

## 退火时间对中锰热轧 TRIP 钢组织演变的影响

李志超, 丁桦, 蔡志辉, 李美玲  
(东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘 要:** 为了研究热轧 Fe-6Mn-3Al TRIP 钢组织演变和力学性能, 对实验钢采用淬火 + 不同时间退火 (ART) 的热处理工艺. 研究发现, 随着退火时间的增加, 奥氏体晶粒尺寸增大、稳定性降低, 冷却过程中部分奥氏体相变为马氏体; 其中退火 10 min 后, 实验钢性能最优, 其残余奥氏体体积分数能达到 50.3%, 抗拉强度 765 MPa, 总延伸率达到 49.1%; 拉断后实验钢中的奥氏体含量减少, 马氏体含量增加, 其中, 退火 10 min 后的实验钢 TRIP 效应最为明显, 奥氏体体积分数由变形前的 50.3% 降低到变形后的 11%, 奥氏体转化率为 78%.

**关 键 词:** 热轧; TRIP 钢; 残余奥氏体; 逆相变; 奥氏体转化率

中图分类号: TG 335.58

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)09-1256-05

## Influence of Annealing Time on the Microstructure Evolution in the Medium-Mn Hot-Rolled TRIP Steel

LI Zhi-chao, DING Hua, CAI Zhi-hui, LI Mei-ling

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: DING Hua, E-mail: hding2013@163.com)

**Abstract:** Microstructure evolution and mechanical properties of a hot-rolled Fe-6Mn-3Al TRIP steel were studied by using the heat treatment process of quenching and annealing for different time (ART). The results showed with the increase of annealing time, the grain size of austenite increases and the stability decreases. Part of the austenite transforms into martensite in the cooling process. After annealing for 10 min, the performance of the experimental steel is optimal. The volume fraction of austenite is 50.3%, the ultimate tensile strength is 765 MPa and the total elongation is 49.1%. The content of the austenite decreases and the martensite increases after deformation. The TRIP effect is most obvious after annealing for 10 min. The volume fraction of austenite reduces from 50.3% to 11% after deformation. The transformation rate of austenite is 78%.

**Key words:** hot-rolled; TRIP steel; retained austenite; reverse transformation; transformation rate of austenite

TRIP 钢, 即相变诱导塑性钢 (transformation induced plasticity steel), 是近年来发展起来的一种高强高塑性钢, 用其制作汽车钢板, 可以减轻汽车质量、降低汽车燃油消耗和排放, 同时提高了汽车的安全性, 是一种非常有前途的金属材料<sup>[1]</sup>. 锰质量分数在 15% ~ 20% 的 TRIP 钢具有较低的比重、超级强韧性和高成型性, 在汽车工业中的应用具有巨大的潜力<sup>[2]</sup>. 但锰含量较多会使钢在热连轧时开裂, 材料的热塑性变差. 而对于低锰或无

锰 TRIP 钢的研究近年来已较成熟. 对锰质量分数在 5% ~ 15% 的中锰 TRIP 钢研究相对较少. 中锰 TRIP 钢由于其独特的强韧化机制和高的强韧性, 被公认为是新一代用于汽车的高强度钢, 因此国内外研究者都在开展大量开发研究工作<sup>[3-4]</sup>. Clarke 等对 6% Mn TRIP 钢的研究发现, 热处理后, 其残余奥氏体体积分数可达到 40%<sup>[5]</sup>.

中锰热轧 TRIP 钢力学性能优良、成本低, 在工业生产中更加具有实际意义, 被一致认为是新

一代 TRIP 钢<sup>[6]</sup>. 本文主要研究中锰热轧 TRIP 钢在 700 °C 等温淬火, 随后在 650 °C, 以不同时间退火, 得到不同的组织结构和力学性能.

## 1 实验方法和实验材料

实验用钢采用真空炉熔炼, 化学成分(质量分数, %) 如下: C 0.17, Mn 5.83, Al 3.12, Fe 90.88. 将已熔炼好的 40 kg 钢锭加热到 1 150 °C 并保温 2 h 后锻造; 将锻后坯料在高温炉中加热到 1 250 °C 并保温 3 h, 随后经 7 个道次进行热轧, 最终轧成 5 mm 的薄板, 初轧温度为 1 200 °C, 终轧温度不低于 850 °C, 随后空冷至室温.

运用 Thermo - Calc 计算出不同温度下的平衡态中相组成, 结果如图 1 所示, 图中 3 条曲线分别代表了铁素体、奥氏体和渗碳体的相比比例随温度变化的情况. 从图中可以看出, 该实验钢在 600 °C 已经出现奥氏体, 处于两相区.

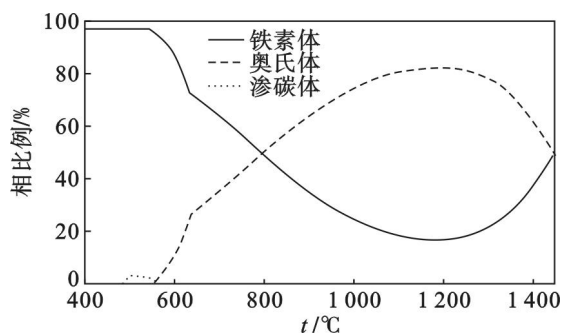


图 1 实验钢中各相相比比例计算模拟相图

Fig. 1 Diagram of phase fraction in experimental steel calculated by Thermo-Calc software

本实验将热轧之后的钢板在 700 °C 高温炉中进行固溶处理, 保温 1 h 后快速水冷到室温; 将淬火后的钢板在 650 °C 分别保温 5, 10, 20, 40 min, 1, 3 h 后空冷至室温, 其热处理方案见图 2. 将热处理后的试样线切割为拉伸试样, 试样采用标距

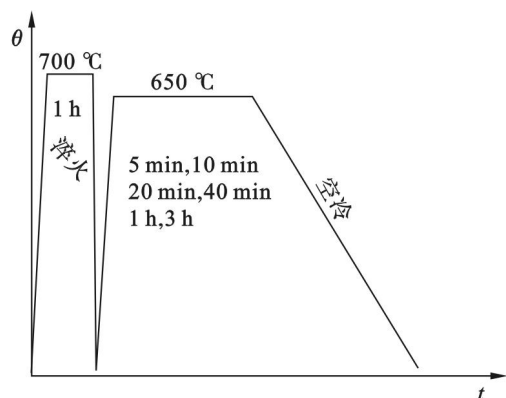


图 2 热处理工艺

Fig. 2 Process of heat treatment

为 50 mm 的非比例拉伸试样. 室温下采用万能拉伸试验机对试样进行力学性能测试, 分别测得断后延伸率和抗拉强度, 拉伸中加载速度采用 3 mm/min. 分别将淬火后、不同时间退火后以及拉断后的实验钢在光学显微镜下观察组织, 在 X 射线衍射仪上以块状样品进行实验钢相分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织

冷实验钢热轧后, 经过 700 °C 两相区等温淬火, 其显微组织主要由铁素体、马氏体和残余奥氏体组成, 光学显微组织如图 3a, 图 3c 所示. 经过 650 °C 退火 5 min 后, 组织中马氏体逆相变为铁素体和奥氏体, 所以马氏体含量减小, 奥氏体含量增加, 组织中既有等轴的又有板条状的奥氏体, 如图 3b, 3d 所示. 经过不同时间退火后, 组织中主要由铁素体和奥氏体组成, 随着退火时间的增加, 奥氏体晶粒发生长大. 在实验钢中, 从熔点到室温, 铁素体相会有一个连续存在的过程, 所以这些铁素体中通常会有长条状的  $\delta$  铁素体存在.

随着退火时间的增加, 奥氏体中固溶的 C 和 Mn 会相对减少, 奥氏体中 C 和 Mn 的浓度影响奥氏体的稳定性, 从而导致奥氏体稳定性的下降. 在冷却过程中, 奥氏体更容易相变为马氏体, 淬火后马氏体的比例逐渐升高<sup>[7-8]</sup>. 而本实验钢在两相区 700 °C 淬火会产生少量马氏体组织. 因为 Al 元素的加入会抑制退火过程中渗碳体从马氏体中的析出, 所以退火后马氏体发生逆相变, 转变成奥氏体和铁素体, 奥氏体会在马氏体晶界处形核并逐渐长大.

### 2.2 残余奥氏体含量

对经过不同时间退火后和拉断后的实验钢进行 XRD 物相分析, 得到 XRD 图谱. 利用 XRD 结果计算出实验钢经过不同时间退火后的奥氏体含量, 见图 4, 从计算结果可以看出, 随着退火时间的增加, 残余奥氏体含量先增加后减小. 因为铝的加入会抑制渗碳体的析出, 所以退火过程中, 碳元素会很快地扩散到奥氏体中, 退火 10 min 后实验钢即能得到体积分数为 50.3% 的残余奥氏体, 如图 5 所示. 随着退火时间的增加, 组织中马氏体含量会增加, 如图 6 和图 3d 所示, 退火 3 h 比退火 5 min、1 h 后的实验钢中马氏体含量要高. 因为随着退火时间的增加, 奥氏体晶粒长大, 奥氏体稳定性随其体积的增大而降低, 在冷却过程中更容易转变成马氏体. 退火时间影响了实验钢中奥氏体含量.

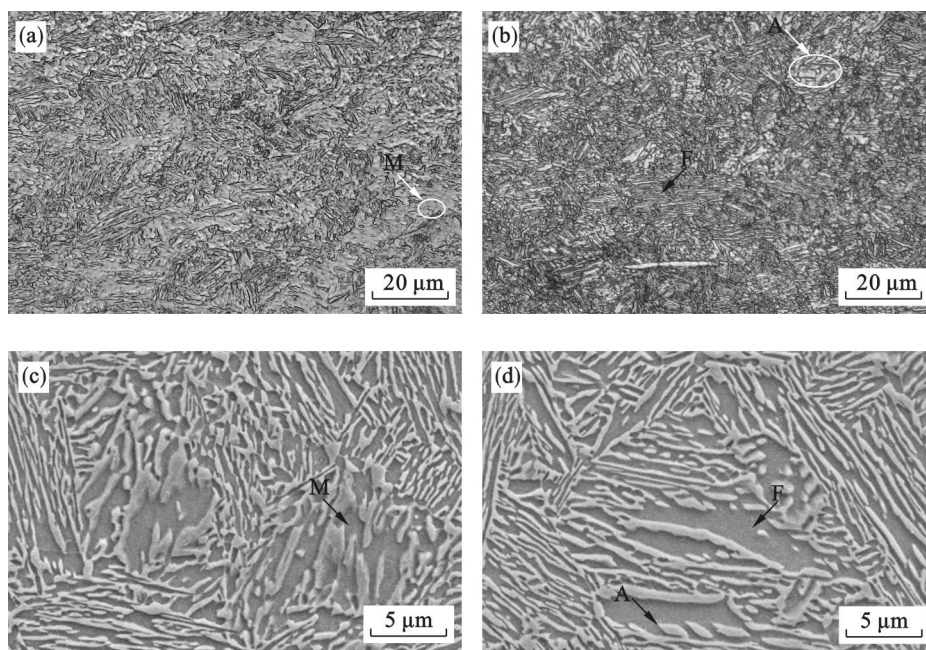


图 3 700 °C 保温 1 h 水淬及退火 5 min 后的组织

Fig. 3 Microstructures of steel austenitized after water quenched at 700 °C for 1 h and followed by annealing at 650 °C for 5 min

(a)—淬火金相; (b)—650 °C 退火 5 min 金相; (c)—淬火金相扫描; (d)—650 °C 退火 5 min 金相扫描.

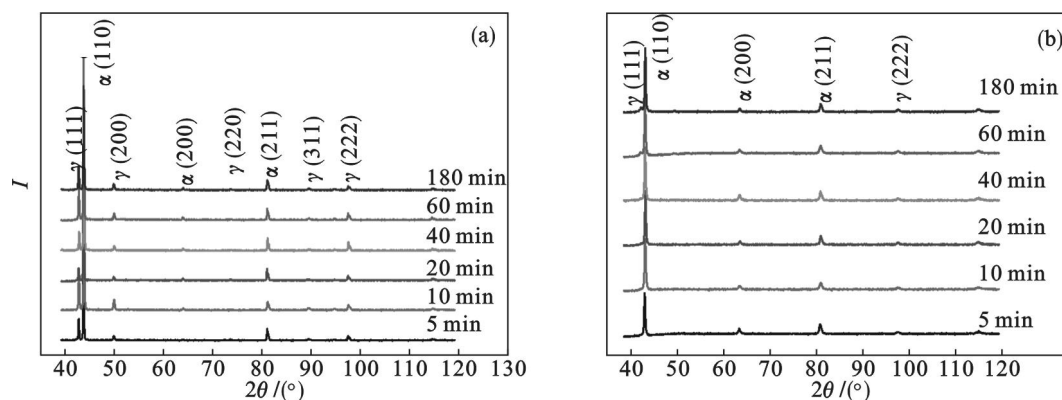


图 4 不同时间退火后变形前、拉断后的 XRD 图谱

Fig. 4 X-ray diffraction (XRD) patterns of the undeformed and fractured of the samples by annealing for different time

(a)—变形前; (b)—拉断后.

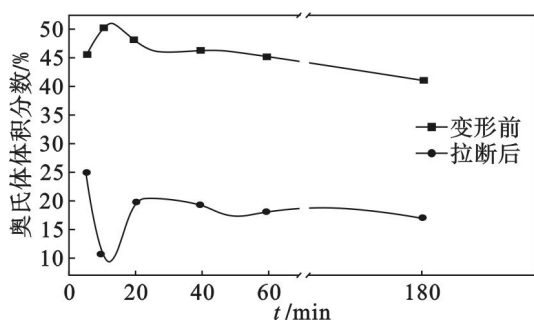


图 5 不同时间退火后拉伸前后奥氏体体积分数

Fig. 5 Volume fraction of austenite of the undeformed and fractured samples by annealing at different time

退火 10 min 后的试样变形前和拉断后颈缩附近的显微组织见图 7, 作对比可以发现, 试样经

应变后残余奥氏体含量减少, 马氏体含量增多. 由 XRD 计算结果可以看出 (见图 5), 退火 10 min 实验钢中奥氏体含量由拉伸前的 50.3% 降低到拉断后的 11%, 奥氏体转化率为 78%, 发生了明显的 TRIP 效应.

### 2.3 力学性能

不同时间退火后实验钢的工程应力-应变曲线如图 8 所示, 可以看出, 在拉伸过程中, 不同时间退火后的实验钢都是连续屈服的. 其中经过 10 min 退火后, 工程应力和断后延伸率都最高. 表 1 是抗拉强度和断后延伸率随着退火时间变化而变化的情况, 可以看出, 断后延伸率随着退火时间的增加先增加后下降, 退火 10 min 后的延伸率最大, 可达到 49.1%. 抗拉强度随退火时间变化

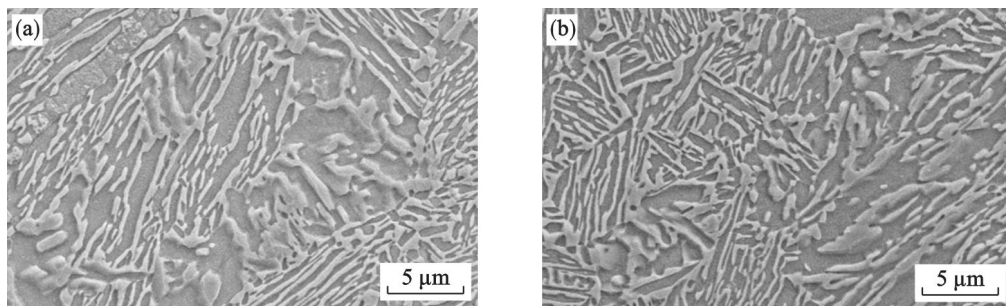


图6 700 °C保温1 h水淬+650 °C保温1 h和3 h退火后的组织

Fig. 6 Microstructures of steel austenitized after water quenched at 700 °C for 1 h and followed by annealing at 650 °C for 1 h, 3 h

(a)—650 °C 1 h; (b)—650 °C 3 h.

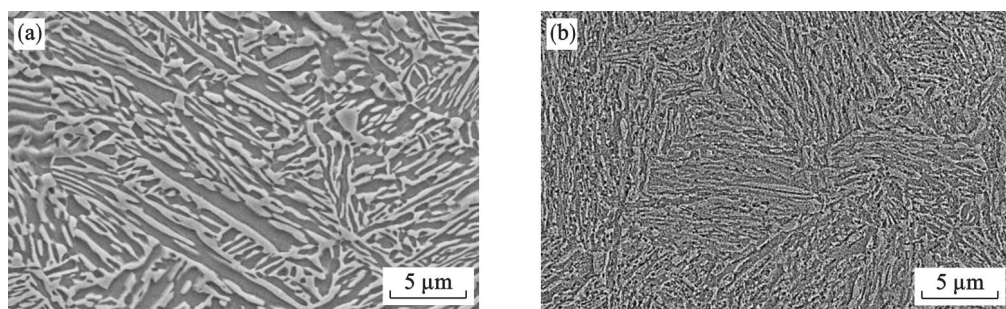


图7 700 °C保温1 h水淬+650 °C退火10 min变形前、拉断后的组织

Fig. 7 Microstructure of the undeformed and fractured steel austenitized, water quenched at 700 °C for 1 h and followed by annealing at 650 °C for 10 min

(a)—变形前; (b)—拉断后.

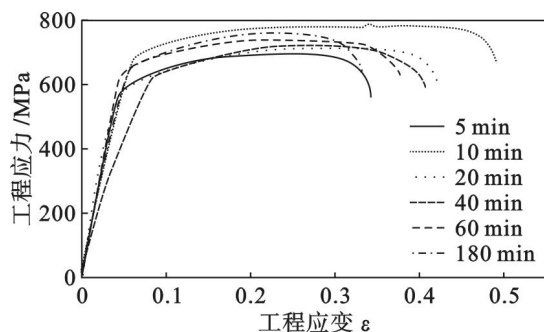


图8 实验钢不同时间退火后的工程应力-应变曲线

Fig. 8 Engineering stress-strain curves of experimental steel for different time

表1 实验钢不同时间退火后的力学性能  
Table 1 Mechanical properties of the experimental steel for different time

退火时间 min	抗拉强度 MPa	延伸率 %	强塑积 GPa·%
5	691.6	34.3	23.7
10	765.3	49.1	37.5
60	737.3	32.9	27.7
180	753.6	37.4	24.8

不大,随着退火时间的增加,奥氏体稳定性降低,在冷却过程中部分奥氏体会转变成马氏体,提高了抗拉强度,所以退火3 h后的抗拉强度略有升高.实验钢的延伸率和抗拉强度在退火10 min后

都达到最大值,其中延伸率达到49.1%,抗拉强度达到765.3 MPa.

图9是实验钢经过不同时间退火后的强塑积,从图中可以看出,随着时间的增加,强塑积先升高后逐渐降低.强塑积在退火10 min后可以达到最高,为37.5 GPa·%.从图中可以看出,强塑积随退火时间变化而变化的趋势与奥氏体体积分数变化趋势相同,所以,奥氏体体积分数是影响实验钢综合力学性能的重要因素.

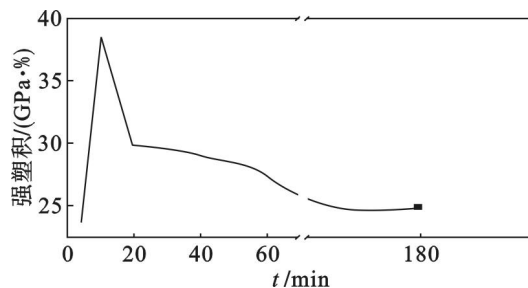


图9 实验钢不同退火时间后的强塑积

Fig. 9 Product of strength and ductility of samples by annealing for different time

### 3 结 论

1) 本实验钢在700 °C等温淬火后会发生马  
(下转第1264页)