

· 组织和性能 ·

贝氏体区等温时间对低硅 TRIP 钢组织和力学性能的影响

景财年¹ 陈晓辉² 刘在学¹ 谭启忠¹ 李亮¹

(1 山东建筑大学材料科学与工程学院, 济南 250101; 2 山东交通学院机械加工实验中心, 济南 250023)

摘要 研究了 0.15C-1.5Mn-1.5Al-0.3Si TRIP 钢 820 °C 2 min 加热后快冷至 450 °C 盐浴中保温 5 ~ 300 s 空冷的组织和力学性能。结果表明, 随在贝氏体转变区 450 °C 等温时间的增加, 该钢的屈服强度和伸长率增加, 抗拉强度降低, 等温时间 60 s 时强塑积最佳, 为 23 000 MPa%; 等温时间 ≤ 60 s 时随等温时间增加钢中残余奥氏体含量增加, > 60 s 时随等温时间的增加钢中残余奥氏体含量降低, 60 s 时钢中残余奥氏体达到最高值, 为 14%。

关键词 CMnAlSi-TRIP 钢 贝氏体 等温淬火 组织 力学性能

Effect of Austempering Isothermal-Time at Bainite Field on Structure and Mechanical Properties of Low Silicon TRIP Steel

Jing Cainian¹, Chen Xiaohui², Liu Zaixue¹, Tan Qizhong¹ and Li Liang¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Shandong Architecture University, Jinan 250101;

2 Lab of Mechanical Manufacture, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023)

Abstract Structure and mechanical properties of 0.15C-1.5Mn-1.5Al-0.3Si TRIP steel heated at 820 °C for 2 min then quenching in 450 °C salt bath for 5 ~ 300 s, air cooling have been studied. Results showed that with increasing isothermal-time in Bainite transformation field at 450 °C, the yield strength and elongation of steel increased while tensile strength decreased, and the product of tensile strength-elongation of steel was highest i. e. 23 000 MPa% with isothermal-treating for 60 s; as isothermal-treating for less than 60 s, with increasing isothermal-treating time, the retained austenite content in steel increased, as isothermal-treating for more than 60 s, with increasing isothermal-treating time, the retained austenite content in steel decreased, and the retained austenite content in steel isothermal-treating for 60 s was highest i. e. 14%.

Material Index CMnAlSi-TRIP Steel, Bainite, Austempering, Structure, Mechanical Properties

经合理的热处理工艺, 可使低合金钢在室温下含有一定量的残余奥氏体, 这部分残余奥氏体在应力作用发生马氏体相变, 产生 TRIP (Transformation-Induced Plasticity) 效应, 能同时得到良好的延展性和高强度的特点^[1,2]。TRIP 钢板用作汽车构件可减轻车重, 降低油耗, 抵御撞击时的塑性变形能力强, 保障了驾乘人员的安全, 具有明显的优越性, 应用前景广阔^[2]。传统 TRIP 钢成分为 C-Mn-Si 系, 为获得稳定的残余奥氏体组织, 硅元素含量在 1% ~ 2%, 高硅含量的钢板经热轧后会在表面产生稳定的氧化物, 造成表面质量下降, 降低钢板的涂镀能力, 影响后续的热镀锌工序, 易在钢板表面形成漏镀点^[3]。降低硅含量或选用能抑制碳化物析出的元素替代硅, 以改善钢板的润湿性, 提高钢板表面质量成为 TRIP 研发的热点, 但这方面的研究还不完善。在本试验中, 以铝元素部分替代硅元素, 研究了试验钢板的组织和性能, 并与 CMnSi-TRIP 钢的力学性能做了对比; 讨论了贝氏体等温时间对 CMnAlSi-TRIP 钢板组织和性能的影响。

1 试验材料和过程

试验用 TRIP 钢的化学成分见表 1。试验合金用 50 kg 真空感应炉熔炼, 热轧至 3 mm 厚, 终轧温度为 950 °C, 热轧板经酸洗后冷轧成 1 mm 厚的钢板。临界退火和贝氏体等温热处理分别在两个盐浴炉中进行, 其中 CMnAlSi-TRIP 钢在 820 °C 保温 2 min, 然后快速取出, 在 450 °C 分别保温 5、30、60、120、180、300 s, 保温后的试样空冷至室温; CMnSi-TRIP 钢在 780 °C 临界退火 2 min, 在 450 °C 等温处理 60 s。按 ASTM E8 (2004) 标准制备拉伸试样, 在 INSTRON 电子拉伸试验机上进行力学性能测试, 测得试样的力学性能指标, 夹头恒定速度为 2 mm/min。金相试样经切割、研磨、抛光后, 用硫代硫酸钠的水溶液 (10%) 浸蚀, 在 Nikon-300 金相显微

表 1 试验用 TRIP 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test TRIP steel / %

钢种	C	Mn	Si	Cu	Al	S	P
CMnSi 钢	0.15	1.5	1.5	-	-	0.008	0.01
CMnAlSi 钢	0.15	1.5	0.3	0.5	1.5	0.008	0.01

镜上观察组织;部分试样用 4% 硝酸酒精浸蚀,在 JEOL5880 扫描电镜上观察组织。X 射线衍射试样用含 5% 氢氟酸的双氧水溶液减薄至 0.5 mm,在 D/MAX 型 X 射线衍射仪上 (Mo 靶) 测量残余奥氏体含量 (V_r), 用 (200)_r 和 (311)_r 衍射峰的数据代入式 (1) 来计算残余奥氏体中的碳含量 (C_γ)^[4]。式中 a_0 为残余奥氏体的晶格常数。

$$a_0 = 3.578 + 0.033 \times C_\gamma(\%) \quad (1)$$

2 试验结果及分析

2.1 显微组织和力学性能

图 1 为 CMnAlSi-TRIP 钢在 450 °C 等温 60 s 的光学照片和扫描电镜照片。试样冷轧态组织为铁素体和珠光体,在临界退火过程中,C 元素向奥氏体中

扩散,组织转变为铁素体和奥氏体两相;在随后的贝氏体等温处理过程中,Al、Si、Cu 元素均能延缓渗碳体的形成,使渗碳体的形成受到阻碍,使 C 元素在贝氏体转变过程中进一步向奥氏体中扩散,贝氏体成为无碳贝氏体,奥氏体碳含量进一步升高,提高了奥氏体的稳定性,在随后的空冷中成为残余奥氏体^[1,2]。最终钢板组织为铁素体、贝氏体加上残余奥氏体组成。如图 1(a) 光学照片所示,经硫代硫酸钠的水溶液浸蚀后,试样中铁素体呈大块灰色或亮灰色,贝氏体为黑色,残余奥氏体为白色,多以粒状分布在铁素体晶界或铁素体、贝氏体界面上。图 1(b) 的扫描电镜照片更加清晰地显示了试验钢的多相组织,多边形铁素体为基体,贝氏体多以板条状形式分布铁素体基体中,残余奥氏体呈粒状存在。

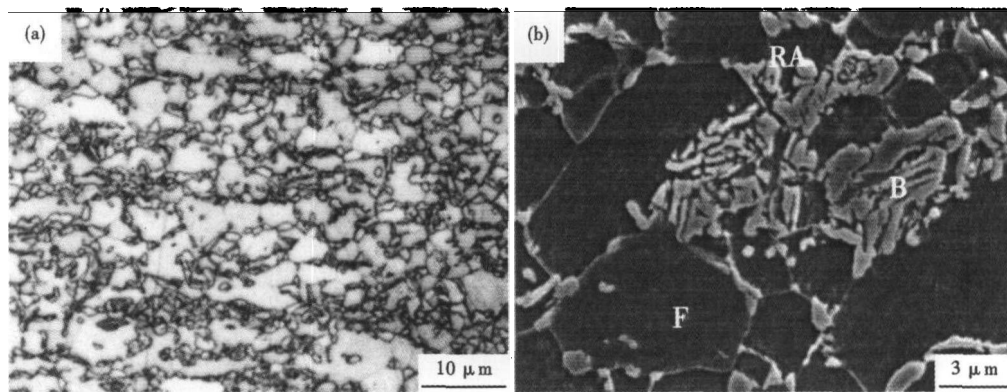


图 1 450 °C 等温 60 s 的 CMnAlSi-TRIP 钢的组织形貌:(a) 光学;(b) 扫描电镜(F- 铁素体;B- 贝氏体;RA- 残余奥氏体)

Fig. 1 Morphology of structure of CMnAlSi-TRIP steel isothermal-treating for 60s at 450 °C: (a) optical; (b) SEM (F- ferrite, B- bainite, RA- retained austenite)

图 2 是两试验钢在 450 °C 等温 60 s 时的应力应变曲线,可见两试样应力应变曲线呈相似的变化趋势。分析电子拉伸试验机上自动采集的试样力学性能数据,可知 CMnSi-TRIP 钢屈服强度为 370 MPa,抗拉强度为 768 MPa,伸长率是 33.8%;而 CMnAlSi-TRIP 钢屈服强度和抗拉强度分别为 450 MPa 和 670 MPa,伸长率为 34%。Al 替代 Si 后使伸长率升高,但 Al 的固溶强化作用比 Si 弱,会造成强度的降低,不利于应用。因此在设计试样成分时添加了 0.5% 的 Cu 元素,Cu 的添加强化了铁素体,补偿了 Al 替代 Si 后损失的强度,并且未对伸长率造成不利影响,试样的伸长率仍保持在较高水平;同时有利于 Cu 元素的回收再利用,保护环境^[5,6]。强塑积(抗拉强度和伸长率的乘积)是用来表征材料综合性能的指标,试验 CMnAlSi-TRIP 钢强塑积为 23 000 MPa%,能满足使用要求,但低于 CMnSi-TRIP 钢的强塑积 26 000 MPa%。

2.2 等温时间对组织和性能的影响

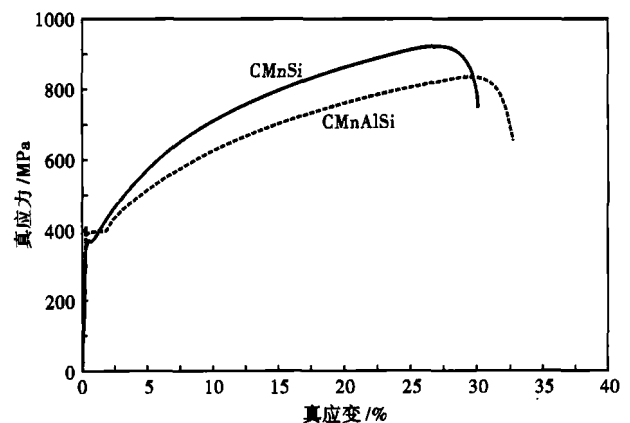


图 2 两种钢 450 °C 等温 60 s 试样的应力应变曲线

Fig. 2 Strain-stress curves of CMnSi steel and CMnAlSi steel isothermal-treating at 450 °C for 60 s

图 3 是 CMnAlSi-TRIP 钢力学性能随 450 °C 等温时间的变化曲线。等温时间由 0 增加至 300 s 时,试样伸长率由 26% 提高至 37%,屈服强度由 350 MPa 提高至 480 MPa;抗拉强度随等温时间的增加

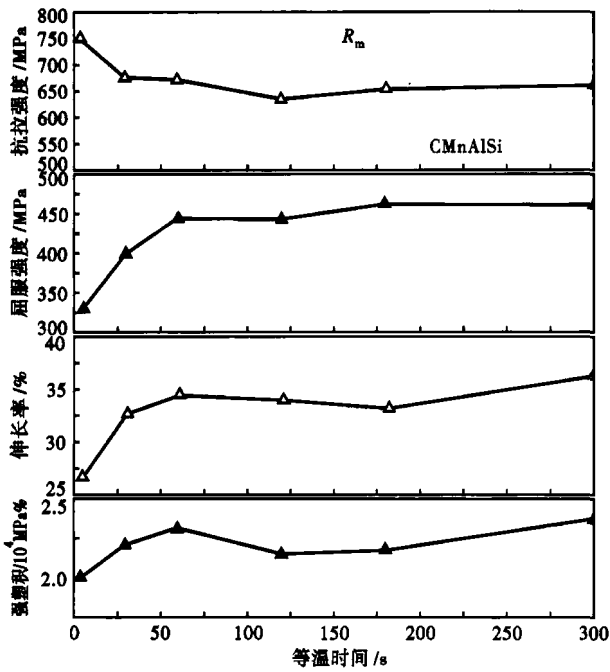


图 3 试验 CMnAlSi 钢在 450 °C 等温时力学性能随等温时间的变化

Fig. 3 Change of mechanical properties of test CMnAlSi steel with isothermal-treating time at 450 °C

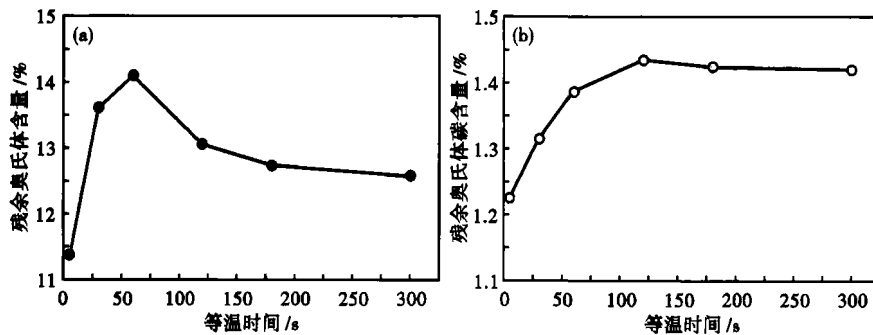


图 4 试验 CMnAlSi 钢残余奥氏体(a)及其碳含量(b)随 450 °C 等温时间的变化

Fig. 4 Change of retained austenite (a) and carbon content (b) in test CMnAlSi steel with isothermal-treating time at 450 °C

由 760 MPa 降低至 650 MPa;强塑积在各等温时间上都大于 20 000 MPa%, 在 60 s 时强塑积最大, 为 23 000 MPa%。图 4 是 CMnAlSi-TRIP 钢残余奥氏体及其碳含量随等温时间的变化曲线。残余奥氏体随等温时间的延长先升高而后降低, 等温 60 s 时含量有最高值 14%, 其它时间时含量都高于 10%; 残余奥氏体碳含量都高于 1.2% 并随等温时间呈上升趋势, 但在 300 s 时碳含量有所降低。

考察等温处理时的贝氏体转变过程^[7], 当贝氏体等温时间短时, 贝氏体转变未能充分完成, 相应的碳元素向奥氏体中的扩散也不充分, 使奥氏体中的碳含量降低, 奥氏体碳含量低, 稳定性差, 在冷却过程中转变为马氏体, 因此等温时间为 5 s 时残余奥

氏体及其碳含量都较低, 性能上体现为抗拉强度高, 而屈服强度和伸长率低。随等温时间的延长, 贝氏体转变充分, 奥氏体中的碳含量也升高, 同时贝氏体含量增加, 马氏体由奥氏体和贝氏体所取代, 因而抗拉强度降低而屈服强度和伸长率升高。等温至 300 s 时, 贝氏体转变已结束, 在长时间的等温过程中部分奥氏体会发生分解, 产生渗碳体组织, 使残余奥氏体的含量降低, 碳化物的出现还会降低残余奥氏体的碳含量, 残余奥氏体的力学稳定性随之降低。

3 结论

(1) 经 820 °C 临界退火和 450 °C 贝氏体等温处理后, 低硅 CMnAlSi-TRIP 钢组织为多边形铁素体基体, 板条状贝氏体和粒状残余奥氏体, 残余奥氏体含量高于 10%, 碳含量高于 1.2%。

(2) 屈服强度和伸长率随等温时间的延长而上升, 抗拉强度随等温时间的增加而降低, 在等温时间 60 s 时达到最佳强塑积, 为 23 000 MPa%。

(3) 残余奥氏体随等温时间的延长先升高而后降低, 60 s 时达到最高值 14%; 残余奥氏体碳含量随等温时间的延长而呈上升趋势。

山东省博士后创新项目 (20070225), 建设部科技计划项目 (2008-K4-7), 山东省博士基金 (2008BS04023)

参考文献

- 1 景财年, 王作成. TRIP-相变诱发塑性钢的研究进展. 特殊钢, 2004, 25 (4): 1
- 2 De Cooman B C. Structure Properties Relationship in TRIP Steels Containing Carbide-free Bainite. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004, 8 (3-4): 285
- 3 Jacques P J, Girault E, Harlet P, et al. The Development of Cold Rolled TRIP-assisted Multiphase Steels. Low Silicon TRIP Assisted Multi-phase Steels. ISIJ International, 2001, 41 (9): 1061
- 4 Onink M, Brakman C M, Tichelaar F D, et al. The Lattice Parameters of Austenite and Ferrite in Fe-C Alloys as Functions of Carbon Concentration and Temperature. Scripta Metallurgica et Materialia, 1993, 29 (8): 1011
- 5 景财年, 王作成, 金成俊, 等. 铜元素和退火温度对 TRIP 冷轧钢板组织和力学性能的影响. 金属热处理, 2004, 29 (9): 19
- 6 Kim S J, Lee C G, Jeong W C, et al. Effects of Copper Addition on Mechanical Properties of 0.15C-1.5Mn-1.5Si TRIP-aided Multiphase Cold-rolled Steel Sheets. ISIJ International, 2002, 42 (12): 1452
- 7 Jacques P, Girault E, Catlin T, et al. Bainite Transformation of Low Carbon Mn-Si TRIP-assisted Multiphase Steels: Influence of Silicon Content on Cementite Precipitation and Austenite Retention. Materials Science and Engineering A, 1999, A273-275: 475

景财年(1973-), 男, 博士, 副教授, 钢铁材料组织和性能研究。

收稿日期: 2009-01-12