

层冷模式对 MR T-2.5 热轧带钢 横向性能均匀性的影响

Effect of Laminar Cooling Mode on Transverse Properties Uniformity of MR T-2.5 Hot Rolled Strip Steel

供稿|刘冠华, 栗建辉, 郭隆, 龙标, 艾兵权 / LIU Guanhua, LI Jianhui, GUO Long, LONG Biao,
AI Bingquan

内 容 导 读

为了研究层冷模式对宽幅马口铁热轧带钢横向拉伸性能均匀性的影响, 选取某钢厂 2.75 mm×1800 mm 规格的 MR T-2.5 基板分别进行了两段密集冷却、两段稀疏冷却和后段稀疏冷却实验, 比较横向拉伸性能分布和金相组织。结果表明, 3 种层冷模式下金相组织分布均匀, 均为铁素体+少量珠光体, 横向拉伸性能存在差异。两段密集冷却模式下横向拉伸性能分布均匀, 组织晶粒度为 8.5 级; 两段稀疏冷却和后段稀疏冷却模式下中间部位拉伸性能偏高, 组织晶粒度分别为 8.0 级和 8.5 级。分析认为: 两种稀疏冷却模式下中间部位由于过冷度偏小产生 AIN 析出, 析出相强化作用导致中间部位拉伸性能偏高, 采用两段密集冷却模式有利于保证 MR T-2.5 横向拉伸性能均匀性。

食品级马口铁 (MR 系列) 主要用于奶粉罐、八宝粥罐、食品罐等高端罐, 产品附加值高, 市场潜力大。食品级马口铁基板 (即热轧钢卷) 生产工艺窗口窄, 技术难点多, 对尺寸、板型以及表面质量均有较高要求^[1-3]。国内某 2050 热轧产线主要生产宽幅马口铁基板, 宽度范围为 1600~1890 mm, 食品级 MR 系列从 T-1 到 T-5 级全覆盖, 其中 MR T-2.5 市场需求量最多, 宽幅马口铁基板除满足常规检验指标外还须保证横向性能均匀性。胡华东等^[4] 研究层冷 U 型冷却工艺可以显著改善钢卷全长性能一致性, 余伟等^[5] 通过有限元分析证明层冷冷却在宽度

方向上存在不均匀性, 张军锋等^[6] 通过调整层冷模式改善了 MR T-2.5CA 板宽方向性能均匀性。热轧带钢轧制过程中横向温度分布不均客观存在的问题, 可通过调整冷却模式来达到相近的冷却速率, 从而改善横向性能均匀性^[7]。本文针对 MR T-2.5 基板实验了 3 种冷却模式, 分别为两段密集冷却、两段稀疏冷却和后段稀疏冷却, 通过对比成品卷横向拉伸性能和金相组织, 确定了适合的冷却模式。

热轧工艺

MR T-2.5 主要用于柔软性良好的罐身或罐盖,

作者单位: 唐山钢铁集团有限责任公司, 河北 唐山 063011

需要优质的热轧基板，成分设计及热轧工艺均需与下游冷轧工艺相匹配。

化学成分

MR T-2.5 冷轧后成品目标硬度为 HR30T 55±3，热轧基板采用低碳铝镇静钢，严格控制 Cr、Ni、Cu、Mo 等残余元素的含量，化学成分见表 1。

表 1 MR T-2.5 钢化学成分 (质量分数)						%
C	Si	Mn	P	S	Als	Fe
0.04~0.06	≤0.03	0.20~0.30	≤0.020	≤0.012	0.02~0.06	余量

注：Als 为酸溶铝

热轧工艺

MR T-2.5 基板的热轧工艺路线为：铁水预处理→转炉→真空循环脱气 (RH) 精炼→连铸→2050 轧机→层冷→卷取。冷轧后采用罩式退火工艺，AlN 需要在退火前处于固溶状态，常规工艺为热轧采用低温卷取使 AlN 来不及析出，冷轧退火后再析出以达到提升马口铁强度的目的^[8]。终轧温度设定为 890℃，卷取温度设定为 580℃。

层冷模式

层冷设备

2050 热轧产线精轧出口到卷取机之间距离为 130 m，层冷段有效长度为 95 m，层冷段细分为 4 部分，依次为超快冷、普通冷、加密冷和精调。层冷模式是通过设定层冷段水阀开启使带钢温度按工艺要求的冷却速率冷却到卷取温度，目前已配置的层冷模式有 56 种，本文对两段密集冷却、两段稀疏冷却和后段稀疏冷却 3 种模式进行比较。

层冷模式比较

选取实验钢成品规格为 2.75 mm×1800 mm，终

轧温度为 890±15℃，精轧出口速度为 12 m/s，带钢从轧机出口到层冷入口大约 0.9 s，出层冷段大约 8.3 s。两段密集冷却模式为超快冷段水阀关闭，带钢经过精轧机组轧制后空冷约 2.7 s 到普通冷前段密集冷却以 80~90℃/s 的速度强冷 0.4 s 至 840±15℃，然后空冷 1.2 s 进入普通冷后段密集冷却，以 70~90℃/s 的速度强冷至 630±15℃，随后空冷加精调冷却至 580±15℃ 卷取。两段稀疏冷却模式为超快冷段第一组水阀开启，带钢经过精轧机组轧制后空冷约 0.9 s 到超快冷前段稀疏冷却以 100~120℃/s 的速度强冷 0.3 s 至 840±15℃，然后空冷 2.5 s 进入普通冷中段稀疏冷却，以 50~80℃/s 的速度强冷至 600±15℃，随后精调冷却至 580±15℃ 卷取。后段稀疏冷却模式为超快冷段水阀关闭，带钢经过精轧机组轧制后空冷约 4.1 s，然后稀疏冷却，以 60~80℃/s 的速度强冷至 600±15℃，随后精调冷却至 580±15℃ 卷取。

均匀性比较

取样位置

在带尾 20 m 处取通宽试样，从驱动侧到操作侧切分 9 条试样进行拉伸测试，拉伸试样在带钢横向位置分布情况见图 1，拉伸试样尺寸见图 2。两段密集冷却模式下试样编号为 DI1#~DI9#，两段稀疏冷却模式下试样编号为 DS1#~DS9#，后段稀疏冷却模式下试样编号为 BS1#~BS9#。按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》在 Zwick-Roell/Z600 型拉伸机上进行拉伸试验测定其力学性能，在蔡司倒置金相显微镜 Axio Vert.A1 下观察显微组织，依据 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定法》标准，对显微组织的晶粒度进行评级。

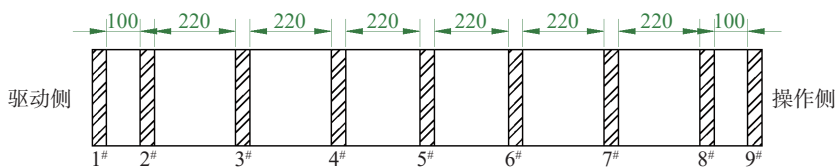


图 1 横向取样位置分布 (单位: mm)

横向拉伸性能分布比较

两段密集冷却下抗拉强度 R_m 平均值为 363 MPa、

极差 17 MPa，屈服强度 $R_{p0.2}$ 平均值为 258 MPa、极差 61 MPa，边部性能偏高，除边部外整体均匀性稳

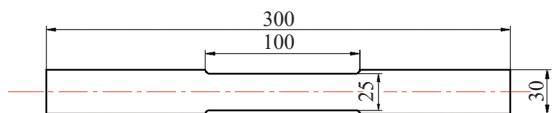


图2 拉伸试样尺寸示意图 (单位: mm)

定,具体数据见图3。两段稀疏冷却下抗拉强度 R_m 平均值为346 MPa、极差28 MPa,屈服强度 $R_{p0.2}$ 平均值为241 MPa、极差45 MPa,中间部位抗拉强度、屈服强度升高,两侧性能波动较小,具体数据图4。后段稀疏冷却下抗拉强度 R_m 平均值为354 MPa、极差47 MPa,屈服强度 $R_{p0.2}$ 平均值为247 MPa、极差57 MPa,中间部位抗拉强度、屈服强度升高,驱动侧偏低,其余位置波动较小,具体数据见图5。宽幅马口铁需纵剪分条后进入冷轧工序,宽度1800 mm的常用分条部位为1000和800 mm两处,分条后高屈服强度的中间部位会分到1000 mm那条,同时考虑冷轧切边工艺,故经两段密集冷却

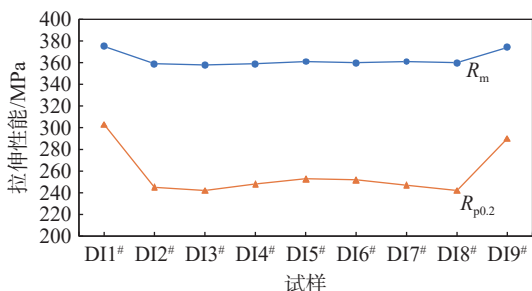


图3 两段密集冷却后不同部位横向拉伸性能分布

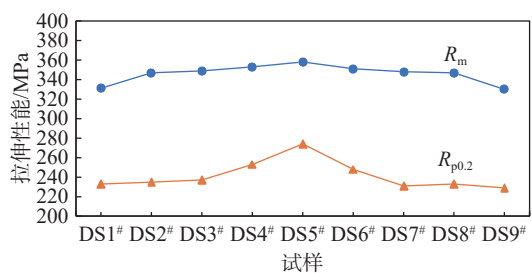


图4 两段稀疏冷却后不同部位横向拉伸性能分布

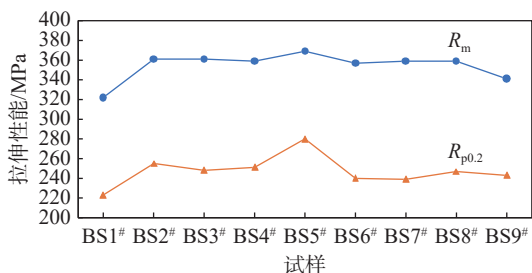


图5 后段稀疏冷却后不同部位横向拉伸性能分布

处理后样品的横向拉伸性能均匀性优于其他2种。

金相组织比较

经不同层冷模式处理的试样的金相组织均为铁素体+少量珠光体,如表2所示,两段密集冷却下边部晶粒度为10.0级,其余位置均为8.5级。边部对应位置拉伸性能偏高,原因为边部过冷导致细晶强化,金相组织见图6。如表3所示,两段稀疏冷却下驱动侧晶粒度为9.5级,其余位置均为8.0级,中部拉伸性能升高表明中部位置存在AIN析出^[9],AIN析出属于析出强化,金相组织见图7。后段稀疏冷却下驱动侧晶粒度8.0级,其余位置大部分为8.5级,见表4。整体组织较为均匀表明横向冷速均匀,中部拉伸性能升高表明存在AIN析出,金相组织见图8。考虑后期冷轧切边,3种模式下试样的横向金相组织比较均匀。密集冷却模式冷速较快,晶粒度较两段稀疏冷却模式的晶粒度高0.5级。稀疏冷却模式下由于中部冷速慢存在AIN析出现象,密集冷却模式下中部冷速高于AIN析出临界值未出现AIN析出,从AIN强化效果分析得出,两段密集冷

表2 两段密集冷却后不同部位钢样晶粒度

DI1#	DI2#	DI3#	DI4#	DI5#	DI6#	DI7#	DI8#	DI9#
10.0	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	10.0

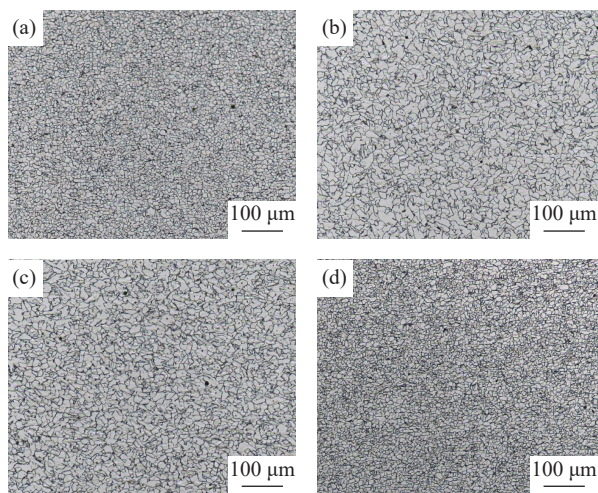


图6 两段密集冷却后不同部位试样金相组织: (a) DI1# (驱动侧); (b) DI2#; (c) DI5# (中间部位); (d) DI9# (操作侧)

表3 两段稀疏冷却后不同部位钢样晶粒度

DS1#	DS2#	DS3#	DS4#	DS5#	DS6#	DS7#	DS8#	DS9#
9.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0

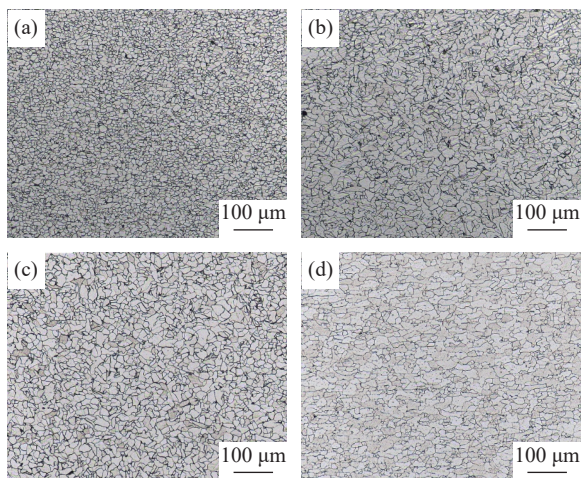


图7 两段稀疏冷却后试样不同部位金相组织: (a) DS1[#] (驱动侧); (b) DS2[#]; (c) DS5[#] (中间部位); (d) DS9[#] (操作侧)

表4 后段稀疏冷却后不同部位钢样晶粒度

BS1 [#]	BS2 [#]	BS3 [#]	BS4 [#]	BS5 [#]	BS6 [#]	BS7 [#]	BS8 [#]	BS9 [#]
8.0	8.5	8.5	8.5	9.0	8.5	8.5	8.5	9.0

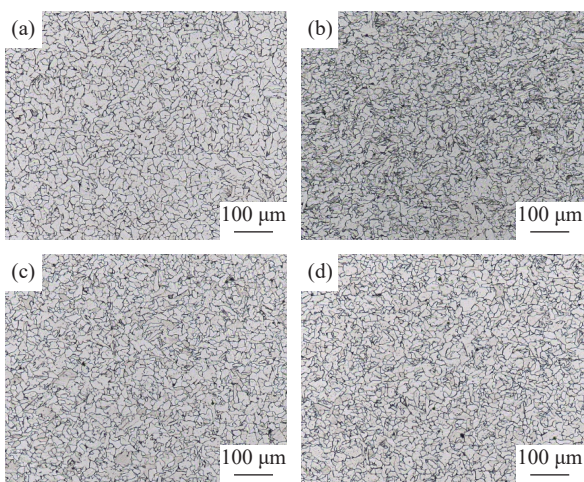


图8 后段稀疏冷却后试样不同部位金相组织: (a) BS1[#] (驱动侧); (b) BS2[#]; (c) BS5[#] (中间部位); (d) BS9[#] (操作侧)

却的横向性能均匀性优于其他2种。

结果与分析

由横向拉伸性能分布图可知, 两段密集冷却呈“凹”字型, 两段稀疏和后段稀疏呈“凸”字型, 边部高性能区域可由冷轧切边切除, 中间高性能区域会被非对等纵剪保留, 故经两段密集冷却的基板横向金相组织比较均匀。稀疏冷却模式下中间部位存在AlN析出, 析出强化导致性能不均。综上所述, 两段密集冷却模式下MR T-2.5基板横向性能均匀性优于两段稀疏冷却和后段稀疏冷却。

结束语

(1) 卷取温度相同的情况下, 采用不同的层冷模式, MR T-2.5基板横向拉伸性能分布情况存在差异, 且均值也不同。

(2) 两段密集冷却模式下MR T-2.5基板边部抗拉、屈服强度高, 其余位置拉伸性能波动小, 组织均匀, 后续冷轧工艺切除边部后可视为基板横向拉伸性能均匀性良好; 两段稀疏冷却模式和后段稀疏冷却模式下MR T-2.5基板中间部位拉伸性能高于其他位置, 非对等纵剪分条及冷轧工艺切边无法去掉原基板中间拉伸性能较高部位, 导致基板横向拉伸性能不均。

(3) 两段密集冷却模式下MR T-2.5基板金相晶粒度为8.5级, 两段稀疏冷却和后段稀疏冷却模式下基板的晶粒度分别为8.0和8.5级, 3种模式下横向金相组织都比较均匀。两端密集冷却模式由于冷速高于AlN析出温度, AlN无法析出, 横向拉伸性能均匀。两段稀疏冷却和后段稀疏冷却中间部位由于过冷度较小存在AlN析出, 析出强化导致中间部位拉伸性能升高, 基板横向性能不均。

参考文献

- [1] 赵智勇. 国内镀锡板的生产与市场. 中国冶金, 2013, 23(4): 7
- [2] 刘连喜, 刘建兵. 中国金属包装产业及包装材料的发展现状及趋势. 河北冶金, 2015(7): 76
- [3] 梅忠, 杨志刚, 黄伟丽, 等. 马口铁基料生产工艺的控制研究. 河北冶金, 2020(1): 41
- [4] 胡华东, 李洪翠, 雷凯, 等. 热轧U型冷却工艺对冷轧带钢性能均匀性的影响. 金属世界, 2018(6): 70
- [5] 余伟, 卢小杰, 陈银莉, 等. 热轧带钢在常规层流冷却中温度不均匀性的有限元分析. 钢铁, 2011, 46(4): 44
- [6] 张军锋, 李建军, 张维, 等. 热轧工艺对MR T-2.5 SCA马口铁硬度的影响与防护措施. 山西冶金, 2022, 45(6): 1
- [7] 刘忠满, 任吉堂. 热轧带钢层流冷却系统的技术开发与应用. 河北理工大学学报(自然科学版), 2009, 31(4): 38
- [8] 孙超凡, 方园, 王雅晴, 等. 氮对镀锡钢板的强化作用. 金属热处理, 2020, 45(3): 64
- [9] 刘阳春, 傅杰, 吴华杰. 低碳铝镇静钢中AlN的沉淀析出. 钢铁研究学报, 2009, 21(6): 20

作者简介: 刘冠华(1990—), 男, 工程师, 河北省唐山市人, 轧钢工艺技术主管。2012年毕业于合肥工业大学材料成型及控制工程专业, 主要研究方向: 轧钢工艺质量管理。通信地址: 河北省唐山市乐亭县海港经济开发区盛世景苑315-1单元; E-mail: 987636452@qq.com。