Q550D 高强度钢板组织及焊接性能分析

朱晓丽[1],张 军[1],高 军[1],柳 婕[1],李肃龙[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司销售分公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 包钢通过成分优化和轧制工艺的优化研制了工程机械用高强度钢Q550D。通过热影响区最高硬度、插销试验、斜Y坡口焊接裂纹试验对Q550D高强度钢的焊接性能进行分析,研究结果表明:Q550D钢板热影响区最高硬度(HV10)为297。插销试验结果表明,在中等拘束条件下,采用HS-70焊丝焊接20 mm厚Q550D钢板,不预热没有裂纹的产生。同时斜Y坡口焊接裂纹试验表明对于20 mm厚Q550D钢板,在不预热条件下焊接,两组试样表面裂纹率和断面裂纹率均为零。

关键词: Q550D; 焊接; 宽厚板; 显微组织
中图分类号: TG115.6 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2017)02-41-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.02.014

Analysis for Microstructure and Welding Performance of Q550D High Strength Steel Plate

ZHU Xiao-li[1], *ZHANG Jun*[1], *GAO Jun*[1], *LIU Jie*[1], *LI Su-long*[2]

(1. *CSP Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*;
2. *Sales Co. of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*)

Abstract: The high strength steel Q550D used in engineering machinery was developed by composition optimization and rolling process optimization in Baotou Steel. The welding performance of Q550D high strength steel was analyzed by the maximum hardness in heat affected zone, the implant test and the Y-slit type cracking test, and the results show that: The highest hardness (HV10) for heat affected zone of Q550D steel plate is 297. The result of implant test shows that under the condition of moderate restraint, Q550D steel plate with 20 mm thickness was welded by HS-70 welding stick, there is no crack without preheating. At the same time, the Y-slit type cracking test shows that under the condition of no preheating to weld Q550D steel plate with 20 mm thickness, the surface crack rate and the cross section crack rate of the two groups of samples are zero.

Key words: Q550D; welding; wide and thick plate; microstructure

Q550D是一种微合金低碳贝氏体钢,具有强度高、韧性好、耐磨、耐腐蚀、低温韧性、加工性能和焊接性能优良等特点,广泛应用于工程机械、煤矿机械、造船和钢结构等领域[1-4]。但由于Q550D使用环境恶劣,加之Q550D在生产过程中板形难以控制,生产稳定性较差,特别是其生产工艺和焊接质量对设备的使用寿命影响很大,而且Q550D钢强度高、塑性差,焊后易产生裂纹。因此包钢利用TMCP工艺生产的Q550D高强钢的工艺和焊接性能被广泛关注。本文对包钢生产的高强度钢的焊接性能进

收稿日期: 2017-02-28
作者简介: 朱晓丽(1988-),女,内蒙古赤峰市人,助理工程师,现从事金相检测工作。

行分析研究，为其在焊接领域的广泛应用提供指导。

1 成分设计与轧制工艺流程

1.1 成分设计

材料设计的核心是组织的设计，选择适宜的主控组织类型是材料设计的关键。对于屈服强度为550 MPa级高强度工程机械用钢可选择的组织类型很多，主要有传统的铁素体+珠光体钢、针状铁素体钢、低碳贝氏体钢。考虑到厚钢板的可焊性问题，传统的铁素体+珠光体钢显然无法满足要求。另外，考虑到厚钢板的高强度问题，普通的针状铁素体钢也不能满足要求。因此应主要考虑低碳贝氏体组织作为主控组织。

低碳贝氏体钢是近年来发展起来的一类新型钢种，具有优异的焊接性能，高的强度和韧性匹配。因此Q550D选择低碳贝氏体组织为主控组织。低碳贝氏体钢最新的组织设计是通过TMCP加回火工艺和其它有利于针状铁素体形成的因素，在奥氏体晶粒内较早形成少量的针状铁素体，分割奥氏体晶粒为若干小空间，在随后的板条贝氏体相变中，分割后的空间限制了板条束的长大，从而得到细化的组织，并通过回火工艺进一步均匀和细化组织。

碳的降低可显著提高相变温度，有利于低碳贝氏体铁素体的形成。降低碳可有效减少偏析以保证厚钢板组织的均匀性，减少后期固态相变带来的有害组织，故只添加0.08%～0.10%的C。此外，还要添加1.60%～1.80%的锰，锰的添加可补充由于降低碳带来的强化效果的损失，但是锰添加过多会带来钢种的锰偏析而造成M/A组织的产生，因此锰添加不易过高。

由于采用低碳的设计思想，而且添加的铌含量w[Nb]为0.03%～0.07%，因此减少了碳氮化铌的形成，从而提高了奥氏体中固溶铌的含量。固溶铌量的提高，升高了再结晶温度，从而可实现高温轧制，保证了高温时奥氏体的充分再结晶，改善了非再结晶区高温控轧效果。通过实现高温大压下，保证了厚钢板中心组织的细化。

铬、钼的添加是必要的，铬、钼均能增大过冷奥氏体的稳定性，提高奥氏体的淬透性，提升钢的综合力学性能。本试验中添加了0.10%～0.30%的钼，0.20%～0.40%的铬。为了改善该钢板的焊接性能，加入0.010%～0.020%的钛。为了增强析出强化的效果，加入0.04%～0.07%的钒。

对有害元素P、S含量提出严格的限定。提高钢水的洁净度，改善钢板的力学性能。

根据GB/T 1591—2008，《低合金高强度结构钢》要求[1]，Q550D钢板的化学成分见表1，力学性能要求见表2。

表1 Q550D化学成分要求(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ni	Cr	Mo	Ti	V	Als	B	C_{EV}
≤0.18	≤0.6	≤2.0	≤0.030	≤0.025	≤0.11	≤0.8	≤0.8	≤0.3	≤0.20	≤0.12	≤0.015	≤0.004	≤0.48

表2 Q550D力学性能技术要求

厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	纵向冲击功(-20℃)/J
≤100	≥550	670～830	≥16	≥47

1.2 工艺流程

包钢根据工程机械钢的客户需求，采用低碳成分设计并配以微合金技术，通过TMCP+回火工艺生产的工程机械钢板具有钢质洁净、高的强韧性、良好的冲击韧性和焊接性能等特性。

轧制方面，采用优化的铸坯加热曲线充分保证钢坯加热温度和均热时间，实现在铸坯长度、宽度和厚度方向的温度均匀一致。加热温度控制在1 180～1 250 ℃，保证铌的化合物充分溶解，使其在随后的轧制过程中析出，起到阻止奥氏体晶粒长大的作用。

轧机采用控轧控冷工艺保证组织和晶粒的均匀。轧制时加大粗轧道次变形量，严格保证精轧各道次变形量。粗轧开轧温度为1 160～1 200 ℃，单道次相对压下率至少有两道以上控制在25%～40%，使变形充分渗透，防止奥氏体晶粒不均，为后续加工过程做好组织准备。精轧开轧温度低于950 ℃，至少有两道压下率>20%以上，末道次压下率控制在10%以上，以增加相变时铁素体的形核率，保证晶粒细化效果。轧后钢板采用控制冷却，终冷温度≤700 ℃，得到晶粒细小的铁素体+珠光体组织。并结合现场生产实际，确定回火保温温度为600～700 ℃，保温时间根据钢板厚度的不同而不同。具体的生产工艺流程为:

铁水预处理→铁水脱硫→顶底复吹转炉冶炼→LF 精炼→RH 真空循环脱气→连铸→加热→除鳞→粗轧→精轧→矫直→冷却→切割→抛丸→回火→取样检验

包钢宽厚板生产线工程机械钢 Q550D 的成分见表 3。

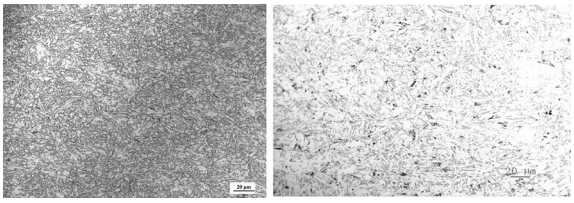
表 3　Q550D 的成分设计(质量分数)　%

C	Si	Mn	P	S	Nb + V + Ti	Cr	Mo
≤0.10	≤0.60	1.6 ~ 1.8	≤0.02	≤0.010	≤0.12	0.2 ~ 0.4	≤0.3

2　实验结果与分析

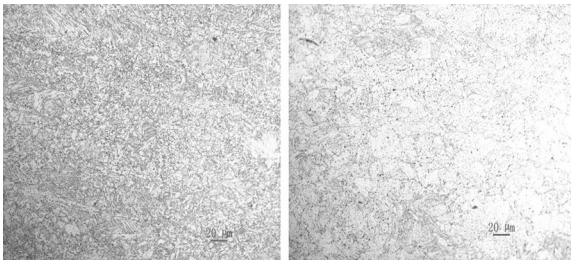
2.1　钢板的显微组织

分别从轧态钢板、回火态钢板上取样，磨制金相试样并抛光后用 4% 硝酸酒精浸蚀，通过对两种状态试样的显微组织观察发现，Q550D 高强度工程机械用钢轧态主要是低碳贝氏体组织，回火态显微组织为回火贝氏体。对于厚规格轧态钢板而言，其心部主要为粒状贝氏体加少量铁素体珠光体组织，部分金相组织见图 1 和图 2。



(a) 厚度 16 mm　　(b) 厚度 80 mm

图 1　轧态 Q550D 钢板厚度 1/2 处金相组织



(a) 厚度 16 mm　　(b) 厚度 80 mm

图 2　回火态 Q550D 钢板厚度 1/2 处金相组织

由图可见，16 mm 厚的轧态组织主要是低碳贝氏体加少量铁素体；80 mm 厚的轧态组织主要为粒状贝氏体加少量铁素体和少量珠光体，说明随着钢板厚度的增加，钢板心部的冷却速率下降，组织也发生变化。钢板经回火后组织主要是回火贝氏体加少量铁素体，厚规格钢板的心部珠光体发生了扩散分解，变为弥散分布且细小均匀，同时在轧制过程中，Nb、V 和 Ti 的加入起到了很好的强化作用。Nb、V 和 Ti 的碳氮化物相变析出，进一步细化晶粒，为随后热处理工艺及性能的改善提供了保障。

2.2　焊接性能评定

工程机械主要是通过焊接将大量钢板组合而成，因此可焊接性能是评价钢板是否能应用于工程机械制造的重要指标，选取 20 mm 厚 Q550D 对其焊接性能及其焊接工艺进行研究。研究项目主要有热影响区最高硬度、插销试验、斜 Y 坡口焊接裂纹试验。

2.2.1　热影响区最高硬度试验

焊接热影响区的最高硬度试验可以直观的反映出钢板的淬硬倾向，进而可以间接评价钢板的冷裂纹倾向。对试样焊 12 h 后进行制样并做 HV10 硬度测定，从熔合线开始向两侧每隔 0.5 mm 测一次硬度，其试验结果见表 4。结果表明，Q550D 钢板热影响区最高硬度(HV10)为 297，表明该钢焊接热影响区淬硬倾向不明显。

表 4　热影响区最高硬度值

预热温度/℃	HV10	HV(max)
常温	247、249、251、268、268、268、297、283、294、270、245、240、232、243、247	297

2.2.2　插销试验

插销试验试验按 GB9446 规定进行[8]，采用断裂准则进行评定。采用 HS - 70 焊丝焊接，在不同条件下 20 mm 厚 Q550D 钢插销临界断裂应力测定结果见表 5。由结果可知，对于 20 mm 厚的 Q550D 钢板，在不同条件下，试验载荷达到 640 MPa(20 mm 厚 Q550D 钢板实际屈服强度)，保载 24 h 未发生断裂，表明在常温条件下，20 mm 厚 Q550D 钢板的插销临界断裂应力均超过 Q550D 钢板实际屈服强度。插销试验结果表明，在中等拘束条件下，采用 HS - 70 焊丝焊接 20 mm 厚 Q550D 钢板，常温没有冷裂纹的产生。同时采用碳当量(C_{EV})来估算钢的淬硬倾向和冷裂纹倾向。根据 GB/T 24186—2009，《工程机械用高强度耐磨钢板》中碳当量公式[9]：

$$C_{EV}(\%) = w[C] + w[Mn]/6 + w[Cr + Mo + V]/5 + w[Cu + Ni]/15$$

Q550D 高强度钢板，$C_{EV} \leqslant 0.48\%$[7]。本文采用的化学成分经计算后 $C_{EV} \leqslant 0.44\%$，远远小于标准要求，保证了本次开发的 Q550D 高强度钢板焊接

性能良好。而且 Ti 的加形成的 TiN 可以改善耐磨钢板的焊接性。

表5 20 mm 厚 Q235B 底板插销试验结果

实验编号	预热温度/℃	实验载荷/MPa	实验结果
1	常温	640	
2	常温	640	
3	常温	640	保载 24 h
4	60	640	无断裂发生
5	60	640	
6	60	640	

2.2.3 斜 Y 坡口焊接裂纹试验

斜 Y 坡口焊接裂纹试验主要用于考核钢板焊接热影响区的根部裂纹情况，试验按照标准 GB4675.1 规定执行[10]。采用 HS－70 焊丝，试样焊后放置 48 h，进行表面和断面裂纹检查。20 mm 厚 Q550 钢板斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果见表6。

表6 斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果

预热温度/℃	间隙/mm	表面裂纹率/%	断面裂纹率/%
常温	2.02～2.05	0	0
	1.90～2.00	0	0

由结果可知，对于 20 mm 厚 Q550D 钢板，在常温条件下焊接，两组试样表面裂纹率和断面裂纹率均为零。试验结果表明，采用 HS－70 焊丝，80% Ar +20% CO_2 气体保护焊焊接 Q550D 钢板，在不预热的拘束程度较苛刻条件下焊接没有冷裂纹的产生。

3 结论

(1) 采用添加 Nb、V、Ti 等合金元素化学成分设计及 TMCP + 回火工艺设计可以得到低成本和性能优良的 Q550D 高强度结构钢。

(2) 焊接冷裂纹敏感性试验表明研制的 Q550D 高强度结构钢在中等拘束条件下，采用 HS－70 焊丝，80% Ar + 20% CO_2 气体保护焊焊接 Q550D 钢板，在不预热的拘束程度较苛刻条件下焊接没有冷裂纹的产生。

参 考 文 献

[1] He X L，Shang C J. High Performance Low Carbon Batnite Steel [M]. Beijing: Metallical Industry Press，2008.

[2] 尚成嘉，王学敏，杨善武，等. 高强度低碳贝氏体钢的工艺与组织细化 [J]. 金属学报，2003，39，(10)：10－19.

[3] 崔风平，孙玮，刘彦春，等. 中厚板生产与质量控制 [M]. 北京：冶金工业出版社，2008.

[4] Kotobu Nagai. Second Phase of Ultra Steel Project at NIMS [A]. Second International Conference on Advanced Structural Steels [C]，Shanghai，2004，15.

[5] 董瀚. 钢铁材料研发的技术发展 [J]. 中国冶金，2008，18(10)：2－7.

[6] 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.

[7] GB/T 1591—2008，低合金高强度结构钢 [S].

[8] GB 9446—1988，焊接用插销冷裂纹试验方法 [S].

[9] GB/T 24186—2009，工程机械用高强度耐磨钢板 [S].

[10] GB 4675.1—1984，焊接性试验斜 Y 型坡口焊接裂纹试验方法 [S].

(上接第31页)

参 考 文 献

[1] EN 13674.1—2011，46kg/m 及以上 T 型钢轨 [S].

[2] TB/T 2344—2012，43kg/m～75kg/m 钢轨订货技术条件 [S].

[3] 智建国，刘平，李仙华. UIC54 钢轨用 900A 钢的研制 [J]. 炼钢，2003，19(5)：22.

[4] DIN 50602—1985，钢中氧化物洁净度检验标准 [S].