

轧后控制冷却对非调质钢 F45MnVS 组织和性能的影响^①

梁佰战¹, 赵刚², 徐浩², 赵岳³

(1.江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司技术中心,江苏淮安 223002; 2.江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司检测中心,江苏淮安 223002; 3.江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司轧钢厂,江苏淮安 223002)

摘要: 对非调质钢 F45MnVS 进行轧后控制冷却试验,对比了轧后未冷却与控制冷却的钢材热轧态力学性能、脱碳层和显微组织。结果表明,轧后控制冷却对钢材下屈服强度、延伸率、断面收缩率和常温冲击功均有明显改善作用;钢材表面脱碳层在轧后控制冷却条件下可以得到有效控制,甚至脱碳层“消失”;在钢材轧后表面温度冷却至 650 °C 时,表层区域出现少量粒状贝氏体,而在钢材轧后表面温度冷却至 460 °C 时,表层区域出现大量粒状贝氏体。轧后控制冷却使钢材表层区域和 1/2 半径附近的铁素体和珠光体组织被细化,铁素体网状比例降低,长条铁素体转变为块状铁素体;因钢材尺寸较大,心部区域显微组织差异性较小。

关键词: 控制冷却; 热轧; 非调质钢; F45MnVS; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG142

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.039

文章编号: 0253-6099(2023)03-0176-04

Effect of Controlled Cooling After Hot Rolling on Microstructure and Properties of Non-quenched and Tempered Steel F45MnVS

LIANG Baizhan¹, ZHAO Gang², XU Hao², ZHAO Yue³

(1. Technology Center of Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002, Jiangsu, China; 2. Examination Center of Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002, Jiangsu, China; 3. Steel Mill of Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002, Jiangsu, China)

Abstract: An experiment on non-quenched and tempered steel F45MnVS was carried out by adopting controlled cooling after hot rolling. The mechanical properties, decarburized layer and microstructure of rolled steel without cooling and after controlled cooling process were compared for analysis. The results show that controlled cooling after hot rolling can lead to the steel with yield strength, elongation, section shrinkage and impact energy improved all, and with the decarburized layer being effectively controlled or even “disappeared”. With the surface temperature of the hot-rolled steel decreased to 650 °C, granular bainite begins to occur on the steel surface; with the surface temperature down to 460 °C, much granular bainite occurs on the steel surface. It is shown that by using controlled cooling after hot rolling, the ferrite and pearlite on the steel surface and near 1/2 radius on the cross section of the steel become fine-grained. The total ferrite net is reduced, and long strip ferrite is transformed to blocky ferrite. Due to larger size, the central part of steel shows little difference in the microstructure.

Key words: controlled cooling technology; hot rolling; non-quenched and tempered steel; F45MnVS; microstructure; mechanical properties

根据加工方式不同,非调质钢一般分为两大类:一类是直接车削用非调质钢,钢材的力学性能即为产品的力学性能,此类非调质钢对于钢材力学性能要求较高;另一类为锻造用非调质钢,该类非调质钢因后续还需要锻造加工,钢材的力学性能仅为参考^[1-2]。非调质

钢一般用于替代 45 钢,在替代一些中小规格(直径不大于 70 mm)45 钢轴类件时,要求 F45MnVS 的力学性能达到 45 钢水平且有一定富余量。目前对于非调质钢 F45MnVS 的研究主要集中在非金属夹杂物、热变形和动态再结晶等方面^[2-5],而对终轧后冷却方案如何影

① 收稿日期: 2022-12-13

作者简介: 梁佰战(1983—),男,陕西富平人,高级工程师,主要研究方向为新产品开发及工艺研究。

响非调质钢的性能和显微组织则研究较少。本文研究了热轧轧后不同水冷强度对非调质钢 F45MnVS 显微组织和力学性能的影响,以充分发挥微合金化元素对力学性能的改善作用,为制定适宜冷却工艺提供参考,对开发更高强度直接车削用非调质钢具有重要意义。

1 试验钢种及方法

1.1 试验钢种

试验钢种为非调质钢 F45MnVS,其化学成分见表1。

表1 试验钢种化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	Fe
0.46	0.42	1.44	0.012	0.040	0.18	0.008	0.03	0.04	0.009	余量

1.2 水冷试验

由 200 mm×200 mm 方坯经过 10 架 750 连轧机组将 F45MnVS 非调质钢轧制成 Φ70 mm 圆钢,然后在步进梁式加热炉中加热,加热温度 1 130~1 160 ℃,在炉时间 120 min,开轧温度 990~1 001 ℃,终轧温度(即穿水前温度)915~920 ℃。在终轧机组后连续布置 4 台穿水冷却器,各穿水冷却器之间距离为 1 m,试验所用水冷却器均为自制,每个水冷却器长 1.25 m,内有 4 组喷水水环。通过调整冷却水流量来实现强穿水冷却与弱穿水冷却,表 2 为水冷过程中穿水冷却器的水流量参数;表 3 为开轧温度、穿水前后和横移处返红温度数据,其中方案 1 为弱冷却,方案 2 为强冷却,方案 3 为未冷却。

表2 不同冷却方案的水冷参数

试验方案	穿水冷却器水量/(m ³ ·h ⁻¹)			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
1	60	50	60	30
2	100	100	100	60
3	0	0	0	0

表3 不同冷却方案的过程温度

试验方案	开轧温度/℃	水冷前温度/℃	水冷后温度/℃	温降/℃	横移处返红温度/℃
1	1 001	920	650	270	780
2	990	915	460	455	702
3	998	918	918	0	885

从试验钢材上近表面、1/2 半径和心部取横向显微组织试样,用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀试样,利用 Zeiss Imager A1m 金相显微镜观察显微组织和脱碳层。从试样钢材上近表面、1/2 半径和心部取力学性能试样,

分别在 Zwick330KN 电子万能材料试验机、JB-30B 冲击试验机、Qness3000CS 硬度计上测定试验钢材力学性能。

2 试验结果

2.1 力学性能

从热轧状态钢材 1/2 半径处取拉伸试样和冲击试样检验抗拉强度 R_m 、下屈服强度 R_{el} 、延伸率 A 、断面收缩率 Z 、常温冲击功 $KU2$,同时检验热轧状态钢材近表面(距表面 1 cm)、1/2 半径处、心部布氏硬度,检验结果分别见表 4、表 5 和表 6。

表4 不同冷却方案所得样品力学性能

试验方案	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%	Z /%
1	595	912	19	52
2	618	916	21	54
3	574	905	15	46

表5 不同冷却方案所得样品常温冲击功

试验方案	冲击功 $KU2$ /J			
	单个值			平均值
1	42	44	48	44.7
2	50	50	51	50.3
3	32	35	37	34.7

表6 不同冷却方案所得样品热轧态硬度

试样方案	硬度(HBW)		
	近表面	1/2 半径	心部
1	267	273	278
2	270	280	281
3	265	268	273

从表 4~5 可以看出,与未穿水冷却钢材力学性能相比,弱穿水冷却分别提高下屈服强度 21 MPa、抗拉强度 7 MPa、延伸率 4 个百分点、断面收缩率 6 个百分点,常温冲击功平均提高了 10 J;强穿水冷却分别提高下屈服强度 44 MPa、抗拉强度 11 MPa、延伸率 6 个百分点、断面收缩率 8 个百分点,常温冲击功平均提高了 15.6 J;穿水冷却对热轧状态钢材下屈服强度、延伸率、断面收缩率和常温 U 型冲击功的改善作用较为明显,而对抗拉强度影响有限。

由表 6 可以看出,穿水冷却方式对于热轧状态钢材硬度有一定程度影响,特别是在强穿水冷却条件下 1/2 半径处和心部的硬度提升较明显。

2.2 脱碳层

检验了 3 种冷却方式下对应钢材的脱碳层,如图 1 所示。

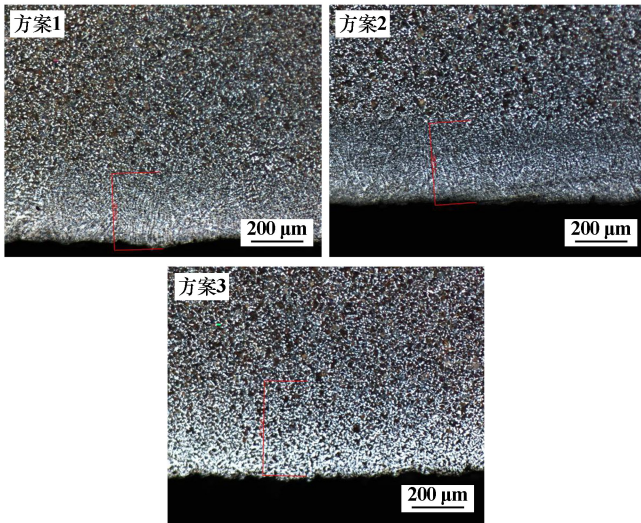


图1 3种方案钢材表面脱碳层

从图1可以看出,未穿水冷却钢材脱碳层大约为0.371 mm,弱穿水和强穿水钢材表面脱碳层明显减薄,其中强穿水冷却时钢材表面脱碳现象基本“消失”,这种“消失”主要是穿水冷却使组织发生转变,降低脱碳现象,同时也减轻了二次氧化脱碳的发生。

2.3 显微组织

从穿水和未穿水冷却钢材上分别取近表面、1/2半径和心部3处位置横向试样,粗磨、抛光后用4%硝酸酒精溶液腐蚀,制成显微组织试样,用金相显微镜观察显微组织,结果见图2~4。

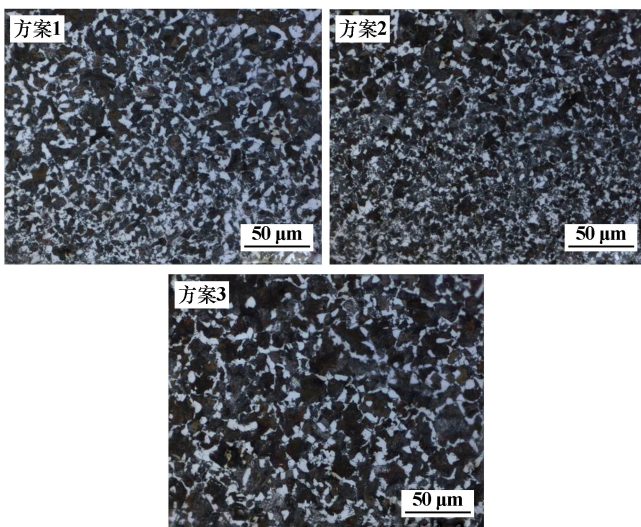


图2 表层区域显微组织

从图2可以看出,强穿水和弱穿水冷却钢材的近表面显微组织分别为:粒状贝氏体+珠光体+铁素体和珠光体+铁素体+少量粒状贝氏体^[6-9];钢材强穿水和弱穿水后,在近表面的显微组织中出现了大量的粒

状贝氏体,随着冷却强度增大,粒状贝氏体出现区域变大;钢材穿水冷却后,近表面显微组织中的网状铁素体转变为块状铁素体;穿水冷却条件下,钢材近表面显微组织中铁素体和相应附近珠光体出现明显细化现象,其中强穿水的块状铁素体组织要细于弱穿水的块状铁素体组织。

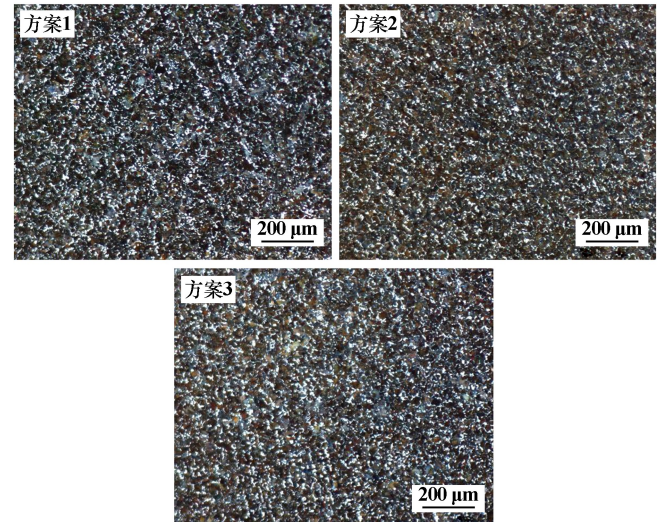


图3 1/2半径处显微组织

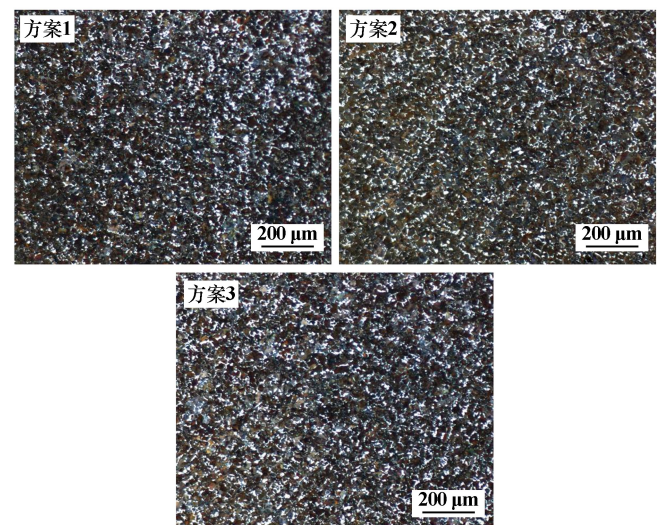


图4 心部区域显微组织

从图3可以看出,与未穿水冷却钢材相比,弱穿水冷却对钢材1/2半径处的显微组织影响不明显,仅仅使得铁素体在一定程度上均匀化和细化,但仍然存在大块铁素体和聚集现象,而强穿水冷却方式则使得钢材1/2半径处的显微组织出现较为明显的细化和均匀化,并未出现铁素体聚集现象,显微组织整体较为均匀。

从图4可以看出,在心部区域,弱穿水和未穿水冷却钢材显微组织差异不大,但强穿水冷却在一定程度上

上抑制了铁素体网的形成,减少了网状铁素体的量,同时对局部铁素体起到了细化作用。

从图 2~4 可知,可能因为钢材规格较大,穿水冷却仅对近表面区域的显微组织有较为明显的作用,而对 1/2 半径处及钢材心部区域的显微组织影响有限。

3 分析与讨论

对于非调质钢 F45MnVS,轧后穿水冷却可以在一定程度上提高热轧态钢材的下屈服强度、延伸率、断面收缩率和常温 U 型冲击功,但穿水冷却对钢材抗拉强度的影响相对有限。

钢材轧后弱冷却(方案 1),钢材水冷后温度为 650 °C,横移处返红温度为 780 °C,在钢材表层组织中开始出现少量粒状贝氏体组织,铁素体网状比例较少,铁素体从长条状向块状转变,铁素体和珠光体得到一定程度细化;相对未穿水冷却钢材 1/2 半径处的显微组织,弱穿水冷却钢材此处显微组织变化不大,这主要由于弱穿水后钢材温度迅速返红到 780 °C,此时在 1/2 半径处温度已经重新处于奥氏体存在温度,随着温度缓慢降低,铁素体开始析出和长大,这就导致在 1/2 半径处出现了一定量铁素体网状和聚集现象,可见对于 F45MnVS 这种中碳非调质钢来说,要想获得粒状贝氏体,必须将冷却后温度控制在 650 °C 以内,且需要在此温度下适当保留一定时间,即在线等温处理,保证有足够时间实现组织转变,因为自制的穿水装置较短,钢材在该温度下保持时间相对较短,粒状贝氏体的生成量相对较少。同理,方案 2 钢材水冷后温度为 460 °C,横移处返红温度为 702 °C,穿水后随着钢材表面温度逐渐升高,表层组织中粒状贝氏体出现区域相对变多,温度由里及表传递,1/2 半径处和心部区域的铁素体组织得到一定程度细化。由于钢材尺寸较大,表面到 1/2 半径区域的细化作用比较明显,而 1/2 半径处到心部区域的细化作用较弱。

钢材轧后穿水冷却,控制水冷后温度在 650 °C 以下,可以有效降低表面脱碳现象的发生,甚至当水冷后温度降至 460 °C 时,可以根本上消除钢材表面脱碳层。在加热炉内,钢坯表面在高温条件下发生快速脱碳,使钢坯表层的碳含量低于内部,在随后的轧制过程和轧后空冷过程中,碳元素短程扩散,发生缓慢脱碳现象,

由于钢材表层碳含量较低和缓冷冷却,使得铁素体含量相对较高,铁素体在晶界析出和长大,导致钢材表层出现较为明显脱碳现象。钢材轧后穿水冷却后,加速了钢材表面冷却,使钢材表面温度迅速降低至相变温度以下,抑制了铁素体的析出和长大,同时在随后的返红温度持续时间较短,二次脱碳几乎停止,两者的双重作用使强穿水后钢材的脱碳层几乎消失。

4 结 论

1) $\Phi 70$ mm F45MnVS 在轧后穿水冷却后下屈服强度、延伸率、断面收缩率和常温冲击功明显上升。

2) 钢材轧后穿水冷却,当冷却后温度为 650 °C、横移返红温度为 780 °C 时,钢材表层区域出现少量粒状贝氏体;当钢材穿水冷却后温度为 460 °C、横移返红温度为 702 °C 时,钢材近表面组织出现大量粒状贝氏体,同时近表面和 1/2 半径处区域的铁素体和珠光体被细化,铁素体网状比例降低,长条状铁素体转变为块状铁素体;由于钢材尺寸较大,心部区域显微组织变化较小。

3) 轧后穿水冷却后,表面脱碳现象明显减少,在强穿水冷却条件下,钢材表面脱碳层几乎消失。

参考文献:

- [1] 邹海兆. F45MnVS 钢热变形行为及组织性能研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学冶金工程学院, 2017.
- [2] 吴晓东,王联进,谢坚锋,等. F45MnVS 非调质钢动态再结晶模型与晶粒尺寸数值模拟[J]. 机械工程材料, 2021,45(10):84-90.
- [3] 谢坚锋. F45MnVS 非调质钢动态再结晶行为及硫化物演变的研究[D]. 镇江:江苏大学材料科学与工程学院, 2020.
- [4] 白瑞娟,刘成松,谭雷红,等. F45MnVS 非调质钢中硫化锰夹杂物特性控制的研究[J]. 特殊钢, 2022,43(5):7-13.
- [5] 康荻娜,庞玉华,罗 远,等. F45MnVS 钢热变形本构方程[J]. 钢铁, 2020,55(9):104-110.
- [6] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [7] 飞尚才,李志强,蒋小霞. 退火温度及冷轧压下量对低碳铝镇静钢退火织构的影响[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):149-151.
- [8] 曹 杰,刘雅政,阎 军,等. 变形温度和冷却方法对粒状贝氏体组织形态的影响[J]. 材料热处理学报, 2011,32(7):62-66.
- [9] 张超铸,杨 龙,高兴健,等. 卷曲温度对含 Nb 微合金高强钢力学性能波动的影响[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):138-142.

引用本文: 梁佰战,赵 刚,徐 浩,等. 轧后控制冷却对非调质钢 F45MnVS 组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):176-179.