

水电站座环用 S500Q-Z35 钢 245 mm 特厚板的热处理工艺

唐郑磊^{1,2} 许少普^{1,2} 陆岳璋² 李忠波^{1,2} 高照海^{1,2} 杨阳²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083;2 南阳汉冶特钢有限公司钢研所,南阳 474500)

摘要 S500Q-Z35 钢(%:0.13C,0.25Si,0.007P,0.001S,0.010Al,0.39Cr,0.92Ni,0.44Mn,0.02Nb,0.01Ti,0.54Ceq)245 mm 板由 KR 脱硫铁水-120 t 转炉-LF-VD-42 t 模铸-轧制-热处理工艺生产。根据控制钢的晶粒长大原理,测定的 CCT 曲线和临界厚度,以及工艺试验,得出 S500Q-Z35 钢 245 mm 特厚板经快速升温至 930 °C,保温 2.0 min/mm,快冷至 670 °C 的预淬火,快速升温至 880 °C,保温 2.4 min/mm,循环水+气体搅拌冷至室温的亚温淬火,620~630 °C,保温 4 min/mm,空冷至 400 °C 压平的回火处理,钢板表面组织为索氏体,其他部位为回火贝氏体+铁素体,具有良好的综合机械性能,钢板 Z 向性能良好。

关键词 S500Q-Z35 钢 245 mm 特厚板 亚温淬火 力学性能

Heat Treatment Process of 245 mm Heavy Plate of Steel S500Q-Z35 for Seat Ring of Hydro-Power Station

Tang Zhenglei^{1,2}, Xu Shaopu^{1,2}, Lu Yuezhang², Li Zhongbo^{1,2}, Gao Zhaohai^{1,2} and Yang Yang²

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Steel Research Institute, Nanyang Hanye Special Steel Co Ltd, Nanyang 474500)

Abstract 245 mm plate of steel S500Q-Z35 (%:0.13C, 0.25Si, 0.007P, 0.001S, 0.010Al, 0.39Cr, 0.92Ni, 0.44Mo, 0.02Nb, 0.01Ti, 0.54Ceq) is produced by KR desulphurized hot metal-120 t BOF-LF-VD-42 t ingot casting-rolling-heat treatment process. According to principle of control of grain growth, the measuring CCT curves and critical thickness, as well as process test are carried out, it is obtained that with pre-quenching process-rapidly heating to 930 °C for 2.0 min/mm, quickly cooling to 670 °C, the sub-critical quenching-rapidly heating to 880 °C for 2.4 min/mm, with circle water + gas stirring cooling to ambient, and tempering treatment at 620~630 °C for 4 min/mm, air cooling to 400 °C and flatting, the surface structure of 245 mm heavy plate of steel S500Q-Z35 is sorbite, the structure in other parts is tempered bainite + ferrite, it has better comprehensive mechanical properties and has better properties of plate Z-direction.

Material Index Steel S500Q-Z35, 245mm Heavy Plate, Sub-Critical Quenching, Mechanical Properties

2013 年中国长江三峡集团公司即将在白鹤滩、乌东德分别装机1 600万千瓦和1 000万千瓦的两座水电站,水电站的水轮机座环设置需用特厚板钢 S500Q-Z35 材料。座环由两块环形部件与若干片固定导叶组成,构成从蜗壳到导水机构间通道的结构部件。据悉原计划采用 S550Q(Z35) 钢板,迪林根试制的 220 mm 厚试板性能检测结果各项性能指标优异,但焊接达不到要求。之后三峡水电提高标准 Ceq≤0.6% 的 S550Q(Z35)、德国 ReinerBrach 提供 260 mm 厚 Ceq≤0.6% 的 S500Q,冲击韧性及抗层状撕裂性能不稳定。由于目前国内外对 S500Q 特厚板的开发和研究尚未完全,并且对此特厚钢板热处理工艺的研究较少,因此,对其进行热处理工艺的试验研究。

1 热处理工艺研究材料与性能要求

对于厚度大于 150 mm 的 S500Q/Q500 钢板,其力学性能应满

足 EN10025-6:2004 表五中厚度 100~150 mm 钢板规定,碳当量 Ceq 应满足 EN10025-6:2004 表 2-4 中厚度 100~150 mm 钢板规定。同时钢板性能应参照三峡工程技术规范《抗层状撕裂钢板技术条件》,碳当量应满足该标准要求。具体要求见表 1。汉冶特钢根据性能要求,设计成分见表 2。

S500Q-Z35 过程工艺路线:铁水→KR 脱硫→120 t 转炉→LF+VD→42 t 水冷模模铸→钢锭加热→一次轧制(开坯)→加热→二次轧制→ACC→堆冷→热处理→精整→检验→入库^[1]。

2 S500Q-Z35 热处理工艺研究与设计

2.1 S500Q-Z35 热处理的加热保温控制原理

表 1 S500Q-Z35 钢板的技术要求

Table 1 Standard requirement for plate of steel S500Q-Z35

钢板厚度/ mm	R _m / MPa	R _e / MPa	伸长率/ %	-20 °C KV2 /J	Z 向/%	弯曲试验 180° b=2 a	Ceq /%
245	540~720	≥440	≥17	≥27	≥40	d=3 a	<0.60

表 2 S500Q-Z35 钢设计成分 /%

Table 2 Designed chemical composition of steel S500Q-Z35 /%

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Ceq
0.13	0.25	0.94	0.007	0.001	0.010	0.39	0.92	0.44	0.024	0.010	0.54

加热过程中,当钢的温度大于 A_{c1} 温度时,奥氏体则在铁素体-碳化物的边界开始形核,形核率高,初始奥氏体晶粒很细,若温度持续升高或在该温度下进行长期保温,则奥氏体晶粒会不断长大。加热速率越大,奥氏体在高温下停留时间越短,晶粒越细。故对于 S500Q-Z35 钢,在设备最大加热能力情况下,以最快速率升温,保持其较高的过热度,并控制保温温度及保温时间,来保证其晶粒细化程度。

2.2 S500Q-Z35 临界厚度的确定

将 $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 试样以 $0.05 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 加热到奥氏体化,再以同样的速率缓冷至低温,所得的 S500Q-Z35 加热、冷却时的温度-膨胀量曲线,在曲线上的拐点做切线,切点即为转变点,得 A_{c1} 、 A_{c3} 、 A_{r1} 、 A_{r3} 温度分别为 795 、 882 、 823 、 $760 \text{ }^\circ\text{C}$ 。然后将试样加热到 $(A_{c3} + 33 \text{ }^\circ\text{C})$ 即 $920 \text{ }^\circ\text{C}$ 的奥氏体化温度,保温 5 min ,然后分别以 $0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 25, 30 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,测定不同冷却速率的膨胀量-温度曲线,结合金相观察得到钢的连续冷却转变 (CCT) 曲线如图 1。

试验结果表明,在以 $0.3 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率冷却至低温时,组织为铁素体 + 贝氏体;以 $1 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率冷却至低温时,组织为贝氏体,即形成多边形铁素体的临界冷却速率为 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$;以 $5 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率冷却至低温时,组织为贝氏体 + 马氏体;以 $20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率冷却至低温时,组织为马氏体,要得到马氏体,则冷却速率必须大于 $20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ [2]。

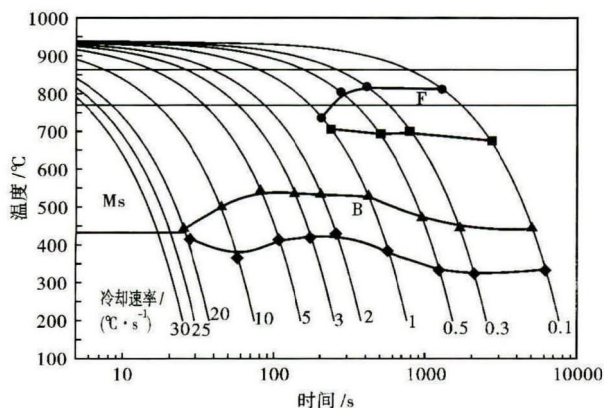


图 1 S500Q-Z35 钢的 CCT 曲线
Fig. 1 CCT curves of steel S500Q-Z35

然后通过建立温度场数值计算模型,确定临界厚度,对于 $(\text{mm}) 200 \times 2500 \times 5000$ 尺寸特厚板(根据淬火水槽冷却能力模拟, 200 mm 厚钢板水淬时钢板心部冷却速率约为 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$),综合考虑计算精度和计算时间,计算区域被划分成 84556 个节点和 381247 个四面体。

图 2 为 200 mm 特厚板表面、 $1/4$ 厚度以及心部处的冷却曲线。通过对图 2 中 $610 \sim 820 \text{ }^\circ\text{C}$ 钢板表面冷却曲线进行拟合得出,表面冷却速率约为 $5.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。根据 CCT 曲线,冷却速率为 $5.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,特厚板表面获得贝氏体组织和马氏体组织,而心部此时冷却速率为 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$,因此对于 S500Q-Z35 特厚板,淬火过程中厚度 $1/2$ 处获得贝氏体组织,厚度不应大于 200 mm ,即保证钢板厚度 $1/2$ 处得到贝氏体组织的极限厚度为 200 mm 。随着板厚的增加,为使心部获得贝氏体组织,需要增加表面冷却强度。但是表面冷却强度的增加,导致表面处冷却速率进一步增强,可能会使特厚板表面处产生马氏体组织。因此对特厚板表面马氏体组织形成情况进行研究,厚度小于 250 mm 时,特厚板表面的冷却速率大于 $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$,根据 CCT 曲线可知,特厚板表面处将产生马氏体组织。

2.4 S500Q-Z35 组织控制

经模拟计算, S500Q-Z35 厚度为 50 mm 时,在 $860 \sim 720 \text{ }^\circ\text{C}$ 以 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 左右的冷却速率冷却,在此高温范围内的此冷却速率起到了延迟奥氏体的分解,抑制了铁素体形成的作用,也使钢板获得了以贝氏体为主的组织;但钢板大于 50 mm 时,在 $860 \sim 720 \text{ }^\circ\text{C}$ 的平均冷却速率低于 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$,难以保证得到以贝氏体为主的组织,需加速冷却方可保证其组织

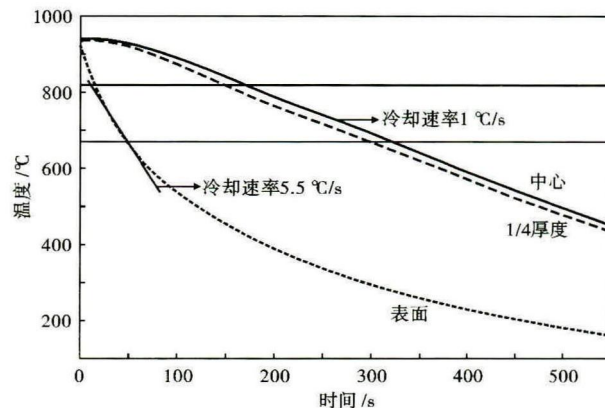


图 2 S500Q-Z35 钢 200 mm 特厚板不同部位的冷却曲线
Fig. 2 Cooling curves in different parts of 200 mm heavy plate of steel S500Q-Z35

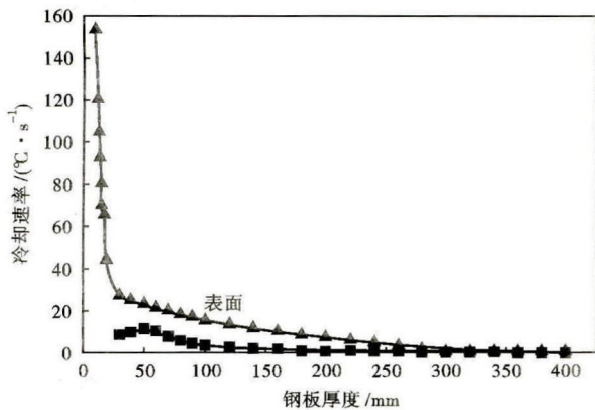


图 3 淬火水槽中钢板厚度对冷却速率的影响

Fig. 3 Effect of plate thickness on cooling rate of plate in quenching tank

为贝氏体。根据汉冶特钢淬火水槽的冷却能力(冷却温度从 880 ~ 610 °C), 245 mm 的钢板表面冷却速率约为 5.5 °C/s, 此时钢板厚度 1/2 处的冷却速率为 0.81 °C/s, 不同厚度钢板在淬火水槽中冷却速率见图 3。

模拟计算 200 mm 厚 S500Q-Z35 在水淬时, 钢板中心冷却速率约为 1 °C/s, 这与多边形铁素体的临界冷却速率相同, 这表明即使是水淬, 要避免形成铁素体是很难达到的, 245 mm 的 S500Q-Z35 钢板在淬火水槽中表面冷却速率约为 5.5 °C/s, 此时钢板厚度 1/2 处的冷却速率为 0.81 °C/s, 表面冷却速率大于 5 °C/s 会出现马氏体组织, 中心冷却速率为 0.81 °C/s, 稍小于 1 °C/s 会产生部分铁素体组织, 当然产生 2% 多边形铁素体对机械性能没有显著的影响(详见表 3), 200 mm 板厚为 100% 贝氏体时性能与 250 mm 时含有 2% 比例的铁素体的贝氏体钢的性能无明显差异。

如果欲使钢板成为单一的马氏体或贝氏体, 粗大的原奥氏体晶粒将转变成板条尺寸粗大的单一马氏体或贝氏体, 这对韧性的提高不利, 且由于冷却能力的限制也无法得到单一的马氏体; 但如果以适当的淬火速率进行冷却时, 在过冷奥氏体中由最先形成的铁素体或贝氏体首先把奥氏体晶粒分割成许多小块, 随后过冷到 Bs 或 Ms 点以下, 在已经被分割

表 3 铁素体所占比例对 S500Q-Z35 钢板拉伸、冲击性能的影响
Table 3 Effect of ferrite ratio on tensile properties and impact toughness of plate of steel S500Q-Z35

冷却速率/ (°C · s ⁻¹)	模拟板厚/ mm	显微组织/ %	R _{el} / MPa	R _m / MPa	A/ %	-20 °C KV2 J(Avg)
1	200	100B	550	692	25	213
0.78	250	2F + 98B	558	690	26	203

表 4 淬火温度对 S500Q-Z35 钢力学性能的影响
Table 4 Effect of quenching temperature on mechanical properties of steel S500Q-Z35

淬火温度/ °C	回火/ °C	R _{el} / MPa	R _m / MPa	A/ %	-20 °C KV2 平均值/J
930	620	640	770	18	43
900	620	550	680	21	88
880	620	500	630	23	164
850	620	450	580	24	201
830	620	400	520	25	73

的小块内形成细小的贝氏体或马氏体, 得到板条马氏体或贝氏体 + 铁素体的混合组织, 提高了韧性。但实际生产中特厚板的冷却速率是不能有效的控制的, 那么只有通过两相区的亚温淬火, 保留部分未溶的铁素体阻止已转变的奥氏体长大, 且由于钢板出炉到入水前有 3 min 的吊运时间, 此时在贝氏体相变前, 在晶内形成的不同取向的晶内铁素体, 把奥氏体一定量的晶粒分割成多个区域, 并在后期冷到贝氏体转变温度后, 被分割的各区内不同取向亚晶界上的析出物促使贝氏体在各亚晶界形核, 亚晶的取向差引起各亚晶贝氏体束方向不同, 并且各束贝氏体的长大过程受亚晶界的限制^[3]。故先用电阻炉进行试验, 结果见表 4。

若两相区淬火的温度过低, 则钢中将残存大量块状的未溶铁素体, 使组织中出现严重的条带状组织, 反而会降低钢板的低温冲击韧性, 造成力学性能的不均匀。因此, 两相区淬火温度不能过低, 应该提高到两相区的一较高温度, 使粗大的铁素体转变为奥氏体, 剩余部分未溶的铁素体细小均匀分布, 且这些细小、均匀分布的铁素体分割奥氏体, 可以阻碍奥氏体晶粒的长大^[4], 结合钢板在吊运入水期间先形成的晶内铁素体, 最终使调质后的钢板的组织为回火状态的细小贝氏体和少量弥散分布的细小未溶铁素体。

实际热处理过程中通过预淬火工艺来使轧制过程“二道火”轧制保证的细化晶粒更加细化, 避免粗晶粒遗传; 也可以减少奥氏体中溶入的合金碳化物, 未溶的稳定碳化物阻止了奥氏体晶粒长大^[5]。综上所述, 详细热处理工艺见表 5。

3 性能检测

检验过程按 EN10025-2:2004 执行, 钢板的力学性能试件取样位置及试样制备按照标准 GB/T5313-2010 及 GB/T2975-2010 规定进行, 低温冲击韧性试验按 GB/T229-2007 标准进行, 拉伸性能试验按 GB/T228-2010 标准进行, 弯曲性能按 GB/T232-2010 标准进行, 检测结果如表 6。S500Q-Z35 钢板厚度

截面上的金相组织如图 4。

上述试验结果可见,碳当量 C_{eq} 为 0.54% 的 245 mm 厚 S500Q-Z35 钢板具有良好的综合性能,弯曲性能良好,强度适中,塑性储备充足,低温韧性优良,钢板 Z 向性能良好,断面收缩率 40% ~ 49.5%,表面为索氏体,其他为 $B_{\text{回}} + F$ 组织,钢板头尾性能均匀,有良好的各向同性,各项性能及指标均满足大

表 5 S500Q-Z35 钢板优化的热处理工艺

Table 5 Optimum heat treatment process of plate of steel S500Q-Z35

工艺类型	工艺参数
预淬火	最快速率升温, 930 °C, $T = 2.0$ min/mm, 快冷至 670 °C
亚温淬火	最快速率升温, 880 °C, $T = 2.4$ min/mm, 循环水 + 气体搅拌冷却至室温
回火	620 ~ 630 °C, $T = 4$ min/mm, 空冷至 400 °C 带温压平

表 6 S500Q-Z35 钢板机械性能

Table 6 Mechanical properties of plate of steel S500Q-Z35

R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	-20 °C KV2/J			-40 °C KV2/J			冷弯	板厚位置	Z/%	板宽位置	头尾位置
490	591	24	243	257	236	163	171	109	OK	表面	43.0		
487	595	23	190	151	164	150	151	136	OK	1/4 厚	45.0	1/4	
478	587	20	140	127	130	110	98	100	OK	1/2 厚	44.0		头部 T
483	589	23	135	191	178	133	162	185	OK	表面	49.0		
486	587	23	158	144	146	91	119	138	OK	1/4 厚	42.5	1/2	
490	584	21	158	121	89	89	69	98	OK	1/2 厚	48.0		
483	598	23	165	200	235	151	171	159	OK	表面	45.0		
475	577	22	166	212	197	144	168	155	OK	1/4 厚	44.0	1/4	
483	587	21	210	180	205	160	178	180	OK	1/2 厚	44.0		尾部 W
488	590	23	156	200	223	132	170	186	OK	表面	47.0		
490	598	23	190	180	180	136	205	104	OK	1/4 厚	46.0	1/2	
479	587	20	210	180	205	160	178	180	OK	1/2 厚	46.0		

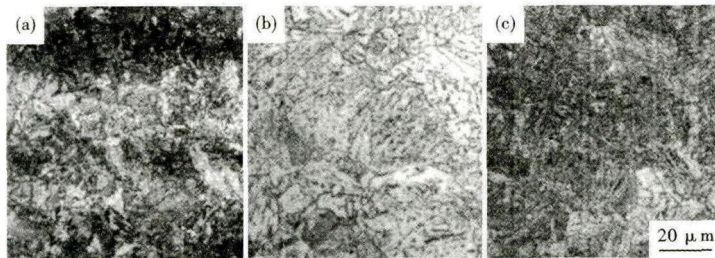


图 4 S500Q-Z35 钢板的组织形貌:(a) 表面,索氏体;(b) 1/4 厚度,回火贝氏体 + 铁素体;(c) 1/2 厚度,回火贝氏体 + 铁素体

Fig. 4 Structure morphology of plate of steel S500Q-Z35: (a) surface, sorbite; (b) at 1/4 thickness, tempered bainite + ferrite; (c) at 1/2 thickness, tempered bainite + ferrite

型水电机组抗撕裂钢板用钢要求。

4 结论

(1) S500Q-Z35 钢板临界生产厚度为 200 mm 时中心冷却速率约为 1 °C/s,这与多边形铁素体的临界冷却速率相同,即钢板厚度大于 200 mm 的特厚 S500Q-Z35 钢板即使是水淬,要避免形成铁素体是很难的(2% 多边形铁素体对机械性能没有显著的影响)。

(2) 通过亚温淬火,在过冷奥氏体中由最先形成的铁素体,首先把奥氏体晶粒分割成许多小块,随后过冷到 B_s 点以下,在已经被分割的小块内形成细小的贝氏体,得到贝氏体 + 铁素体的混合组织,以提高韧性。

(3) 碳当量 C_{eq} 为 0.54% 的 245 mm 厚 S500Q-Z35 钢板在经过预淬火(930 °C, $T = 2.0$ min/mm,快冷至 670 °C)-亚温淬火(880 °C, $T = 2.4$ min/mm,水槽冷至常温 200 °C 以下)-回火(620 ~ 630 °C, $T = 4$ min/mm,空冷)处理后,表现出良好的综合性能,钢板表面为索氏体,其他为 $B_{\text{回}} + F$ 组织,钢板头尾性能均匀,有良好的各向同性,各项性能及指标均满足大型水电机组抗撕裂钢板用钢要求。

参考文献

- [1] 唐郑磊,高照海. HG785D 塔式起重机用高强特厚焊接钢板的研发[J]. 轧钢,2013,30(5):10-14.
- [2] 孟庆勇,王福明,李长荣,等. 12Cr2Mo1R 特厚板正火过程中贝氏体组织控制[J]. 材料热处理学报,2014,35(5):109-114.
- [3] 隋铁,丛津功,刘明. 亚温调质在超低碳贝氏体钢 HG7850DB 上的应用研究[C]. 第十一届全国轧钢信息网中厚板生产技术交流会,辽宁鞍山:2004 年.
- [4] 庞辉勇,谢良法,李经涛. 提高 3.5Ni 厚钢板低温冲击韧性的研究[J]. 压力容器,2009,26(10):5-9.
- [5] 唐郑磊,许少普. 特厚桥梁钢板 Q370qE-Z35 的开发研究[J]. 钢铁,2012,47(5):82-86.

唐郑磊(1985-),男,硕士(北京科技大学),主任工程师,2008 年武汉科技大学毕业,特厚板研发和热处理工艺研究。
E-mail: tangzpl@163.com

收稿日期:2014-12-03