

巴莱水电站压力钢管用P460Q钢材 焊接性试验研究

彭水平

中国葛洲坝集团机械船舶有限公司 湖北宜昌 443002

摘要: 介绍了欧标P460Q钢的特性。对于该材料的焊接性能, 首先通过计算碳当量及裂纹敏感系数进行分析, 然后进行了焊接工艺评定试验验证, 最后通过冷卷试验、焊缝返修试验、水压试验等进行研究。

关键词: 欧标P460Q; 焊接性能; 碳当量; 裂纹敏感系数; 焊接工艺评定。

Welding performance study of P460Q steel for pressure steel pipe for baleh hydropower station

PENG Shuiping

China Gezhouba Group Machinery and Ship Co., Ltd., Yichang 443002, Hubei, China

Astract: The characteristics of European standard P460Q material are described in this paper. The welding performance of this material will be studied through the carbon equivalent calculation and welding crack sensitivity coefficient analyzing, and then the welding procedure qualification will carried out to check the welding performance, and a series of tests such as the cold coil test and weld repair test, and water pressure test will be carried out for the further study of welding performance.

Keywords: European standard P460Q; welding performance; carbon equivalent; crack sensitivity coefficient; welding procedure qualification

1 序言

欧标P460Q高强度钢板通常以调质状态交货, 广泛用于各类工程机械, 如矿山和各类工程施工用的钻机、电铲、电动轮反斗车、矿用汽车、挖掘机、装载机、推土机、各类起重机及煤矿液压支架等。P460Q钢属于专业合金钢和承压设备用钢, 具有良好的塑性、韧性、冷弯性能和焊接性能。马来西亚巴莱水电站是我公司水电站项目中第一次使用P460Q钢, 该项目共5条压力钢管道, 钢板厚度26~38mm, 质量约9800t。

2 P460Q钢材料性能

P460Q钢为调质可焊接细晶粒钢, 执行EN 10028-6: 2009《压力用途的钢板制品 第6部分: 可焊接淬火和回火细粒钢》要求, 数字代码1.8870, 屈服强度下限值460MPa。其化学成分和力学性能分别见表1、表2。

表1 P460Q钢板化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr
≤0.18	≤0.50	≤1.70	≤0.025	≤0.010	≤0.015	≤0.005	≤0.50
Mo	Cu	Nb	Ni	Ti	V	Zr	
≤0.50	≤0.30	≤0.05	≤1.00	≤0.03	≤0.08	≤0.05	

作者简介: 彭水平, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为能源钢结构项目制造安装技术, E-mail: 937671750@qq.com。

表2 P460Q钢板力学性能

对应板厚t的屈服强度/MPa			对应厚度t的抗拉强度/MPa		断后伸长率（%）	冲击吸收能量/J	
						- 20℃	27℃
$t \leq 50\text{mm}$	$50\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	$100\text{mm} < t \leq 200\text{mm}$	$t \leq 100\text{mm}$	$100\text{mm} < t \leq 200\text{mm}$	—	0	40
≥ 460	≥ 440	≥ 400	550 ~ 720	500 ~ 670	≥ 19	20	60

3 材料焊接性分析

焊接性影响的判定通常采用计算法，通过计算出钢的碳当量和冷裂敏感系数^[1, 2]，可以初步衡量钢材冷裂敏感性的高低，对焊接工艺条件（如预热、焊后热处理及热输入）的确定具有重要指导作用。

国际焊接学会（IIW）推荐的碳当量（质量分数）经验公式为

$$CE\text{ (IIW)} = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo) / 5 + (Cu + Ni) / 15$$

当CE≤0.4%时，焊接性较好；当CE=0.4%~0.6%时，焊接性稍差，焊前需适当预热；当CE≥0.6%时，焊接性较差，属难焊材料，需采用较高的预热温度和严格的工艺方法。

冷裂纹敏感系数由钢材化学成分、氢含量和接头拘束力等数值计算得出，是间接判断钢的焊接性优劣的一种方法，主要是判定钢的冷裂纹倾向

大小。

冷裂纹敏感系数（质量分数）的计算公式为

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr) / 20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

P_{cm}值越大，说明钢在焊接时产生裂纹的倾向越大，其焊接性就差。当P_{cm}≥0.25%时，即表示材料焊接有冷裂纹倾向。

对P460Q钢材取样进行化学成分及力学性能检测，并根据以上公式计算出碳当量和冷裂纹敏感系数，将检测及计算结果进行整理，汇总曲线如图1所示。

由图1可知，P460Q钢材的碳当量CE≤0.4%，冷裂敏感系数P_{cm}≤0.2%，可确定其焊接性良好，冷裂纹倾向较低，且焊前可不进行预热。同时屈服强度、抗拉强度及裂纹敏感系数基本随碳当量同向波动，伸长率与抗拉强度呈反向波动。

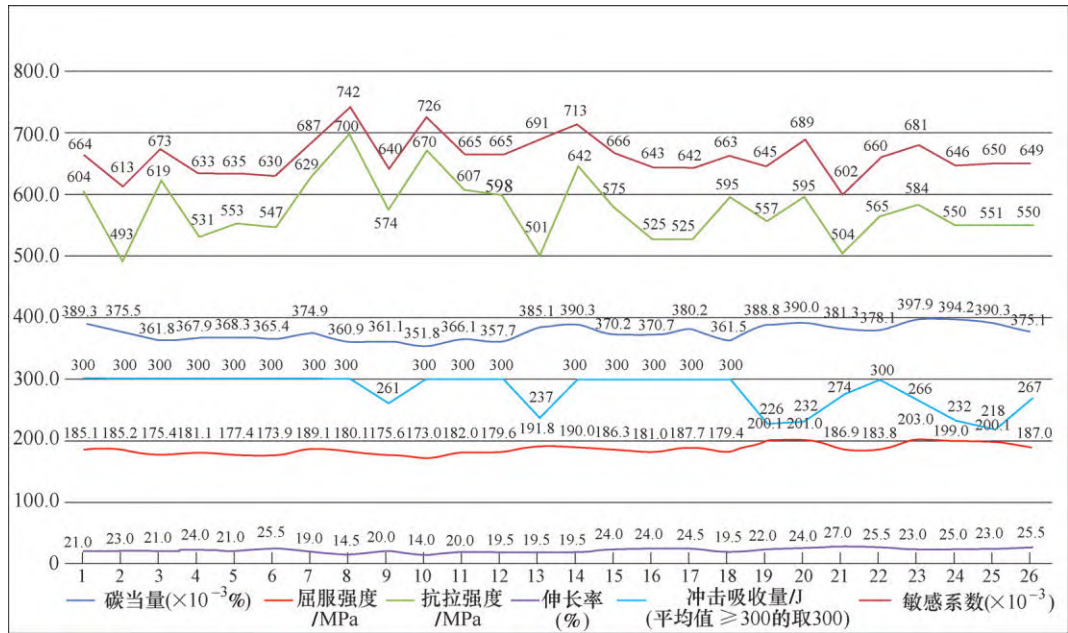


图1 检测及计算结果汇总曲线

4 焊接工艺评定试验

焊接工艺评定程序按ISO 15614-1：2017《金属材料焊接工艺规程及评定-焊接工艺评定试验 第1部

分：钢的电弧焊和气焊、镍及镍合金的电弧焊》中有关规定进行。

先按ISO 15609-1：2004《金属材料焊接工艺规

程及评定-焊接工艺规范 第1部分：电弧焊》中有关要求编制预焊接工艺规程（pWPS），然后根据pWPS要求，通过焊条电弧焊、气体保护焊、埋弧焊3种不同的焊接方法，在平、横、立三个不同的焊接工位，分别采取不预热、预热及后热工艺进行试板焊接，最后对试板进行非破坏性试验和破坏性试验。pWPS焊接参数见表3。

表3 pWPS焊接参数

焊接方法	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度 / (cm/min)	热输入 / (kJ/cm)
焊条电弧焊	130~180	22~27	7~9	20~33
气体保护焊	180~250	24~32	9~17	15~37
埋弧焊	500~620	26~32	40~58	20~35

试板焊接完成后，采用无损检测对焊缝表面及内部质量进行检测，检测合格后，按照ISO 15614-1：2017中有关规定取样并进行力学性能试验。

表4 焊接工艺评定试验结果统计（试板未进行预热）

序号	焊接方式	力学性能试验									低倍金相	
		拉伸试验		－20℃冲击吸收能量/J	弯曲试验	显微硬度HV10（平均值）						
		抗拉强度 /MPa	断裂位置			编号	母材	热影响区		焊缝区		
1	焊条电弧焊（立焊）	665、660	母材	焊缝区：90、83、63	合格	1	244	210	223	216	244	合格
				热影响区：≥300		2	232	226	200	209	203	
						3	243	241	226	213	236	
2	焊条电弧焊（横焊）	685、695	母材	焊缝区：166、149、170	合格	1	244	316	315	254	246	合格
				热影响区：≥300		2	205	182	220	245	206	
						3	241	266	248	287	239	
3	气体保护焊（立焊）	680、688	母材	焊缝区：245、190、245	合格	1	240	240	225	275	217	合格
				热影响区：≥300		2	217	202	199	185	230	
						3	234	236	227	234	234	
4	气体保护焊（横焊）	696、700	母材	焊缝区：202、247、209	合格	1	240	243	211	304	236	合格
				热影响区：≥300		2	211	208	275	250	223	
						3	232	242	247	235	228	
5	埋弧焊（平焊）	664、662	焊缝	焊缝区：197、213、212	合格	1	240	250	201	212	220	合格
				热影响区：≥300		2	200	197	210	178	216	
						3	246	241	198	211	221	

表5 焊接工艺评定试验结果（试板采用预热、后热工艺）

序号	焊接方式	外观检查	无损检测	力学性能试验				
				抗拉强度/MPa	-20℃冲击吸收能量/J	弯曲试验	硬度测试	低倍金相
1	焊条电弧焊（立焊）	合格	合格	634、631	焊缝区：152、148、156	合格	合格	合格
2	焊条电弧焊（横焊）	合格	合格	631、626	焊缝区：123、149、152	合格	合格	合格
3	气体保护焊（立焊）	合格	合格	640、631	焊缝区：146、127、147	合格	合格	合格
4	气体保护焊（横焊）	合格	合格	619、611	焊缝区：92、117、74	合格	合格	合格
5	埋弧焊（平焊）	合格	合格	621、616	焊缝区：127、73、104	合格	合格	合格

经检测，试板的焊缝质量及所有力学性能均满足相关规范要求。试验检测结果见表4、表5。在实际施工过程中，压力钢管纵缝、环缝的焊接采用埋弧焊，加劲环的角焊缝焊接采用气体保护焊，焊缝缺陷的返修采用焊条电弧焊。

5 冷卷回圆试验

单个管节的纵缝焊接完成后，在堆放、翻身、吊装及转运过程中，容易引起钢管的弧度变形，为保证产品质量，对于已经产生弧度变形的钢管，需要采取措施进行校正。为验证焊缝区域的弧度变化对材料焊接性能的影响，进行了冷卷回圆试验。

5.1 试验方法

将钢板卷至设计要求的标准弧度后进行焊接。首先，通过无损检测确认无内部缺陷后，在试板上

取下部分样品，作为回原前的产品试样；然后，将剩下的试板用压力机压至平直状态，再次按规范要求进行取样，作为回圆后的产品试样；最后，将两种试板同时送往实验室，进行无损检测及力学性能试验。

5.2 试验结果

通过检测，冷卷回圆前后产品试样的焊缝质量、相关力学性能参数均符合规范要求，证明冷卷回圆对P460Q钢材的母材及焊缝质量无明显影响，冷卷回圆校正工艺具有可操作性。力学性能检测结果见表6。

表6 冷卷回圆试验力学性能检测结果

试样状态	接头拉伸试验		接头弯曲试验	冲击试验	显微硬度（平均值）HV10				
	抗拉强度/MPa	断裂位置	弯曲180°	0℃冲击吸收能量（平均值）/J	母材	热影响区	焊缝	热影响区	母材
未回圆	676	焊缝	无裂纹	190、212、175	200	213	217	204	200
					198	189	210	203	203
回圆	676	焊缝	无裂纹	215、279、134	207	202	215	208	209
					192	205	210	204	202

6 返修试验

施工过程中不可避免地存在焊缝返修，针对焊缝返修工艺是否对该材料的焊接性能及力学性能产生影响，需进行返修试验进行验证。

6.1 试验过程

在P460Q钢板上截取规格为900mm×260mm×300mm的试板2块，按已通过的焊接工艺完成对接焊缝焊接。假定其焊缝内部存在深度为13mm的全条缺陷，按既定的返修工艺进行焊缝返修。

按照返修工艺要求，用碳弧气刨清除假定缺陷，并用渗透检测确认缺陷已彻底清除后，分别采用焊条电弧焊及CO₂气体保护焊进行返修焊接，最后对返修焊缝进行无损检测及力学性能试验。

6.2 试验结果

经检测，返修焊缝的无损检测及力学性能试验均合格，可确认焊缝返修对该材料的焊接性能及焊缝质量无明显影响，可以进行焊缝的返修。

7 水压试验

7.1 试验目的及试验内容

水压试验可检测钢管原材料、制作工艺及焊接工艺的可靠性，验证钢管成品的质量，并通过试验得出钢管受压后的变形量及其恢复能力。

水压试验内容包括以下3个方面。

- 1) 水压试验前后的焊缝检查、无损检测。
- 2) 水压试验过程中的压力检测。

3) 水压试验过程中的变形观测。

7.2 试验方案

压力钢管应在无约束的状态下进行水压试验，为确保试验过程中压力测试的可靠性，应安装两只压力表同时监测。注水应缓慢进行，注水流量控制在20m³/h为宜，并严格执行打压步骤及稳压时间。巴莱水电站压力钢管水压试验现场如图2所示。



图2 巴莱水电站压力钢管水压试验现场

在试验过程中，重点观察钢管的焊缝位置有无渗水、异常变形及异常响声。若检测结果离散太大时应立即停止，检查压力钢管及仪器设备状态，排除异常后再重新按程序进行试验。

在试验过程中，钢管周围应设定禁止通行区，检查人员需佩戴好安全防护用品，做检查时任何人不得站在封头侧面及焊缝的正面。

7.3 试验结果

试验结果显示，试验管节及封头上的所有焊缝均无渗漏，试验前后的焊缝质量经无损检测均合（下转第51页）

浅坡口，反面焊前需进行气刨清根，保证熔透^[5]。

焊接时注意焊道排列及道间打磨清理，防止产生夹渣等焊接缺陷。无损检测合格后对圆弧部位切割打磨匀顺，进行超声波锤击处理，消除焊接内应力。最后进行修整打磨及焊缝部位的补涂装处理。

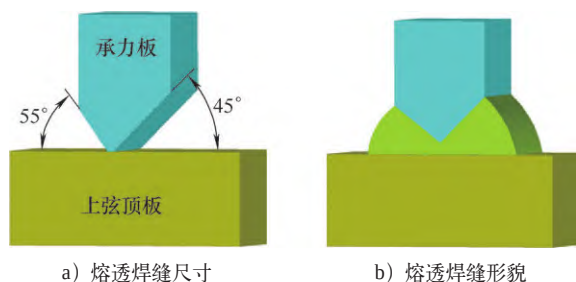


图7 钢锚箱与上弦杆顶板熔透焊缝示意

9 结束语

1) 通过对新市金沙江大桥钢锚梁、钢牛腿及上弦杆钢锚箱构造焊缝受力情况进行分析研究，优化焊缝设计，减少非主要受力部位熔透焊缝，降低熔敷金属填充量，尽可能避免因过多的热输入而造成构件产生较大焊接变形。结合施焊空间影响，设计

合理的组装施焊顺序，保证了所有焊缝满足可操作性。

2) 将上述焊接技术研究成果应用于新市金沙江大桥制造、安装中，焊缝外观及力学性能符合验收标准，主要受力焊缝质量得到保证，确保了该桥钢结构整体制造质量，同时通过采用合理的焊接工艺措施，有效控制了构件的焊接变形，保证了钢梁安装精度，可为同类结构制造施工提供借鉴。

参考文献：

- [1] 彭琼. 九江长江公路大桥钢锚梁索塔锚固区受力研究[J]. 南昌：南昌大学，2012.
- [2] 朱东明，黄旭光. 沪通长江大桥钢锚梁制造关键技术[J]. 中国新技术新产品，2020（16）：60-62.
- [3] 杨辉. 大跨斜拉桥钢锚梁施工关键技术[J]. 公路，2016，61（5）：64-67.
- [4] 中国铁路总公司. 铁路钢桥制造规范：Q/CR 9211—2015[S]. 北京：中国铁道出版社，2015.
- [5] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

MW 20240605

（上接第46页）

格。水压试验过程前后，钢管整体沿水流方向无明显变形，但钢管周长变化明显。钢管进口端（靠近加劲环）管口周长减小9mm，出口端（远离加劲环）管口周长增加11mm；卸压切割后，进口端周长仍减小9mm，较充压状态下未发生变化，出口端周长还原至最初状态。水压试验数据记录见表7。

表7 水压试验数据记录 (mm)

测量位置	水压试验前	充压到预定压力 (3.95MPa)	卸压后	切除两侧 封头后
水流进口端	18461	18455	18440	18452
水流出口端	18459	18470	18454	18459

通过水压试验结果可判定，钢材焊接性能良好，制作及焊接工艺可行，结构受力安全可靠。

8 结束语

1) 试验结果表明，焊条电弧焊、气体保护焊及埋弧焊3种焊接方法的焊接工艺评定试验结果均合格，对比力学性能差异不大。实际施工中，可根据施工便捷性采取其中一种或者多种组合的方式进行

焊接。

2) 在15~35kJ/cm焊接热输入条件下，焊接接头的力学性能均能满足要求，说明P460Q钢热输入适应性较强。

3) 结合碳当量和冷裂纹敏感系数，P460Q钢在常温下可不预热进行焊接。但由于焊接预热温度还受板厚、施工环境、焊接热输入大小及焊接金属氢含量等一系列因素的影响，因此建议焊接施工中应根据情况适当预热。

4) 通过返修及冷卷回圆试验，可确定焊缝返修工艺、冷卷回圆工艺对该材料性能无明显影响。

5) 通过水压试验，可确定P460Q钢焊接性能较好，产品质量可靠可控。

参考文献：

- [1] 孙景荣. 焊接名词术语释义大全[M]. 北京：化学工业出版社，2015.
- [2] 曹良裕，魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用，1999（1）：41-45.

MW 20240609