

应变速率对低合金高强钢性能的影响

刘海娜¹, 梅运东¹, 刘领兵²

(1. 黄河交通学院 机电工程学院, 河南 焦作 454950; 2. 焦作市泰鑫机械制造有限公司, 河南 焦作 454000)

摘要:以低合金高强钢 H300LA 为研究对象, 采用液压伺服高速拉伸试验机, 选取应变速率为 0.001、0.1、1、10、100、200、500、1000 s⁻¹ 开展力学性能测试, 获取不同应变速率下的屈服强度、抗拉强度和伸长率等性能参数, 并通过积分力学曲线计算了不同应变速率下的断裂吸收能, 分析了应变速率对材料性能的影响规律。采用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 分析了不同应变速率下的试样断口形貌和变化规律, 获取了材料的断裂特性。结果表明: 低合金高强钢 H300LA 的抗拉强度和伸长率与应变速率呈正相关, 具有明显的应变速率敏感性; 断裂吸收能随着应变速率的增加而增加; 断口形貌均呈韧窝状, 随着应变速率的增加, 韧窝数量增加且尺寸增大。

关键词: 应变速率; 低合金高强钢; 抗拉强度; 断裂吸收能; 断口形貌

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.034

中图分类号: U463.83

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 06-0253-05

Influence of strain rate on properties for low alloy high strength steel

Liu Haina¹, Mei Yundong¹, Liu Lingbing²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Huanghe Jiaotong University, Jiaozuo 454950, China;

2. Taixin Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiaozuo 454000, China)

Abstract: For low alloy high strength steel H300LA, the mechanical properties were tested by hydraulic servo high-speed tensile testing machine at strain rates of 0.001, 0.1, 1, 10, 100, 200, 500 and 1000 s⁻¹, and the yield strength, tensile strength and elongation under different strain rates were obtained. Then, the fracture absorption energy under different strain rates was calculated by integral mechanical curve, and the influence laws of strain rate on material properties were analyzed. Furthermore, the fracture morphology and change law of the test specimens under different strain rates were analyzed by scanning electron microscopy, and the fracture characteristics of the material were analyzed. The results show that the tensile strength and elongation of low alloy high strength steel H300LA are positively correlated with strain rate, and have obvious strain rate sensitivity. The fracture absorption energy increases with the increasing of strain rate, and the fracture morphology is dimple. As the strain rate increases, the number and the size of dimples increase.

Key words: strain rate; low alloy high strength steel; tensile strength; fracture absorption energy; fracture morphology

低合金高强钢是在低碳或超低碳钢中, 添加一定量的合金元素, 通过固溶强化和细晶强化来提高材料的强度。此类材料的基体组织主要是铁素体和珠光体, 具有较高的强度和塑性, 具有广泛的应用前景^[1]。此类材料被广泛应用于车身的结构件、加强件及内板件, 如前纵梁内板、座椅骨架板等^[2]。应变速率对材料的力学性能、断口形貌和基体组织等具有重要的影响, 材料表现出一定的应变速率敏

感性, 这将直接反应在汽车的碰撞过程中, 因此, 对材料在高应变速率条件下的动态力学性能、断裂特征开展研究十分重要。

学者们针对应变速率对不同材料性能的影响开展了相关研究, 徐鑫等^[3]研究了不同应变速率下 δ -TRIP980 钢动态拉伸性能及变形行为, 随着应变速率的增高, 材料的性能提升; 徐勇等^[4]研究了 DP980 钢不同应变速率下的力学性能和应变速率敏感性, 并构建了本构模型; 张伟等^[5]研究了应变速率对增强成形性双相钢 HC440/780DHD+Z 力学性能特征和内部组织变化的影响; 徐超等^[6]研究了 DP 双相钢在不同应变速率下的拉伸变形行为, 并对双相钢组织中的位错密度进行了计算。本文以低合金高强钢 H300LA 为研究对象, 采用高速拉伸试验

收稿日期: 2023-03-02; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 河南省智能制造技术与装备工程技术研究中心项目 (3118210370)

作者简介: 刘海娜 (1984-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: 493815668@qq.com

机研究了其不同应变速率下的力学性能, 获取了抗拉强度、伸长率等参数, 并对其断裂吸收能、断口形貌、裂纹分布等断裂特性进行了分析。

1 材料组织和力学性能

低合金高强钢 H300LA 的成分中除了 Si、Mn 元素外还添加了一定量的 Nb 元素, 可通过固溶强化和细晶强化来提高强度, 其一般用于结构件和加强件。图 1 为低合金高强钢 H300LA 的微观组织, 主要为铁素体+珠光体组织。

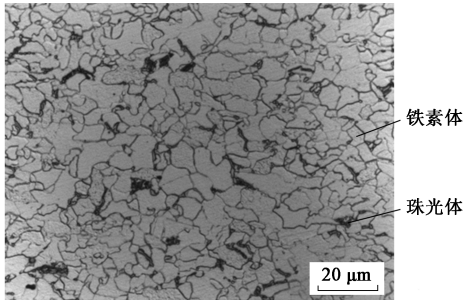


图 1 低合金高强钢 H300LA 的微观组织
Fig. 1 Microstructure of low alloy high strength steel H300LA

根据 GB/T 228.1—2021^[7]要求, 选取 A80 拉伸试样进行静态拉伸测试, 选取与轧制方向夹角为 0°、45°和 90°的试件来分析材料的各向异性, 3 个方向的拉伸曲线如图 2 所示。提取 3 个方向的力学性能参数, 如表 1 所示。

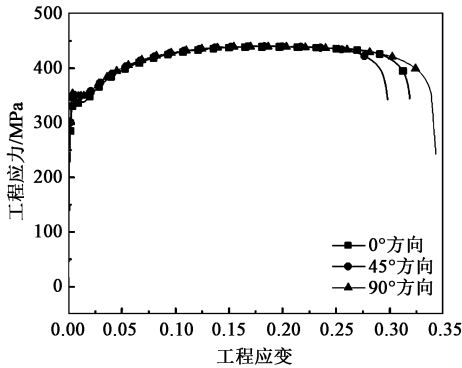


图 2 静态拉伸的工程应力-工程应变曲线
Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curves of static stretching

表 1 3 个方向的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters at three directions

与轧制方向的夹角	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/%
0°	331.1	439.8	31.86
45°	345.8	440.5	29.80
90°	354.1	440.1	34.29

由图 1 和表 1 可知, 低合金高强钢 H300LA 的屈服强度约为 343 MPa, 抗拉强度约为 440 MPa, 伸长率约为 32.00%, 具有明显的屈服平台, 3 个方向的力学性能差异较小, 各向异性不明显。

2 应变速率影响分析

2.1 力学性能影响分析

根据 GB/T 30069.2—2016^[8], 对低合金高强钢 H300LA 在高应变速率下的力学性能进行测试, 采用液压伺服高速拉伸试验机, 选取应变速率为 0.001、0.1、1、10、100、200、500 和 1000 s⁻¹ 进行测试, 每个应变速率重复 5 次^[9], 测试结果如图 3 所示。不同应变速率下的屈服强度、抗拉强度和伸长率的变化曲线如图 4 所示。

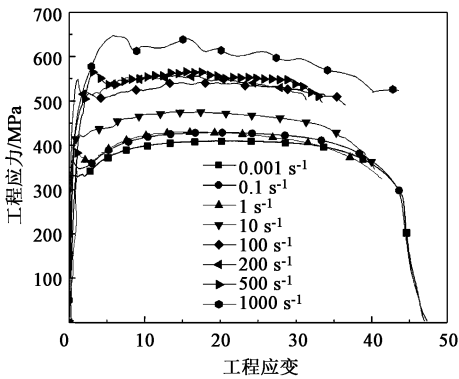


图 3 不同应变速率下的工程应力-工程应变曲线
Fig. 3 Engineering stress-engineering strain curves under different strain rates

由图 3 和图 4 可知, 低合金高强钢 H300LA 具有一定的应变速率敏感性, 随着应变速率的增加, 其屈服强度和抗拉强度不断增加, 应变速率由 0.001 s⁻¹ 增加至 1000 s⁻¹ 时, 屈服强度增加了 132.4 MPa, 抗拉强度增加了 217.1 MPa, 但伸长率整体的增幅较小。

断裂吸收能可以用来表征材料在动态拉伸过程中所吸收的能量, 一般断裂吸收能越高材料的碰撞性能越好^[10-11]。通过对拉伸曲线(图 3)下的面积进行积分来计算材料的断裂吸收能, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知: 随着应变速率的增加, 材料的断裂吸收能不断增加, 尤其当应变速率从 0.001 s⁻¹ 增加至 200 s⁻¹ 时, 随着应变速率的增加, 断裂吸收能增加明显; 当继续增加至 500 s⁻¹ 时, 材料的断裂吸收能增加幅度放缓。

2.2 断裂形貌分析

选取不同应变速率下的试样断口进行 SEM 分

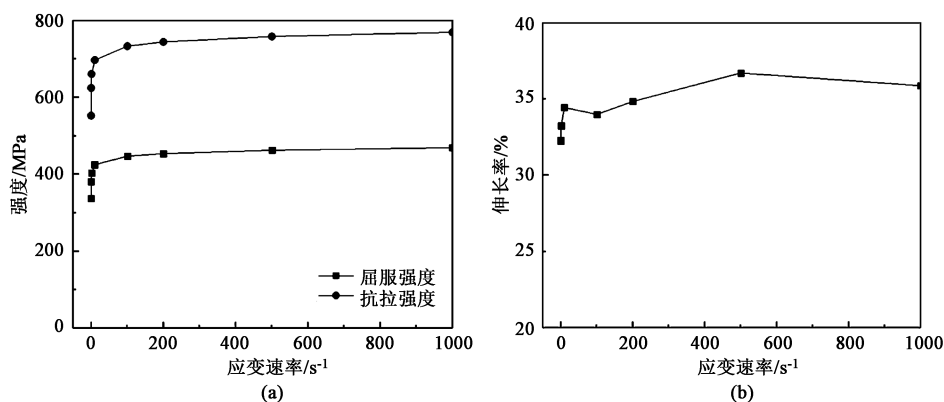


图4 不同应变速率下强度(a)和伸长率(b)的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of strength (a) and elongation (b) under different strain rates

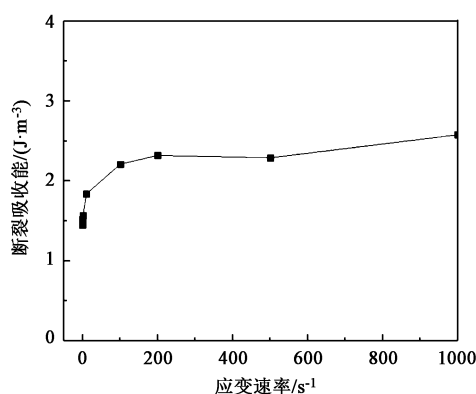


图5 不同应变速率下的断裂吸收能

Fig. 5 Fracture absorption energy under different strain rates

析^[12-13], 结果如图6所示。由图6可知, 不同应变速率下的断口形貌均呈现典型的韧性断裂, 随着应变速率的增加, 韧窝尺寸逐渐增加, 分布更加紧密。韧窝的尺寸和密度与断裂吸收能呈正相关, 因此, 可以推测低合金高强钢 H300LA 拉伸至断裂的过程中, 随着应变速率的增大, 断裂前可吸收更多的能量。

对低合金高强钢 H300LA 的断口进行定量分析, 其韧窝尺寸与应变速率关系曲线如图7所示。由图7可知, 韧窝尺寸与应变速率呈正相关, 由此表明, 随着应变速率的增加, 材料吸能能力增强, 碰撞性能更优, 这与图5所示结果相一致。

2.3 断裂裂纹分析

图8为应变速率为 500 s^{-1} 时, 低合金高强钢 H300LA 断口附近形貌。由图8可知, 当组织为铁素体+珠光体的低合金高强钢 H300LA 经过高速率拉伸后, 一部分裂纹出现在铁素体和珠光体的界面处(图8d中A区域), 另外一部分裂纹存在于铁素体晶粒的晶界处(图8d中B区域), 在断口附近的裂纹密度较高。同时, 铁素体晶粒也被明显拉长, 在

铁素体晶粒内部存在裂纹, 如图8a和图8b所示; 在远离断口的位置, 裂纹的密度有所降低, 但仍可以看到铁素体与珠光体界面处以及铁素体晶界处存在裂纹, 此时铁素体晶粒内部延展的裂纹仍十分明显, 如图8c所示; 在距离断口更远的位置, 裂纹基本消失, 此时滑移也不明显, 但是铁素体晶粒表现出明显的浮凸, 珠光体也呈凸起形貌, 如图8d所示。

应变速率对低合金高强钢 H300LA 的力学性能和断口形貌具有显著的影响, 因此, 在车辆结构设计时, 需要予以考虑, 尤其是在碰撞安全分析过程中, 不能忽略应变速率效应的作用。

3 结论

(1) 随着应变速率的增加, 低合金高强钢 H300LA 的屈服强度和抗拉强度均呈现明显提升, 伸长率亦有所提升, 表现出明显的应变速率敏感性; 随着应变速率的增加, 断裂吸收能不断增加, 材料的吸能能力增强。

(2) 不同应变速率下拉伸断口均呈现韧窝状, 为典型的韧性断裂特征; 随着应变速率的增加, 韧窝的数量增多, 并且尺寸越来越大, 断裂前吸收的能量越多; 随着应变速率的增大, 不同应变速率拉伸至断裂的过程中, 断裂前可吸收更多能量。

(3) 高应变速率下, 裂纹主要分布在铁素体和珠光体的界面处及铁素体晶粒的晶界处; 随着与断口之间的距离减小, 裂纹逐渐增多, 在断口附近的裂纹密度最高。

参考文献:

- [1] 赵征志, 陈伟健, 高鹏飞, 等. 先进高强度汽车用钢研究进展及展望 [J]. 钢铁研究学报, 2020, 32 (12): 1059-1076.

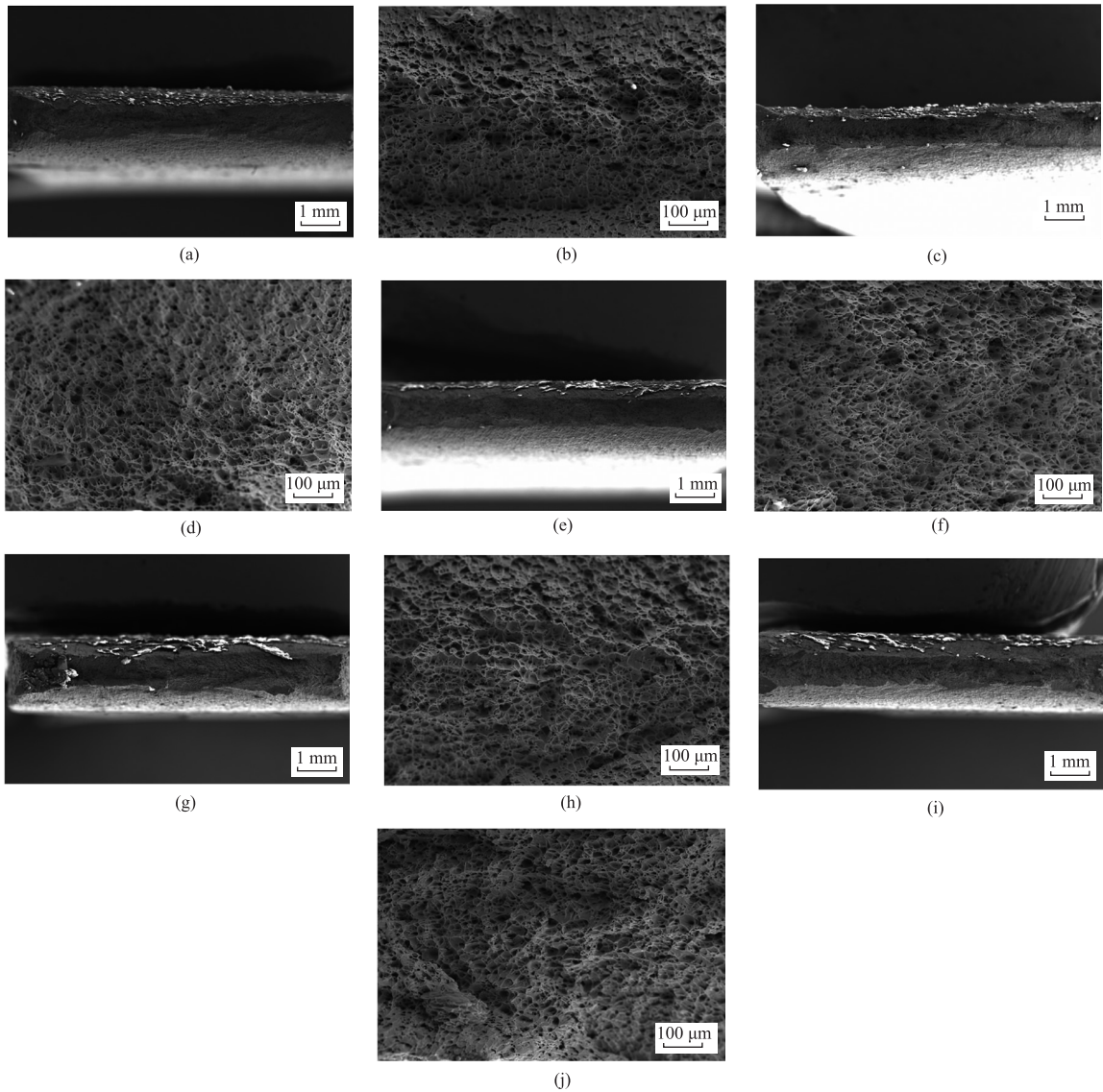


图 6 不同应变速率下的试样断口 SEM 结果

(a) 1 s⁻¹, 低倍 (b) 1 s⁻¹, 高倍 (c) 10 s⁻¹, 低倍 (d) 10 s⁻¹, 高倍 (e) 100 s⁻¹, 低倍 (f) 100 s⁻¹, 高倍
(g) 500 s⁻¹, 低倍 (h) 500 s⁻¹, 高倍 (i) 1000 s⁻¹, 低倍 (j) 1000 s⁻¹, 高倍

Fig. 6 SEM results of sample fracture under different strain rates

(a) 1 s⁻¹, low power (b) 1 s⁻¹, high power (c) 10 s⁻¹, low power (d) 10 s⁻¹, high power (e) 100 s⁻¹, low power
(f) 100 s⁻¹, high power (g) 500 s⁻¹, low power (h) 500 s⁻¹, high power (i) 1000 s⁻¹, low power (j) 1000 s⁻¹, high power

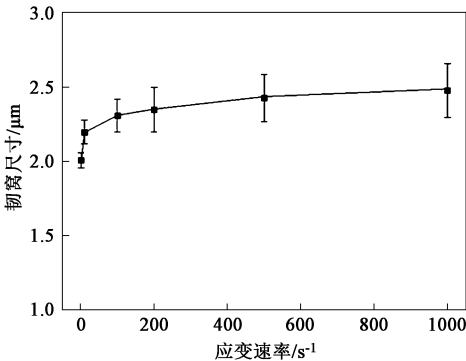


图 7 韧窝尺寸与应变速率关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between dimple size and strain rate

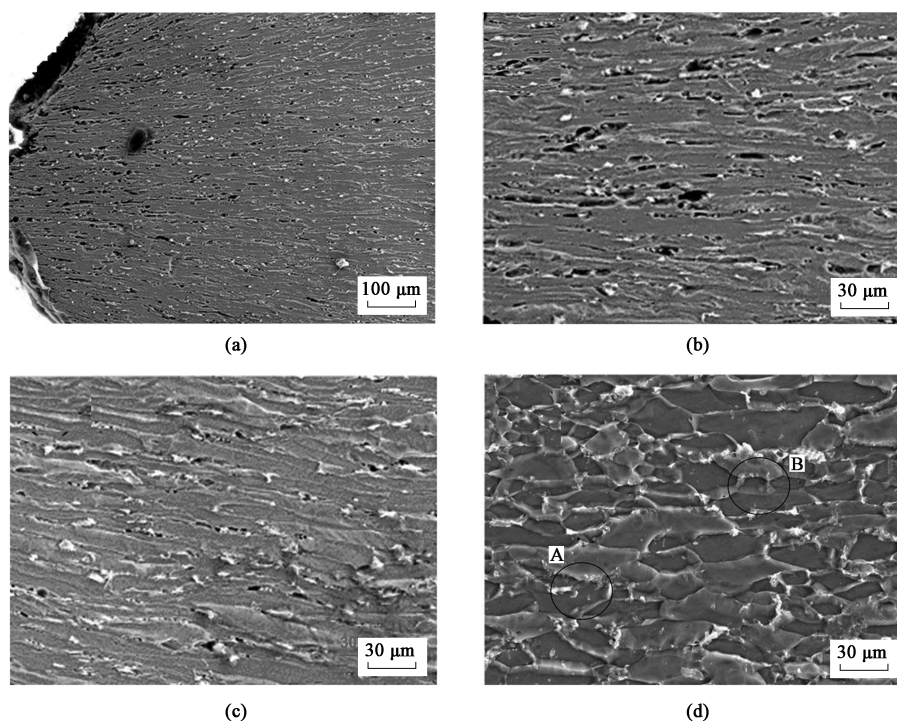
Zhao Z Z, Chen W J, Gao P F, et al. Progress and perspective of advanced high strength automotive steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32 (12): 1059-1076.

[2] 徐李军, 时朋召, 张淑兰. 低合金高强度钢微观组织转变机制 [J]. 钢铁研究学报, 2019, 31 (11): 988-996.

Xu L J, Shi P Z, Zhang S L. Microstructure evolution mechanism of HSLA steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31 (11): 988-996.

[3] 徐鑫, 梁笑, 李春林, 等. 应变速率对 δ-TRIP980 钢动态拉伸变形行为的影响 [A]. 中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集 [C]. 北京: 冶金工业出版社, 2022.

Xu X, Liang X, Li C L, et al. Effect of strain rate on the dynamic tensile deformation behavior of δ-TRIP980 steel [A]. Chinese So-

图8 应变速率为 500 s^{-1} 时的断口形貌

(a) 断口 (b) 距断口 5 mm 处 (c) 距断口 8 mm 处 (d) 距断口 10 mm 处

Fig. 8 Fracture morphologies at strain rate of 500 s^{-1}

(a) Fracture (b) 5 mm from fracture (c) 8 mm from fracture (d) 10 mm from fracture

cirty for Metals. Proceedings of the 13th Annual China Steel Conference [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022.

- [4] 徐勇, 段星宇, 陈帅峰, 等. DP980 高强钢静态拉伸性能及本构模型构建 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (6): 125-133.
- Xu Y, Duan X Y, Chen S F, et al. Static and dynamic tensile properties and constitutive model construction of DP980 high-strength steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (6): 125-133.
- [5] 张伟, 潘跃, 刘华赛, 等. 应变速率对增强成形性双相钢性能影响分析 [J]. 钢铁, 2022, 57 (4): 123-129.
- Zhang W, Pan Y, Liu H S, et al. Effect of strain rate on properties of dual phase steel with high formability [J]. Iron and Steel, 2022, 57 (4): 123-129.
- [6] 徐超, 朱超群, 何燕霖, 等. 不同应变速率下 DP 钢变形行为的微观机理研究 [J]. 上海金属, 2014, 36 (3): 1-5.
- Xu C, Zhu C Q, He Y L, et al. Study on the microscopic deformation mechanism of DP steel at different strain rates [J]. Shanghai Metals, 2014, 36 (3): 1-5.
- [7] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [8] GB/T 30069.2—2016, 金属材料 高应变速率拉伸试验 第2部分: 液压伺服型与其他类型试验系统 [S].
- GB/T 30069.2—2016, Metallic materials—Tensile testing at high strain rates—Part 2: Servo-hydraulic and other test systems [S].
- [9] 邓彬, 李庆芬, 吴远志, 等. 高应变速率多向锻造对 AZ31 镁

合金组织及耐腐蚀性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 7-11, 25.

- Deng B, Li Q F, Wu Y Z, et al. Influence of high strain rate multi-directional forging on microstructure and corrosion resistance property for AZ31 magnesium alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 7-11, 25.
- [10] Chen G, Huang L, Link T M, et al. Calibration and validation of GISSMO damage model for a 780 MPa third generation advanced high strength steel [A]. SAE International. WCX SAE World Congress Experience [C]. Detroit, 2020.
- [11] 郑鑫福, 任鹏飞, 郑崇嵩, 等. HC260LAD+Z 钢动态力学性能及其本构模型研究 [J]. 机电工程技术, 2022, 51 (5): 70-73, 203.
- Zheng X F, Ren P F, Zheng C S, et al. Research on dynamic property and constitutive modeling for HC260LAD+Z steel [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51 (5): 70-73, 203.
- [12] 余立, 刘静, 葛锐, 等. DP780 双相钢在不同应变状态下的断裂特性及机理 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 48-55.
- Yu L, Liu J, Ge R, et al. Fracture characteristics and mechanism on DP780 dual-phase steel under different strain states [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 48-55.
- [13] 潘利波, 左治江, 周文强, 等. 双相钢的成形与断裂极限性能分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 185-189.
- Pan L B, Zuo Z J, Zhou W Q, et al. Analysis on forming and fracture limit properties for dual phase steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 185-189.