~480
摩擦因数	0.2~0.4
压边力/kN	20~40

在板料温度为 440~480 ℃ 范围内选择不同的温度参数。结合模拟测试结果，测试板料容易破裂的部位（图 3 中标记点 A、B、C 和 D），得到图 4 中的减薄率数据。

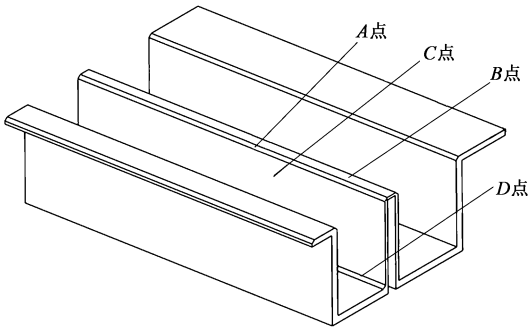


图 3 危险部位取点位置

Fig. 3 Positions of selected points in dangerous parts

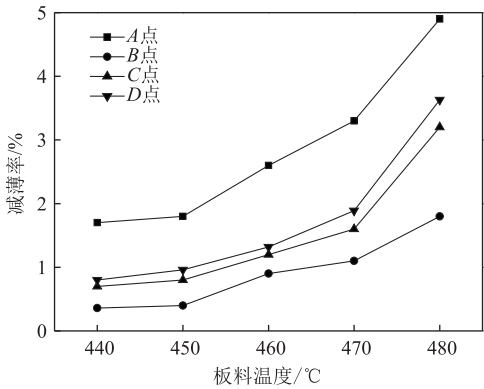


图 4 不同板料温度下 6061 铝型板温冲压减薄率结果

Fig. 4 Results of warm stamping thinning rate for 6061 aluminum plate under different plate temperatures

对图 4 进行分析可知，提升板料温度的过程中，型板成形件的减薄率呈现出先降低再升高的变化趋势，这是因为：随着板料温度的上升，在铝合金中形成了更低的流变应力，由此引起成形极限增大的现象，附近板料则可以迅速起到补充的效果，而当板料温度进一步上升后，发生了流变应力的降低，促进变形区材料更快发生流动，对型板的其余区域进行成形时，危险区属于先成形区域，此时更多材料经传力区进入变形范围，从而引起更大程度的减薄。

按照减薄率从小到大的顺序排列依次为 B 点、C 点、D 点、A 点。考虑到 B 点属于最先开始成形的部位，此部分进入成形阶段时，没有形成压边力作用，材料得到了充分流动，大幅降低了减薄量，在逐渐提高型板压边力并且其他位置发生成形转变时，B 点位置产生模具摩擦力从而减小了板料的流动能力，此部位在成形阶段达到了最低的减薄量；A 点位置处于中部圆角，在最初成形的过程中，便引起厚度的明显减薄，进入后期阶段时其余部位也发生了变形，导致应变区域发生了更大扩展，引起 A 点部位的材料更快向外流动，最终使得 A 点部位发生了最明显的减薄现象。

2.2 压边力对减薄率的影响

控制板料温度为 460 ℃ 与摩擦因数为 0.35 的恒定状态，测试了不同压边力下的试样成形性能，压边力范围介于 20~40 kN 之间，型板成形件的危险区减薄率结果见图 5。根据图 5 发现，逐渐提高压边力后，成形件形成了更大的减薄率。这是因为提高压边力后，材料获得了更大的流动阻力，而边缘区域的材料则无法对危险区起到及时补充的作用，从而引起这一区域发生厚度的明显降低，严重时甚至发生了拉裂现象，可以看到危险区形成了与图 4 基本一致的减薄程度变化特征。

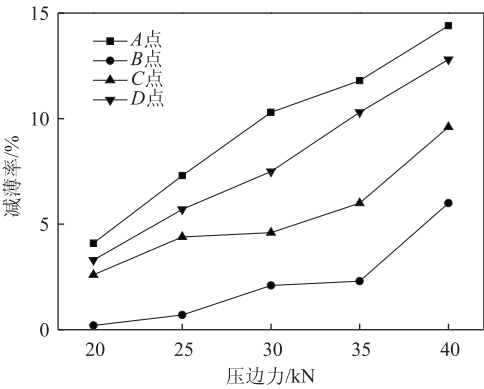


图 5 不同压边力下的 6061 铝型板温冲压减薄率结果

Fig. 5 Results of warm stamping thinning rate for 6061 aluminum plate under different blank holder forces

2.3 摩擦因数对减薄率的影响

在板料温度为 460 ℃ 与压边力为 20 kN 的恒定值条件下，将摩擦因数依次设定为 0.2~0.4，对型板成形件危险区的减薄率进行测试，得到如图 6 所示的减薄率结果。可以看到，提高摩擦因数后，各点均发生了减薄率增大的变化现象，说明进行温冲压处理时，提高摩擦力将会阻碍板料的流动过程，从而使危险区板料的厚度减小。危险区标记点的减

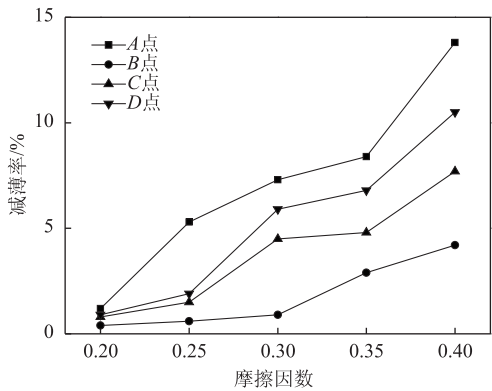


图 6 不同摩擦因数下 6061 铝型板温冲压减薄率结果
Fig. 6 Results of warm stamping thinning rate for 6061 aluminum plate under different friction coefficients

薄程度表现出与图 4 相同的趋势。同时还可以明显发现,虽然 C 点位置并未达到最大的减薄率,但获得了最大的增幅,这是由于提高摩擦因数后,先后发生成形的模具的底部位置相当于 2 个固定的约束区,当后成形区形成更大的应变后,中间区域 C 点受到更大程度的拉力作用,导致减薄率更快上升。

2.4 减薄预测模型

根据以上研究可以发现,板料温度、摩擦因数、压边力均会引起减薄率的明显变化。结合线性回归的分析方法,在三元二次回归方程基础上构建了型板危险区域减薄预测模型。以 A 点为例,其表达式为:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

式中: y 为减薄率; a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_{12} 、 b_{13} 、 b_{23} 、 b_{11} 、 b_{22} 、 b_{33} 为常数; x_1 为板料温度; x_2 为摩擦因数; x_3 为压边力。

经单因素模拟以及回归正交测试,得到表 2 所示的结果。最终建立的减薄预测模型为:

$$y = 282 - 1.46x_1 - 36.52x_2 + 0.41x_3 + 0.15x_1x_2 + 2.6 \times 10^{-4}x_1x_3 + 0.06x_2x_3 + 1.33 \times 10^{-3}x_1^2 - 2.95x_2^2 - 1.17 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (2)$$

3 温冲压实验研究

本文对 6061 铝合金进行了温冲压测试,根据测试结果判断型板危险区域减薄预测模型的预测性能,本实验在 5000 kN 液压机上进行,同时配备了箱式电阻炉进行温度控制。结合之前的测试情况,设定的实验参数为:板料温度依次为 440~480 ℃,压边力为 20 kN,持续保温 0.5 h,保压 30 s。

表 2 回归正交实验方案和结果

Table 2 Schemes and results of regression orthogonal test

实验序号	板料温度/℃	摩擦因数	压边力/kN	减薄率/%
1	440	0.2	30	5.5
2	440	0.2	20	4.8
3	440	0.2	40	7.8
4	440	0.3	30	1.9
5	440	0.3	20	3.2
6	440	0.3	40	2.6
7	440	0.4	30	2.8
8	440	0.4	20	1.2
9	440	0.4	40	4.5
10	460	0.2	30	2.9
11	460	0.2	20	4.6
12	460	0.2	40	8.5
13	460	0.3	30	3.9
14	460	0.3	20	1.8
15	460	0.3	40	7.2
16	460	0.4	30	4.1
17	460	0.4	20	2.6
18	460	0.4	40	6.8
19	480	0.2	30	3.3
20	480	0.2	20	1.9
21	480	0.2	40	7.2
22	480	0.3	30	3.5
23	480	0.3	20	2.5
24	480	0.3	40	7.1
25	480	0.4	30	6.3
26	480	0.4	20	4.1
27	480	0.4	40	8.7

以冲压测试加工得到的型板的尺寸可以发现,利用冲压减薄方法进行处理后,成形件只发生了小幅回弹,推断温冲压可以有效地改善工件回弹并获得更高的精度。通过分析厚度参数可以发现,关键点的厚度介于 1.46~1.62 mm 内,板料保持 1.60 mm 的厚度值,减薄和增厚均处于极限区间内,说明本次制得了合格的成形件。

图 7 为预测和实测减薄率对比结果。逐渐提高板料温度后,减薄率预测值与实测值均增大,形成了幅度更大的减薄率。预测值和实测值之间的最大误差为 6.6%、最小误差为 1.4%,减薄率实测值均超过预测结果。这是因为当工件由加热炉转移至模具时,板料发生了热量快速散失的情况,导致冲压

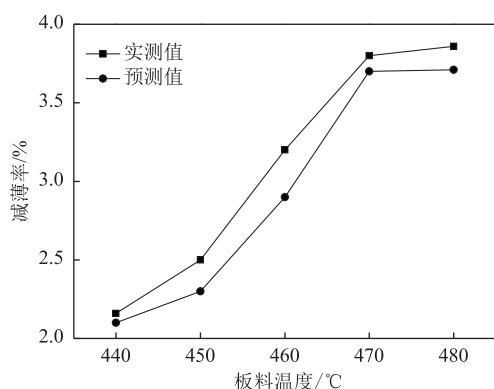


图7 预测和实测减薄率对比结果

Fig. 7 Comparison results of thinning rate between predicted and actual tested results

处理时的板料温度比设计温度更低, 因此, 板料流动能力比模型参数更小。

为了提升安全性, 本实验修正了减薄预测模型, 加入了安全因子 k , 根据最小二乘法得到 k 值为 1.091, 最终获得的减薄预测模型为:

$$y = 242.32 - 1.34x_1 - 47.24x_2 + 0.45x_3 + 0.24x_1x_2 + 6.8 \times 10^{-4}x_1x_3 + 0.06x_2x_3 + 1.26 \times 10^{-3}x_1^2 - 3.48x_2^2 - 1.15 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (3)$$

通过比较图 7 实测值和式 (3) 计算结果, 说明经过修正处理的模型可以实现对危险区减薄量的准确预测。

4 结论

(1) 提升板料温度的过程中, 发生了型板成形件减薄率先降低再升高的变化趋势。逐渐提高压边力后, 成形件形成了更大的减薄率。提高摩擦因数后, 各点的减薄率均增大。

(2) 板料温度、摩擦因数、压边力均会引起减薄率的明显变化, 在三元二次回归方程的基础上构建减薄预测模型。

(3) 利用本文方法处理后, 测试成形件只发生了小幅回弹, 推断温冲压可以有效地改善工件回弹并获得更高精度。预测和实测减薄率对比结果的误差最大值与最小值分别为 6.6% 与 1.4%, 说明经过修正处理的模型可以实现对危险区减薄量的准确预测。

参考文献:

[1] 凡晓波, 王旭刚, 陈险烁, 等. 铝合金管材超低温介质压力胀形行为 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 1-6.

Fan X B, Wang X G, Chen Y S, et al. Pressure bulging behavior of aluminum alloy pipe in ultra-low temperature medium [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 1-6.

[2] Shin J, Kim T Y, Kim D E, et al. Castability and mechanical properties of new 7xxx aluminum alloys for automotive chassis/body applications [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 698: 577-590.

[3] 蒋琳, 徐忠根. 基于单片机控制的 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接头组织与性能 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (4): 37-43.

Jiang L, Xu Z G. Microstructure and properties of Q890D steel/6061 aluminum alloy MIG welded joints controlled by single chip microcomputer [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49 (4): 37-43.

[4] 刘伟, 吴远志, 邓彬, 等. 时效工艺对 6061 铝合金力学性能各向异性的影响及微观组织研究 [J]. 材料导报, 2021, 35 (4): 4134-4138.

Liu W, Wu Y Z, Deng B, et al. Effect of aging process on anisotropy of mechanical properties and microstructure of 6061 aluminum alloy [J]. Materials Review, 2021, 35 (4): 4134-4138.

[5] Deng Y L, Guo Y S, Wu P, et al. Optimal design of flax fiber reinforced polymer composite as a lightweight component for automobiles from a life cycle assessment perspective [J]. Journal of Industrial Ecology, 2019, 23 (4): 986-997.

[6] 邱宇, 孟强, 董继红, 等. 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊工艺及性能研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 86-91.

Qiu Y, Meng Q, Dong J H, et al. Friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 86-91.

[7] 于金程, 陈玉平, 许桂林, 等. 6061 铝合金环形锻件动态力学性能与失效行为 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 179-185.

Yu J C, Chen Y P, Xu G L, et al. Dynamic mechanical properties and failure behavior of 6061 aluminum alloy ring forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 179-185.

[8] Li Y B, Li Y T, Lou M, et al. Lightweight car body and its challenges to connection technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (18): 44-54.

[9] 张丽凤. 汽车用 6061 铝合金热压缩变形行为研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (11): 174-181.

Zhang L F. Deformation behavior of 6061 aluminum alloy used in automobile under hot compression [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (11): 174-181.

[10] 刘克威, 姚明镜, 程精涛, 等. 7075 铝合金热变形抗力模型 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (5): 161-163.

Liu K W, Yao M J, Cheng J T, et al. Hot deformation resistance model of 7075 aluminum alloy [J]. Hot Working Process, 2019, 48 (5): 161-163.

[11] Li Y, Retraint D, Xue H, et al. Fatigue properties and cracking mechanisms of a 7075 aluminum alloy under axial and torsional loadings [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 19: 637-644.