

# 腐蚀及温度循环对 6061 铝合金力学性能的影响

刘兵飞, 罗雪航

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

**摘要:** 为合理描述 6061 铝合金在腐蚀和温度循环下的应力流动行为, 通过理论研究、实验测试和有限元仿真相结合的手段讨论了腐蚀及温度循环对 6061 铝合金力学性能的影响。实验研究结果表明: 腐蚀和温度循环均可导致 6061 铝合金屈服强度和抗拉强度的降低; 且腐蚀液浓度越高、温度循环次数越多, 材料力学性能下降趋势越明显。通过不同腐蚀和温度循环条件下应力-应变曲线的对比, 修正了 Johnson-Cook 本构模型并标定了各项系数, 得到了考虑腐蚀和温度循环下的修正本构模型, 且理论模型与实验测试及有限元结果吻合良好; 进而基于该本构模型, 讨论了腐蚀时间和腐蚀浓度和温度循环次数对 6061 铝合金力学性能的影响。

**关键词:** 6061 铝合金; 本构模型; 腐蚀; 温度循环; 屈服强度; 抗拉强度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.034

**中图分类号:** TG146.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 07-0243-10

## Influence of corrosion and temperature cycle on mechanical properties for 6061 aluminum alloy

Liu Bingfei, Luo Xuehang

(School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to reasonably describe the stress flow behavior of 6061 aluminum alloy under corrosion and temperature cycling, the influences of corrosion and temperature cycling on the mechanical properties of 6061 aluminum alloy were discussed by the combination of theoretical research, experimental tests and finite element simulation. The experimental results show that both corrosion and temperature cycling can lead to the reduction of yield strength and tensile strength for 6061 aluminum alloy. The higher the concentration of corrosive solution is, the more the times of temperature cycles is, and the more obvious the downward trend of mechanical properties for the material is. By comparing the stress-strain curves under different corrosion and temperature cycling conditions, the Johnson-Cook constitutive model is revised and various coefficients are calibrated, and the revised constitutive model considering corrosion and temperature cycling is obtained. The theoretical model is in good agreement with the experimental tests and finite element results. Based on the constitutive model, the influences of corrosion time, corrosion concentration and temperature cycle on the mechanical properties of 6061 aluminum alloy are discussed.

**Key words:** 6061 aluminum alloy; constitutive model; corrosion; temperature cycling; yield strength; tensile strength

6061 铝合金由于具有极佳的加工性能、优良的焊接特点及电镀性、良好的抗腐蚀性、较高的韧性与比强度等优良特点<sup>[1-6]</sup>, 已被广泛应用于航空航天、兵器工业、交通运输等各个领域。然而研究表明, 腐蚀和温度循环均可对 6061 铝合金的力学性能造成显著影响, 这也必将对其在工程中的应用构成难以预知的风险<sup>[7-8]</sup>。所以, 很有必要对其在腐蚀

和温度循环下的力学性能进行研究和探讨。

对于 6061 铝合金力学性能的研究, Zheng C B 等<sup>[9]</sup>对 6061 铝合金进行了等温蠕变实验, 并给出了用以描述材料蠕变行为的本构模型; Rahi K D 等<sup>[10]</sup>对 6061 铝合金进行了硬度和微观结构的测试; 刘宁等<sup>[11]</sup>研究了热处理固溶工艺对 6061 铝合金组织和力学性能的影响; 雷经发等<sup>[12]</sup>通过修正 Johnson-Cook 本构模型描述了高应变率下 6061 铝合金的力学性能; 盈亮等<sup>[13]</sup>修正了传统 Field-Backofen 模型, 用以描述 6061 铝合金在高温成形下的力学性能; Liu Y 等<sup>[14]</sup>修正了 Arrhenius 和 Cowper-Symonds 本构模型, 用以预测材料在高温和温差较大情况下的裂纹; 刘伟等<sup>[15]</sup>通过有限元模拟探究了 6061 铝合金

**收稿日期:** 2021-07-16; **修订日期:** 2021-10-19

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (11502284); 中科院重点部署项目 (KFZD-SW-435); 中央高校基本科研业务费 (3122020077)

**作者简介:** 刘兵飞 (1985-), 男, 博士, 副教授

**E-mail:** bingfeiliu2@126.com

的挤压变形能力;邓云飞等<sup>[16]</sup>通过 ABAQUS/Explicit 有限元软件建立了弹靶撞击 6061 铝合金的三维有限元模型;Gilioli A 等<sup>[17]</sup>修正了 Mohr-Coulomb 模型和 Bauwierzicki 断裂模型,用以描述弹丸撞击 6061 铝合金的力学性能。

对于考虑腐蚀的铝合金材料力学性能的研究,Derose J A 等<sup>[18]</sup>采用湿度控制室对 AA7075 铝合金的腐蚀行为进行研究;Pidaparti R M 等<sup>[19]</sup>研究了 AA2024-T3 铝合金在腐蚀条件下的降解行为;韩东锐等<sup>[20]</sup>利用室内海水浸泡实验、点蚀电位测试、流动海水模拟实验等方法研究了 6061 铝合金在 80 ℃ 海水中的腐蚀行为。对于考虑温度循环下铝合金材料力学性能的研究,刘晓云等<sup>[21]</sup>利用高低温循环实验箱使铝基复合材料在 -50~120 ℃ 温度范围内分别循环 10、50、100 和 200 次,用以研究不同的温度循环次数对材料组织和性能的影响。

虽然上述文献均开展了一些考虑腐蚀或温度循环对 6061 铝合金力学性能影响的相关理论和实验研究工作,然而还未对考虑腐蚀和温度循环下 6061 铝

合金的本构模型进行详细报导。而且由于实验条件的局限性,不同腐蚀条件和温度循环次数下 6061 铝合金的力学行为也难以通过大量的实验加以描述。鉴于此,本文提出一种考虑环境腐蚀和温度循环条件的 6061 铝合金的本构模型,并将理论计算结果与实验测试结果和有限元仿真结果进行比较,验证了模型的正确性,并在建立的正确本构模型的基础上,讨论了不同腐蚀条件和不同温度循环条件对 6061 铝合金力学性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 常温静态拉伸实验

实验所使用的材料为标准 6061 铝合金棒材试件与板材试件,其几何参数和实物图如图 1a 和图 1b 所示,其中棒材试件的总长度为 170 mm,夹持端直径为  $\Phi 30$  mm,中间直径为  $\Phi 10$  mm,标距为 70 mm。板材总长度为 140 mm,夹持端宽度为 30 mm,中间宽度为 15 mm,标距为 50 mm,厚度为 3 mm。材料的化学成分表见表 1。

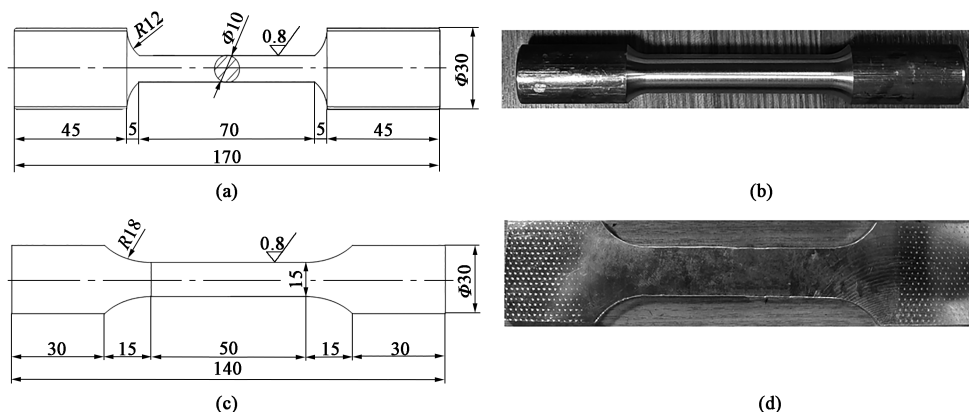


图 1 标准 6061 铝合金实验试件

(a) 棒材试件,几何参数 (b) 棒材试件,实物 (c) 板材试件,几何参数 (d) 板材试件,实物

Fig. 1 Experimental specimens of standard 6061 aluminum alloy

(a) Bar specimen, geometric parameters (b) Bar specimen, entity (c) Plate specimen, geometric parameters (d) Plate specimen, entity

表 1 6061 铝合金的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 6061 aluminum alloy  
(%, mass fraction)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.40	0.70	0.15	0.15	0.60 ~ 1.20	0.05 ~ 0.35	0.25	0.10	余量

用于常温静态拉伸的仪器为微机控制万能试验机 504C-TS, 首先对未做任何处理的试件进行单向拉伸, 加载速度为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 如图 2 所示。

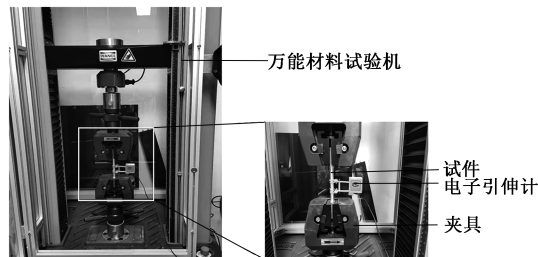


图 2 单向拉伸实验及设备

Fig. 2 Uniaxial tensile test and equipment

## 1.2 试件的腐蚀处理

为讨论腐蚀对 6061 铝合金动态力学性能的影响, 选用如图 1b 所示的 6061 铝合金棒材试件, 共 9 根, 实验温度设置为  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 容面比即溶液体积  $SV$  与试样表面  $SA$  之比 ( $SV/SA$ ) 为  $0.15 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 试件静置在 2000 mL 不同浓度的氯化钠溶液下进行腐蚀处理。实验分 3 组进行, 3 组实验设置条件分别为 1.75%、3.50% 和 7.00% 的氯化钠溶液。实验开始前, 先用薄纱纸对每根 6061 铝合金试件进行均匀打磨, 去掉表面的氧化膜, 使得腐蚀能够顺利进行。每组实验使用 3 根试件在室温下分别在溶液中静置 4、24 和 48 h, 随后取出试样并妥善保存。腐蚀处理完成后, 将收集好的试件利用万能材料试验机进行单向拉伸实验后得到材料经过腐蚀后的应力-应变关系曲线。

## 1.3 试件的温度循环处理

使用 LRP500 型自控式温度循环疲劳试验机对 6061 铝合金进行温度循环处理, 如图 3 所示, 其中选用的试件为如图 1d 所示的 6061 铝合金板材试件, 共 4 根。将低温槽温度设置为  $10^\circ\text{C}$ , 高温槽温度设置为  $80^\circ\text{C}$ , 确定两槽中的液体能够完全浸没试件后, 将试件固定在夹头上开始循环, 循环次数设置为 50、100、200 和 500 次, 单次循环时间为 1 min, 其中试件在低温槽和高温槽中所放置的时间均为 25 s。实验完成后, 将温度循环后的试件在万能材料试验机上进行单向拉伸实验, 得到材料的应力-应变关系曲线。

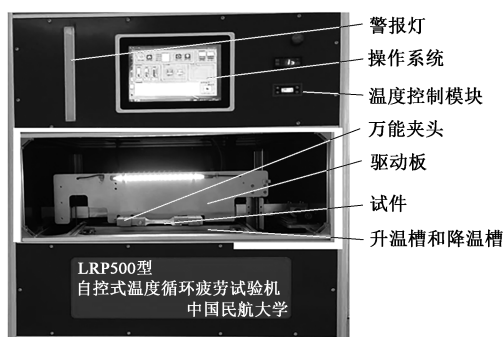


图3 自控式温度循环疲劳仪

Fig. 3 Automatic temperature cycles fatigue tester

## 1.4 实验结果讨论

本文选择棒材试件作为腐蚀处理的对象。经过腐蚀处理后, 棒材试件的应力-应变关系曲线如图 4 所示。由图 4 可见, 材料经过腐蚀处理后, 力学性能的衰减受到腐蚀时间和腐蚀液浓度的影响, 且当氯化钠溶液浓度高于 3.50% 时, 腐蚀处理时间超过

24 h 后的力学性能衰减较为明显。当氯化钠溶液浓度为 7.00% 时, 腐蚀时间在超过 24 h 后, 每延长 1 h, 材料的力学性能平均下降 0.3%; 当腐蚀时间超过 48 h 后, 每延长 1 h, 材料的力学性能平均下降 10%。造成这种现象的可能原因为: 由于腐蚀的影响, 材料的屈服应变和断裂应变随着氯化钠溶液浓度的增加有所减小, 腐蚀可以使材料晶粒间的结合减小, 使得材料更容易达到屈服和断裂<sup>[22]</sup>; 且由于腐蚀的影响使得材料的塑性指标增强, 导致最大应变增加。此外, 本实验中 1.75% 氯化钠溶液腐蚀 4 h 和 7.00% 氯化钠溶液腐蚀 4 h 的实验数据, 由于受到试件制造时产生的成分不均或实验预处理时打磨不彻底等影响, 实验结果与上述规律不完全相符; 3.50% 氯化钠溶液中腐蚀 4 h 的实验数据受拉伸实验时夹具夹持不平稳的影响, 在屈服阶段所受应力有小幅下降趋势。

本文选择 6061 铝合金板材来进行温度循环处理。考虑温度循环后得到的应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 随着温度循环次数的增加, 材料的屈服强度和抗拉强度随之递减; 在温度循环 200 次之前, 循环次数每递增 100 次, 材料的力学性能平均下降 0.022%; 温度循环 200~500 次时, 温度循环次数每递增 100 次, 材料的力学性能平均下降 0.026%。可见温度循环对材料的力学性能起到的下降作用较为明显, 且在高温度循环次数下材料的损坏更为严重。当温度循环次数介于 0~200 次之间时, 材料的应力所受到的影响较小, 断裂应变随温度循环次数的增加而有所减小, 当温度循环次数在 200~500 次之间时, 材料的屈服强度大幅下降, 断裂应变有所增加, 说明温度循环对材料的失效模式有较为显著的影响, 且在 200~500 次温度循环次数范围内, 影响程度更大。

## 2 本构模型的建立及参数确定

J-C (Johnson-Cook) 模型是由 Johnson G R 与 Cook W H<sup>[23]</sup> 在 1983 年提出的一种粘塑性本构模型, 它能较好地反映应变速率与变形温度对材料动态力学性能的影响。仅涉及应力的 J-C 初始模型为:

$$\sigma = (R_{p0.2} + B\varepsilon_p^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)[1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为应力;  $\varepsilon_p$  为真实塑性应变;  $n$  为硬化指数;  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ , 为无量纲应变速率;  $\dot{\varepsilon}$  为有效塑性应变速率;  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考塑性应变速率;  $T^* = (T - T_0)/$

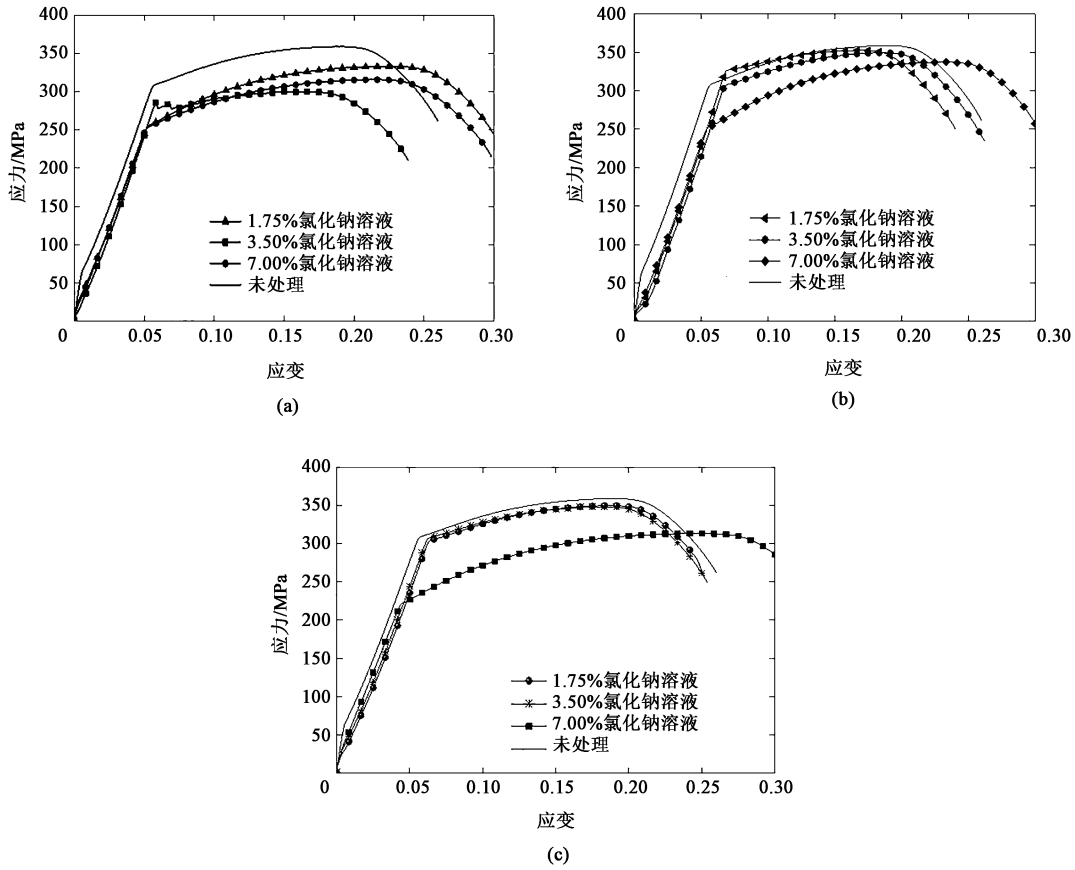


图 4 6061 铝合金棒材在不同腐蚀时间处理后的应力-应变曲线

(a) 4 h (b) 24 h (c) 48 h

Fig. 4 Stress-strain curves of 6061 aluminum alloy rods after corrosion treatment for different time

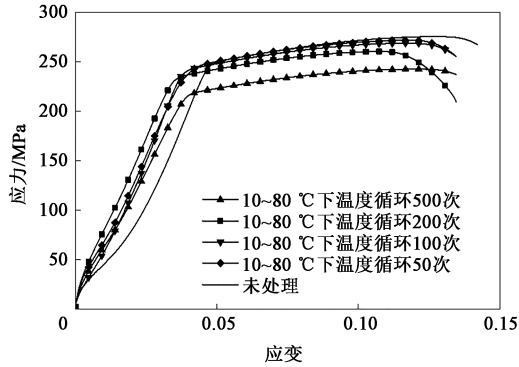


图 5 6061 铝合金板材不同温度循环处理后应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of 6061 aluminum alloy plate after different temperature cycles

$(T_m - T_0)$ , 为无量纲温度;  $T$  为环境温度;  $T_0$  为室温;  $T_m$  为材料熔点;  $R_{p0.2}$  为屈服强度, 取自塑性应变为 0.2% 时的工程应力;  $B$  为硬化系数;  $C$  为应变率敏感系数;  $m$  为温度软化系数。各项参数均可由实验室获得。

在常温准静态拉伸实验下, 一般可取实验值作为参考塑性应变速率, 室温与环境温度相同, 即  $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$ ,

$\dot{\varepsilon}^* = 1$ ,  $T = T_0$ ,  $T^* = 0$ 。此时本构方程可转化为:

$$\sigma = R_{p0.2} + B(\varepsilon_p)^n \quad (2)$$

其中硬化系数  $B$ 、硬化指数  $n$  均可从实验中材料的屈服阶段和颈缩阶段的数据拟合得到。

为了讨论不同腐蚀条件和不同温度循环条件对材料力学性能的影响, 本文在 J-C 本构模型的基础上, 引入修正系数  $\alpha_1$ 、腐蚀因子  $\alpha_2$ 、温度循环因子  $\alpha_3$ , 对 J-C 本构模型进行修正, 建立 MJC 本构模型, 式 (2) 可转化为:

$$\sigma = \{ (1 - \alpha_1) [R_{p0.2} + Q(1 - \exp(-\beta\varepsilon_p))] + \alpha_1 [R_{p0.2} + B(\varepsilon_p)^n] \} (\alpha_2 + \alpha_3 - 1) \quad (3)$$

式中:  $\alpha_1$  为修正系数, 取值范围为  $0 \leq \alpha_1 \leq 1$ ;  $Q$ 、 $\beta$  为与  $B$ 、 $n$  相似的硬化系数和硬化指数, 均可根据实验数据拟合得到。根据实验数据利用最小二乘法拟合得到:

$$\alpha_2 = 1 - 0.0025 \left( \frac{c}{0.0175} + \frac{t}{24} \right)^2 - 0.005 \left( \frac{c}{0.0175} + \frac{t}{24} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_3 = 1 - 1.67 \times 10^{-7} N^2 - 1.5 \times 10^{-4} N \quad (5)$$



式中： $c$  为溶液浓度； $t$  为腐蚀处理时间； $N$  为温度循环次数。

当材料只受腐蚀影响而不受温度循环影响时， $N=0$ ，即  $\alpha_3=1$ ，则式（3）可转化为：

$$\sigma = \{ [R_{p0.2} + Q(1 - \exp(-\beta \varepsilon_p))] (1 - \alpha_1) + \alpha_1 [R_{p0.2} + B(\varepsilon_p)^n] \} \alpha_2 \quad (6)$$

当材料只受温度循环影响而不受腐蚀影响时， $c=0$ ， $t=0$ ，即  $\alpha_2=1$ ，则式（3）可转化为：

$$\sigma = \{ [R_{p0.2} + Q(1 - \exp(-\beta \varepsilon_p))] (1 - \alpha_1) + [\alpha_1 (R_{p0.2} + B(\varepsilon_p)^n)] \} \alpha_3 \quad (7)$$

采用上述理论模型，可以模拟不同腐蚀条件以及不同温度循环条件下 6061 铝合金的应力-应变关系曲线，并可讨论材料力学性能的下情况。

3 有限元分析

以未经过任何处理的材料模型为例，利用 ABAQUS/Standard 有限元软件建立 6061 铝合金试件

的轴对称模型，几何尺寸和实验所选试件保持一致，为了提高仿真的精度，先对棒材试件模型进行手动划分网格，采用 Partition Face 命令环绕棒材边界每隔 90°进行切割，并在中心平行段的边界处进行环形切割，对板材试件在夹持段和中心平行段及弧形过渡段的交线处进行切割，然后再进行自动网格划分，网格划分结构如图 6 所示。该模型所用网格类型为 C3D8R，模型中心的网格尺寸为 0.8 mm×0.8 mm，两端的尺寸逐渐增大。对 6061 铝合金试件的夹持端边缘加固定约束，另一端施加固定载荷进行单向拉伸，将 MJC 本构模型的各项参数嵌入有限元程序中，相关参数见表 2，其中  $E$  为杨氏模量， $\mu$  为泊松比， $\rho$  为密度， $T_r$  为转变温度， $D_4$ 、 $D_5$ 、 $D_6$  为材料常数。对模型采用单元删除法模拟试件在拉伸时产生裂纹和断裂的过程，设置拉伸速度为 0.1 mm·s<sup>-1</sup>，数值模拟计算后得到试件的应力-应变曲线。模型断裂的效果图如图 7 所示。

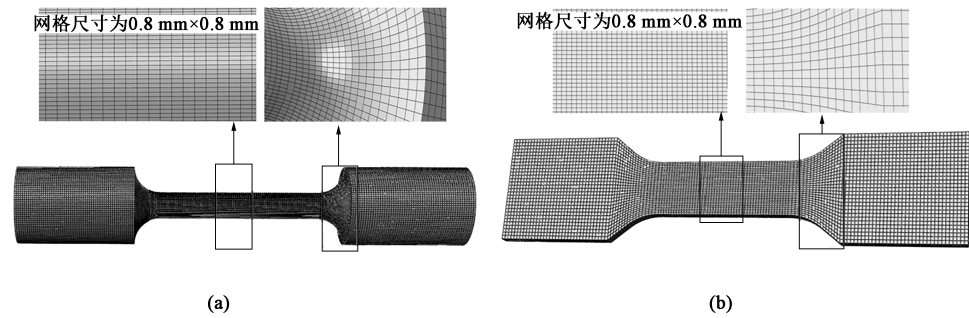


图 6 试件轴对称模型  
(a) 棒材试件 (b) 板材试件  
Fig. 6 Axisymmetric models of specimens  
(a) Bar specimen (b) Plate specimen

表 2 6061 铝合金材料参数  
Table 2 Material parameters of 6061 aluminum alloy

参数	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$B$	$n$	$Q$	$\beta$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\alpha_1$
棒材试样	61.42	0.33	307.94	245.2	0.817	58.3	20	2700	0.25
板材试样	61.42	0.33	241.34	245.2	0.817	58.3	12	2700	0.30
参数	$C$	$\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$	$m$	$T_r/\text{K}$	$T_m/\text{K}$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	
棒材试样	0.0256	$1 \times 10^{-3}$	2.387	294	925	0.01	7.77	4.81	
板材试样	0.0256	$1 \times 10^{-3}$	2.387	294	925	0.01	7.77	4.81	

4 数值计算与结果讨论

为了证明本文理论研究的正确性，选择 7.50% 氯化钠溶液腐蚀 24 h、温度循环 500 次以及未经处

理的材料，将理论计算结果、实验测试结果和有限元仿真结果进行比较，如图 8 所示。根据图 8a、图 8c 可以发现，在对未处理试件进行单向拉伸实验后，相比于 J-C 本构模型，MJC 本构模型的理论计算结果与仿真计算结果的吻合效果更好，说明 MJC

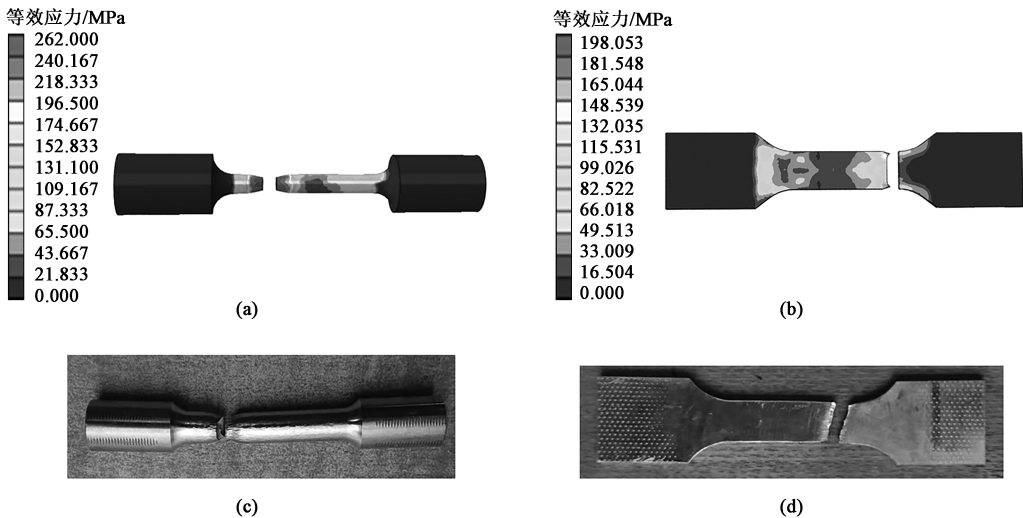


图 7 模型断裂效果

(a) 棒材试件, 仿真结果 (b) 板材试件, 仿真结果 (c) 棒材试件, 实物 (d) 板材试件, 实物

Fig. 7 Fracture effects of model

(a) Bar specimen, simulation result (b) Plate specimen, simulation result (c) Bar specimen, entity (d) Plate specimen, entity

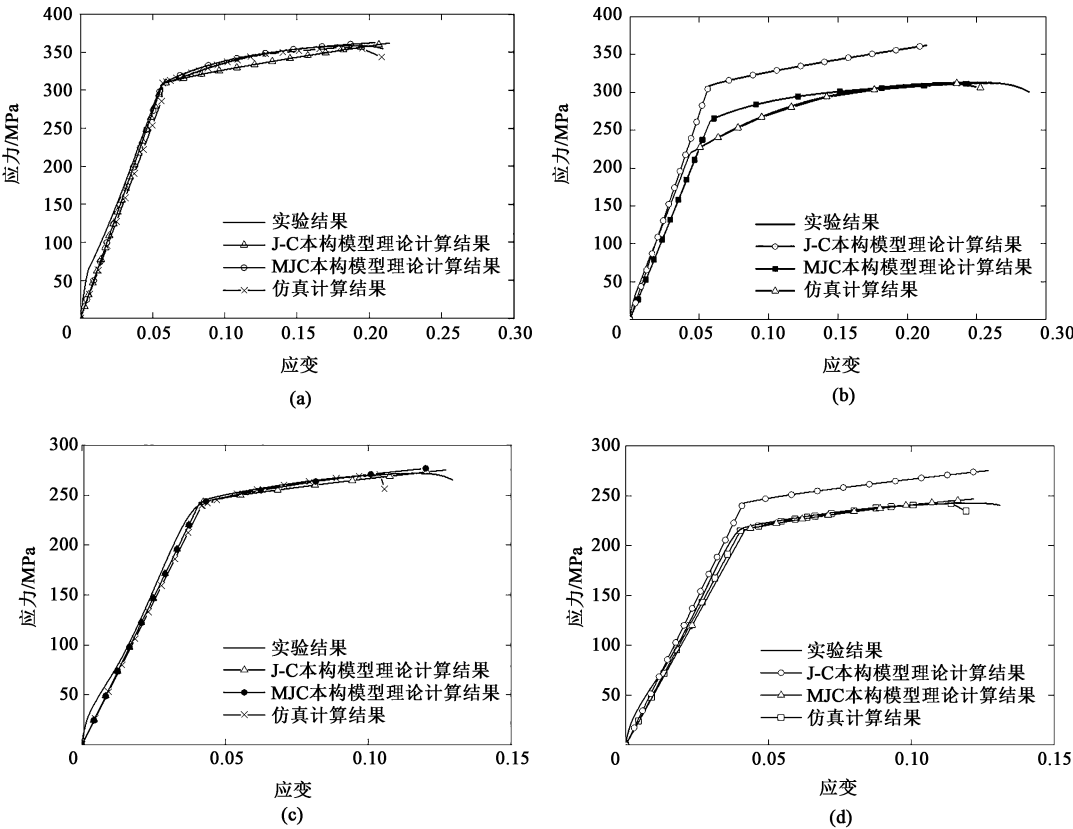


图 8 仿真、理论计算和实验的结果对比

(a) 未处理 6061 铝合金棒材 (b) 6061 铝合金棒材, 7.00% 氯化钠溶液腐蚀 48 h (c) 未处理 6061 铝合金板材  
(d) 6061 铝合金板材温度循环 500 次

Fig. 8 Comparison among simulation, theoretical calculation and experimental results

(a) Untreated 6061 aluminum alloy bar (b) 6061 aluminum alloy bar, 7.00% sodium chloride solution corroding for 48 h  
(c) Untreated 6061 aluminum alloy plate (d) 6061 aluminum alloy plate with temperature cycle of 500 times

本构模型较 J-C 本构模型具有更好的精确性。对图 8b 图进行分析可以发现, 7.00% 氯化钠溶液腐蚀 48 h 的 MJC 本构模型计算得到的应力-应变曲线与仿真计算结果较为一致, 说明引入了腐蚀因子的 MJC 本构模型能够较好地预测材料经过腐蚀处理后材料的本构关系。对图 8d 图进行分析, 可以发现 500 次温度循环下 MJC 本构模型的理论计算结果与仿真计算结果的吻合效果较好, 说明引入温度循环因子的 MJC 本构模型能够较好地预测经过温度循环

处理后的材料的力学性能, 也验证了本文提出的 MJC 本构模型的正确性。

为了进一步验证本文 MJC 本构模型的正确性, 对不同腐蚀条件和不同温度循环次数下的实验结果进行比较, 不同腐蚀条件下试样的对比结果如图 9 所示, 不同温度循环条件下试样的对比结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出, MJC 模型的理论计算结果与实验测试结果吻合良好, 进一步验证了本文理论模型的正确性。

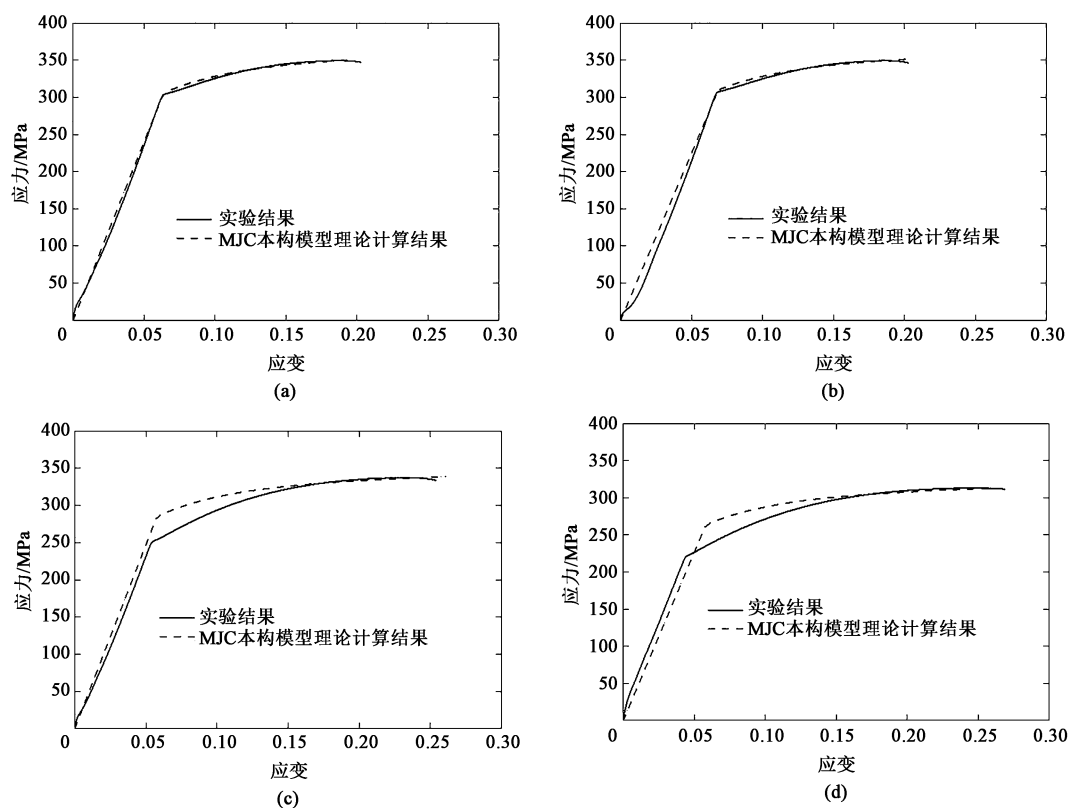


图 9 不同腐蚀处理下理论计算结果与实验结果对比

(a) 1.75% 氯化钠溶液腐蚀 24 h (b) 3.50% 氯化钠溶液腐蚀 24 h (c) 7.00% 氯化钠溶液腐蚀 24 h (d) 7.00% 氯化钠溶液腐蚀 48 h

Fig. 9 Comparison of theoretical calculation results and experimental results under different corrosion treatments

(a) 1.75% sodium chloride solution corroding for 24 h (b) 3.50% sodium chloride solution corroding for 24 h  
(c) 7.00% sodium chloride solution corroding for 24 h (d) 7.00% sodium chloride solution corroding for 48 h

在建立的正确的 MJC 本构模型基础上, 对不同循环次数和不同腐蚀液浓度、不同腐蚀时间下 6061 铝合金的力学行为进行模拟, 如图 11 所示。从图 11a 中可以看出, 随着温度循环次数的增多, 材料的屈服强度和抗拉强度均有所降低, 且温度循环次数在 600 次以上时, 温度循环次数每增加 100 次, 材料的力学性能衰退 0.056%; 从图 11b 可以看出, 在腐蚀液浓度保持在 3.50% 的情况下, 腐蚀 72 h 后处理时间每延长 1 h, 力学性能衰退 0.14%; 从图 11c 中可以看出, 保持腐蚀处理时间为 48 h 时, 腐

蚀液浓度在超过 8% 后每增加 1%, 材料的力学性能衰退 2.62%。

由于本文将温度循环因子和腐蚀因子共同引入到材料的本构模型中, 所以能够实现对同时考虑腐蚀条件和温度循环条件的材料本构关系进行预测, 选用棒材试件的本构关系作为预测对象, 预测结果如图 12 所示。图 12 为既考虑腐蚀又考虑温度循环下 6061 铝合金棒材的应力-应变关系, 从图 12 中可以看出, 材料同时处在腐蚀条件和温度循环条件下时, 其力学性能的衰减幅度相较于处于单种条件下时

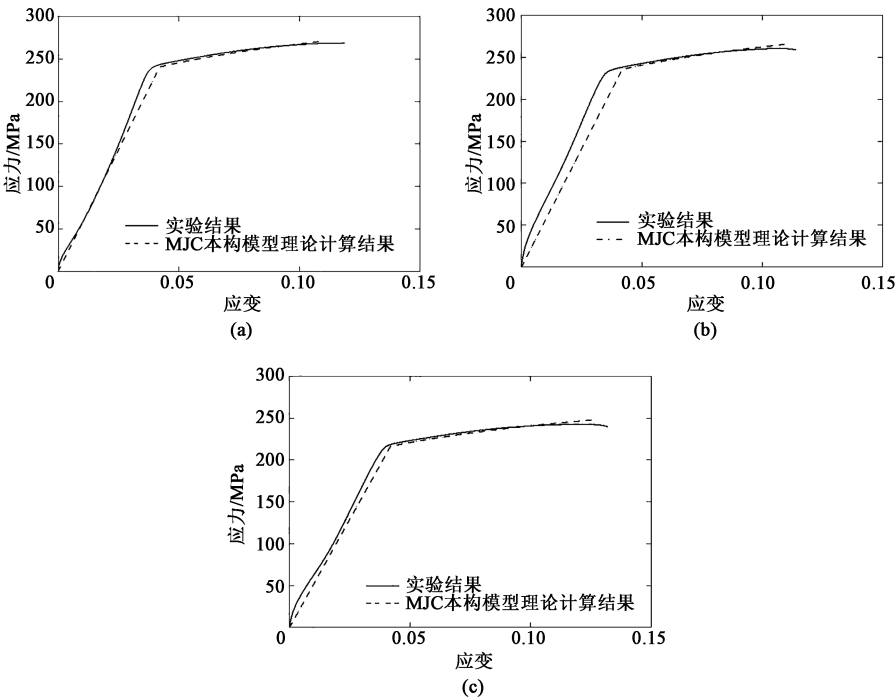


图 10 不同温度循环下理论计算结果与实验结果对比

(a) 温度循环 100 次 (b) 温度循环 200 次 (c) 温度循环 500 次

Fig. 10 Comparison of theoretical calculation results and experimental results under different temperature cycles  
(a) Temperature cycles of 100 times (b) Temperature cycles of 200 times (c) Temperature cycles of 500 times

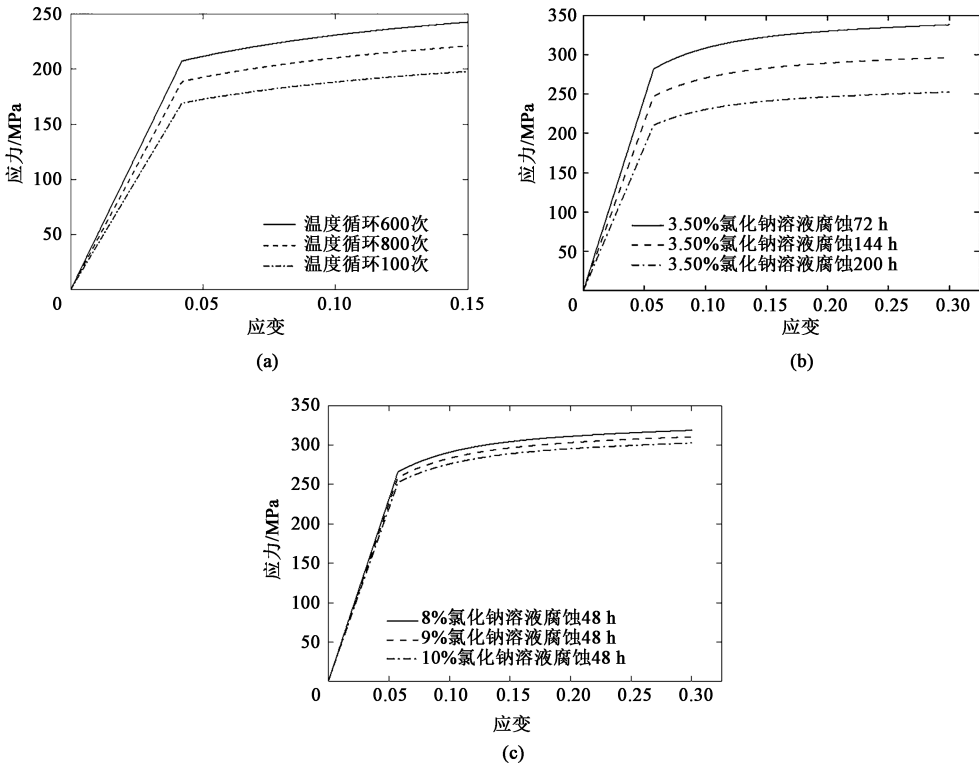


图 11 不同处理条件下本构关系的预测

(a) 温度循环次数不同 (b) 浓度相同, 腐蚀时间不同 (c) 腐蚀时间相同, 浓度不同

Fig. 11 Prediction of constitutive relation under different treatment conditions

(a) Different temperature cycles (b) Same concentration and different corrosion time (c) Same corrosion time and different concentrations



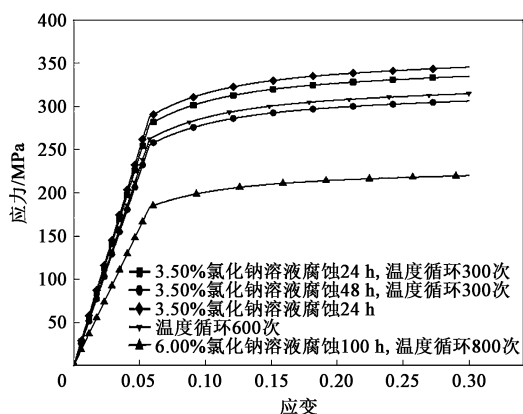


图 12 考虑腐蚀和温度循环条件的 6061 铝合金棒材本构关系预测

Fig. 12 Constitutive relation prediction of 6061 aluminum alloy bars considering corrosion and temperature cycle conditions

更大,且在腐蚀液浓度高于 4%、温度循环次数大于 600 次时材料力学性能的衰减更为明显。

## 5 结语

腐蚀和温度循环均可导致 6061 铝合金屈服强度和抗拉强度的降低,且随着腐蚀浓度、腐蚀时间以及温度循环次数的增加,材料的力学性能显著下降,材料的本构关系也发生了相应的改变。采用修正后的 MJC 本构模型进行不同腐蚀和温度循环条件下材料力学性能的预测。结果表明,保持腐蚀处理时间为 48 h,腐蚀液浓度在超过 8% 后每增加 1%,材料的力学性能衰减 2.62%;循环次数在 600 次以上时,循环次数每增加 100 次,材料的力学性能衰退 0.056%。

### 参考文献:

- [1] El-aty A A, Ha S, Zhang S H, et al. Prediction of tensile deformation behavior of Al-Li alloy 2060-T8 by computational homogenization-based crystal plasticity finite element method [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1063: 1-6.
- [2] Chen Y, Clausen A H, Hopperstad O S, et al. Stress-strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46 (21): 3825-3835.
- [3] 李慎兰, 黄志其, 蒋福利, 等. 固溶温度对 6061 铝合金组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (5): 131-136.
- Li S L, Huang Z Q, Jiang F L, et al. Effect of solution temperature on microstructure and property of a 6061 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34 (5): 131-136.
- [4] 商宝川, 尹志民, 段佳琦, 等. 6061 挤压态铝合金的 TTP 曲线及其应用 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (14): 17-19.
- Shang B C, Yi Z M, Duan J Q, et al. TTP curve of 6061 extrusion aluminum alloy and its application [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (14): 17-19.
- [5] Farshidi M H. Effect of aging treatment on the crushing behavior of aluminum 6061 alloy tube [J]. Journal of Materials: Design and Applications, 2015, 229 (5): 389-397.
- [6] Sarapure S, Shivakumar B P, Hanamantraygouda M B. Investigation of corrosion behavior of SiC reinforced Al6061/SiC metal matrix composites using Taguchi technique [J]. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion, 2020, 6 (1-2): 325-334.
- [7] 梁景恒, 郑自芹, 杭平平, 等. 6A01 铝合金焊接接头盐雾腐蚀行为研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43 (6): 54-59.
- Liang J H, Zheng Z Q, Hang P P, et al. Corrosion behavior of 6A01 aluminium alloy welding joint under salt spray test [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43 (6): 54-59.
- [8] 林德源. 6082-T6 铝合金在模拟沿海大气环境下的腐蚀行为和腐蚀机理 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29 (5): 499-506.
- Lin D Y. Corrosion behavior of Al-alloy 6082-T6 in simulated marine atmospheric environment [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29 (5): 499-506.
- [9] Zheng C B, Chen X, Li C L, et al. The effect of heat treatment on corrosion resistance of 6061 aluminum alloy [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11: 7255.
- [10] Rahi K D, Gupta P K. Effect of deformation on the mechanical and physical properties of aluminum alloy 6061 [J]. Journal of Scientific Research and Advances, 2016, 3 (4): 358-366.
- [11] 刘宁, 马力, 刘爱军, 等. 热处理对含钕 6061 铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (8): 8-17.
- Liu N, Ma L, Liu A J, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy containing Sc [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41 (8): 8-17.
- [12] 雷经发, 许孟, 刘涛, 等. 高应变率下 6061 铝合金力学性能及本构模型研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42 (1): 75-78.
- Lei J F, Xu M, Liu T, et al. Mechanical properties and constitutive model of 6061 aluminum alloy at high strain rate [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42 (1): 75-78.
- [13] 盈亮, 戴明华, 胡平, 等. 6061-T6 铝合金高温本构模型及温成形数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (7): 1816-1821.
- Ying L, Dai M H, Hu P, et al. Thermal constitutive model and numerical simulation of hot forming for 6061-T6 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25 (7): 1816-1821.
- [14] Liu Y, Zhu Z J, Wang Z J, et al. Flow and friction behaviors of 6061 aluminum alloy at elevated temperatures and hot stamping of a B-pillar [J]. The International Journal of Advanced Manufactur-

- ing Technology, 2018, 96: 9–12.
- [15] 刘伟, 吴远志, 邓彬, 等. 挤压态 6061 铝合金的力学性能及显微组织 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (9): 172–177.  
Liu W, Wu Y Z, Deng B, et al. Mechanical properties and microstructure of extruded 6061 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (9): 172–177.
- [16] 邓云飞, 张永, 吴华鹏, 等. 6061-T651 铝合金动态力学性能 J-C 本构模型的修正 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (20): 74–81.  
Deng Y F, Zhang Y, Wu H P, et al. Dynamic mechanical properties and modification of J-C constitutive model of 6061-T651 aluminum alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (20): 74–81.
- [17] Gilioli A, Manes A, Giglio M, et al. Predicting ballistic impact failure of aluminium 6061-T6 with the rate-independent Bao-Wierzbicki fracture model [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76: 207–220.
- [18] Derose J A, Suter T, Balkowiec A, et al. Localized corrosion initiation and microstructural characterization of an Al2024 with a higher Cu to Mg ratio [J]. Corrosion Science, 2012, 55: 313–325.
- [19] Pidaparti R M, Aghazadeh B S. Degradation modeling of 2024 aluminum alloy during corrosion process [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20 (3): 348–354.
- [20] 韩东锐, 韩冰, 隋景堂, 等. 6061 铝合金在高温流动海水中的腐蚀行为 [J]. 装备环境工程, 2011, 8 (3): 1–4.  
Han D R, Han B, Sui J T, et al. Corrosion behavior of 6061 aluminum alloy in high temperature flowing seawater [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8 (3): 1–4.
- [21] 刘晓云, 王文广, 陈礼清, 等. 热循环对片层石墨/铝复合材料的强度和热导率的影响 [J]. 复合材料学报, 2021, 38 (4): 1–8.  
Liu X Y, Wang W G, Chen L Q, et al. Effect of thermal cycling treatment on the strength and thermal conductivity of graphite flakes/Al composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38 (4): 1–8.
- [22] Aylor D M, Moran P J. Pitting corrosion behavior of 6061 aluminum alloy foils in sea water [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 133 (5): 949–951.
- [23] 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: 541–547.

## 新书推荐

### 《冲压件废次品的产生与防止 200 例》(第 2 版)

西安交通大学 郭成 主编

机械工业出版社 出版

本书由编写团队共同编写, 由西安交通大学郭成教授担任主编, 由周漱六、罗征志担任副主编。全书由重庆理工大学胡亚民教授主审。由机械工业出版社出版。本书通过 200 个典型实例分析了冲压生产中出现的冲裁、弯曲、拉深、胀形、翻边和复合成形件废次品的原因, 介绍了解决问题的方法, 根据实践经验和理论分析概括了控制和提高产品质量的措施。

本书自 1994 年第 1 版面市以来, 受到了读者的好评, 被众多出版物和期刊引用。考虑到冲压技术的不断进步和发展, 许多成熟的新技术应该在本书中有所反映。同时, 也为了适应行业和经济发展的需求, 故此对本书的相关内容进行了重新编排和修订。本书第 2 版延续了第 1 版的特点, 即注重实例的典型性和实用性; 将冲压生产作为一个系统来研究; 强调冲压工序之间的区别和相互联系, 在此基础上尽量反映当代科技在冲压成形领域的新成就。为适应行业和经济发展的需求, 本书第 2 版增加了近年来冲压新技术的实例; 对各类实例所占比例做了调整; 增加了“冲压新技术及发展方向”一章; 书中涉及各类标准均采用现行标准; 对各章节做了修改, 增加了反映时代进步的新内容。书中列举的实

例涉及多个行业, 既有实际经验总结, 也有理论分析, 内容丰富, 通俗易懂。

本书可供从事冲压工作的设计人员、管理人员、生产工人和进行产品创新设计的人员阅读; 也可作为大中专院校、职业技术学院(校)相关专业师生的参考书和选修课教材。

