

# 在线加速冷却对热轧 C - Mn 无缝钢管 组织及性能影响

邬占飞, 米永峰, 贺景春, 郭志文, 姜海龙, 孙文秀

(内蒙古包钢钢管有限公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 文章介绍了包钢钢管公司 460 生产线上一种 C - Mn 热轧无缝钢管在线加速冷却工艺试验。试验结果表明, 在线加速冷却工艺对试验钢组织、性能影响显著, 在线控冷能够抑制两相区先共析铁素体的产生, 细化了基体晶粒, 晶粒度从非控冷状态下的 6.5 级提高到了 8 级, 改善了钢的带状组织。钢管力学性能及冲击性能有明显提高, 屈服强度达到 300 ~ 345 MPa, 抗拉强度达到 485 ~ 545 MPa, 纵向室温冲击功平均值达到 102 J, 纵向 0 °C 冲击功平均值达到 86 J, 纵向 -20 °C 冲击功平均值达到 60 J。

**关键词:** 在线加速冷却; 热轧 C - Mn 无缝钢管; 带状组织; 力学性能

中图分类号: TG335.7

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438 (2024) 03 - 0071 - 04

## Effects of Online Accelerated Cooling on Microstructure and Properties of Hot Rolled C - Mn Seamless Steel Pipe

Wu Zhan - fei, Mi Yong - feng, He Jing - chun, Guo Zhi - wen,  
Jiang Hai - long, Sun Wen - xiu

(Inner Mongolia Baotou Steel Pipe Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In this paper, it is introduced the online accelerated cooling process test of a type of hot rolled C - Mn seamless steel pipe in 460 production line of Baotou Steel Pipe Co., Ltd.. The test results showed that the effects of online accelerated cooling process on microstructure and properties of test steel were significant, generation of proeutectoid ferrite in two phase region could be restrained by online controlled cooling so that the matrix grains were refined as well as grain size was increased from level 6.5 under non controlled cooling conditions to level 8 and the banded structure of steel was improved. The mechanical properties and impact properties of steel pipe are significantly improved, the yield strength could reach 300 ~ 345 MPa, tensile strength could reach 485 ~ 545 MPa, average value of longitudinal impact energy at room temperature could reach 102 J, average value of longitudinal impact energy at 0 °C could reach 86 J and average value of longitudinal impact energy at -20 °C could reach 60 J.

**Key words:** online accelerated cooling; hot rolled C - Mn seamless steel pipe; banded structure; mechanical property

无缝钢管被广泛应用于油气的开采及输送, 因其服役环境的特殊性, 不仅对其耐腐蚀性有严格的

要求,力学性能的稳定性也是产品安全服役的一项重要指标。近年来,随着产品竞争的日益激烈,钢铁企业面临重重压力。上游原材料尤其是合金的价格不断攀升,下游用户对产品的性能要求逐渐严格,对于钢铁企业,如何降本增效是一个必须思考的问题。包钢管公司试验将钢中 Mn 含量由原来的 1.55% 降低至 0.40% ~ 0.65%, 达到降低生产成本的目的。事实上,伴随着 Mn 含量的降低,产品的力学性能也呈现出不同程度的下降,主要表现为钢中带状组织严重,造成钢管屈服强度偏低,且各项力学性能不稳定。究其原因是钢在凝固时溶质元素偏聚,轧制过程中溶质元素偏聚区被变形延伸成带状分布,轧后冷却时低锰区的局部相变温度  $Ar_3$  较高,首先形成铁素体并导致碳和锰进一步富集到偏聚区,最后形成铁素体/珠光体带状组织。

热机械控轧控冷(TMCP)技术是通过控制轧制和控制冷却技术相结合,也就是采用低温轧制和在线热处理的综合处理手段,通过在线连续对热轧组织和轧后组织进行调控,获得理想的实物性能,该技

术多用于板材的生产<sup>[1]</sup>,如将控轧控冷技术用于无缝钢管生产,特别是轧后采用控制冷却技术,可在降低合金的基础上使钢管的强度和韧性同步提高,实现节约型绿色化生产。但因无缝钢管形状、工艺流程的特殊性和复杂性,导致热轧过程工艺窗口窄,不易实现控制轧制生产,而在线控冷技术是热轧无缝钢管领域长期以来的重点发展方向<sup>[2]</sup>,结合包钢自身无缝机组的特点,开发轧后在线控制冷却设备和工艺,实现高品质热轧无缝钢管的生产<sup>[3]</sup>。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验钢的原料为钢管公司  $\Phi 460$  mm 作业区采用  $\Phi 390$  mm 坯型轧制规格为  $\Phi 377$  mm  $\times$  9 mm 的热轧无缝管料,其制造工艺为铁水预处理 $\rightarrow$ 顶底复吹转炉冶炼 $\rightarrow$ LF 炉精炼 $\rightarrow$ 圆坯连铸 $\rightarrow$ 管坯加热 $\rightarrow$ 穿孔 $\rightarrow$ 连轧 $\rightarrow$ 定径机( $\rightarrow$ 在线控冷) $\rightarrow$ 冷床冷却。本试验用材料仅采用 C-Mn 钢生产,不添加其他合金元素,化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

| C           | Si          | Mn          | P            | S            | Cr、Mo、Nb、V、Ti | % |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---|
| 0.17 ~ 0.23 | 0.17 ~ 0.37 | 0.35 ~ 0.65 | $\leq 0.030$ | $\leq 0.030$ | 残余            |   |

### 1.2 试验方法

选定同一炉圆钢坯,在 1 290  $^{\circ}\text{C}$  温度下加热,菌式穿孔机穿孔,PQF 连轧机轧管,定径后分别以不同的冷却方式进行冷却,定径后温度为 908  $^{\circ}\text{C}$ 。方案一,出定径机后正常进入冷床空冷,过 10 支钢管,辊道速度设定为 2.1 m/s,运行时间为 15 s,入口温度为 832  $^{\circ}\text{C}$ ,出口温度为 773  $^{\circ}\text{C}$ ,冷却速度为 3.9  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;方案二,出定径机后进入在线控冷系统,开启 8 组冷却器,试制 10 支钢管,辊道速度设定为 1.5 m/s,运行时间 21 s,控冷入口温度为 807 ~ 825  $^{\circ}\text{C}$ ,控冷出口温度为 571 ~ 647  $^{\circ}\text{C}$ ,冷却速度为 10.7 ~ 12.9  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;经冷床冷却后,按照 GB/T 2975—2018 规定取样方法,在头尾纵向距离管端 500 mm 处取拉伸试样,试样宽度 20 mm。按照 GB/T 228.1—2021 中规定的试验方法,在 KN600-J4A 型拉力试验机上进行拉伸试验。按照 GB/T 2975—2018 中规定的取样方法,在钢管端部纵向上,每组

取 3 个冲击试样,试样尺寸 7.5 mm  $\times$  10 mm  $\times$  55 mm,缺口深度为 2 mm。按照 GB/T 229—2022 中规定的试验方法,在 RKP450GE 型冲击试验机上进行冲击试验。在每个测试样取金相试样,用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,采用蔡司金相显微镜和图像分析仪拍摄显微组织照片。选择过控冷系统第 1 支及第 10 支钢管分别进行头尾四象限拉伸、冲击、组织、晶粒度检验,同时和轧态钢管(未进行在线冷却)进行性能对比,

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验钢在线快冷后力学性能

按照设定的在线快冷参数,对在线快冷后钢管进行力学性能检测,在其中 0<sup>#</sup>表示轧态钢管,1<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>为过在线快冷处理后的第 1 支和第 10 支钢管,1、2、3、4 表示四象限拉伸性能检测结果,如图 1 所示。

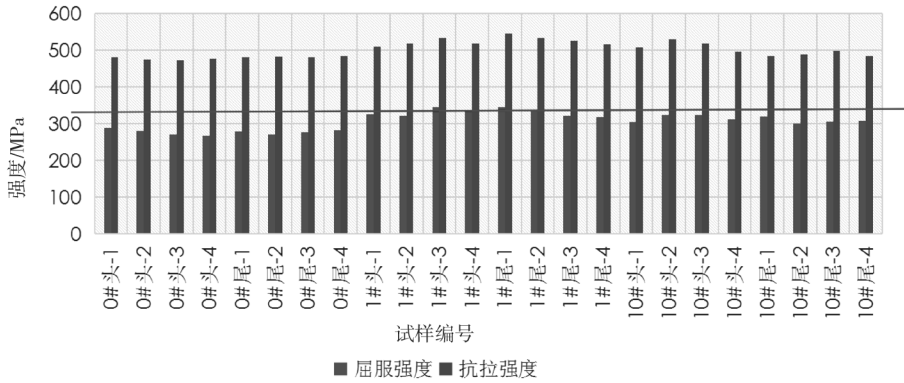


图1 试验钢轧态和过快冷后拉伸性能对比

图1为试验钢轧态和过快冷后拉伸性能对比,其中0#未过在线快冷轧态钢管头端四象限屈服强度为267~289 MPa,尾端为271~282 MPa,平均屈服强度为277 MPa,抗拉强度满足标准GB/T 8163—2018要求<sup>[4]</sup>;1#、10#过在线快冷后2支钢管头尾四象限屈服强度在300~345 MPa区间,最大值已满足标准要求,头尾四象限屈服强度差约为45 MPa,说明钢管在轴向和周向上拉伸性能较为均匀,也表明在线快冷整体控制良好,在线快冷后平均屈服强度为321 MPa,较未过在线快冷轧态钢管的屈服强度提高44 MPa,屈服强度的提高率为15.9%。未过在

线快冷钢管抗拉强度平均值为479 MPa,过在线快冷钢管的抗拉强度平均值为513 MPa,均能满足标准要求,抗拉强度提高34 MPa,提高率为7.1%。过在线快冷钢管屈服强度较抗拉强度提高的幅度要大。另外未过在线快冷钢管的延伸率平均值为31%,过在线快冷钢管的延伸率平均值为28%,两者相比过在线快冷的钢管整体延伸率有所降低,但满足标准要求且富余量较大。

对3支钢管的头尾进行四象限冲击性能检测,试验温度分别为室温、0℃、-20℃、-40℃,如图2所示。

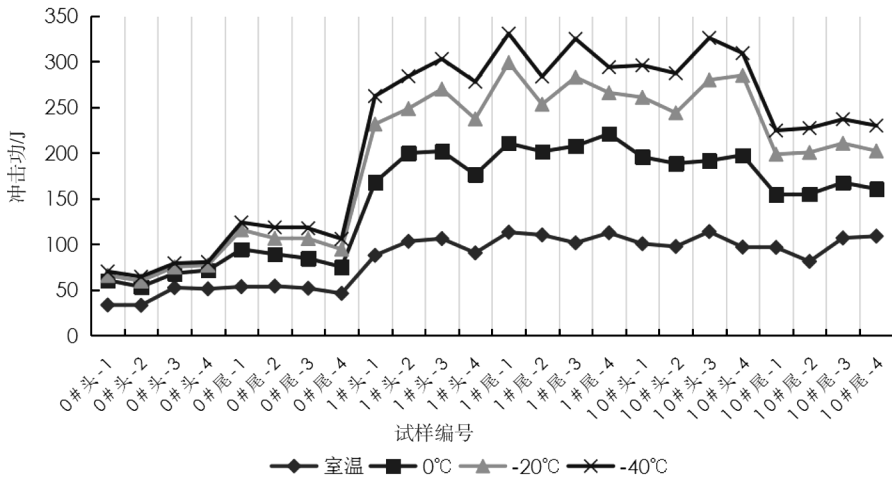


图2 试验钢在不同试验温度下冲击性能对比

图2为试验钢在不同试验温度下轧态冲击韧性和过在线快冷后冲击韧性对比,其中0#代表未过在线快冷轧态钢管头尾端四象限冲击功,1#、10#代表过在线快冷后两支钢管头尾四象限冲击功。过在线快冷

钢管较未过在线快冷钢管的冲击功明显提高,满足标准GB/T 8163—2018中Q345B、Q345C、Q345D钢级要求,且随着试验温度降低,未过在线快冷的钢管和过在线快冷的钢管,冲击功呈下降趋势。

## 2.2 显微组织

对 3 支钢管采用蔡司显微镜对晶粒度、显微组

织进行了检测,结果如图 3 和表 2 所示。

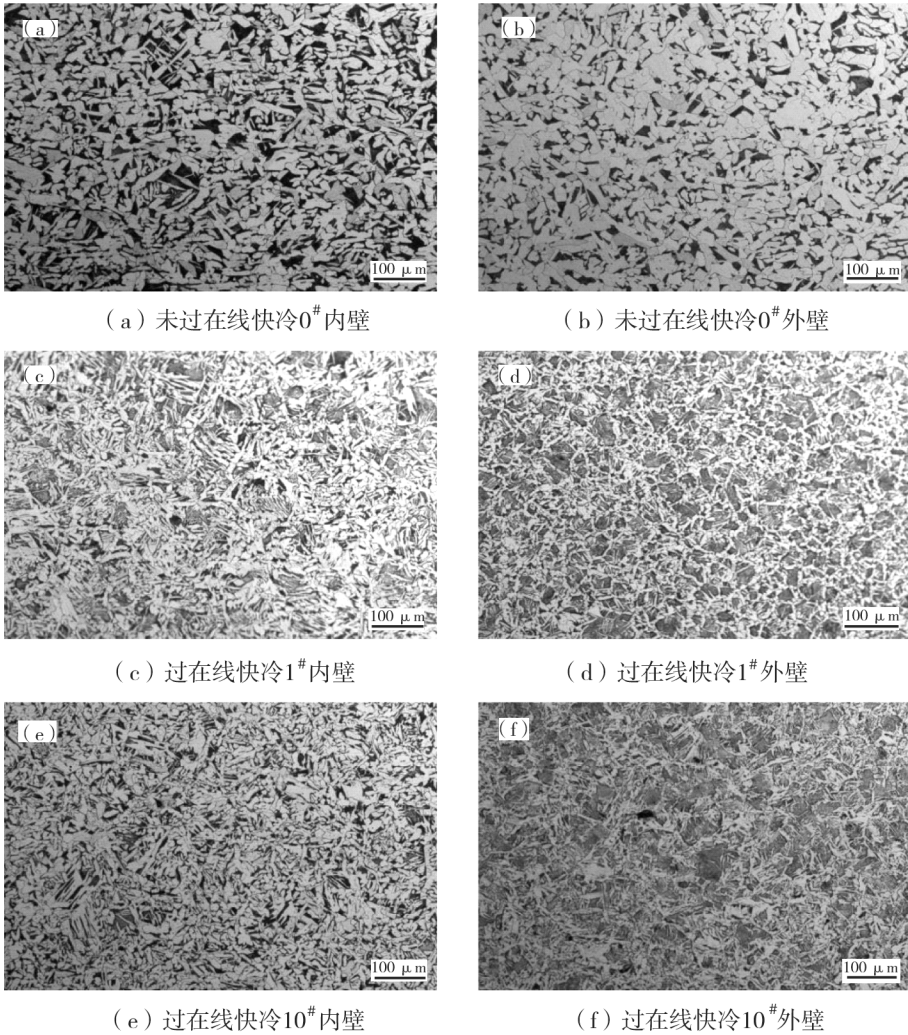


图 3 试验钢显微组织

表 2 钢管显微组织、晶粒度对比

| 试样编号 | 晶粒度/级 |     | 显微组织  |       |
|------|-------|-----|-------|-------|
|      | 内壁    | 外壁  | 内     | 外     |
| 0#   | 6.5   | 6.5 | F+P   | F+P   |
| 1#   | 8     | 8.5 | F+P+B | F+P+B |
| 10#  | 8     | 8.5 | F+P+B | F+P+B |

从钢管显微组织来看,未过在线快冷管线钢管 0#内壁及外壁组织为铁素体(F) + 珠光体(P),晶粒度为 6.5 级;过在线快冷钢管 1#、10#内壁及外壁组织为针状铁素体(F) + 珠光体(P) + 粒状贝氏体(B),晶粒度为 8 ~ 8.5 级。通过在线快冷,钢管晶

粒发生细化,内外表面的带状组织得到明显改善<sup>[5]</sup>。过在线快冷后钢管显微组织中的珠光体(P)含量明显比未过在线快冷显微组织中的珠光体(P)含量要多,使得材料的强度和韧性同时得到提高。

## 3 讨论

在线加速冷却过程改变了 C - Mn 钢奥氏体相变产物,最终形成了针状铁素体、粒状贝氏体和珠光体,此外,加速冷却还可促进铁素体晶粒中碳氮化物析出,提高钢的强度。目前采用 Mn 含量为 0.35% ~ 0.65% 钢种,屈服强度单值已经满足标准

(下转第 80 页)

### 3 结束语

世界各国根据线路条件、运营情况的不同,不同标准在性能检验方面会有一定差异。我国制定的普速铁路用 TB/T 2344—2020 钢轨标准,虽在各项技术指标上相对而言较为宽松,但总体上已经非常趋近于高速铁路用钢轨标准,这也体现出我国钢轨标准随着铁路和冶金行业的发展而不断更新,逐渐迈向更高的台阶。通过对《AREMA 铁路工程保养手册》(2020)、欧标 EN 13674 - 1:2011 + A1:2017、铁标 TB/T 2344. 1—2020 三个标准对比分析发现,不同标准的钢种、牌号和断面是多样的,不同类型的钢轨可以应用的场合不同,可以根据施工使用目的不同更加灵活地选用不同的断面。在成分设定方面,美标在 P、S 元素方面相对欧标、铁标要求要高,同时国外标准中允许加入一些 Cu、Ni 等合金元素形成低合金钢轨,但目前铁标中还未涉及此类钢轨。铁标钢轨在性能检验方面与欧标钢轨存在很多相似

之处,可以与欧标钢轨检验接轨;但美标钢轨与铁标钢轨在性能检验方面存在一定差异,需要进一步对标,力争将国内更多品种的钢轨推向美洲市场。

#### 参 考 文 献

- [1] 张银花,周清跃,陈朝阳,等. 北美重载铁路钢轨技术及发展趋势[J]. 铁道技术监督,2015(43):1-6.
- [2] 罗忠河. 国铁集团计划投产新线里程断崖式下降:我国今年铁路建设“钢需”会大降吗?[N]. 中国冶金报,2024-02-27(008).
- [3] EN 13674 - 1:2011 + A1:2017,46 kg/m 及以上 T 型钢轨[S].
- [4] TB/T 2344. 1—2020,43 kg/m ~ 75 kg/m 钢轨订货技术条件[S].
- [5] 张军政. 欧洲标准与我国铁道行业标准在钢轨指标检验上的差异分析[J]. 铁道技术监督,2018,47(10):16-18,21.

(上接第 74 页)

GB/T 8163—2018 中 Q345B、Q345C、Q345D 钢级要求,因此对在线快冷冷却水的大小、钢管的前进速度、终冷温度和性能的匹配有必要进一步研究,从而降低现有钢种合金含量。

### 4 结论

(1) 试验钢通过在线加速冷却,可一定程度上细化晶粒,增加珠光体含量,提高钢的强度,改善 C - Mn 钢的带状组织。

(2) 试验钢管通过在线加速冷却,奥氏体相变产物为针状铁素体、粒状贝氏体和珠光体。

(3) 试验钢通过在线加速冷却,可提高钢管的强度及冲击韧性,使得 Q345B/C 系列产品采用最为经济的 C - Mn 钢生产,无需添加合金元素,即可保证材料的力学性能满足标准要求,无需后续离线热处理,可进一步降低生产成本。

#### 参 考 文 献

- [1] 袁国,康健,李振垒,等. 热轧无缝钢管在线热处理工艺组织性能调控研发技术进展[J]. 钢管,2018,47(1):30-34.
- [2] 彭龙洲,陈利明,杜新立,等. 简析控轧控冷技术在无缝钢管生产中的应用[J]. 钢管,2013,42(4):56-60.
- [3] 刘晓瑾,康健,李振垒,等. 热轧无缝钢管控制冷却关键技术的开发与工业应用[J]. 轧钢,2022,39(1):9-14.
- [4] GB/T 8163—2018,输送流体用无缝钢管[S].
- [5] 陈思联,惠卫军,邵成伟,等. 控制冷却对中碳高钒非调质钢组织性能的影响[J]. 钢铁,2015,50(8):77-82.