

国产 WDB620 高强钢在冶勒水电站压力钢管制造中的应用

陈 霖 ,栗皓维

(中国水利水电第七工程局机电安装分局 四川 彭山 620860)

摘要 :介绍国产 WDB620 高强钢在冶勒水电站压力钢管中的应用及其材质特性和相关要求 ,对制作中采用的焊接方法的优缺点进行比较选择 ,介绍在设计要求和性能限制下不同焊接材料的选择 ,对焊接过程的施工工艺和质量控制的方法进行探讨。通过力学性能对比、金相组织分析和超声波质量检查 ,表明国产 WDB620 高强钢在冶勒水电站压力钢管制造中的应用是成功的 ,所提出的一些关键施工技术是可靠、经济和科学的 ,值得在其他电站中推广应用。

关键词 :WDB620 高强钢 ;埋弧焊 ;冶勒水电站 ;施工技术

中图分类号 :TG142.2 文献标识码 :B 文章编号 :1006-764X(2006)S2-0052-04

国产 WDB620 高强钢作为新一代焊接无裂纹钢 ,由邯钢集团舞阳钢铁有限公司研制 ,该钢材与国外 WELTENC62 ,NK-HITEN610U2 ,ASTMA514F 为同等级钢材。在 WDB620 高强钢出现前 ,水工金属结构高强钢压力钢管普遍都是使用以上 3 种进口钢材 ,国家每年要花费大量外汇从国外进口。新一代国产 WDB620 高强钢出现后 ,在水电站压力钢管中逐渐被大量使用。据了解到目前为止 ,WDB620 高强钢在水电站压力钢管中大量使用的有四川省石棉县冶勒水电站 ,其用量约 4 329 t ,其次是福堂电站调压井 ,用量约 1 560 t。该钢材在其他电站中采用的都是焊条电弧焊焊接 ,采用埋弧自动焊焊接方法此前未见相关的文献报道。在冶勒水电站压力钢管的制造过程中 ,为保证压力钢管焊接质量的可靠性满足工期要求 ,埋弧自动焊的焊接量达到了 96% 以上 ,极大地提高了工程效率。笔者对埋弧自动焊焊接国产 WDB620 高强钢的施工工艺、施工工艺装配和各项焊接工艺参数进行了摸索和试验 ,并对该钢材的可焊性、抗裂纹敏感性和焊缝微观组织等进行初步研究 ,掌握了该钢材焊接过程中的一些基本规律和各项焊接工艺参数 ,为在其他电站中推广应用埋弧自动焊焊接国产 WDB620 高强钢提供了参考 ,同时也加快了新一代国产 WDB620 无裂纹高强钢在水电施工中的应用步伐。

1 工程简介

冶勒水电站压力钢管为地下埋藏式 ,管道全长

1 796.927 m ,其中主管长 1 706.927 m ,支管长 90 m。主管直径 3.4 m ,支管直径 2.2 m。设计水头 700 m。压力钢管制作工程量约为 5 720 t ,其中 Q345C 钢的质量约 1 391 t ,国产 WDB620 钢的质量约 4 329 t ,板厚在 22 ~ 70 mm 之间。

2 WDB620 高强钢的材质特性及相关要求

2.1 WDB620 高强钢的材质特性

WDB620 为非调质超低碳贝氏体钢 ,是在 CF 钢基础上发展起来的新一代焊接无裂纹钢。WDB620 钢通过微合金和控轧工艺 ,综合利用晶粒细化、析出强化与位错强化 ,使钢的屈服强度不小于 490 MPa。该技术突破了只有采用淬火回火才能生产综合性能良好的高强度钢的传统观念 ,WDB620 高强钢是低合金高强钢自 20 世纪 70 年代以来的最新发展成果 ,被誉为 21 世纪高强钢的发展方向。

WDB620 高强钢主要是通过降低材质中 C ,P ,S 的含量、适当选用合金元素、提高钢的纯净度和采用微合金化技术来保证该钢种优良的焊接性能 ,其化学性能和力学性能见表 1 ~ 2。

表 1 WDB620 钢化学质量成分(熔炼)					%
C	Si	Mn	P	S	Cu
≤0.07	0.15 ~ 0.40	1.00 ~ 1.60	≤0.015	≤0.010	≤0.30
Ni	Cr	Mo	V	Nb	B
≤0.50	≤0.30	≤0.30	≤0.08	≤0.08	≤0.003

作者简介 陈霖(1964—)男 ,四川武胜人 ,高级工程师 ,从事水电站机电设备安装工作。

表 2 WDB620 钢的力学性能

屈服强度 $R_{el}/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	抗拉强度 $R_m/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	伸长率 $A/$ %	冷弯试验 180°	-20℃纵向 冲击功/J
≥ 490	620 ~ 730	≥ 19 (5 号试件, $c \leq 16 mm$)	$d = 3.0a$	≥ 47
≥ 490	620 ~ 730	≥ 27 (5 号试件, $c > 16 mm$)	$d = 3.0a$	≥ 47
≥ 490	620 ~ 730	≥ 19 (4 号试件, $c > 20 mm$)	$d = 3.0a$	≥ 47

注 表中 d 为弯心直径, a 为试件厚度, c 为拉伸试验时试件的延伸长度。

2.2 相关要求

根据邯钢集团舞阳钢铁公司研制报告中的试验结果, WDB620 钢作为压力钢管使用, 无需考虑预热或后热同样能满足焊接接头强度、冷弯及韧性的技术要求, 并具有较高的富裕量。试验报告对各种焊接方法的焊接热输入要求为: 焊条电弧焊小于或等于 21 kJ/cm, 气保焊小于或等于 18.9 kJ/cm, 埋弧焊小于或等于 35.4 kJ/cm。

3 焊接方法的选择

由于 WDB620 高强钢在冶勒水电站中的使用量很大, 且施工工期较短, 采用何种焊接方法不仅要满足焊接质量的要求, 也要满足安装进度的要求。其他水电站中普遍采用的焊接方法是焊条电弧焊, 但若冶勒工程中仅采用焊条电弧焊, 无法满足钢管安装进度的要求。因此, 承担该电站钢管制作的中国水利水电第七工程局机电安装分局提出采用埋弧自动焊接方法。据调查, 埋弧自动焊在国产 WDB620 高强钢的焊接未见相关文献报道, 可供借鉴的焊接工艺和参数几乎没有。因此, 在对冶勒水电站压力钢管的焊接方法选择上, 专门召开了现场技术论证会, 提出了 3 种焊接方法: ①增加设备和人力资源投入, 完全采用焊条电弧焊, 该焊接方法的特点是焊接工艺成熟。②采用富氩全自动气体保护焊, 该焊接方法成本较高, 经济效益相对较差。③采用焊条电弧焊封底、埋弧自动焊焊接, 一方面可以利用埋弧自动焊焊接速度快、质量稳定的优点, 另一方面焊条电弧焊技术成熟、成本低、经济效益好。3 种焊接方法的优缺点比较见表 3。

另外, 埋弧自动焊接方法虽在 WDB620 高强钢中没有应用实例, 但该方法在天生桥一级电站、小关子电站 16MnR 钢的焊接中被大量采用, 在焊接工艺和各项工艺参数方面积累了一些经验。埋弧自动焊在国产 WDB620 高强钢中未被采用过, 如能通过冶勒水电站为该焊接方法在 WDB620 高强钢中的焊接积累经验, 对 WDB620 高强钢的推广运用会起到积极作用。因此, 在确保安装进度和质量的同时, 为最

大化地提高经济效益, 经过多次论证认为采用焊条电弧焊封底、埋弧自动焊焊接可以实现双赢。

表 3 各种焊接方法的优缺点比较

焊接方法	优 点	缺 点
焊条电弧焊	操作简便, 移动灵活, 设备投入较少; 焊接质量容易保证, 焊缝力学性能稳定。	人力资源投入较多, 工效低; 焊缝外观成形不如自动焊, 焊接质量易受到个人技术水平的影响。
富氩全自动气体保护焊	焊接质量稳定, 焊缝成形美观, 焊接质量容易保证, 焊缝力学性能稳定。	设备投入多, 焊接成本高; 对焊缝坡口对装精度要求高; 工效较低。
焊条电弧焊封底、埋弧自动焊焊接	焊接质量稳定, 对个人操作水平的依赖程度降低; 焊缝成形美观, 焊接质量容易保证; 工效高, 是焊条电弧焊的 5 ~ 8 倍。	辅助和附属设备投入较多; 对网络电压波动较为敏感, 易影响焊接质量; 焊缝晶间晶粒较为粗大, 对焊缝力学性能有影响。

4 焊接材料的选择

4.1 设计对焊接材料的要求

根据 WDB620 高强钢的特点和当地环境条件, 为控制成本、提高焊接质量, 在工艺评定试验中曾采用了不同厂家的几种焊剂和焊丝交叉配合, 见表 4。最后根据设计和规范要求以及焊缝与母材的等强原则, 焊条电弧焊选用超低氢型 CFE62CFLH 焊条, 埋弧焊选用 CHF101(焊剂) 和 CHW-S7(焊丝)。

表 4 不同焊剂和焊丝的力学性能指标

序号	牌号	生产厂家	焊缝力学性能		
			-20℃冲击功/ ($kJ \cdot cm^{-2}$)	抗拉强度/ MPa	硬度/ HB
1	CHF101(焊剂) CHW-S7(焊丝)	自贡大西 洋焊条厂	96, 40, 88	718	215
2	S-777MXH × A-3(焊剂和 焊丝组合)	韩国现代焊接 材料株式会社	106, 108, 77	690	211
3	CHF101 (焊剂) S-777MXH × A-3(焊丝)	自贡大西 洋焊条厂(焊剂) 韩国现代焊接 材料株式会社 (焊丝)	139, 127, 138	688	211
4	CFE62CFLH (焊条)	自贡大西 洋焊条厂	145, 145, 149	699	219

4.2 力学性能的要求

由表 4 可知, 国产焊丝的低温冲击功没有进口焊丝的大, 焊缝力学性能没有进口焊丝稳定。对焊接工艺评定试验的全部数据进行综合对比, 采用所选定的不同焊丝、焊剂配合, 焊缝主要力学性能指标都达到甚至超过母材力学性能指标。焊条电弧焊为超低氢型低合金钢焊条, 其焊缝力学性能指标远远高于母材力学性能, 完全满足施工需要, 因此焊条电弧焊封底的焊条选用的是自贡大西洋焊条厂生产的 CFE62CFLH。

4.3 脱渣性

国产焊剂的脱渣性要优于进口焊剂,这一点在埋弧自动焊中尤为重要。因为如果脱渣性好,清除焊渣的时间就会缩短,工效提高更明显。在工艺评定试验中,国产焊剂与进口焊剂清除焊渣的时间为1:1.5,试板长度为1 m。根据测算,压力钢管的周长一般为10 m,按照试验中的节约时间,计算得1节钢管共节约0.5 h/m×10 m=5 h。

4.4 综合评定

从焊缝力学性能看,国产焊丝和进口焊丝各有优势,而在焊剂脱渣性上国产焊剂占有很大的优势。经过综合评定,笔者认为国产焊丝、焊剂能满足设计要求,为此在冶勒水电站埋弧自动焊焊接中选用的是国产焊丝和焊剂,牌号分别为CHW-S7和CHF101。

5 焊接施工工艺

5.1 坡口形式

根据设计图纸要求和焊接工艺评定的结果,压力钢管的纵缝和环缝采用不等边“X”形坡口,采用多层多道焊,焊条电弧焊先进行封底焊接,然后埋弧焊进行正缝和背缝的6层焊接,盖面层为一层两道,坡口形式见图1(图中δ为板厚)。

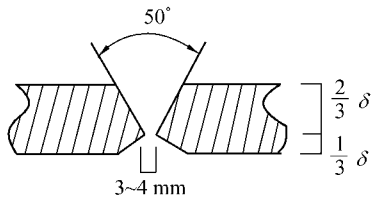


图1 坡口形式

5.2 焊缝预热

根据邯钢集团舞阳钢铁有限责任公司的研制报告,WDB620钢作为压力钢管使用,无需考虑预热或后热,能满足焊接接头强度、冷弯及韧性的技术要求,并具有较高的富裕量。但在实际生产中发现,由于加热的不均匀性,焊接背缝第一层时出现断续冷裂纹。为此,焊前必须对焊缝进行预热,同时还要保证加热的均匀性,防止冷裂纹的产生和由于预热而使焊接热影响区的冷却速度过于缓慢,导致在焊接热影响区内产生粗大贝氏体,造成焊接热影响区强

度下降、韧性变坏的倾向。实际预热温度为100~120℃,进入冬季后,预热温度逐步提高到115~135℃,用辐射测温仪进行温度控制。

5.3 施焊

焊条电弧焊焊接时采用多层、多道、对称、分段、退步的焊接方法施工,层间厚度小于6 mm,接头错开30 mm,各对称施焊的焊工热输入基本保持一致,控制在17~20 kJ/cm之间,注意控制层间温度不大于230℃。

高强钢环缝埋弧自动焊焊接,首先对正缝进行打磨,预热温度达到工艺规定要求后进行埋弧自动焊接。正缝焊接完成后,提前后热消氢,空冷后开始背缝清根。背缝采用碳弧气刨清根后,用砂轮机修磨除去渗碳层。对钢管进行预热,达到规定预热温度后,进行环缝焊接。焊缝开始施焊后要求连续进行直至焊接完成,使用加热设备进行保温,由专人负责测控保温温度。多层多道焊接,各层间热输入基本保持一致,控制在28~35 kJ/cm之间,较好地防止了层间晶粒粗大等问题。热输入的试验结果和实际生产中采用的基本一致,与邯钢集团舞阳钢铁有限责任公司提供的WDB620钢板研制报告中试验结果十分接近,说明焊接工艺参数的选择是准确和科学的,尤其对焊缝最后形成良好的晶粒组织起到了关键性保证作用。

5.4 焊接热输入控制

焊接热输入不仅会影响焊接热影响区的性能,也会影响到焊缝金属的性能。在采用埋弧自动焊焊接该钢种时应注意控制焊接工艺参数,调整焊接速度,采用多层多道焊,较好地防止了层间晶粒粗大等问题。推荐埋弧自动焊焊接工艺参数见表5。

5.5 钢管后热消氢

根据焊接工艺评定和实际操作中焊缝质量的稳定性,钢管后热消氢时间宜控制在2 h,在焊缝焊接完成前0.5 h内进行加温,温度控制在150~200℃。

6 焊接质量分析

6.1 力学性能对比

不同焊接方法和母材的力学性能见表6。通过选择合理的焊接工艺参数,对焊条电弧焊3组数据、

表5 推荐压力钢管焊接规范(埋弧自动焊)

焊缝层次	焊接方法	填充金属		焊接电流		电弧电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	热输入/(kJ·cm ⁻¹)
		牌 号	直径/mm	极性	电流/A			
Ⅰ(正缝封底)	焊条电弧焊	CFE62CFLH	3.2	直反	120~130	22~23	9~10	17.6~18.6
Ⅱ(正缝层间焊)	埋弧焊	CHF101 CHW-S7	4.0	直反	450~550	33~34	30~35	29~32
Ⅲ(正缝盖面焊)	埋弧焊	CHF101 CHW-S7	4.0	直反	550~600	33~34	35~37	31~33
4.5Ⅳ(背缝层间焊接)	埋弧焊	CHF101 CHW-S7	4.0	直反	450~550	33~34	30~35	29~32
Ⅴ(背缝盖面焊)	埋弧焊	CHF101 CHW-S7	4.0	直反	550~600	33~34	35~37	31~33

表 6 不同焊接方法和母材力学性能比较

焊接方法	试件编号 ($\delta=40\text{mm}$)	屈服点/ MPa	抗拉强度/ MPa	-20℃冲击 功/J	硬度/ HB	100°时 弯曲情况
焊条电弧焊	422	1DS-1	582	145 ,143 ,139	224(焊缝) 224(热影响区) 219(母材)	完好
焊条电弧焊	620	2DS-1	692	145 ,140 ,141	215(焊缝) 228(热影响区) 224(母材)	完好
焊条电弧焊	628	3DS-1	699	144 ,135 ,145	219(焊缝) 219(热影响区) 224(母材)	完好
埋弧自动焊	663	MZ-12	718	98 ,78 ,88	215(焊缝) 222(热影响区) 224(母材)	完好
埋弧自动焊	627	MZ-21	690	108 ,119 ,77	211(焊缝) 222(热影响区) 224(母材)	完好
埋弧自动焊	635	MZ-41	688	145 ,105 ,45	211(焊缝) 228(热影响区) 217(母材)	完好
埋弧自动焊	619	MZ-42	692	139 ,127 ,138	215(焊缝) 224(热影响区) 222(母材)	完好
母 材	575	MC-1	645	130 ,123 ,120 215(上表面) 224(1/2厚度处) 222(上表面)		完好

埋弧自动焊 4 组数据和 1 组母材数据进行对比,无论是焊条电弧焊还是埋弧自动焊,各个区域的硬度值都非常高,说明了其焊缝组织和成分的均匀性。从冲击值分析,埋弧自动焊的冲击功只有 2 组数据接近母材和焊条电弧焊,表明采用埋弧自动焊焊接中的热输入对焊缝晶粒组织的形成有一定的影响,降低了焊缝的冲击韧性,但冲击韧性几乎大于母材的标准保证值($47\text{kJ}/\text{cm}^2$)。采用焊条电弧焊和埋弧焊焊缝的屈服强度、抗拉强度值比母材还略高,有一定的富裕量,表明所选择焊接材料是合理的。

6.2 金相组织分析

通过对试件酸侵蚀后,对焊接试件的母材、热影响区、熔合线区和焊缝区的微观金相组织进行观察。焊缝区有少量白色的条状组织——铁素体和过热区大量条状组织即为魏氏组元,它是促使低合金高强钢焊接热影响区脆化的一个主要原因。由于焊缝和过热区存在条状铁素体和魏氏组织,说明焊接中焊缝在高温停留时间过长,冷却速度过慢,表明实际施工中的焊接热输入没有完全严格按照工艺参数的要求执行。为此,必须严格焊接过程控制,强化施工人员的质量意识,防止因焊接热输入过大和冷却速度过慢引起焊缝力学性能下降。

7 超声波质量检查

根据设计和规范要求,对压力钢管的纵、环焊缝进行了超声波和 γ 射线探伤相结合的方式检验。该电站压力钢管 I 段和 II 段共长 6 353 m,对材质为 WDB620、长为 3 940 m 的焊缝和材质为 Q345C、长为 2 413 m 的焊缝进行了超声波探伤,同时对制造完成 3 个月以上的材质为 WDB620 的高强钢管管进行了 γ 射线探伤,共拍片 246 张,返修 12 张(每张底片长 300 mm),未发现高强钢产生延迟裂纹等缺陷,经二滩国际监理部金属结构监理部确认,焊缝一次合格率达到 98% 以上,焊接质量被评为优良。

8 结 论

选择焊条电弧焊 CHE62CFLH(焊条)埋弧焊 CHF10K(焊剂)+ CHW-S7(焊丝)两种焊接材料,采用

埋弧自动焊,对舞阳钢铁有限责任公司生产的 WDB620 钢进行试验,得出以下结论 ①焊接接头的强度和冷弯性能达到了要求,接头各部位的冲击功在推荐的焊接工艺条件下都能达到技术要求,而且有一定的富裕量,证明焊接材料的选择是合理的。②实际焊接接头熔合线与母材冲击功的结果对照表明,焊接热影响区的过热区对 $8t/5$ (其中 t 为冷却时间, s)比较敏感。为保证过热区的冲击功满足技术要求,必须按推荐的工艺参数进行焊接,确保 $8t/5 < 25s$ 。推荐的工艺如下:焊条电弧焊应采用快速多道焊,焊接热输入应小于 $20\text{kJ}/\text{cm}$,埋弧自动焊小于 $35\text{kJ}/\text{cm}$ 。焊接试验和实际生产中的预热温度都超过了 100°C ,层间温度控制不超过 230°C ,而不是舞阳钢铁有限责任公司报告中所提出的焊接预热及层间温度控制在 100°C 以下。③焊前必须预热,焊后进行后热消氢处理,并制作连续加温的专用加热装置,保证焊缝预热和后热均匀。预热温度普遍为 $100\sim 120^\circ\text{C}$,随着冬季的到来,实际预热温度还在逐步提高,为 $115\sim 135^\circ\text{C}$,采用履带式远红外温控仪进行预热,升温速度为 $90^\circ\text{C}/\text{h}$,降温速度为 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

根据邯钢集团舞阳钢铁有限责任公司提供的 WDB620 钢板研制报告,埋弧自动焊焊接 WDB620 高强钢时一般无需预热或后热,发现试验中的环境温度为 26°C 。但施工现场的环境温度为:夏季白天 $20\sim 30^\circ\text{C}$,夜间 $9\sim 15^\circ\text{C}$,冬季白天 $0\sim 9^\circ\text{C}$,夜间 $-5\sim 0^\circ\text{C}$ 。该地区的环境温差很大,不同的自然环境条件决定了高强钢的焊接必须进行焊前预热和后热消氢处理。虽然在焊接试验中对焊接试板进行了加温预热和后热消氢处理,试板的力学性能等综合指标完全达到甚至超过了母材的力学性能指标,但还必须严格控制焊接热输入和冷却速度,以降低条状铁素体和魏氏组织的形成。国产 WDB620 高强钢在冶勒水电站压力钢管制造中成功运用,不仅填补了该钢种焊接技术上的空白,也为今后在高强钢的钢管制作中大量使用埋弧自动焊提供了技术支持。总结并创新的一些关键施工技术,通过实践检验其工艺参数、控制方法是成熟、可靠、经济和科学的,值得在其他电站中推广应用。

(收稿日期 2006-07-06 编辑 骆超)