

控轧控冷对低合金钢 Q355D 厚板组织和力学性能的影响

吕晓芳¹ 孙伟² 杜慧起²

(1 邢台职业技术学院资源与环境工程系, 邢台 054000; 2 天津中德应用技术大学机械工程学院, 天津 300350)

摘要 采用控制轧制工艺对 0.14% ~ 0.18% C, 1.40% ~ 1.60% Mn Q355D 钢 250 mm 连铸板坯进行热轧, 结果表明, 在粗轧温度 1 050 ~ 1 130 °C、精轧温度 920 °C、终轧温度 880 °C 控制轧制条件下, 终冷温度在 670 °C 以下生产的厚板组织细小均匀, 生产 70 mm 和 80 mm 规格厚板性能符合 Q355D 级别要求, 并且 Z25 断面收缩率 (RA) 为 58% ~ 64% 满足 Z25 方向 RA ≥ 25% 的要求。

关键词 低合金钢 Q355D 厚板 控轧控冷 力学性能 组织

Effects of Controlled Rolling and Controlled Cooling on Microstructure and Mechanical Properties of Low-Alloy Steel Q355D Heavy Plates

Lü Xiaofang¹, Sun Wei² and Du Huiqi²

(1 Department of Resources and Environmental Engineering, Xingtai Vocational and Technical College, Xingtai 054000; 2 School of Mechanical Engineering, Tianjin Sino-German University of Applied Science, Tianjin 300350)

Abstract The 250 mm casting slab of steel Q355D bearing 0.14% ~ 0.18% C and 1.40% ~ 1.60% Mn is hot-rolled by the controlled rolling process. The results show that the microstructure of rolled plate is fine and uniform by rough rolling at 1 050 ~ 1 130 °C, finishing rolling at 920 °C and final rolling at 880 °C, and the final cooling below 670 °C, the properties of the 70 mm and 80 mm thick plate can meet the requirements of Q355D steel grade and the Z25 reduction of area (RA) is 58% ~ 64% to meet the requirement of Z25 direction RA ≥ 25%.

Material Index Low Alloy Steel Q355D, Thick Plate, Controlled Rolling and Controlled Cooling, Mechanical Properties, Microstructure

高强高韧的低合金高强度厚板广泛应用于机械制造、车辆、风电设备等领域, 随着我国基础建设的不断加大, 对厚板的市场需求量不断增加, 且均朝大厚度、高强度和高功能化以适应各种恶劣环境的方向发展^[1-3]。

目前, 大多数厚板厂家均采用微合金化超厚钢锭为原料, 同时采用 TMCP 加正火热处理工艺来生产性能合格的厚板, 不仅成本高, 且成材率低、生产流程长。为了追求效益最大化, 多数企业采取降低生产成本、提高钢材质量, 开发出具有良好经济性的高性能厚板^[4-5]。结合轧钢厂现有装备条件开展研究, 以 Q355 系列级别厚板研发为目标, 采用 250 mm 厚板坯, 利用 3 500 mm、7 000 kN 轧制力双机架可逆四辊轧机通过控轧控冷工艺控制生产出具有高强度、低韧脆转变温度的低合金高强度钢厚板, 其强韧度满足 Q355D 要求。

1 试验方法

高炉铁水经转炉熔炼, 通过严格终点控制, 要求碳含量 ≥ 0.05%, 防止钢水过氧化, 减少增碳剂用量及带入的杂质。LF 精炼采用高碱度 (碱度 3.0 左

右) 白渣精炼, 时间 ≥ 15 min, 软吹时间 ≥ 8 min, 保证夹杂物充分上浮、聚集、长大和排除, 减少夹杂的有害影响; 板坯连铸全程保护浇注, 中间包过热度控制在 (30 ± 10) °C, 减少中心偏析, 过程中拉速平稳 (1.2 m/min), 防止卷渣和中心偏析, 辅以结晶器电磁搅拌 (电流为 350 A, 频率为 4 Hz), 减小中心偏析和疏松; 连铸板坯规格为 250 mm × 2 100 mm, 其化学成分见表 1^[6]。板坯经高温、低速、大压下轧制过程, 轧制速度 1.2 m/s; 道次分配: 粗轧 3 道, 精轧 7 道, 单道压下率 14% 以上, 轧制成成品尺寸为 70 mm × 2 000 mm 和 80 mm × 2 000 mm。

整个试验在实际生产线上完成, 轧制工艺温度控制如表 2 所示。试验过程中主要设备包括: 高炉、转炉、LF、板坯连铸机、步进式加热炉, 高压水除鳞机, 粗、精四辊可逆轧机、层流冷却装置, 十一辊全液压矫直机、2 台冷床, 火焰切割剪切线。根据目前的工艺设备条件, 其工艺流程为: 高炉铁水 → 100 t 转炉冶炼 → LF 精炼 → 250 mm × 2 100 mm 板坯连铸 → 加热 → 高压水除鳞 → 轧制 → ACC 冷却 → 热矫直 → 堆垛缓冷 → 表面检验 → 精整 → (探伤) → 性能检测 → 成品入库^[7]。

表 1 Q355D 钢板坯化学成分 / %

Table 1 Chemical composition requirement of steel slab Q355D / %

C	Si	Mn	P	S	Alt
0.14 ~ 0.18	0.20 ~ 0.40	1.40 ~ 1.60	≤ 0.015	≤ 0.015	0.020 ~ 0.040

表 2 70 mm 和 80 mm 厚板轧制工艺过程温度控制 / °C

Table 2 Temperature control in 70 mm and 80 mm plate during rolling process / °C

出炉	粗轧	精轧	终轧	终冷
1 080 ~ 1 130	1 050 ~ 1 130	920	880	670

按照 GB/T228-2010 金属材料室温拉伸试验方法,在钢板厚度的1/4处沿纵向截取拉伸试样,分别在钢板的表面、厚度的1/4处和心部沿横向截取金相试样,金相试样经研磨抛光、4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,采用蔡司 M2M 型金相显微镜观测其显微组织和夹杂物形貌;夏比冲击实验在 MTS-300 型冲击试验机上进行,力学性能测试在 MTS 万能试验机测试系统上进行。按照 GB/T228-2010、GB/T229-2007、GB/T232-1999、GB/T5313-1985 的要求,分别对试验钢进行室温拉伸试验、夏比摆锤冲击试验和 Z 向拉伸试验。

2 试验结果及分析

2.1 化学成分和气体含量

钢水中的 P、S、O、H、N 等元素在钢中以夹杂物形式存在,也会在凝固过程中产生偏析,这些均对力学性能和内部质量产生很大影响,因此为获得较好的厚板内部质量,确保钢板 I 级探伤合格,对钢水的纯净度提出更加严格的要求。试验钢的实际成分控制情况见图 1。由图 1 可见,化学成分波动小,尤其是碳的控制十分严格。成分范围控制比较窄,保证成品性能波动较小,P、S 含量低,有害杂质影响小,可以保证低温冲击和 Z 向性能。

图 2 为钢中气体含量检测结果,全氧含量较低,氮含量较高,H 含量各炉之间差异较大。总的来说,钢水洁净度较高,下一步应对氮含量加以严格控制。

2.2 力学性能

表 3 为试验钢在室温下不同部位的力学性能。从表 3 中可以看出,70 mm 和 80 mm 厚板力学性能良好,屈服强度、抗拉强度以及延伸率均达到标准要求,

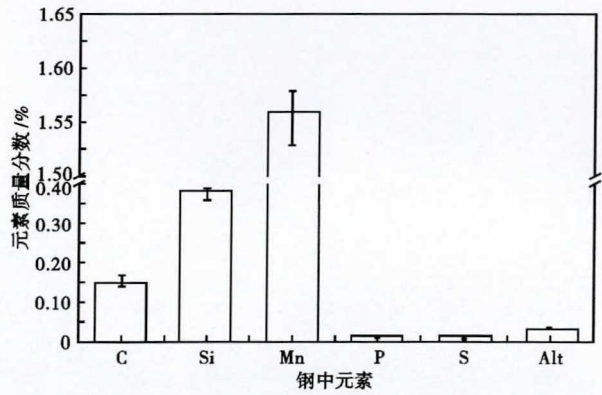


图 1 低合金钢 Q355D 成分控制

Fig. 1 Chemical composition control of low alloy steel Q355D

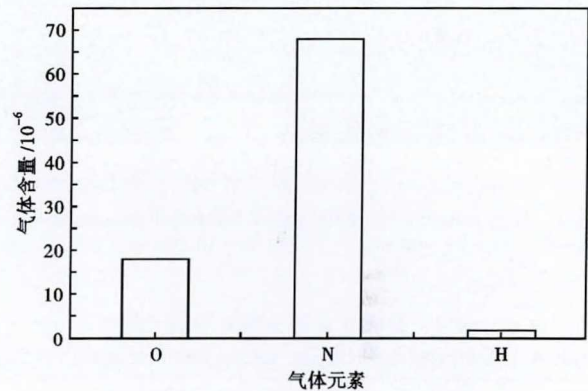


图 2 低合金钢 Q355D 气体含量

Fig. 2 Gas content in low alloy steel Q355D

Z 向和冲击性能很好, -20 °C 冲击值均有较大富余。

2.3 金相组织

图 3 为 70 mm 和 80 mm 规格低合金钢板金相组织。图 3(a,c,e) 为 70 mm 厚钢板边部、1/4 处和心部组织,可以看出,表层由于冷速快,为铁素体 + 贝氏体组织,1/4 处组织较均匀,有轻微的带状分布,心部偏析并未彻底消除。这是因为采用 ACC 层流冷却,冷却速度不均:表面冷速较大,出现了过冷组织;1/4 处冷却较为均匀,为正常的铁素体 + 珠光体,心部冷却较慢,偏析明显,形成异常组织。图 3(b,d,f)

表 3 Q355D 钢厚板力学性能

Table 3 Mechanical properties of thick plate of steel Q355D

规格 / mm	取样部位	R _m / MPa	R _{eL} / MPa	伸长率 / %	-20 °C 冲击功 / J				Z 向性能 (Z25) 断面收缩率 Z / %
					1	2	3	均值	
80	边部	520	345	24	87	85	120	97	
80	1/4 处	575	420	27	136	121	78	112	59.5, 59, 58
80	心部	530	350	27	96	101	88	95	
70	边部	565	400	26	97	95	117	103	
70	1/4 处	510	340	23	126	111	138	125	62.5, 64, 61.5
70	心部	525	355	26	98	85	104	96	
标准要求		470 ~ 630	≥ 325	≥ 22	≥ 34 (纵向)				≥ 25

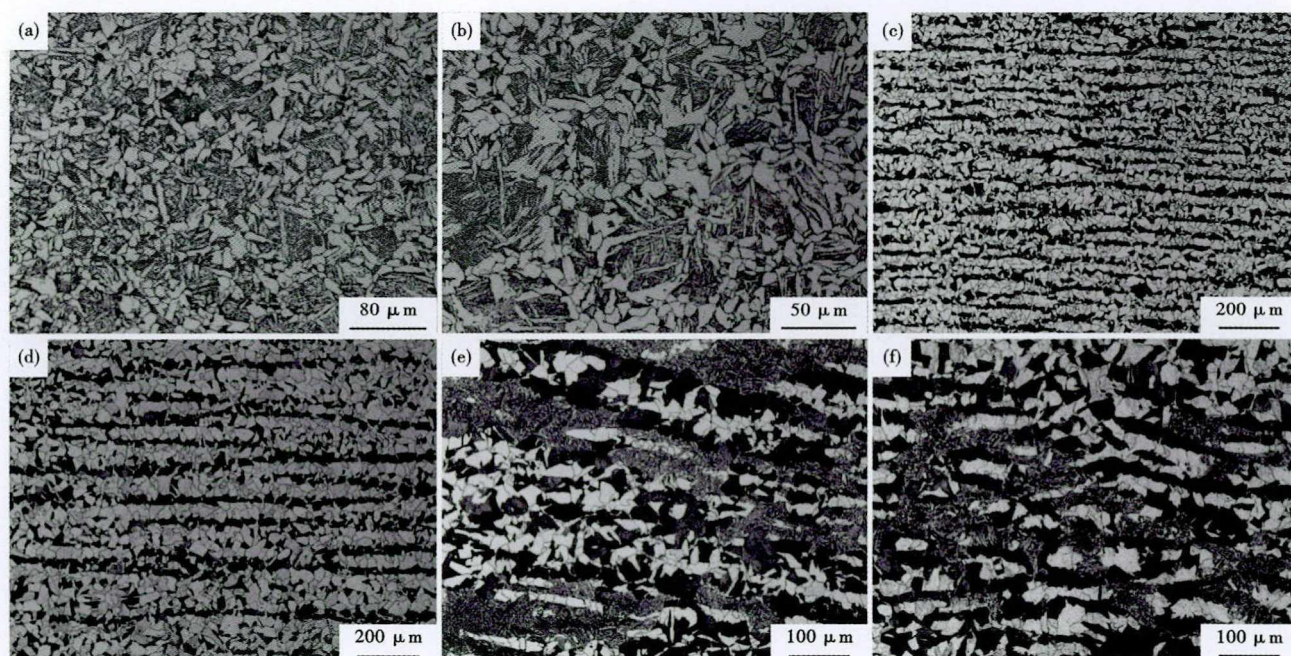


图 3 70 mm(a)(c)(e)和 80 mm(b)(d)(f)低合金钢 Q355D 厚板不同位置组织形貌:(a)(b)边部;(c)(d)1/4厚度;(e)(f)心部
Fig. 3 Microstructure morphology of different locations of low alloy steel Q355D 70 mm (a)(c)(e) and 80 mm (b)(d)(f) thick plate at (a)(b) surface;(c)(d) 1/4 thickness;(e)(f) center

表 4 厚板非金属夹杂物级别/级

Table 4 Nonmetallic inclusion rating of thick plate /rating

规格/mm	A类	B类	C类	D类	Ds类
70	-	-	-	1.0	2.5
80	0.5	-	-	2.5	-

为 80 mm 边部、1/4处和心部组织,总的来说,组织分布与 70 mm 厚钢板情况相同。

夹杂物的数量和形态是影响厚板使用性能的另一个重要因素。对低合金厚板试样中夹杂物进行评级,结果见表 4。

从表 4 中可以看出,成品夹杂物控制水平较好,A、B、C类夹杂很少,D类和Ds类较多。

厚板中夹杂物以细小分散的球状夹杂物颗粒为主,表明低合金厚板中的非金属夹杂物数量和形态控制较好,可以通过强化脱氧和精炼工艺,进一步提高钢水的纯净度。

2.4 结果分析与讨论

厚板轧制由于受限于压缩比,坯料内部组织疏松和内部偏析等问题难以解决,本研究最厚板坯只能选用 250 mm × 2 100 mm 规格。因此只能通过低速(轧速 1.2 m/s)大压下(单道压下率 14% 以上)轧制工艺,采用优化道次(粗轧 3 道/精轧 7 道)和压下率改进厚板心部性能,在保证压合铸坯内部缺陷条件下,就要实现晶粒细化,这也是保证厚板强韧

性的重要条件。

本研究用粗轧和精轧两阶段控制轧制,粗轧保证奥氏体再结晶区轧制,精轧保证奥氏体未再结晶区轧制,开轧温度在 1 050 ~ 1 130 °C,目的就是为细化奥氏体晶粒和破碎柱状晶,采用高温低速大压下轧制,使形变在厚度方向充分渗透至中心部分,以充分进行奥氏体再结晶,达到晶粒尺寸均匀细化。

为了保证厚板韧性,精轧设定在 920 °C,同时保证终轧温度 880 °C,目的是在合理控制每次压下量及轧制速度前提下,保证奥氏体未再结晶区的累积变形,在晶粒内部形成更多的滑移带,为铁素体的转变提供更多的形核位置,细化晶粒。为了强化轧制效果,对钢板进行轧后快冷,增大过冷度,降低形变奥氏体向铁素体和珠光体的相转变温度,进一步细化晶粒,得到细铁素体和细片状珠光体组织,最终提高强度和塑性。本研究采用 ACC 层流冷却降温,终冷温度 670 °C,为保证试验钢获得细小的铁素体 + 珠光体组织,一般通过 CCT 曲线确定钢种的开冷温度、终冷温度以及冷却速度,尤其厚板要综合考虑厚度方向组织、性能差异来设定冷却速度,避免铁素体转变前发生变形带、位错密度减少等回复现象,防止相变后铁素体晶粒较大,影响试验钢的韧性^[4-5,8-14]。

通过严格执行奥氏体再结晶区和奥氏体未再结

晶区两阶段控轧控冷工艺制度,并通过 ACC 冷却工艺,保证了奥氏体有足够的过冷度,在一定程度上抑制转变后的铁素体晶粒长大,本研究虽然厚板组织和性能均符合标准要求,但仍存在 ACC 冷却能力不足,厚度方向组织差异大等问题,因此后续工作一方面进一步提高板坯质量,优化轧制,提高性能稳定性,另一方面要进一步强化冷却水的控制,力求做到均匀强冷,使钢板沿整个厚度上获得较为均匀的组织,以提高其塑性和韧性。

3 结论

(1)低合金厚板实际成分波动小,P、S 含量低,

气体含量较低,钢水洁净度较高,可以保证低温冲击和 Z 向性能。

(2)低合金厚板试样表层组织为铁素体加贝氏体组织;1/4处组织较均匀,有轻微的带状分布;心部有明显的偏析,70 mm 试样组织分布与 80 mm 情况相同。

(3)70 mm 和 80 mm 低合金厚板不同部位的力学性能良好,其屈服强度、抗拉强度以及延伸率均达到标准要求,Z 向和冲击性能较好,-20 ℃ 冲击值均有较大富余。

参考文献

- [1] 耿明山,刘艳,黄衍林.大型特厚板坯料制造技术现状和发展趋势[J].中国冶金,2014,24(8):10-17.
- [2] 常跃峰,王祖滨,赵文忠.低合金高强度宽厚钢板的发展趋势[J].钢铁,2007,42(8):1-6.
- [3] 康永林.中国中厚板产品生产现状及发展趋势[J].中国冶金,2012,22(9):14+14.
- [4] 李万明,吴少鹏,李德军,等.海工钢特厚板的质量控制[J].辽宁科技大学学报,2018,41(1):7-13.
- [5] 李德发,梁宝珠,王世森,等.特厚锅炉和压力容器用钢 Q370R 的研制[J].热加工工艺,2017,46(8):91-93.
- [6] GB/T 1591-2018.低合金高强度结构钢[S].国家技术监督局.
- [7] 信海喜,孙伟.天钢生产厚板可行性分析[J].天津冶金,2019,22(4):33-35,41.
- [8] 龚立国.250 mm 特厚板 Q345D 热处理工艺研究[J].金属材料与冶金工程,2017,45(2):23-28.
- [9] 李德发,梁宝珠,王世森,等.特厚锅炉和压力容器用钢 Q370R 的研制[J].热加工工艺,2017,46(8):91-93.
- [10] 刘庆波,许少普,陈熙,等.水电用大厚度钢板 Q500DZ35 的开发[J].中国冶金,2019,29(8):64-70.
- [11] 高照海,唐郑磊,许少普,等.高精度塑料模具 718 钢特厚板的研发[J].轧钢,2016,33(5):18-21.
- [12] 杨东,唐郑磊,李红洋,等.低合金结构钢 Q345B 420mm 特厚板的研发[J].中国冶金,2012,22(1):12-14+31.
- [13] 袁恒,唐郑磊,朱成杰,等. A633GrD 结构钢特厚板的研发[J].炼钢,2012,28(3):7-10.
- [14] Chen Jia, Yongsong Shao and Lanhui Guo, et al. Mechanical Properties of Corroded High Strength Low Alloy Steel Plate[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172(9):106160-106165.

吕晓芳(1979-),女,硕士(2006年河北理工大学),讲师,2001年河北理工大学(本科)毕业,金属材料热处理和控轧控冷技术研究。E-mail:363405308@qq.com

收稿日期:2020-09-01

欢迎订阅 2021 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010