

TSCR 工艺制备 600MPa 级 TRIP 钢的组织与力学性能

Microstructure and Mechanical Properties of 600MPa
TRIP Steel Produced by TSCR Process

张迎晖¹, 赵鸿金¹, 康永林²

(1 江西理工大学 材料与化学工程学院,

江西 赣州 341000; 2 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

ZHANG Ying-hui¹, ZHAO Hong-jin¹, KANG Yong-lin²

(1 Faculty of Material and Chemical Engineering, Jiangxi University of

Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2 School of Materials

Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

摘要: 在实验室条件下模拟薄板坯连铸连轧工艺试制了 600MPa 级 G-Si-Mn 系 TRIP 钢, 拉伸实验检测表明, 试验钢的力学性能为 $\sigma_b = 630\text{MPa}$, $\sigma_s = 460\text{MPa}$, $\delta = 29.1\%$; 组织观察发现, 试样组织为铁素体+ 贝氏体+ 残余奥氏体, 彩色金相定量分析结果表明残余奥氏体的体积分数为 6.6%。

关键词: TRIP 钢; 薄板坯连铸连轧; 力学性能; 组织

中图分类号: TG142.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)02-0051-03

Abstract: G-Si-Mn TRIP steel was prepared by TSCR process in laboratory. The results of tensile experiment indicated that the ultimate tensile strength was 630MPa, yield strength was 430MPa, elongation was 29.1%. The results also indicated that the microstructure was composed with ferrite, bainite and retained austenite. The counting of quantitative colour metallography showed that retained austenite volume fraction was about 6.6%.

Key words: G-Si-Mn TRIP steel; TSCR process; mechanical property; microstructure

薄板坯连铸连轧(Thin Slab Casting and Rolling, TSCR)是一种短流程工艺, 在世界范围内倍受关注^[1,2], 到 2006 年底, 中国已建成和在建的 TSCR 生产线达到 11 条, 产能预计为 2500 万吨/年, 是世界上 TSCR 线最多的国家^[3]。但该工艺可生产的钢种范围仍不如传统流程, 有关扩展薄板坯连铸连轧可生产钢种范围的研发工作具有重要意义。在薄板坯连铸连轧的品种扩展策略中, 一个重要的方向是用于制作汽车结构件的高强度深冲钢^[2]。

相变诱导塑性(Transformation Induced Plasticity, TRIP)效应是指钢中稳定存在的残余奥氏体在变形过程中向马氏体转变时引入了相变强化和塑性增长^[3], 这类钢的强塑积高, 合金元素含量低、成分简单, 是制作汽车车门防护杆、保险杠加强体等要求高强度、成形性好的理想材料^[4]。低合金 TRIP 钢的生产方法有两类, 热轧 TRIP 钢主要通过热轧控冷来获得多边形铁素体+ 片状(或板条状)贝氏体+ 残余奥氏体的多

相组织^[5,6]; 冷轧 TRIP 钢则通过冷轧后进行临界加热+ 贝氏体等温淬火的热处理方法实现^[7-11]。本研究模拟薄板坯连铸连轧工艺制备了 600MPa 级 G-Si-Mn 系 TRIP 钢, 对试验钢的力学性能进行了检测; 观察了试验钢组织, 进行了相组成的定量分析; 并对试验钢中的夹杂物进行了分析。

1 实验方法

TSCR 工艺的热历史特征是只发生奥氏体向铁素体的单向相变, 为此要保证脱模温度不低于相变温度。参考 CCT 曲线^[12]以及薄板坯连铸连轧工艺制订了实验工艺。

采用 10kg 真空感应炉熔炼合金, 铁模浇注后, 开模取出钢锭, 钢锭尺寸为 60mm × 100mm × 130mm。用红外线测温仪测得钢锭表面温度为 952℃, 随即将钢锭送入均热炉内, 均热工艺为 1150℃ × 30min。均

热后在 $\phi 380\text{mm} \times 400\text{mm}$ 二辊轧机上热轧 7 道次, 终轧温度为 760°C , 总变形率为 90%。热轧后的轧件先空冷到 700°C (冷却速度为 1.9°C/s), 再水冷至 500°C (冷却速度为 25°C/s), $500^\circ\text{C} \times 60\text{min}$ 模拟卷取后出炉空冷。

经化验, 试验钢的化学成分(质量分数/%)为: 0.20C , 1.08Si , 1.27Mn , 0.015P , 0.0065S , 0.005Ti , $\text{Al} < 0.01$ 。

沿轧制方向按 GB6397-86 标准加工了拉伸试样, 标距 65mm , 在 300kN 电子拉伸机上进行了力学性能实验, 拉伸速度为 5mm/min 。在带图像分析软件的 LEICA DMRX 型金相显微镜上对试验钢进行了组织观察和定量金相分析, 在 LEO-1450 型扫描电镜上对试验钢中的夹杂物进行了观察。经双喷减薄后的金属薄膜试样在 H-800 透射电镜下观察了残余奥氏体及贝氏体的微观组织。

2 实验结果及分析

2.1 试验钢的力学性能及组织

拉伸实验结果表明, 试验 TRIP 钢的力学性能为: $\sigma_b = 630\text{MPa}$, $\sigma_s = 460\text{MPa}$, $\delta = 29.1\%$, 屈强比为 0.73 。金相试样取自试验钢轧件的纵向。在光学显微镜下可以观察到大量的多边形铁素体, 贝氏体分布于基体上, 但残余奥氏体与铁素体在光学显微镜下不能分辨开来。为了测定合金中各相的含量, 采用了彩色金相实验方法。参考文献[13]的做法, 先将 1g 偏重亚硫酸钠溶于 80mL 蒸馏水中, 另将 4g 苦味酸溶于

80mL 无水乙醇中, 将两种溶液按体积比 $1:1$ 混合均匀后, 立即将研磨、抛光好的试样侵入试液中 $15\sim 25\text{s}$, 用清水冲洗后, 冷风吹干。

在带图像分析软件的 LEICA DMRX 金相显微镜上进行了组织分析。图 1 是试验钢的彩色金相照片。图中浅灰色区域为铁素体, 深棕色的是贝氏体, 白色发亮的是残余奥氏体。(黑白打印图中灰色区域为铁素体, 深色的是贝氏体, 白色的是残余奥氏体。) 定量金相分析结果为: 6.6% 的残余奥氏体, 57.9% 的铁素体, 35.5% 的贝氏体。

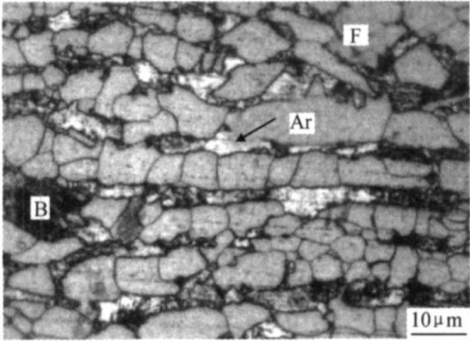


图 1 试验 TRIP 钢的显微组织

Fig. 1 Micrograph of the test TRIP steel

2.2 试验钢的 TEM 组织分析

薄膜试样的 TEM 观察表明, 试制 TRIP 钢中的残余奥氏体有两种形态, 在铁素体基体上以小岛状存在(如图 2a 所示), 在贝氏体板条的边界上则呈薄膜状分布(如图 2b)。图 2c 所示为贝氏体板条内的位错。残余奥氏体的含量及其稳定性对 TRIP 钢的组织、性

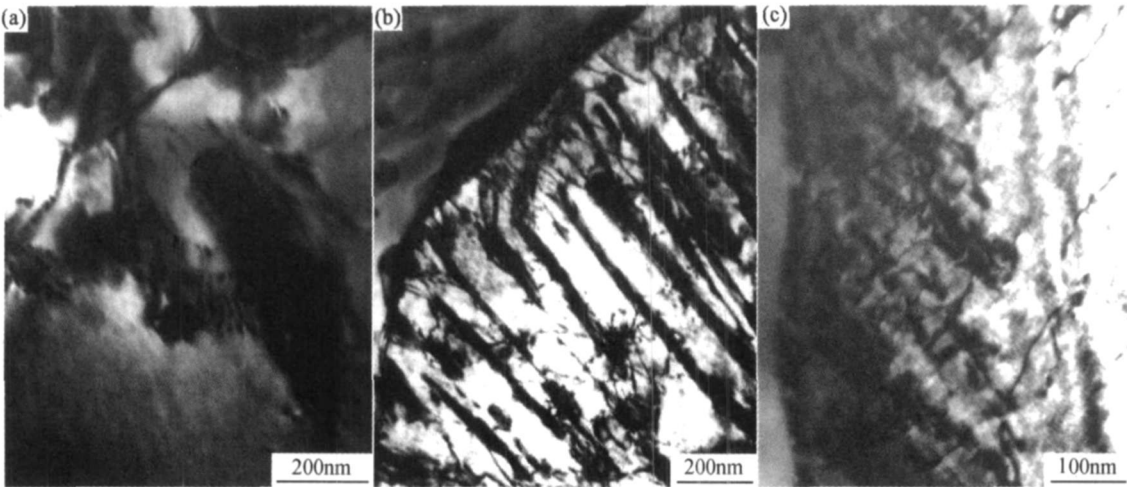


图 2 试验 TRIP 钢的 TEM 照片 (a) 岛状残余奥氏体; (b) 薄膜状残余奥氏体; (c) 贝氏体内的位错

Fig. 2 TEM micrograph of the test TRIP steel

(a) retained austenite island; (b) retained austenite film; (c) dislocation in bainite

能影响极大。文献^[14]认为,薄膜状残余奥氏体的稳定性高于孤岛状残余奥氏体的稳定性,并且平均强度也更高。铁素体延性较好,易吸收残余奥氏体向马氏体转变引起的体积膨胀,因而对 TRIP 效应具有辅助作用。文献^[15]认为铁素体量的变化与奥氏体中碳含量和合金元素有直接的关系,在优化铁素体量的基础上才能获得最大量稳定的奥氏体。高强低合金 TRIP 钢中,铁素体和残余奥氏体主要对塑性有影响,而贝氏体

主要对强度有影响。

2.3 试验钢的夹杂物分析

在扫描电镜上对薄板坯连铸连轧工艺制备的 TRIP 钢进行了夹杂物分析。大量观察表明,试验钢中夹杂物的尺寸细小,以点球状形貌为主,尺寸在 1~5 μm 之间。图 3 所示为试验钢中的一个尺寸约为 1 μm ×2 μm 夹杂,成分以 MnS 为主,另有 TiO \cdot FeO 复合氧化物。

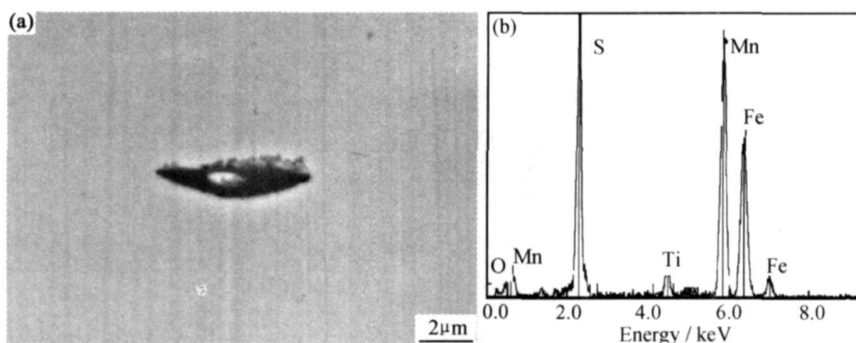


图 3 试验 TRIP 钢的夹杂物 (a) 形貌; (b) EDS 谱

Fig. 3 The structure and EDS of impurity in the test TRIP steel

(a) structure; (b) EDS

文献^[16]根据奥氏体中第一相的固溶度积理论、Ostwald 熟化理论、晶粒尺寸控制理论和沉淀强化理论,对薄板坯连铸连轧时钢中主要夹杂物在奥氏体中形成的可能性及其尺寸的控制进行了理论分析。计算结果表明,硫化锰有可能在奥氏体中以 100nm 以下尺寸沉淀析出;而氧化铝夹杂在目前条件下很难使之完全在固态铁中析出;夹杂物在钢中控制再加热时奥氏体晶粒尺寸及产生沉淀强化效果的可能性的分析表明,固态铁中析出的硫化锰可有效抑制均热态奥氏体晶粒粗化并产生微弱的沉淀强化效果。在传统热轧工艺中,硫化锰是作为有害夹杂物来看待的,这说明 TSCR 工艺的金属学特点对夹杂物行为会产生很大影响。

3 结论

(1) 实验室模拟薄板坯连铸连轧试验生产的 600MPa 级 G-Si-Mn 系 TRIP 钢,力学性能为: $\sigma_b = 630\text{MPa}$, $\sigma_s = 460\text{MPa}$, $\delta = 29.1\%$ 。屈强比为 0.73。

(2) 试样组织为铁素体+贝氏体+残余奥氏体的复相组织,彩色金相定量测试表明,试验钢中残余奥氏体的体积分数为 6.6%。

(3) 试验 TRIP 钢中的残余奥氏体有两种形态,在铁素体基体上以小岛状存在,在贝氏体板条的边界上则呈薄膜状分布。

参考文献

- [1] 田乃媛. 薄板坯连铸连轧[M]. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [2] GUNTER F. Present and future CSP technology expands product range[J]. Aise Steel Technology, 2000, (1): 53- 57.
- [3] 王泰昌, 刘志兴. 我国薄板坯连铸连轧建设和生产情况[J]. 冶金管理, 2004, (7): 44- 47.
- [4] 康永林. 现代汽车板的质量控制与成形性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [5] HASHIMOTO S, IKEDA S, SUGIMOTO K, et al. Effects of Nb and Mo addition to 0.2% C-1.5% Si-1.5% Mn steel on mechanical properties of hot rolled TRIP-aided steel sheets[J]. ISIJ inter, 2004, 44(9): 1590- 1598.
- [6] HANZAKI A Z, HODGSON P D, YUE S. Hot deformation characteristics of Si-Mn TRIP steels with and without micro-alloy additions[J]. ISIJ Inter, 1995, 35(3): 324- 331.
- [7] ZACKAY V F, PARKER E R, FAHR D, et al. The enhancement of ductility on high-strength steels[J]. Trans of ASM, 1967, 60(2): 252- 258.
- [8] KIM Sung-joon, LEE Chang-gil, LEE Tae-ho, et al. Effect of Cu, Cr and Ni on mechanical properties of 0.15wt% C TRIP-aided cold rolled steels[J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 539- 544.
- [9] 赵金福, 明旭光, 欧立晋, 等. 残留奥氏体的相变诱导塑性研究[J]. 机械工程材料, 1993, 17(2): 14- 17.
- [10] 邹宏辉, 符仁钰, 李麟, 等. 低碳 Si-Mn 系 TRIP 钢的热处理工艺对组织的影响[J]. 金属热处理, 2003, 28(1): 59- 62.

成核, 萌生出微裂纹, 即 M 点, 此时声发射的各个特征量也第一次达到一个小峰值。

阶段 III 微裂纹滞带期(BC 段)。从图 6 可看出, 事件出现频率增多, 密度增大, 但并没有剧烈地增加。这表明, 微裂纹在材料中萌生以后, 虽然外加载荷继续增加, 但是微裂纹出现了短暂的停滞状态, 并没有进一步有比较大的发展。

阶段 IV: 微裂纹扩展期(CD 段)。在 C 点载荷-时间曲线斜率出现了突变, CD 段的斜率基本保持不变。表明该阶段内微裂纹快速扩展, 产生了大量的高幅信号, 声发射信号跨过门槛的振铃计数激增。

阶段 V: 突然断裂期。随着载荷的进一步增加, 微裂纹扩展成宏观裂纹, 之后便非稳定扩展。最终导致突然断裂(即点 P), 释放大弹性能, 导致声发射信号幅值达到最大值。

由以上五个阶段可以看出, 在陶瓷的断裂过程中, 微裂纹的成核、扩展及贯穿都会引起声发射特征参数的相应变化。声发射幅值-时间图形和载荷-时间曲线的变化趋势是一致的, 这是因为实验数据是来自于同一个试件, 虽然参数的定义不一样, 但都携带着声发射源的信息, 反映了试件内部损伤演化过程。

4 结论

(1) 本研究利用声发射技术, 对陶瓷试件在三点弯曲载荷下的破坏断裂过程进行了监测, 得到了丰富的声发射信号。

(2) 通过对声发射特征参数的采集、统计和分析, 研究了陶瓷试件内部损伤演化、发展至宏观断裂阶段的声发射特征表现; 结合载荷时间曲线, 声发射幅值分布直

接反映了材料内微裂纹的成核、扩展和形成宏观裂纹至断裂的破坏过程, 可以描述材料内部的损伤状态。

(3) 声发射技术作为一种有效的动态监测手段, 对陶瓷内部损伤演化过程可以有效地监测和观察, 为陶瓷材料的广泛应用提供保证。

参考文献

- [1] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [2] WU Ke-ru, CHEN Bing. Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique[J]. Cement and Concrete Research, 2001, (31): 919- 923.
- [3] TAKESHI WATANABE, SAYAKA NISHIBATA. Compressive failure in Takeshi watanabe concrete of recycled aggregate by acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2007, (21): 470- 476.
- [4] 夏明安, 杨虹. 声发射在陶瓷材料试验中的应用[J]. 湖北工学院学报, 2002, 17(4): 94- 96.
- [5] 黄志鹏. 单轴压缩下岩石声发射与损伤变量关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增刊): 784- 787.
- [6] NING Jian-guo, REN Hui-lan, LI Ping. Mechanical behaviors and damage constitutive model of ceramics under shock compression[J]. Acta Mech Sin, 2008, (24): 305- 315.
- [7] LONGY F, CAGNOUX J. Plasticity and microcracking in shock-loaded alumina[J]. Journal American Ceramics Society, 1989, 72(6): 971- 979.

基金项目: 国家自然科学基金资助(10772027, 10632080)

收稿日期: 2007-03-15; 修订日期: 2008-11-06

作者简介: 任会兰(1973—), 女, 副教授, 主要从事材料动力学特性、损伤本构模型的研究, 联系地址: 北京理工大学宇航科学技术学院(100081), E-mail: huilanren@bit.edu.cn

(上接第 53 页)

- [11] SUGIMOTO K, NAGASAKA A, KOBAYASHI M, et al. Effects of retained austenite parameters on warm stretch-flangeability in TRIP-aided dual phase sheet steels[J]. ISIJ Inter, 1999, 39(1): 56- 63.
- [12] 张迎晖, 康永林, 于浩, 等. TRIP 钢变形奥氏体连续冷却过程的组织相变及组织研究[J]. 金属热处理, 2005, 30(12): 79- 81.
- [13] GIRAULT E, JACQUES P, HARLET P, et al. Metallographic methods for revealing the multiphase microstructure of TRIP-assisted steel[J]. Mater Character, 1998, 40: 111- 118.
- [14] SUGIMOTO K, KOBAYASHI M, SHIRSAWA H. Effects of second phase morphology on retained austenite morphology and tensile properties in a TRIP-aided dual-phase steel sheet[J]. ISIJ Inter, 1993, 33(7): 775- 782.

- [15] HANZAKI A Z, HODGSON P D, YUE S. Ferrite formation characteristics in S+Mn TRIP steels[J]. ISIJ Inter, 1997, 37(6): 583- 589.
- [16] 雍岐龙, 孙新军, 刘清友, 等. 薄板坯连铸连轧时夹杂物在奥氏体中形成与控制的理论考虑[J]. 特殊钢, 2005, (1): 1- 5.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50334010)

收稿日期: 2007-09-24; 修订日期: 2008-04-01

作者简介: 张迎晖(1968—), 女, 教授, 博士, 现从事金属材料加工工艺、组织及性能研究, 联系地址: 江西省赣州市红旗大道 86 号江西理工大学 254# 信箱(341000), E-mail: zyh0727@sohu.com