

材料与成形性能

温度循环对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响

徐建新¹, 崔勇志², 刘兵飞³

(1. 中国民航大学 科技处, 天津 300300; 2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300;
3. 中国民航大学 科技创新研究院, 天津 300300)

摘要: 运用 LRP500 自控式温度循环疲劳仪研究了 30CrMnSiNi2A 超高强度钢在不同循环次数、不同温度区间处理后的屈服强度、抗拉强度等参数的变化规律。通过实验测试、理论计算和有限元仿真相结合的方法, 研究了温度循环处理对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响。结果表明: 温度循环处理会降低 30CrMnSiNi2A 钢的屈服强度和抗拉强度, 且温度循环区间越高、循环次数越多, 材料力学性能下降越明显。基于实验数据, 给出了考虑温度区间和循环次数下 30CrMnSiNi2A 钢的修正本构模型和有限元数值仿真结果。结果表明: 保持循环次数为 100 次, 温度区间在上限超过 100 ℃ 后, 温度每增加 20 ℃, 抗拉强度衰减 0.65%, 屈服强度衰减 1.67%; 保持温度区间为 10~80 ℃, 循环次数在 600 次以上时, 循环次数每增加 100 次, 抗拉强度衰减 0.95%, 屈服强度衰减 1.94%。

关键词: 30CrMnSiNi2A 钢; 温度循环; 本构模型; 屈服强度; 抗拉强度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.029

中图分类号: TG142.33

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0201-10

Influence of temperature cycle on mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel

Xu Jianxin¹, Cui Yongzhi², Liu Bingfei³

(1. Technology Department, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. Science and Technology Innovation Research Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The change rules of yield strength and tensile strength for 30CrMnSiNi2A ultra-high strength steel after treatment with different cycle times and different temperature ranges were studied by using LRP500 self-controlled temperature cycle fatigue tester, and the influences of temperature cycling treatment on the mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel were studied by experimental test, theoretical calculation and finite element simulation. The results show that the yield strength and tensile strength of 30CrMnSiNi2A steel decreases by temperature cyclic treatment. The higher the temperature cycle range is, the more the number of cycles is, the more obviously the mechanical properties of materials decrease. Based on the experimental data, the modified constitutive model and the finite element numerical simulation results of 30CrMnSiNi2A steel are given considering temperature range and cycle times. The results show that the tensile strength decays by 0.65% and the yield strength decays by 1.67% for every 20 ℃ increase in temperature when the number of cycles keeps 100 and the upper limit of the temperature range exceeds 100 ℃, while the tensile strength decays by 0.95% and the yield strength decays by 1.94% for every increase in the number of cycles by 100 when the temperature range is 10~80 ℃ and the number of cycles is more than 600.

Key words: 30CrMnSiNi2A steel; temperature cycle; constitutive model; yield strength; tensile strength

30CrMnSiNi2A 钢是一种常见的超高强度合金钢, 因具有较好的延展性及韧性, 被广泛应用于飞机起落

架、机翼主梁和平尾大轴等关键承力结构^[1-4]。30CrMnSiNi2A 钢在飞机服役过程中, 会受到多种不同环境因素的影响, 作为装备的关键承力材料, 其受环境影响而导致的材料性能的下降、损伤等会严重影响航空装备的安全可靠服役。其中, 部件所处环境温度的高低交替变化对材料性能的影响不可忽视。所以, 有必要对其在温度循环载荷下的力学性能进行研究和探讨。

对于 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的研究, 周义清

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-08-18

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)

作者简介: 徐建新 (1967-), 男, 博士, 教授

E-mail: jxxu_cauc@163.com

通信作者: 刘兵飞 (1985-), 男, 博士, 教授

E-mail: bingfeiliu2@126.com

等^[5]对其在不同应变率下的力学性能进行了研究;花峰、刘宪民等^[6]研究了化学成分对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响;刘天琦^[7]研究了回火温度对 30CrMnSiNi2A 钢组织和性能的影响;许泽建、李玉龙等^[8]研究了过加载速率对 40Cr 高强钢和 30CrMnSiNi2A 钢 I 型动态断裂韧性的影响;武海军等^[9]对 30CrMnSiNi2A 钢的动态力学性能进行了实验研究;许良等^[10]研究了超声波冲击对 30CrMnSiNi2A 钢疲劳性能的影响;刘建华等^[11]研究了 30CrMnSiNi2A 超高强度钢在氯化钠溶液中的腐蚀的前期表现;罗来正等^[12]研究了海洋大气环境与拉伸疲劳载荷耦合作用下 30CrMnSiNi2A 钢的腐蚀损伤行为;刘宪民等^[13]研究了热处理对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响;张勇等^[14]研究了预腐蚀对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响;李磊等^[15]研究了不同硬度下 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数;郑修麟等^[16]研究了循环冷处理对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响;余万千等^[17]研究了应力三轴度对 30CrMnSiNi2A 钢的韧性断裂特性的影响,并通过有限元迭代方法标定了材料的 Johnson-Cook 动态本构模型参数,分析了温度和应变率对 30CrMnSiNi2A 钢断裂行为的影响;陈跃良等^[18]研究了冲击载荷下点蚀损伤对 30CrMnSiNi2A 钢应力集中的影响;焦明^[19]对 30CrMnSiNi2A 钢的热处理过程进行了数值模拟及实验研究,并通过仿真模拟和实验研究得出淬火后对材料进行 300 ℃ 的回火可以平衡强度和塑性之间的关系,进而得到比较平衡的力学性能的结论。

对于材料本构关系的研究,曹建国等^[20]基于 Arrhenius 改进模型框架,建立了无取向电工钢热轧高温行为的统一本构关系模型;赵慧俊等^[21]基于钛合金球化软化机理,建立了 TA15 钛合金的统一黏塑性本构模型;Zhu F H 等^[22]研究了基于 Arrhenius 方程的 Ti6Al4V

合金的硬化和软化行为跟踪新流变应力模型。此外,杨合、詹梅编著的《材料加工过程实验建模方法》^[23]为本文数学模型的建立提供了理论指导。

上述文献针对不同因素对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能造成的影响以及基于不同模型对某种材料的本构关系的探索开展了相关的理论和实验研究工作,但是还未有对于温度循环载荷下 30CrMnSiNi2A 钢材料的本构模型的详细研究。由于实验条件的限制,很难通过大量的实验对不同温度区间和不同循环次数下的力学行为进行描述。因此,本文提出了一种考虑温度循环区间和温度循环次数的 30CrMnSiNi2A 钢的本构模型,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对比,验证模型的准确性,并在所建立的本构模型的基础上,讨论了不同温度循环区间和循环次数对于 30CrMnSiNi2A 钢的力学性能的影响。

1 实验部分

为了研究温度循环对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响,分别进行了不同温度区间和不同循环次数的温度循环实验,目的是利用控制变量的方法,分别讨论不同温度区间和不同循环次数对材料力学性能的影响,并对试件进行常温下的准静态拉伸实验,分别得到不同预处理后试件的应力-应变曲线。

1.1 实验材料

实验所用试件为标准 30CrMnSiNi2A 钢板状试件 7 根,其几何参数和实物图如图 1 所示,其中试件总长度为 74.87 mm,夹持端宽度为 20 mm,中间段宽度为 10 mm,标距为 22.87 mm,厚度为 1 mm。材料的化学成分见表 1。

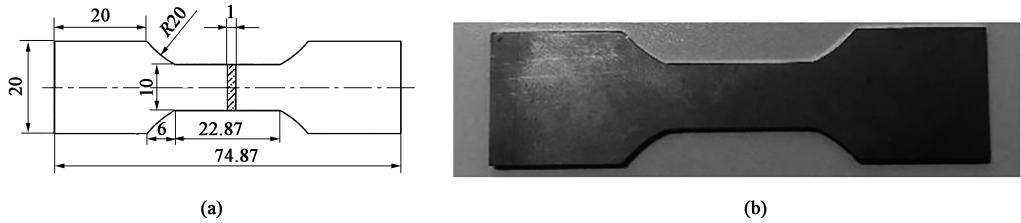


图 1 标准 30CrMnSiNi2A 钢板材试件的尺寸图 (a) 和实物图 (b)

Fig. 1 Dimension diagram (a) and physical diagram (b) of standard 30CrMnSiNi2A steel sheet specimen

表 1 30CrMnSiNi2A 钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 30CrMnSiNi2A steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Fe
0.27~0.34	0.90~1.20	1.00~1.30	0.90~1.20	1.40~1.80	≤0.020	≤0.020	余量

1.2 实验仪器

温度循环系统为 LRP500 自动温度循环疲劳实验机，如图 2a 所示，该实验机包括温度循环疲劳测试仪、数据处理器、数据显示器和电阻应变仪，可实现材料在不同应力幅值下的温度循环疲劳实验测试和数据处理，可用于进行航空用新型复合材料以及温度敏感材料的温度循环作用下的疲劳实验，以及材料在温度循环疲劳寿命的预

测功能，为新型智能复合材料的温度循环疲劳问题的研究提供理论指导和技术支撑。该实验机可以设定特定的温度范围和循环次数，也可以在整个温度循环过程中对试件施加预应力，其中，可调温度范围为-10~99 ℃，误差为±0.1 ℃，循环次数和预应力数值可根据测试需要自行设定。实验机操控界面及温度循环试验槽如图 2b 和图 2c 所示。

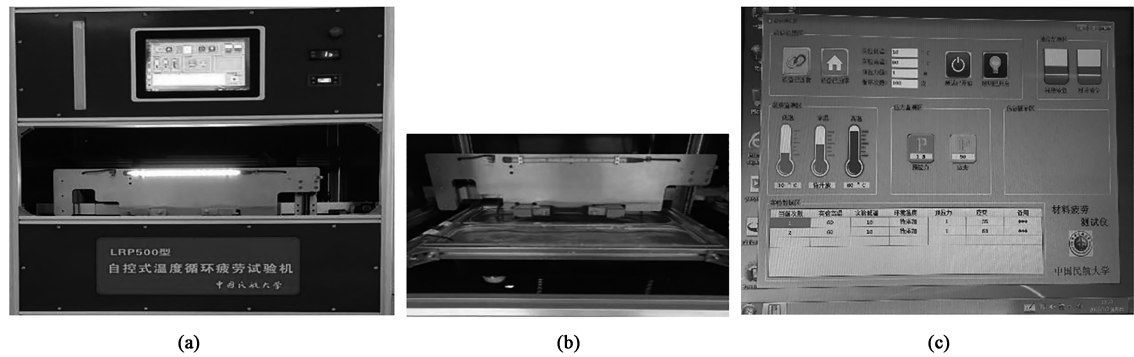


图 2 LRP500 自控式温度循环疲劳仪的整体图 (a)、温度循环槽实景图 (b) 和主操控页面实景图 (c)
Fig. 2 Overall diagram of LRP500 self-controlled temperature cycle fatigue tester (a), real image of temperature circulation slot (b) and real image of main operation control page (c)

如图 3 所示，用于常温静态拉伸的仪器为 MTS 机架测试系统，落地式 MTS 系统可提供用于低受力和高受力静态和动态测试的各种测试功能。只需选择不同的受力大小、伺服阀额定流速、泵流速、软件和配件，即可轻松配置 MTS 系统，从而满足特定的材料测试或组件测试需要。MTS 机架测试系统的受力范围为 15~500 kN；能够测试各种强度的材料（如：塑料、铝、复合材料和钢等）；能够容纳各种标准型、中型和大型样品、夹具、固定装置和环境子系统；兼容多种测试类型，包括零部件的拉伸测试、高周和低周疲劳测试、断裂力学测试和耐久性测试等。采用该仪器，可以得到任意加载速率单轴拉伸下试件的应力、应变关系，也可利用该仪器测试不同应力幅值下试件的疲劳寿命，可根据实验需要参考本文的仪器选用。

1.3 实验设计

实验工作包括两部分：温度循环预处理部分和常温准静态单轴拉伸部分。在温度循环部分，将 7 个试件按不同的实验条件（温度区间和循环次数）分为两组，不同实验条件设计如表 2 所示。每次实验前，温度循环区间和循环次数等实验条件均可在温度循环疲劳仪控制面板中直接设定，然后在实验机夹持端夹紧相应试件开始循环，实验机在设定下会将试件分别浸入低温槽和高温槽各 10 s，此为 1



图 3 MTS 机架测试系统

Fig. 3 MTS rack test system

表 2 温度循环条件设计

Table 2 Design of temperature cycling condition

实验编号	温度范围/℃	循环次数/次
1	—	—
2	10~40	100
3	10~60	100
4	10~80	100
1	—	—
4	10~80	100
5	10~80	200
6	10~80	400

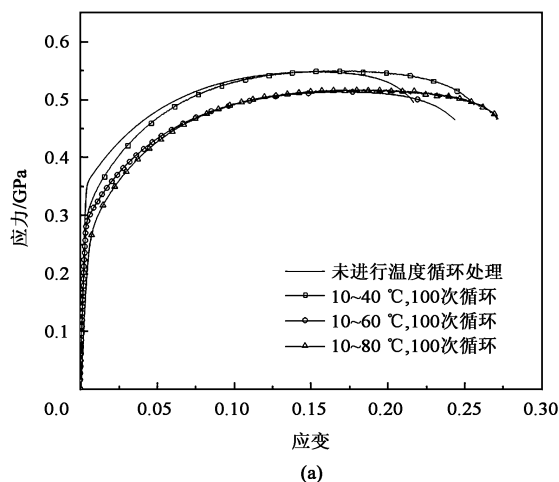
次循环, 单次循环时间为 30 s。循环至设定的循环次数, 完成该次循环实验。

完成温度循环实验部分后, 在 MTS 机架测试系统上进行准静态单轴拉伸实验, 同时对未进行温度循环处理的对照试件也进行单向拉伸。如图 4 所示, 在实验仪夹头上固定试件两端, 下端夹头维持固定状态, 为得到准确的应力-应变曲线, 实验采用位移控制, 开始先假设位移到达 7 mm 之前试件会完全断裂, 故设置上端夹头位移为 7 mm, 对试件进行单向拉伸, 直至完全断裂, 拉伸时间设置为 30 s。如上所述, 完成所有试件的单轴拉伸实验。



图 4 单轴拉伸实验

Fig. 4 Uniaxial tensile experiment



1.4 实验结果讨论

图 5a 为第 1 组试件在 100 次循环下不同温度区间预处理后得到的应力-应变曲线, 其中实曲线表示未进行温度循环处理的对照试件的拉伸结果, 其他不同标线为不同温度区间循环后的试件的拉伸结果。由图 5a 可见, 与未进行温度循环处理的试件相比, 随着温度区间峰值的升高, 材料的屈服强度和抗拉强度也随之递减, 其中屈服强度受温度区间的影响呈明显的递减趋势, 在保持温度区间下限 10 °C 不变的情况下, 温度区间峰值由 40~80 °C 提升的过程中, 每提高 10 °C, 材料的屈服强度平均衰减 2.34%。在本实验中, 可能由于循环次数较低的原因, 材料的抗拉强度未呈现规律变化, 其中, 温度区间为 10~40 °C 的试件其抗拉强度衰减不明显, 但温度区间峰值为 60 和 80 °C 的试件相比于未进行温度循环处理的试件的抗拉强度均衰减约 6.2%。并且材料的最大应变随温度循环区间峰值的增加呈递增趋势, 数据表明, 固定循环次数为 100 次, 循环温度峰值高于 60 °C 时, 峰值温度每增加 10 °C, 材料的最大应变平均增加量接近 6%。造成这种现象的原因可能是由于温度循环的影响导致材料晶粒间的结合力有所减小, 且温度的影响使得材料的塑性指标增强, 从而导致最大应变的增加。此外, 本实验中, 温度区间为 10~40 °C、循环次数为 100 次的试件数据, 可能由于受到试件制造时产生的成分不均或实验预处理时操作不当等影响, 导致该条件下的实验结果与上述规律具有跳跃性。

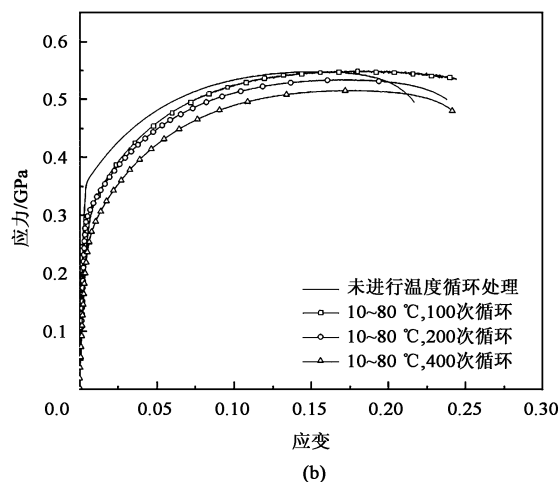


图 5 30CrMnSiNi2A 钢板材试件温度循环处理后的应力-应变曲线

(a) 循环次数为 100 次 (b) 温度区间为 10~80 °C

Fig. 5 Stress-strain curves of 30CrMnSiNi2A steel sheet specimen after temperature cycling treatment

(a) Cycles number of 100 times (b) Temperature range of 10~80 °C

图 5b 为第 2 组试件在 10~80 °C 温度区间下不同循环次数预处理后得到的应力-应变曲线, 其中实线为未做任何处理的试件的拉伸结果, 其他标线分别为 100、200 和 400 次温度循环处理后的试件的拉伸测试结果。如图 5b 所示, 随着温度循环次数的增加, 材料的屈服强度和抗拉强度呈明显递减趋势, 其中在温度循环次数为 200~400 次的试件之间, 循环次数平均每递增 100 次, 材料的屈服强度衰减 2.78%; 温度循环 100 次与 200 次时试件的屈服强度下降不明显, 可能是由于拉伸实验时夹具前期加持不平稳的影响所导致的; 本组实验中, 材料的抗拉强度明显呈规律递减, 数据表明, 循环次数在 100~400 次之间, 循环次数每递增 100 次, 材料的抗拉强度平均衰减 2.05%; 本组实验中, 温度循环 100、200 和 400 次的试件的最大应变与未进行温度循环处理的试件相比平均增加 11.5%, 但 3 个处理条件下的试件断裂应变相差不大, 可能是由于材料本身成分不均或实验操作不当所导致的。通过实验数据分析可知, 温度循环区间及温度循环次数对 30CrMnSiNi2A 钢板状试件的力学性能均有较为显著的影响, 且温度循环区间愈大、温度循环次数愈多, 对其力学性能的影响程度越大。

2 本构模型的建立及参数的确定

J-C (Johnson-Cook) 模型是由 Johnson G R 与 Cook W H^[24] 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, 且方程形式简单, 模型参数容易获取, 因此被广泛应用于各类有限元模拟。仅涉及应力的 J-C 初始模型为:

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

式中: σ 为流动应力; ε_p 为真实塑性应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲等效塑性应变速率, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$; $\dot{\varepsilon}_p$ 为有效塑性应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变速率; T^* 为无量纲温度, $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$; T 为环境温度; T_0 为室温; T_m 为材料熔点; R_{eL} 为屈服强度, MPa; B 为硬化系数; n 为硬化指数; m 为温度软化系数; D 为应变率敏感系数。各项参数均可由实验获得。

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 $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}^* = 1$, $T = T_0$, $T^* = 0$, 此时本构方程可转化为:

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

其中, 屈服强度 R_{eL} 取自塑性应变为 0.2% 时的工程应力, 硬化系数 B 、硬化指数 n 均可从实验中屈服阶段和颈缩阶段的数据拟合得到, 本文中 $R_{eL} = 344.7$ MPa, $B = 499.21$, $n = 0.44927$ 。

J-C 本构模型的理论结果与实验测试结果相比较, 发现吻合效果不是很好。为了得到与材料更为吻合的本构模型和讨论不同温度循环区间与不同循环次数对材料力学性能的影响, 本文在 J-C 本构模型的基础上, 采用加入修正因子 α_1 的本构模型^[25], 并引入温度循环因子 α_2 和 α_3 , 对 J-C 模型进行修正并建立 MJC 本构模型, 将式 (2) 转化为:

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

式中: Q 、 β 为与 B 、 n 相似的硬化系数和硬化指数。

根据实验数据利用最小二乘法拟合得到:

$$\alpha_3 = 1.4641 \times \left(\frac{C}{20} + \frac{N}{50} \right)^{-0.23149} \quad (4)$$

$$\alpha_2 = 1.25526 - 0.10388 \times \exp \left[- \left(\frac{C}{20} + \frac{N}{50} - 4.59518 \right) / 4.16279 \right] \quad (5)$$

式中: C 为温度循环区间, 由于本实验的温度区间均设为以 10 °C 为下限的温度区间, 故本构模型中 C 的取值范围为 $C > 10$; N 为温度循环次数。各项参数均可根据实验数据拟合得到。

采用上述理论模型, 可以模拟不同循环次数和不同温度区间下 30CrMnSiNi2A 钢的应力-应变曲线, 并可讨论材料力学性能的退化情况。

3 有限元仿真

本文理论模型可通过有限元模拟的方法进行验证。以未经过任何处理的材料模型为例, 利用 ABAQUS 有限元软件建立 30CrMnSiNi2A 钢板材试件的轴对称模型, 其几何尺寸和实验所选试件保持一致, 为了提高仿真的精度, 对板材试件在夹持段和中心平行段与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。该模型所用的网格类型为 C3D8R, 模型中心的网格尺寸为 0.2 mm × 0.2 mm, 两端的尺寸逐渐增大。对试件的夹持端施加固定约束

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 3。对模型采取单元删除法模拟试件在拉伸时产生裂纹和断裂的过程，设置拉伸模式为与实验一致的位移控制，即拉伸时间设为 30 s，位移设为 7 mm，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。

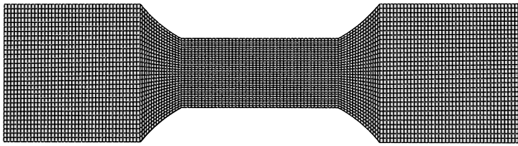
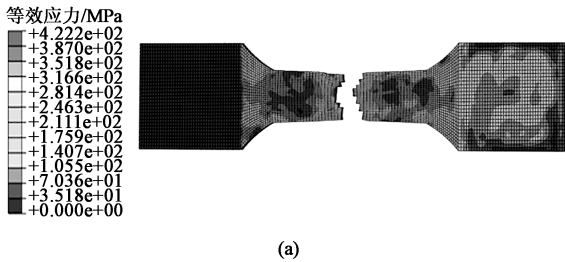
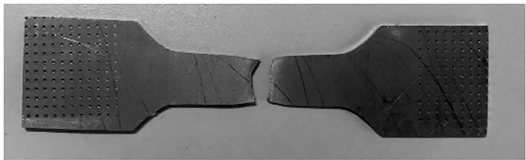


图 6 试件轴对称模型

Fig. 6 Axisymmetric model of specimen



(a)



(b)

图 7 模型断裂模拟结果 (a) 和实物图 (b)

Fig. 7 Simulation result (a) and physical map (b) for model fracture

4 数值计算与结果讨论

为了证明本文理论研究的正确性，选择温度区间为 10~60 ℃、100 次循环的试件，温度区间为 10~80 ℃、200 次循环的试件及未进行温度循环处理的试件，将实验测试结果、理论计算结果和有限元仿真结果进行对比，如图 8 所示。根据图 8a 可以看出，在对未处理试件进行单向拉伸实验后，MJC 本构模型较 J-C 本构模型与仿真结果和实验结果的吻合效果更好，说明 MJC 本构模型较 J-C 本构模型具有更好的精确性。对图 8b 进行分析可以发现，温度区间为 10~60 ℃、100 次循环处理的试件的 MJC 本构模型的理论应力-应变曲线与仿真结果、实验测试结果较为一致，说明引入了温度循环因子的 MJC 本构模型能较好地预测材料经过温度循环处理后的本构关系。对图 8c 进行分析可以发现，温度区间为 10~80 ℃、200 次循环处理的试件的 MJC 本构模型导出的理论结果与仿真结果、实验测试结果的吻合效果较好，进一步说明了引入温度循环因子的 MJC 本构模型能较好地预测经过温度循环处理后材

表 3 30CrMnSiNi2A 钢板材试件材料参数

Table 3 Material parameters of 30CrMnSiNi2A steel sheet specimen

参数	数值
杨氏模量 E/GPa	210
泊松比 μ	0.3
屈服强度 R_{eL}/MPa	344.7
硬化系数 B	499.21
硬化指数 n	0.44927
Q	196.63
β	22.97
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8000
修正因子 α_1	-0.01807

料的力学性能，同时也验证了本文提出的 MJC 本构模型的准确性。

由以上分析可知，采用有限元仿真验证的本文提出的理论模型可对 30CrMnSiNi2A 钢材材料在不同温度区间、不同循环次数下的应力、应变关系进行模拟，也可对材料的力学性能退化进行分析，由于本实验在温度循环变化过程中温度区间的下限是稳定的，因此，在温度梯度损伤因子中选取温度区间上限作为温度项。由于有限元仿真需要不同处理条件下的实验数据，故本文仅以如图 8 所示的 3 种情况为例，对理论模型的准确性进行验证，对于其他情况可根据不同的实验数据进行仿真分析。

基于本文的理论模型，可对不同温度区间、不同循环次数耦合情况下材料的应力、应变关系以及力学性能退化情况进行分析，为进一步验证本文提出的理论模型的准确性，将温度区间为 10~40 ℃、100 次循环，温度区间为 10~80 ℃、100 次循环，温度区间为 10~80 ℃、400 次循环处理下的试件的实验测试结果与 MJC 本构模型的理论计算结果进行对比分析，结果如图 9 所示，其中实线为实验测试结果，虚线为理论计算结果。由图 9 可知，MJC 本

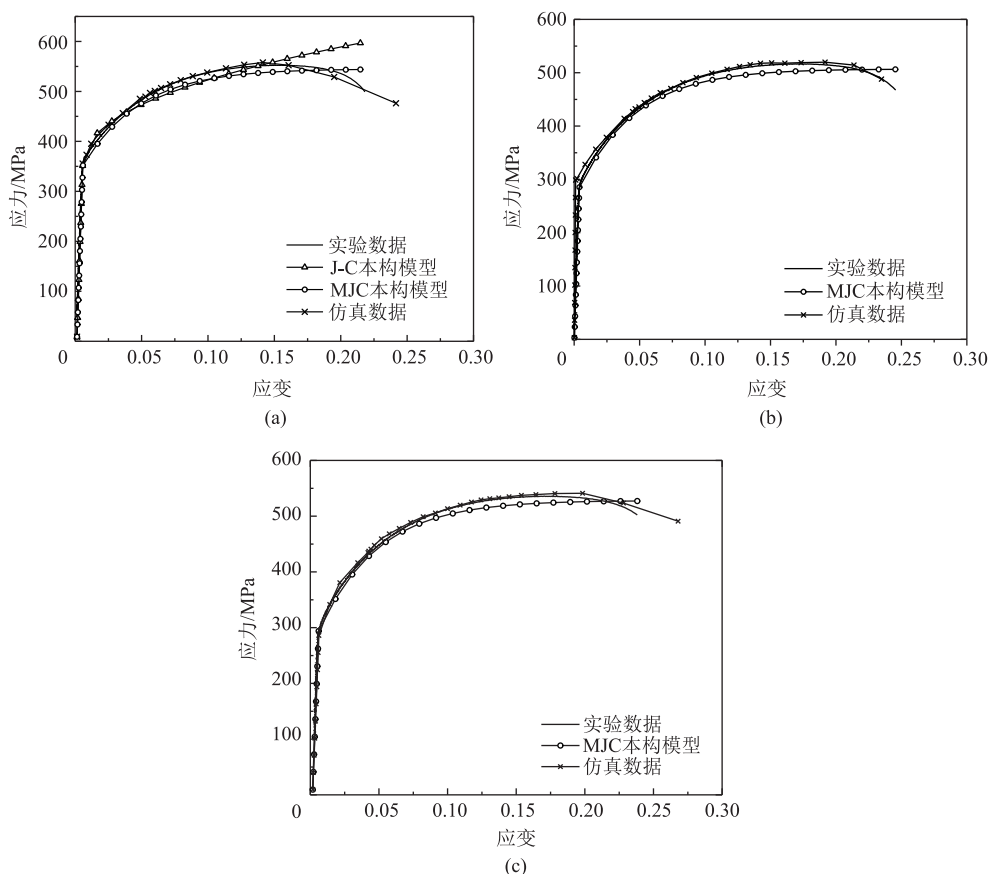


图8 有限元仿真、理论计算和实验测试结果对比

(a) 未进行温度循环处理试件 (b) 温度区间为 10~60 °C、100 次循环处理的试件 (c) 温度区间为 10~80 °C、200 次循环处理的试件

Fig. 8 Comparisons of finite element simulation, theoretical calculation and experimental test results

(a) Specimens without temperature cycling treatment (b) Specimens treated at temperature range of 10~60 °C and cycles number of 100 times

(c) Specimens treated at temperature range of 10~80 °C and cycles number of 200 times

构模型的理论计算结果与试件的实验测试结果的吻合情况良好, 表明理论模型能够较好地预测和描述材料在不同温度区间、不同循环次数耦合情况下经温度循环处理后的力学性能衰退情况, 进一步验证了本文提出的理论模型的准确性。

建立在准确的本构模型的基础上, 可以对不同温度区间、不同循环次数处理的 30CrMnSiNi2A 钢材的力学行为进行模拟, 如图 10 所示。其中, 图 10a 为控制循环次数不变, 模拟不同温度区间处理对材料的力学性能影响的结果, 图 10b 为控制温度区间不变, 模拟不同循环次数对材料力学性能影响的结果。由图 10a 可以看出, 随着温度区间上限的增加, 材料的屈服强度和抗拉强度均有所降低, 当温度区间上限在 100 °C 以上时, 保持循环次数 100 次不变, 温度每增加 20 °C, 材料的抗拉强度平均衰减 0.65%, 屈服强度平均衰减 1.67%; 由图 10b 可以看出, 随着循环次数的增加, 材料的屈服强度和抗拉强度同样有所降低, 当循环次数在 600 次以上

时, 保持温度区间为 10~80 °C 不变, 循环次数每增加 100 次, 材料的抗拉强度平均衰减 0.95%, 屈服强度平均衰减 1.94%。

5 结语

温度循环处理可降低 30CrMnSiNi2A 钢的屈服强度和抗拉强度, 且随着温度循环区间和温度循环次数的增加, 材料的力学性能有显著的下降趋势, 本构关系也受到了影响。本文针对在不同温度区间、不同循环次数处理下材料的力学性能测试情况, 对其本构模型进行了修正, 且修正后的 MJC 本构模型表明, 在保持循环次数为 100 次条件下, 温度区间在上限超过 100 °C 后, 温度每增加 20 °C, 材料的抗拉强度衰减 0.65%, 屈服强度衰减 1.67%; 在保持温度区间为 10~80 °C 条件下, 循环次数在 600 次以上时, 循环次数每增加 100 次, 材料的抗拉强度衰减 0.95%, 屈服强度衰减 1.94%。

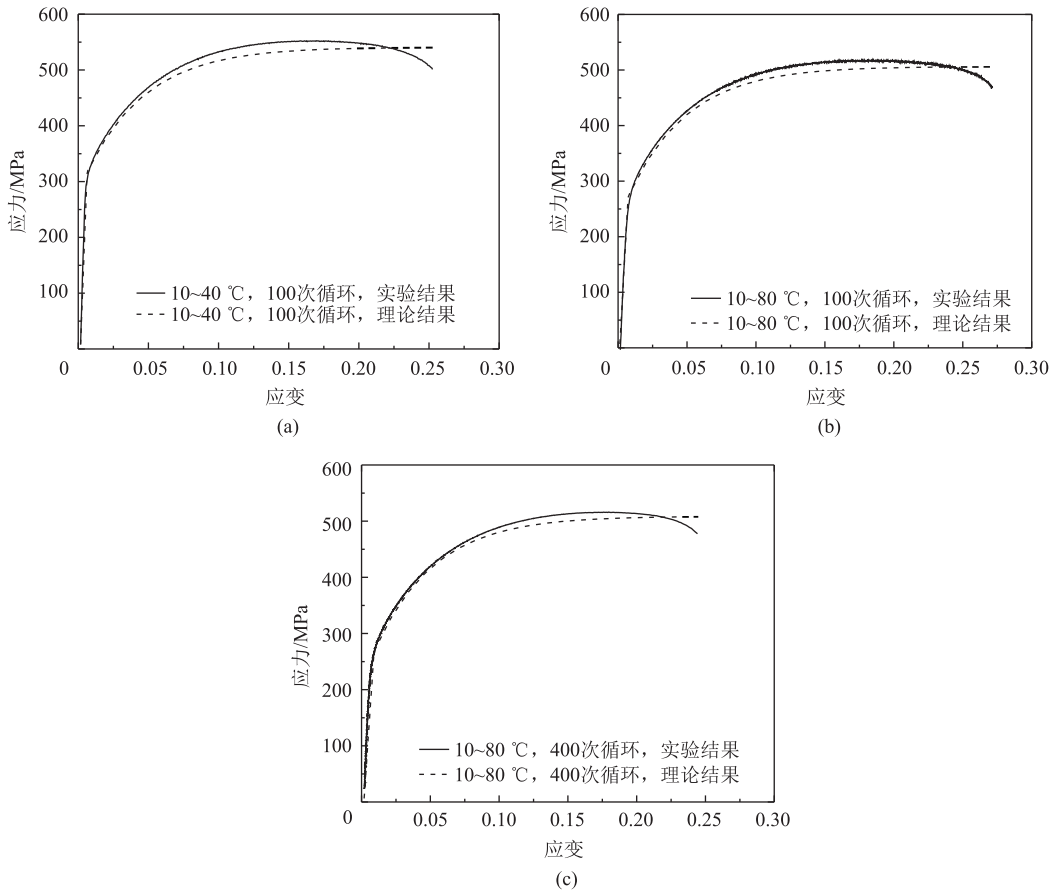


图 9 不同温度循环处理下理论计算与实验测试结果对比

(a) 温度区间为 10~40 °C，100 次循环处理的试样 (b) 温度区间为 10~80 °C，100 次循环处理的试样
(c) 温度区间为 10~80 °C，400 次循环的试样

Fig. 9 Comparison between theoretical calculation and experimental test results under different temperature cycling treatments

(a) Specimens treated at temperature range of 10~40 °C and cycles number of 100 times
(b) Specimens treated at temperature range of 10~80 °C and cycles number of 100 times
(c) Specimens treated at temperature range of 10~80 °C and cycles number of 400 times

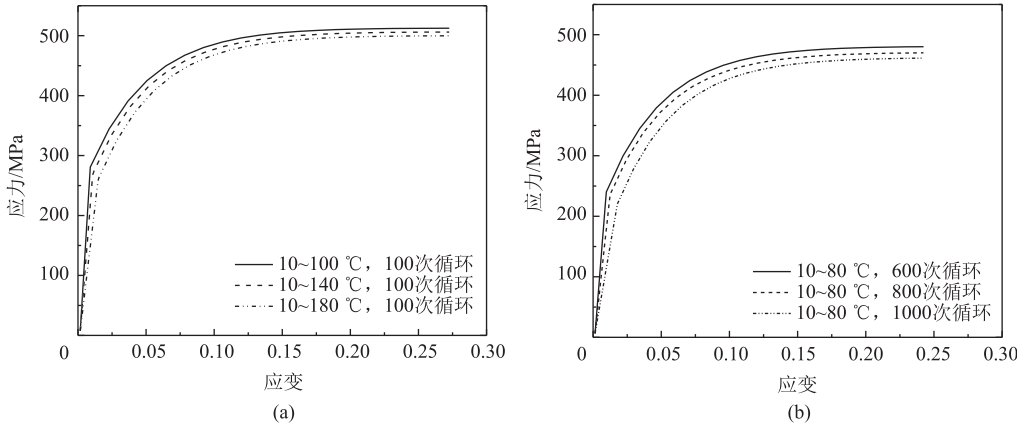


图 10 不同处理条件下 30CrMnSiNi2A 钢本构关系的预测曲线

(a) 循环次数相同，温度区间不同的试件的应力-应变曲线 (b) 温度区间相同，循环次数不同的试件的应力-应变曲线

Fig. 10 Prediction curves of constitutive relationship for 30CrMnSiNi2A steel under different treatment conditions

(a) Stress-strain curves of specimens with the same number of cycles and different temperature ranges
(b) Stress-strain curves of specimens with the same temperature range and different numbers of cycles

参考文献:

- [1] 牛靖, 董俊明, 何源, 等. 超高强度 30CrMnSiNi2A 冲击韧度试验研究 [J]. 机械强度, 2006, 28 (4): 607-610.
Niu J, Dong J M, He Y, et al. Instrumented impact properties of ultra-high strength steel 30CrMnSiNi2A [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28 (4): 607-610.
- [2] 万筱如, 许昌淦. 高强度和超高强度钢 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
Wan X R, Xu C G. High Strength and Ultrahigh Strength Steel [M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [3] 陈群志, 杨蕊琴, 李国元, 等. 腐蚀对 30CrMnSiNi2A 钢结构疲劳寿命的影响 [J]. 装备环境工程, 2007, 4 (5): 7-9, 17.
Chen Q Z, Yang R Q, Li G Y, et al. Influence of corrosion on fatigue life of 30CrMnSiNi2A steel structure [J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4 (5): 7-9, 17.
- [4] Niu Q L, Ming W W, Chen M, et al. Dynamic mechanical behavior of ultra-high strength steel 30CrMnSiNi2A at high strain rates and elevated temperatures [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24 (7): 724-729.
- [5] 周义清, 张治民. 30CrMnSiNi2A 钢在不同应变率下的力学性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33 (4): 46-50.
Zhou Y Q, Zhang Z M. Mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel under different strain rates [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33 (4): 46-50.
- [6] 花峰, 刘宪民, 王春旭. 化学成分对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2003, (3): 25-26, 69.
Hua F, Liu X M, Wang C X. Effect of chemical composition on mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, (3): 25-26, 69.
- [7] 刘天琦. 回火温度对 30CrMnSiNi2A 钢组织和性能的影响 [J]. 特殊钢, 2003, (2): 16-18.
Liu T Q. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Special Steel, 2003, (2): 16-18.
- [8] 许泽建, 李玉龙, 李娜, 等. 加载速率对高强钢 40Cr 和 30CrMnSiNi2A I 型动态断裂韧性的影响 [J]. 金属学报, 2006, (9): 965-970.
Xu Z J, Li Y L, Li N, et al. Effect of loading rate on mode I dynamic fracture toughness of high strength steels 40Cr and 30CrMnSiNi2A [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, (9): 966-967.
- [9] 武海军, 姚伟, 黄风雷, 等. 超高强度钢 30CrMnSiNi2A 动态力学性能实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30 (3): 258-262.
Wu H J, Yao W, Huang F L, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of 30CrMnSiNi2A ultra high strength steel [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 30 (3): 258-262.
- [10] 许良, 刘鹏. 超声波冲击对 30CrMnSiNi2A 钢疲劳性能的影响 [J]. 金属热处理, 2015, 40 (10): 60-63.
Xu L, Liu P. Effect of ultrasonic shock on fatigue properties of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40 (10): 60-63.
- [11] Liu J H, Wen C, Yu M, et al. Manifestations in corrosion pre-phase of ultra-high strength steel 30CrMnSiNi2A in sodium chloride solutions [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2014, 29 (2): 367-373.
- [12] 罗来正, 周堃, 黎小锋, 等. 海洋大气环境与拉伸疲劳载荷耦合作用下 30CrMnSiNi2A 钢的腐蚀损伤行为 [J]. 表面技术, 2021, 50 (8): 349-358.
Luo L Z, Zhou K, Li X F, et al. Corrosion behavior of 30CrMnSiNi2A steel under ocean atmosphere coupled with tensile fatigue load [J]. Surface Technology, 2021, 50 (8): 349-358.
- [13] 刘宪民, 花峰, 刘蕤, 等. 热处理对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响 [J]. 钢铁, 2003, (1): 43-47.
Liu X M, Hua F, Liu R, et al. Effect of heat treatment on mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Iron & Steel, 2003, (1): 43-47.
- [14] 张勇, 樊伟杰, 张泰峰, 等. 预腐蚀对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能影响研究 [A]. 2018 第五届海洋材料与腐蚀防护大会 [C]. 北京, 2018.
Zhang Y, Fan W J, Zhang T F, et al. Effect of pre-corrosion on mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel [A]. The 5th Marine Materials and Corrosion Protection Conference [C]. Beijing, 2018.
- [15] 李磊, 张先锋, 吴雪, 等. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数 [J]. 高压物理学报, 2017, 31 (3): 239-248.
Li L, Zhang X F, Wu X, et al. Dynamic constitutive and damage parameters of 30CrMnSiNi2A steel with different hardness [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31 (3): 239-248.
- [16] 郑修麟, 张铮, 江春生. 循环冷处理对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能的影响 [J]. 航空学报, 1989, (10): 562-563.
Zheng X L, Zhang Z, Jiang C S. Effect of cyclic cold treatment on mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1989, (10): 562-563.
- [17] 余万千, 郁锐, 崔世堂. 考虑应力三轴度影响 30CrMnSiNi2A 钢韧性断裂研究 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41 (3): 47-54.
Yu W Q, Yu R, Cui S T. Study on ductile fracture of 30CrMnSiNi2A steel considering stress triaxiality [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41 (3): 47-54.
- [18] 陈跃良, 张柱柱, 张勇, 等. 冲击载荷下点蚀损伤对 30CrMnSiNi2A 钢应力集中影响的数值模拟研究 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2020, 34 (11): 69-78.
Chen Y L, Zhang Z Z, Zhang Y, et al. Numerical simulation study on the effect of pitting damage on stress concentration of

- 30CrMnSiNi2A steel under impact load [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2020, 34 (11): 69–78.
- [19] 焦明. 30CrMnSiNi2A 钢热处理过程的数值模拟及实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Jiao M. Numerical Simulation and Experimental Study on Heat Treatment Process of 30CrMnSiNi2A steel [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [20] 曹建国, 王天聪, 李洪波, 等. 基于 Arrhenius 改进模型的无取向电工钢高温变形本构关系 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (4): 90–96, 102.
- Cao J G, Wang T C, Li H B, et al. High temperature deformation constitutive relation of non-oriented electrical steel based on improved Arrhenius model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (4): 90–96, 102.
- [21] 赵慧俊, 王宝雨, 刘钢, 等. 基于球化机理的 TA15 钛合金热变形统一本构模型 [J]. 工程科学学报, 2014, 36 (7): 925–930.
- Zhao H J, Wang B Y, Liu G, et al. Unified constitutive model for hot deformation of TA15 titanium alloy based on spheroidization mechanism [J]. Chinese Journal of Engineering, 2014, 36 (7): 925–930.
- [22] Zhu F H, Xiong W, Li X F, et al. A new flow stress model based on Arrhenius equation to track hardening and softening behaviors of Ti6Al4V alloy [J]. Rare Metals, 2018, 37 (12): 1035–1045.
- [23] 杨合, 詹梅. 材料加工过程实验建模方法 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- Yang H, Zhan M. Experimental Modeling Method of Material Processing Process [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008.
- [24] 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.
- [25] Xiao X K, Mu Z C, Hao P, et al. Effect of the Lode parameter in predicting shear cracking of 2024-T351 aluminum alloy Taylor rods [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 120: 185–201.

(上接第 169 页)

● 照片或灰度图应反差适当, 鲜明可见; 金相照片放大倍数均用比例尺表示, 如 $5\mu\text{m}$ 。

● 双栏排图片的宽度应控制在 7.8 cm 左右; 通栏排图片宽度应控制在 16 cm 左右。

● 表格使用三线表, 必要时可加横线, 但一般不得有竖线; 表格的宽度最好设计成 25 个汉字 (相当于 48 个字符) 以内; 表中所有文字一律左齐。

● 公式后应当注明公式中各符号的含义。

● 计量单位一律采用法定计量单位 (国际单位制)。

● 参考文献应按其在正文中被引用的顺序依次列出 (在正文中引用处务必用 “[序号]” 标注); 列出的参考文献应是重要的、近期的、已正式发表的文献资料, 每篇论文应列出 12 篇以上参考文献; 作者不多于 3 个的姓名全部写出, 多于 3 个的, 余者用 “, 等 (, et al)” 表示; 无论中外署名、一律姓 (首字大写) 先名后 (例如: Zhang Y H)。

原文为非英文的参考文献, 需要同时用英文著录。

格式如下:

[1] 期刊 文章作者. 论文题目 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 起页码–终页码.

[2] 专著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 版本. 出版地: 出版社, 出版年.

[3] 译著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 译者, 译. 版本. 出版地: 出版社, 出版年.

[4] 论文集 论文作者. 论文题目 [A]. 论文集编者. 论文集名 (英文实词首字大写) [C]. 出版地: 出版者, 出版年.

[5] 技术报告 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [R]. 地名: 责任单位, 出版年.

[6] 学位论文 作者. 论文题目 (英文实词首字大写)

[D]. 所在城市: 保存单位, 年份.

[7] 专利文献 专利申请者或所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 公告日期或公开日期 (如, 2008–02–03).

[8] 技术标准 标准号, 标准名称 [S].

[9] 在线文献 作者. 论文题目 [EB/OL]. 获取和访问路径 <http://...>, 发表或更新日期 (如, 2008–02–03).

[10] 光盘文献 (数据库) 作者. 论文题目 [DB/CD]. 出版地: 出版者, 出版年.

原文为非英文的参考文献著录举例:

[1] 王博, 张凯锋, 赖小明, 等. SiC_p/2024Al 复合材料板材脉冲电流辅助拉深成形 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (5): 22–26.

Wang B, Zhang K F, Lai X M, et al. Pulse current auxiliary deep drawing of SiC_p/2024Al composites sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37 (5): 22–26.

3 投稿方式及要求

(1) 请通过本刊网站的“作者投稿”系统投稿。

(2) 来稿文责自负, 请勿抄袭他人论文, 请勿一稿多投。对抄袭者和一稿多投者, 一经发现, 本刊将无条件退稿, 并作不良作者记录; 同时, 本刊将保留追索抄袭者浪费本刊资源和其他纷争的权利。

(3) 编辑部对来稿拥有修改权, 遇重大删改时将与作者协商; 排版后的清样将通过 E-mail 发给作者进行核对。

4 编辑部联系方式

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部

邮编: 100083 电话: 010–62920652, 010–82415085

E-mail: fst@263.net

网址: <http://www.fstjournal.net/>

《锻压技术》编辑部