

Ti 微合金化对 45[#] 钢相变的影响研究

华浩, 杨小军, 袁桥军

湖南湘潭钢铁集团有限公司, 湖南 湘潭 411101

摘要 : 利用 MMS-200 热力模拟试验机对 45[#]、45Ti 不同冷速下 (1 °C /s ~20 °C /s) 的相变温度进行测定, 绘制出连续冷却相变曲线, 并利用 Leica DMI8 金相显微镜观察了不同冷速获得的金相组织; 同时采用水淬 + 回火工艺对 45[#]、45Ti 热处理后的相变组织进行观察。结果显示, 在 1 °C /s ~20 °C /s 冷速范围, 45[#]、45Ti 获得铁素体 + 珠光体为主的金相组织, 且随着冷速增加, 珠光体含量持续增多, 铁素体含量持续减少, 且形态由多边形铁素体转变为沿晶界分布的片状铁素体; 45Ti 相变后获得的组织明显比 45[#] 细小; 45[#] 与 45Ti 的相变温度区间大部分重合, 但 45Ti 的相变开始温度整体较 45[#] 低约 30 °C。在淬火冷速条件下, 45Ti 试验钢表现出更好的淬透性。

关键词 : Ti 微合金化; 连续冷却相变; 显微组织

Effect of Ti Microalloying on Phase Transformation of 45[#] steel

Hua Hao, Yang Xiaojun, Yuan Qiaojun

Xiangtan Iron and Steel Group Co., Ltd. Xiangtan, Hunan 411101

Abstract : The CCT diagrams of 45[#] and 45Ti at different cooling rates (1 °C /s ~20 °C /s) were measured by MMS-200 thermal simulation machine. The microstructure obtained at different cooling rates was observed by Leica DMI8 optical microscope. Meanwhile the microstructure of 45[#] and 45Ti obtained by water quenching followed tempering process was observed. The results show that during the cooling rate range of 1 °C /s ~ 20 °C /s, ferrite + pearlite microstructure were obtained for 45[#] and 45Ti. With the increase of cooling rate, ferrite content decreases continuously, and the morphology changes from polygonal ferrite to flake ferrite along grain boundary. The transformed microstructure obtained by 45Ti is significantly finer than that of 45[#]. The transformation temperature interval of 45[#] and 45Ti mostly coincides, but the starting temperature of 45Ti phase transformation is about 30 °C lower than that of 45[#]. The 45Ti steel shows better hardenability than 45[#] during quenching process.

Keywords : Ti microalloying; continuous cooling transformation; microstructure

目前, Ti 微合金在钢种的应用研究主要集中在板材领域, 并已经获得较广泛的应用。中厚板生产过程中, 钛微合金化的主要应用有两种思路: 一种是微钛处理, 即在钢中加入 0.015% ~ 0.025% 的 Ti, 目的是为了固定钢中的自由氮, 控制板坯表面裂纹, 同时利用析出的 TiN 第二相颗粒控制钢坯加热过程中奥氏体晶粒粗化^[1,2]; 另一种通过 Ti 微合金化 (0.05% ~ 0.12%), 利用轧制、卷取过程中析出的纳米级 TiC 第二相来提高钢板的强度^[3-5], 开发 700MPa 级的高强钢。

在线棒材领域, Ti 微合金化主要应用于齿轮钢 20CrMnTi, 以及合金结构钢 20MnTiB 等钢种, 而在中高碳钢领域, 关于 Ti 微合金化的研究资料较少^[6,7], 侧重于微钛处理对铸坯裂纹改善的研究。对中碳钢成分, 常用的微合金元素 Nb、V、Ti 中, NbC 固溶度积较低, VC 固溶度积过高, 而 TiC 固溶度积介于 NbC 和 VC 之间, 较适合应用于中碳钢以获得晶粒细化和第二相强化效果^[8]。本文通过 MMS-200 热力模拟试验机对 45[#]、45Ti 的相变行为进行研究, 并利用淬火 + 回火热处理工艺对 45[#]、45Ti 的组织进行分析, 分析 Ti 的加入对相变行为、相变组织的影响, 为现场生产、下游客户使用等提供理论支持。

一、试验材料和方法

试验材料取自湘钢生产的 $\Phi 50$ mm 规格的 45[#]、45Ti 热轧圆钢, 在圆钢 1/4 直径位置沿轧制方向取 $\Phi 10$ mm \times 15 mm 规格的热模拟试样, 试验钢化学成分见表 1。利用 MMS-200 热力模拟试验机测定出两种钢在不同冷速 (1 °C /s ~20 °C /s) 范围的热膨胀曲线 (图 1), 根据切线法测定出相变温度, 利用 Leica DMI8 金相

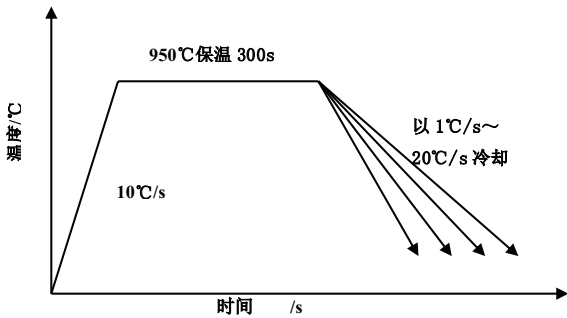
显微镜对不同冷速下后的组织进行分析, 根据相变温度结合金相组织绘制出 CCT 曲线。

另外, 在 45[#]、45Ti 热轧圆钢 1/4 直径处取 $\Phi 20 \times 200$ mm 圆棒试样, 在箱式电阻炉中加热至 850 °C, 保温 30min 后分别淬入水中和油中, 待完全冷却后在 580 °C 进行回火。对热处理后的试样进行金相组织分析, 对比微合金 Ti 的加入对淬透性的影响。

表1 45[#]、45Ti 试验钢的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of 45[#]、45Ti steel (wt%)

钢种 \ 成分	C	Si	Mn	Ti	P	S
45 [#]	0.45	0.21	0.65	0.008	≤ 0.018	≤ 0.01
45Ti	0.45	0.22	0.64	0.059	≤ 0.018	≤ 0.01



> 图1 热模拟实验工艺示意图

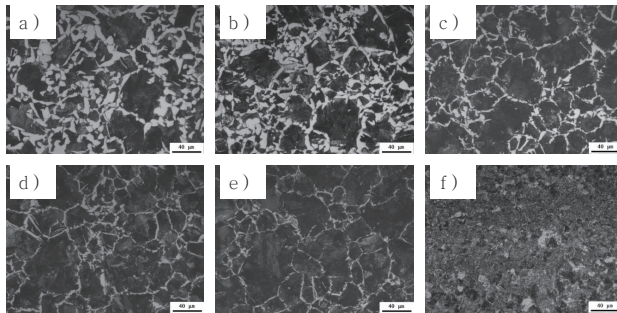
> Fig.1 Process diagram of thermal simulation experiment

热模拟试验 & 热处理试验完成后, 将试样从中间 (焊接热电偶处) 剖开, 经镶嵌 - 磨削 - 抛光后, 采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀后制作成金相试样, 利用 Leica DMI8 金相显微镜观察不同冷速下的金相组织。其中淬火 + 回火后的试样观察位置为横截面 1/4 直径处区域。

二、试验结果与讨论

(一) 显微组织分析

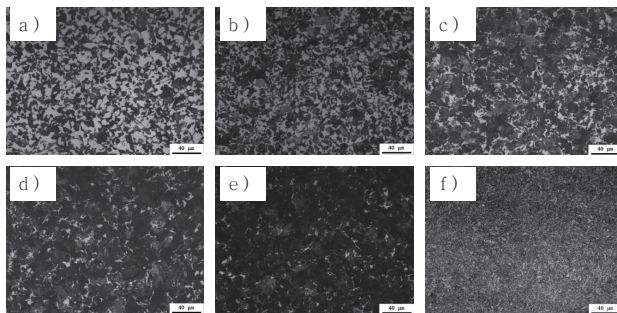
图2、图3分别为 45[#] 试样不同冷速后获得的金相组织照片。可以看出: 在试验冷速 1°C/s~20°C/s 范围内, 45[#]、45Ti 试验钢



a) 1°C/s; b) 2°C/s; c) 5°C/s; d) 10°C/s; e) 20°C/s; f) 淬火 + 回火

> 图2 45[#] 试验钢在不同冷速下的显微组织

> Fig.2 Microstructure of 45[#] steel obtained under different cooling rate



a) 1°C/s; b) 2°C/s; c) 5°C/s; d) 10°C/s; e) 20°C/s; f) 淬火 + 回火

> 图3 45Ti 试验钢在不同冷速下的显微组织

> Fig.3 Microstructure of 45Ti obtained under different cooling rate

均获得铁素体 + 珠光体为主的金相组织; 随着冷速加快, 铁素体含量持续减少, 珠光体含量持续增多, 在冷速 ≥ 10°C/s 时, 珠光体含量占主导地位, 同时随着冷速的增加, 铁素体由多边形铁素体转变为沿晶界的片状铁素体和魏氏组织。在淬火 (约 180°C/s) 冷速条件下^[9], 45[#] 试样基体组织为马氏体 + 少量屈氏体 + 极少量晶界铁素体, 而 45Ti 则获得全马氏体组织。

另外, 试验发现在相同冷速条件下, 45Ti 相变后获得的组织较 45[#] 明显细化, 具体的金相组织和晶粒度对比结果见表 2。分析认为应与 45Ti 钢中的 TiC 第二相析出颗粒对奥氏体晶粒长大存在抑制作用有关^[9]。

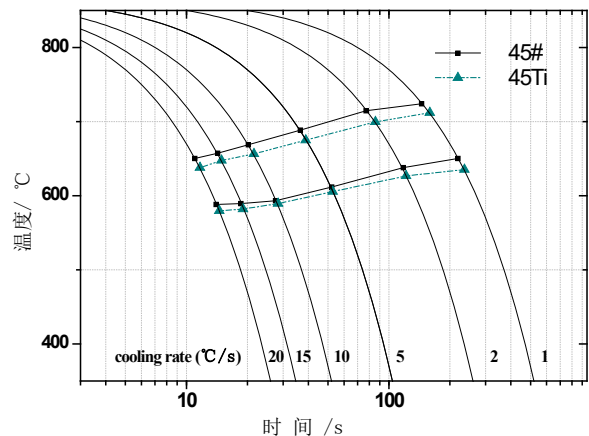
表2 不同冷速下 45[#]、45Ti 试验钢的显微组织

Table 2 microstructure of 45[#]、45Ti steel under different cooling rate

冷速	45 [#]		45Ti	
	金相组织	晶粒度	金相组织	晶粒度
1°C/s	珠光体 + 铁素体	6.5~7.5	珠光体 + 铁素体	8.5~9.5
2°C/s	珠光体 + 铁素体	6.5~7.5	珠光体 + 铁素体	8.5~9.5
5°C/s	珠光体 + 网状铁素体	6~7	珠光体 + 网状铁素体	8.5~9.5
10°C/s	珠光体 + 片状铁素体	6~7	珠光体 + 少量网状铁素体	8~9
20°C/s	珠光体 + 片状铁素体	6~7	珠光体 + 少量网状 / 片状铁素体	8~9
淬火 + 回火	回火索氏体 + 少量屈氏体 + 少量片状铁素体	—	回火索氏体	—

(二) 连续冷却相变 (CCT) 曲线

根据实验采集的膨胀量 - 温度变化曲线 (D-T 曲线), 利用切线法测定出不同冷速下的相变开始温度和结束温度; 再根据测量结果利用 Origin 软件做出实验钢的连续冷却转变曲线 (静态 CCT 曲线), 结果见图 4。



> 图4 45Ti、45[#] 连续冷却转变曲线

> Fig.4 CCT diagram of 45Ti and 45[#] steel

如上 CCT 曲线可以看出, 45Ti 与 45[#] 相变温度区间大部分重合, 但 45Ti 相变开始温度和结束温度均比 45[#] 略低。45Ti 相变开始温度较 45[#] 整体低约 30°C 左右, 相变结束温度整体低 30~10°C。这说明 Ti 的加入一定程度上推迟了 45[#] 的铁素体开始相变温度, 但对珠光体相变影响相对较小。金相分析结果与 CCT 曲线对比结果一致。

(三) 分析讨论

1. Ti 在 45Ti# 钢中的存在形态

钛是强碳氮化物形成元素, 钛微合金钢中, 其常见析出物为 TiN 和 TiC, 其中 TiN 的析出温度较高, 一般于铸坯凝固过程中析出, 而 TiC 的固溶度积较大, 一般于轧制过程中在变形奥氏体中或相变后在过饱和铁素体中析出。根据 TiC 在奥氏体中的平衡固溶度积公式 $\log\{[Ti] \cdot [C]\} = 2.75 - 7000/T^{10}$, 考虑到钢种 TiN 析出消耗的 Ti 元素, 可计算出 45Ti 钢 TiC 在奥氏体中的固溶温度约为 1250°C 左右, 在 900°C 以下, 热力学平衡状态下 Ti 在钢中主要以 Ti(C、N) 第二相析出形式存在, 但实际轧制过程由于工艺过程快, 时间短, 故 TiC 析出不充分, 仍存在部分 Ti 以固溶态形式存在于基体中^[8]。根据第二相钉扎理论, 轧制过程中析出的 TiC 粒子会细化热处理过程中的奥氏体晶粒, 从而细化最终的组织。

2. Ti 微合金对相变的影响

45# 属于普通碳素钢, 淬透性较差, 根据 2.1、2.2 节试验结果, 在 1/s~20°C/s 范围主要发生高温相变, 且随着冷速的增加, 铁素体含量减少, 珠光体含量增加, 符合碳素钢高温相变的一般特征。微合金元素 Ti 的加入对铁素体相变有一定的抑制作用, 这

是由于 Ti 固溶于奥氏体后, 提高了碳原子在奥氏体中的扩散激活能, 降低了其在奥氏体中及相界的扩散速率, 延缓了先共析铁素体的形核和长大速度, 一定程度上抑制了铁素体相变^[11]。同时固溶的 Ti 增加了奥氏体的稳定性, 因此当冷速较快时较 45# 更容易获得贝氏体/马氏体组织。

三、结论

(1) 在 1°C/s~20°C/s 冷速范围, 45#、45Ti 均获得铁素体+珠光体为主的金相组织。随着冷速加快, 珠光体含量持续增多, 在冷速 $\geq 10^\circ\text{C}/\text{s}$ 时, 珠光体含量占主导地位。

(2) 1°C/s~20°C/s 冷速范围, 45Ti 的相变组织较 45# 明显细化, 相同冷速下晶粒度较 45# 高 2 级左右。

(3) Ti 微合金加入推迟了铁素体相变开始温度, 使铁素体相变开始温度整体降低了约 30°C。

(4) Ti 微合金加入明显提高了 45# 的淬透性, 水冷条件下 45Ti 试棒 ($\Phi 20 \times 200\text{mm}$) 横截面 1/4 直径位置可获得全马氏体组织。

参考文献

- [1] 许峰云, 白秉哲, 方鸿生. 低合金高强度钢钛微合金化进展 [J]. 金属热处理, 2007(12):29-34.
- [2] 韩晨, 孙付涛. Ti 与 Nb 微合金化汽车用钢二相粒子及织构研究 [J]. 金属材料与冶金工程, 2018, 46(01):3-9.
- [3] 廖志, 曹燕光, 刘旭辉, 李会等. Ti 微合金化高强度性能波动原因分析与工艺优化 [J]. 轧钢, 2020, 37(03):13-17.
- [4] 张可, 雍岐龙, 孙新军, 李昭东等. 卷取温度对 Ti-V-Mo 复合微合金化超高强度钢组织及力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52(05):529-537.
- [5] 潘辉, 王昭东, 李飞, 郭佳等. 700MPa 级高强工程机械用钢产品设计和生产实践 [J]. 中国冶金, 2014, 24(10):1-6.
- [6] 钱永兰, 乐敏毅, 孙少乐, 虞衡. 微钛处理 45 钢的研究 [J]. 钢铁钒钛, 1990(01):41-49.
- [7] 麻哈, 王雷. V 和 Ti 在高碳钢中的应用 [J]. 钢铁研究学报, 2015(27):P69-74
- [8] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- [9] 胡立光, 赵希文. 钢的热处理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010
- [10] 雍岐龙, 刘正东, 孙新军, 曹建春等. 钛微合金钢中碳氮化钛固溶量及化学组成的计算与分析 [J]. 钢铁钒钛, 2005(03):12-16.
- [11] 陈翱, 李忠华, 何康, 李烈军等. 钛微合金钢形变诱导析出规律的热模拟 [J]. 材料热处理学报, 2019, 40(05):162-167.