

600 MPa 级相变诱导塑性钢的动态力学性能

刘渊媛, 陈明, 魏星

(宝山钢铁股份有限公司中央研究院武汉分院, 武汉 430080)

摘要: **目的** 研究相变诱导塑性钢不同应变速率下的力学性能, 尤其是动态力学性能。**方法** 对 600 MPa 级相变诱导塑性钢进行了准静态至动态 6 种不同应变速率下的力学性能测试, 并对各试样断口处残余奥氏体含量进行了测试比对。0.001~0.01 s⁻¹ 准静态测试在 ZWICK Z050 万能试验机上完成, 0.1, 1, 10, 100 s⁻¹ 动态测试在 ZWICK HTM5020 液压伺服高速拉伸试验机上完成。**结果** 力学测试结果表明, TRIP600 具有明显的应变速率效应。在较高速率下, 随应变速率的升高材料屈服强度、抗拉强度及伸长率都有一定程度的提高。**结论** 断口处残余奥氏体含量在较高速率下无明显差别, 表明较动态条件下应变速率对残余奥氏体转变影响不明显。

关键词: 相变诱导塑性; 高速拉伸; 强度; 延展性

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.004

中图分类号: TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0016-04

Dynamic Mechanical Properties of 600 MPa Transformation Induced Plasticity Steel

LIU Yuan-yuan, CHEN Ming, WEI Xing

(Wuhan Branch of Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Wuhan 430080, China)

ABSTRACT: The study aims to research mechanical property, especially dynamic mechanical property of transformation induced plasticity steel at different strain rates. Quasi-static and dynamic tensile tests were conducted to TRIP600 steel in six different strain rates to get mechanical properties under different strain rates. Content of retained austenite at fracture of specimen were tested and compared. Quasi-static tests with strain rates of 0.001 - 0.01 s⁻¹ were conducted with ZWICK Z050 universal testing machine, while dynamic tests were carried out with ZWICK HTM 5020 hydraulic servo high strain rate testing machine. TRIP600 has apparent strain rate effect. Yield strength, tensile strength and ductility were higher under high strain rate tensile test. Contents of retained austenite around the fractures are close in medium-high to high strain rate tests, reveals that strain rates have little effect on the transformation of austenite.

KEY WORDS: TRIP; high strain rate tensile test; strength; ductility

随着汽车的日益普及和人们环保意识的逐渐增强, 对汽车安全性和燃料效率的要求越来越高。为在保证汽车安全性的前提下减轻车体重量, 提高燃料效率, 汽车结构件大量采用高强度钢。为降低中高强度汽车结构用钢的制造成本, 开发研究了价格低廉、强度高且成形性优异的、含残余奥氏体的相变诱导强化钢 TRIP(Transformation Induced Plasticity)^[1]。TRIP 效

应是钢中稳定存在的残余奥氏体, 在外力作用下发生应变诱导马氏体转变^[2], 由于局部马氏体的高硬度使得变形不断向周围组织转移, 延迟颈缩的产生, 使材料强度提高的同时获得较高的塑性^[3]。良好的强塑性不仅有利于高强钢的冲压成形, 也提高了能量吸收能力, 在汽车轻量化选材中具有明显的优越性, 被认为是非常有前途的轻量化汽车用钢。国内外学者对其组

收稿日期: 2017-09-25

作者简介: 刘渊媛(1989—), 女, 助理研究员, 主要研究方向为汽车板高速拉伸测试及材料成形。

织、性能、生产工艺等做了很多研究^[4-7]。相变诱导强化钢的 TRIP 效应对力学性能影响的研究主要集中在静态下、准静态下^[8-9]，及预加载应变对 TRIP 钢力学性能的影响^[10-11]，动态下其力学性能的研究还很少。文中进行了准静态至动态 6 种不同应变速率 (0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 s⁻¹) 下相变诱导塑性钢力学性能的研究。

1 试验

1.1 材料

试验材料为武钢生产的冷轧 TRIP600 钢,厚度为 1.4 mm, 含有质量分数为 0.09% 的 C, 0.017% 的 Si, 1.9% 的 Mn, 0.01% 的 P, 0.003% 的 S。材料屈服强度为 425 MPa, 抗拉强度为 660 MPa, 断裂伸长率为 30%。TRIP600 显微组织见图 1, 如其中红色标记所示, 白色点区域为残余奥氏体区。XRD 物相含量测试测得 TRIP600 中残余奥氏体体积分数为 16%。

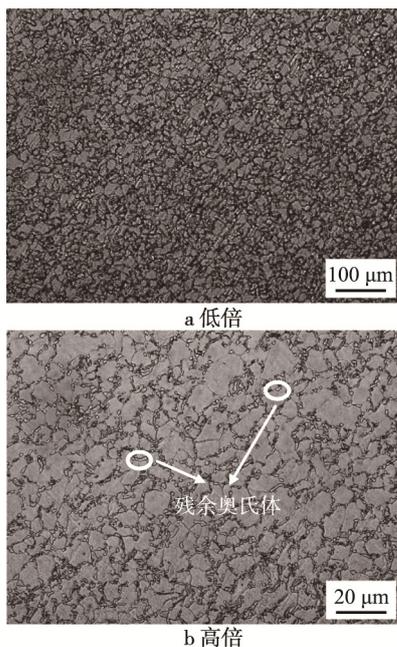


图 1 TRIP600 显微组织
Fig.1 Microstructure of TRIP600

1.2 设备和方法

研究涉及的全部试验皆在室温下进行。速率为 0.001 s⁻¹ 及 0.01 s⁻¹ 的中低速准静态拉伸试验在 ZWICK 公司的 Z050 材料万能试验机上完成,采用机械引伸计测量应变,试样尺寸见图 2a, 单位为 mm。速率为 0.1, 1, 10, 100 s⁻¹ 的中高速动态拉伸试验在 ZWICK 公司的 HTM 5020 高速拉伸试验机上完成,采用非接触式高速应变测量系统,进行应变的测量及计算,试样尺寸见图 2b, 单位为 mm。为避免试样尺

寸对结果的影响,准静态拉伸试样平行段尺寸与高速拉伸保持一致。每个应变速率进行 2~3 次平行试验,取重复性较好的一组试验结果进行后续研究,以保证结果的有效性。机械引伸计和非接触式高速应变测量系统的标距都选择为 15 mm。试样加工采用线切割。

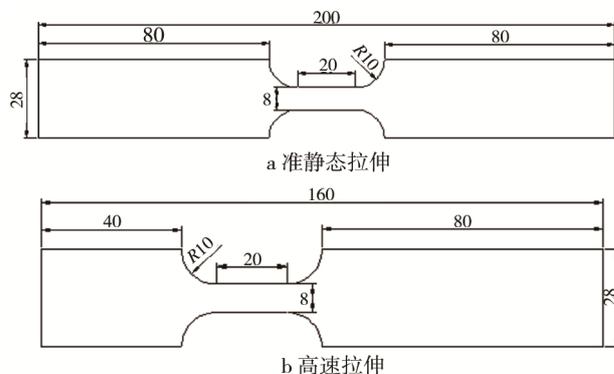


图 2 拉伸试验试样尺寸
Fig.2 Dimensions of test specimen

2 结果及分析

2.1 应变速率对 TRIP600 力学性能的影响

6 种不同应变速率下 TRIP600 的工程应力-工程应变曲线见图 3。屈服强度、抗拉强度及伸长率随应变速率变化的曲线见图 4。可以看出, TRIP600 整体表现出明显的应变速率效应。在 0.001~0.01 s⁻¹ 的中低速范围内力学性能相差不大,但在中高速条件下,屈服强度及抗拉强度都随应变速率的升高而明显增大。伸长率在 0.001~1 s⁻¹ 速率范围内相差不大,但在 10 s⁻¹ 与 100 s⁻¹ 应变速率下伸长率明显增大,表明 TRIP600 在高速应变条件下具有良好的吸能性。

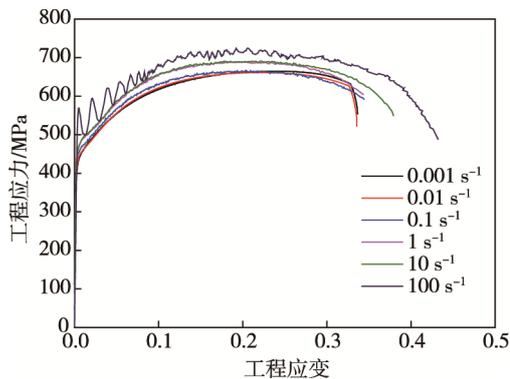


图 3 不同速率下 TRIP600 工程应力-工程应变曲线
Fig.3 Engineering stress-strain curves of TRIP600 under different strain rates

相关 TRIP 钢静态、准静态力学性能的研究表明, TRIP 钢仅在少量、逐步形成应变诱导马氏体时,会得到大的伸长率^[12],即应变速率越慢,TRIP 效应越明显。在准静态(2.8×10⁻² s⁻¹)试验时,马氏体的应变

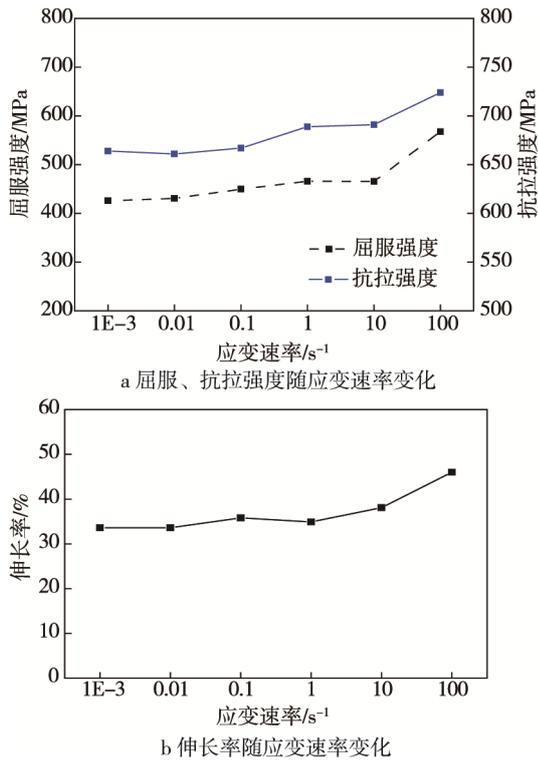


图4 力学性能随应变速率变化

Fig.4 Mechanical properties under different strain rates

诱导相变由于过高的应变速率受到部分抑制,造成伸长率在某一试验温度(250 °C)下大大减少^[3]。动态力学性能的研究中,出现了在高应变速率下伸长率随应变速率升高而增大的现象^[13-14],此时的伸长率增大是由于材料铁素体基体中存在更多的绝热增温而造成的^[15]。

2.2 应变速率对 TRIP600 残余奥氏体含量的影响

对不同应变速率下拉伸试样断口位置进行 XRD 物相含量测定,残余奥氏体含量测试结果见图 5。对比原材料残余奥氏体体积分数 16% 可得,所有应变速率下材料皆发生奥氏体转变即 TRIP 效应,残余奥氏

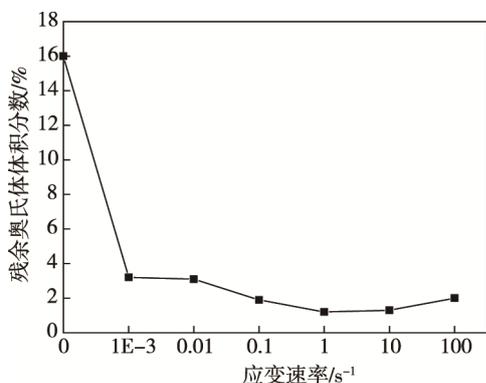


图5 试样断口处残余奥氏体含量随应变速率变化

Fig.5 Volume fraction of retained austenite around the fractures under different strain rates

体含量大大减少。不同应变速率试验后,残余奥氏体含量有细微差别。其中 0.001 s⁻¹ 和 0.01 s⁻¹ 中低速试验后的残奥体积分数为 3.2% 和 3.1%, 稍大于其余中高速试验结果, TRIP 效应稍小于中高速试验,与上一节力学性能趋势一致。0.1~100 s⁻¹ 中高速试验后,残奥量基本无差别,都集中在 1.2%~1.9%,表明中高速条件下应变速率对残余奥氏体转变的影响不明显。结合中高速动态拉伸条件下的材料力学性能,呈现出一定的应变速率敏感性,可得出在中高速动态拉伸条件下,TRIP600 表现出的应变速率效应与材料的 TRIP 效应无明显关联。

3 结论

通过对厚度为 1.4 mm 规格的 TRIP600 钢在 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 s⁻¹ 这 6 种不同应变速率下进行拉伸试验及 XRD 物相含量分析, 得到结论如下。

1) TRIP600 钢在准静态至动态条件下表现出明显的应变速率效应, 强度随应变速率的升高而增大, 材料在高应变速率下表现出良好的吸能性。

2) 应变速率对中高速动态拉伸条件下 TRIP600 残余奥氏体转变的影响不明显, 材料表现出的应变速率效应与 TRIP 效应无明显关联。

后续可进行 TRIP600 静态拉伸力学性能测试及断口物相含量分析, 并对断口进行深入的显微组织分析, 从而得到更全面的不同条件下 TRIP600 的力学性能及断裂机理。

参考文献:

- [1] MATSUMURA O, SAKUMA Y, TAKECHI H. Enhancement of Elongation by Retained Austenite in Inter-Critical Annealed 0.4C-1.5Si-0.8Mn[J]. Trans ISIJ, 1987, 27(4): 570—579.
- [2] 韦习成, 李麟, 符仁钰. TRIP 钢显微组织与性能关系的评述[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(5): 71—76.
WEI Xi-cheng, LI Lin, FU Ren-yu. Review on Relation Between Microstructures and Properties of TRIP Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2001, 13(5): 71—76.
- [3] 刘永前, 陈宇. 相变诱导塑性钢生产现状与发展趋势[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2010, 22(3): 23—26.
LIU Yong-qian, CHEN Yu. Current Production Situation and Development Tendency of Transformation Induced Plasticity Steel[J]. Journal of Wuhan Engineering Institute, 2010, 22(3): 23—26.
- [4] 朱丽娟, 吴迪, 赵宪明, 等. Si-Mn 系相变诱导塑性钢热轧过程中组织演变的预测[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(7): 36—40.
ZHU Li-juan, WU Di, ZHAO Xian-ming, et al. Predic-

- tion of Microstructure Evolution of Si-Mn TRIP Steel during Hot Rolling[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(7): 36—40.
- [5] 胡建明, 李麟, 黄澍, 等. 贝氏体等温温度对 980 MPa TRIP 钢力学性能和显微组织的影响[J]. 上海金属, 2011, 33(3): 14—18.
HU Jian-ming, LI Lin, HUANG Shu, et al. Effect of Isothermal Bainite Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 980 MPa TRIP Steel[J]. Shanghai Metals, 2011, 33(3): 14—18.
- [6] 柳得棹, 李忠义, 张建, 等. 含 1.2% 铝 TRIP 钢中残余奥氏体的 EBSD 研究[J]. 电子显微学报, 2010, 29(1): 23—27.
LIU De-lu, LI Zhong-yi, ZHANG Jian, et al. EBSD Study on Retained Austenite in a TRIP Steel Bearing 1.2% Al[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2010, 29(1): 23—27.
- [7] 王业勤. 新型超高强 TRIP 钢组织性能研究[J]. 山东冶金, 2011, 33(6): 36—37.
WANG Ye-qin. Study on the Microstructure and Mechanical Properties of New Ultra High-strength TRIP Steel[J]. Shandong Metallurgy, 2011, 33(6): 36—37.
- [8] 李壮, 李伟. 应变速率对硅锰系 TRIP 结构钢力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2001, 30(4): 8—10.
LI Zhuang, LI Wei. Effects of Strain Rate on the Mechanical Properties of Plain-carbon Si-Mn TRIP Steel[J]. Hot Working Technology, 2001, 30(4): 8—10.
- [9] 江利, 崔永丽. 应变速率对高碳硅锰 TRIP 钢力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2002, 26(11): 39—42.
JIANG Li, CUI Yong-li. Effect of Strain Rate on Tensile Properties of a High Carbon Si-Mn TRIP Steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002, 26(11): 39—42.
- [10] 曾宇卓, 李光耀, 刘迪辉. 拉伸预应变对 TRIP 钢显微组织和力学性能影响[J]. 机械工程材料, 2011, 35(12): 26—28.
ZENG Yu-zhuo, LI Guang-yao, LIU Di-hui. Effect of Tensile Pre-strain on Microstructure and Mechanical Properties of TRIP Steels[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(12): 26—28.
- [11] ROBERTSON L T, HILDITCH T B, HODGSON P D. The Effect of Prestrain and Bake Hardening on the Low-cycle Fatigue Properties of TRIP Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(4): 587—594.
- [12] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
XU Zu-yao. Martensitic Transformation and Martensite(Second Edition)[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [13] HE Z, HE Y, LING Y, et al. Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of TRIP Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 2141—2147.
- [14] CHOI J Y, LEE J, LEE K, et al. Effects of the Strain Rate on the Tensile Properties of a TRIP-aided Duplex Stainless Steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 666: 280—287.
- [15] RAMO J, KUOKKALA V T, VUORISTO T. Influence of Strain Rate and Adiabatic Heating on the Deformation Behavior of Cold Heading Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 5186—5194.