

以普通 Q235 坯料生产 Q345 级中厚板的 TMCP 生产工艺研究

李艳梅¹ 朱伏先¹ 杜林秀¹ 刘相华¹ 王国栋¹
易敏² 范建文² 陈波³ 李光³

(1.东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室)
(2.首钢集团总公司技术研究院 3.首钢中厚板厂)

摘 要:按照综合利用细晶强化、位错强化、相变强化等手段,大幅度提高钢材强度的思路,在首钢中厚板厂生产线上以 Q235B 坯料,利用 TMCP 技术成功生产出性能合格的 Q345C 级中厚板。

关键词:TMCP 技术; Q235; Q345; 中厚板

1 前言

Q345 系列钢用于中厚板生产已有近 50 年的历史,在中板厂的产量中所占比例最大、涵盖的品种规格范围也最多。Q345 是在 Q235 成分的基础上,为提高强度和韧性,加入了适量的合金元素 Mn,有的厂家由于设备条件的限制,为保证性能,还要添加适量的 Nb、V、Ti 等微合金元素。但由于 Mn 含量较高,形成较多的 MnS 塑性夹杂物,造成带状组织严重,横纵向力学性能严重不均,Z 向性能较差,使其应用受到了很大限制。

因此,如果能够以普通 Q235 坯料代替 Q345,则从工艺性能上,不仅可以很大程度上减轻带状组织程度,减小横纵向性能差异,而且可以降低碳当量,从而提高钢材的韧性和焊接性。在经济效益方面,一方面可以简化炼钢工艺、节省合金元素的用量,降低生产成本(吨钢生产成本可降低 50~100 元);节约国家资源,有利于可持续发展。另一方面,钢材整体质量提升后,还有利于提高构件的承载能力,减少钢材用量,有利于增强钢材用户的市场竞争力,促进国民经济的良性循环。

2002 年 2 月起,在国家经贸委的资助下,东北大学轧制技术与连轧自动化国家重点实验室与首钢合作,开始了以 Q235 代替 Q345 为目标的超级钢中厚板生产工艺研究工作,现已成功开发出 20mm 以下厚度规格的 Q235 超级钢中厚板 TMCP 生产技术。

2 现场 TMCP 生产工艺试验

2.1 试验坯料及设备条件

试验材料为 220mm(厚)×1400mm(宽)×1900mm(长)的 Q235 钢连铸板坯,化学成分为 0.15~0.18C-0.16~0.22Si-0.54~0.62Mn-0.009~0.018P-0.005~0.028S。

在首钢中厚板厂设备改造前的 3340mm 轧机配合轧后 2 组简易水幕冷却条件下及改造后的 3500mm 轧机配合轧后管层流冷却设备条件下,先后共进行了 6 轮工业性试验,试验钢板成品厚度规格分别为 12mm 和 20 mm。

2.2 TMCP 工艺制度

粗轧阶段开轧温度为 1050~1100℃,道次压下率为 10~20%;精轧阶段道次压下率为 10~20%,待温厚度、开轧温度及终轧温度见表 1 所示。为加快温降速度,待温期间及精轧道次间采用机架高压水快速冷却,终轧后采用水幕或管层流设备快速冷却至终冷温度,冷却速度及终冷温度见表 1。

表 1 试验钢板的组织及力学性能检验结果

	规格 (mm)	待温厚度 (mm)	精轧开轧温度 (°C)	终轧温度 (°C)	终冷温度 (°C)	冷却速度 (°C/s)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)
3340mm 轧机 +2 组水幕	12	30~57	807~870	68~770	494~646	2~4	347~397	447~497	22~31
	20	45~60	820~830	742~755	665~710	2~4	330~350	458~470	30~31
3500mm 轧机 +管层流冷却	12	22~48	825~896	738~824	556~648	10~25	345~420	485~545	23~28.5
	20	42~61	818~864	763~833	480~690	10~20	330~375	475~520	23~32

3 试验结果及分析

试验钢板的主要工艺参数及力学性能检验结果如表 1 所示，试验数据表明，利用首钢中厚板厂改造前的 3340mm 中厚板轧机及轧后 2 组简易水幕冷却的设备条件，采用适当的 TMCP 工艺，可使 12mm 和 20mm 规格 Q235B 钢综合性能稳定达到 Q345C 以上水平，12mm 规格最高甚至可达到 Q390C 水平，铁素体晶粒度达到 9~9.5 级，但抗拉强度余量不大，造成钢板屈强比相对较高(0.72~0.8)。利用改造后的 3500mm 中厚板轧机及轧后管层流冷却设备条件，可使 12mm 和 20mm Q235B 中板的综合性能稳定达到 Q345C 以上水平，试验钢板不仅具有较高的强度和低温冲击韧性，而且具有较低的屈强比(0.69~0.77)和良好的延伸率(平均值 26.5%)。

3500mm 中厚板轧机及轧后管层流冷却设备条件下得到的试验钢板金相组织照片如图 1 所示，可以看出，12mm 规格试验钢板的微观组织由均匀细小的多边形铁素体和珠光体组成，铁素体平均晶粒尺寸为 10 μ m，带状为 3 级。20mm 规格试验钢板的微观组织由铁素体、和少量贝氏体组成，珠光体带状基本消失，铁素体的形状较不规则，部分铁素体边界不明显。试验钢板的 TEM 分析照片如图 2 所示，铁素体晶粒内位错密度较大，存在大量位错亚结构（见图 2 a），珠光体有退化现象（图 2 b）。

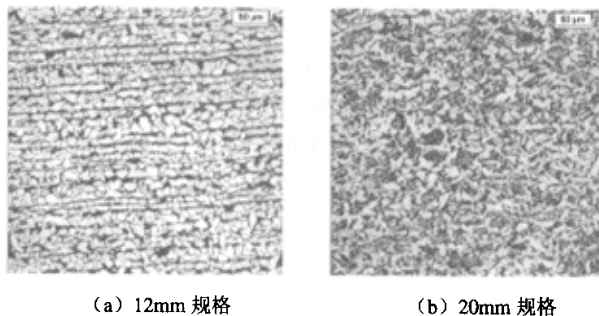
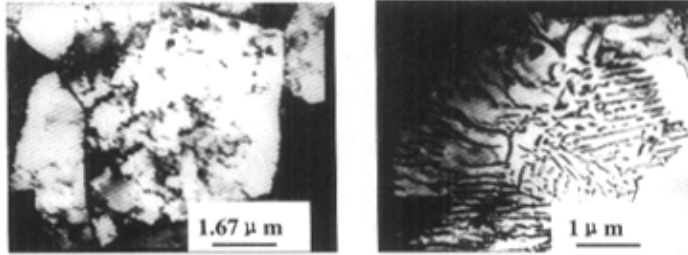


图 1 Q235 试验钢板的金相照片

由于铁素体中大量亚结构的存在，位错强化的比例增大，使材料强度明显提高。由于采用快速冷却和较低的终冷温度，过冷度增大，析出先共析铁素体时间短，铁素体量减少，珠光体量增多，增加相变强化的比例，相应提高了材料强度。20mm 规格钢板由于总变形量相对较小，铁素体晶粒细化对强度贡献相对较小，但由于组织中出现少量贝氏体，增加了相变强化的比例，使材料强度得到有效提高。珠光体退化、细化及均匀化对冲击韧性的有益作用可以抵消珠光体量增加的危害作用，从而使冲击韧性不但不降低，反而略提高。



(a) 铁素体中的位错亚结构 (b) 已发生退化的珠光体

图2 试验钢板的 TEM 照片

中厚板生产中,粗轧阶段的高温再结晶区轧制、主要是通过对加热粗化的奥氏体晶粒进行反复轧制、反复再结晶,获得均匀细化的奥氏体晶粒,为精轧阶段的控轧过程提供理想的组织基础。但它对钢材最终的铁素体-珠光体组织细化并不起决定性作用,真正起作用的是精轧阶段未再结晶奥氏体晶粒内应变累积的程度及其后的冷却过程。应变累积程度越大,奥氏体本身的晶内缺陷、形变硬化及残余应变所诱发的奥氏体/铁素体相变细晶机制越强,在精轧后的冷却过程中越容易形成细晶的铁素体和珠光体组织。

在 Gleeble-1500 热模拟机上得到的试验数据表明, Q235 钢的未再结晶温度偏低,且区间非常窄,要想完全避开部分再结晶区、实现单纯的未再结晶区 II 型控轧是十分困难的,因此,通过 TMCP 技术提高 Q235 钢的强韧性的关键是:充分利用高温再结晶区轧制获得细小、均匀的奥氏体晶粒,在部分再结晶区的低温区合理安排压下制度,严格控制精轧温度区间和最末几道次的变形量,最大限度地利用低温轧制产生的应变累积效应,得到接近未再结晶区轧制的细晶效果,并通过轧后快速冷却,促进奥氏体/铁素体相变,最终获得细晶的铁素体+珠光体组织。为了提高精轧阶段奥氏体部分再结晶区及未再结晶区内应变累积的百分数,选择合适的精轧开始温度及终轧温度是确定 TMCP 工艺的关键。

具体的精轧开轧温度的确定,一方面须根据轧后的冷却设备条件来确定具体的精轧温度区间:在控制冷却能力较弱时,必须采用通过低温轧制,通过变形累积来加强控制轧制效果,从而提高材料强度,但这无疑将加大轧机的负荷,且由于待温时间较长,降低了轧制节奏,从而影响产量;而在控制冷却能力较强时,则不须采用过低的精轧温度,可在控制轧制后通过快速冷却来加强控制冷却的效果,使材料强度得到有效提高,这样既可减轻轧机负荷,也有利于提高产量;另一方面须根据不同成品厚度和待温厚度而定,如成品厚度为 12mm 的钢板,待温厚度为 2.5~3 倍成品厚度,由于精轧道次数较多,精轧过程中的温降较快,不宜采用过低的精轧开轧温度,而成品厚度为 20mm 的钢板,待温厚度为 2~2.5 倍成品厚度,由于待温厚度较厚、精轧道次数较少,且考虑到钢板表面与心部温差较大,整个精轧阶段的温降幅度较小,因此宜采用相对较低的精轧开轧温度。

4 结论

- 采用适当的 TMCP 工艺,可以用 Q235B 坯料生产出 20mm 以下厚度规格的 Q345C 级以上水平的中厚板。成品钢板不仅具有较高的强度和低温韧性,而且具有较低的屈强比(0.69~0.77)和良好的延伸率(平均在 26.5%左右),铁素体平均晶粒尺寸达到 10~12μm。
- 试验结果表明,在轧后冷却设备能力较弱时,必须采用通过低温轧制来提高材料强度,而在轧后冷却设备能力较强的条件下,可以不必过分追求低温轧制,通过工艺参数的优化组合,在控

制轧制后配合快速冷却来使材料强度得到有效提高，这样既可减轻轧机负荷，也有利于提高产量。

- 材料力学性能得到大幅度提高，一方面是由于在进一步晶粒细化的基础上，增加了位错强化和相变强化的比例，另一方面是由于优化了各主要工艺参数，并使其实现了最佳配合；

参考文献：

- [1] 王国栋，400MPa 级超级钢的开发和利用[A]，新一代钢铁材料研讨会(NG STEEL' 2001)[C]，北京:中国金属学会，2001.299~306；
- [2] 杨忠民，普通碳素钢超细晶组织的形成[A]，新一代钢铁材料研讨会(NG STEEL' 2001)[C]，北京:中国金属学会，2001.283~286；
- [3] 杨平，Q235 碳素钢应变强化相变的基本特点及影响因素[J]，金属学报，2001，37(6):592~600.