

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.11

1 000 MPa级高强钢配套焊材水电焊接模型水压 试验验证及可靠性评估

惠振国, 田野, 田井成, 甘洪丰, 卢天田, 吴海龙*

哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要: 为验证1 000 MPa级水电用高强钢配套焊材在压力钢管焊接结构中的适用性和可靠性,设计并制造了两套局部缩比压力钢管焊接模拟件并开展水压试验。1#模拟件纵缝及环缝分别采用国产和进口1 000 MPa级气体保护焊丝,在9.5 MPa峰值压力下监测关键焊缝区域的结构应力分布与承载响应;2#模拟件纵缝采用国产1 000 MPa级埋弧焊丝/焊剂,环缝采用国产1 000 MPa级手工电弧焊条和600 MPa级气体保护焊丝,峰值压力10.25 MPa,同步测试水压试验前后焊接残余应力并监测结构位移。结果表明:1#模拟件实测最大结构应力为175.8 MPa,低于运行和水压试验工况下的许用应力,卸压后UT与TOFD复检未发现超标缺陷;2#模拟件在10.25 MPa下内壁和外壁最大结构应力分别为348.9 MPa和260.5 MPa,主要测点应力和位移随压力变化呈较好的线性关系,卸压后复检未见线性缺陷;水压试验后焊接残余应力总体降低并发生重分布,内壁 σ_x 和 σ_y 方向平均消除率分别为26.6%和36.6%,外壁分别为27.9%和33.3%。研究表明,在本文模拟件结构、焊接工艺和水压试验条件下,所选国产配套焊材及工艺可满足1 000 MPa级水电用高强钢压力钢管焊接结构的水压验证要求。

关键词: 1 000 MPa级水电用高强钢; 焊接材料; 压力钢管; 结构应力; 焊接残余应力

中图分类号: TK730.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)08-0105-11

Verification and Reliability Assessment of Hydraulic Welding Models Using Welding Materials Compatible with 1 000 MPa-grade High-strength Steel for Hydrostatic Testing

HUI Zhengguo, TIAN Ye, TIAN Jingcheng, GAN Hongfeng, LU Tiantian, WU Hailong*

Harbin Electric Machinery Co., Ltd., Harbin 150040, China

Abstract: Hydraulic proof testing is a critical validation procedure for ensuring the structural integrity of welded penstock joints in hydropower stations. However, systematic experimental data remain limited regarding welded joints employing domestic welding consumables for 1000 MPa-grade high-strength steels. Two locally scaled cylindrical penstock mock-ups were designed and fabricated to evaluate the applicability of domestic welding consumables. The No. 1 mock-up utilized domestic and imported 1000 MPa-grade gas metal arc welding (GMAW) wires for the longitudinal and circumferential seams, respectively, and was pressurized to 9.5 MPa. Strain gauges installed at critical weld locations recorded structural stress distributions under loading. The second mock-up employed domestic 1000 MPa-grade submerged arc welding (SAW) wire/flux and 1000 MPa-grade shielded metal arc welding (SMAW) electrodes for different seams, and was pressurized to 10.25 MPa. Residual stresses were measured before and after testing, and structural displacements were monitored. Results indicate that for the No. 1 mock-up, the stress—pressure relationships at all gauge locations were linear ($R^2 \geq 0.99$), with the maximum measured structural stress of 175.8 MPa well below the allowable stress limits for both operating and proof test conditions;

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-07-21

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目(2022ZX04A01);黑龙江省自然科学基金资助项目(YQ2021E007)

作者简介: 惠振国(1982—),高级工程师,主要从事抽水蓄能电站工程建设和生产管理工作。

通讯作者: 吴海龙, E-mail: wuhl@hec-china.com。



重点
专利
—
高强
钢优
质高
效焊
接

no unacceptable defect indications were detected by UT and TOFD re-inspection after unloading. For the No. 2 mock-up, the maximum structural stresses at 10.25 MPa were 348.9 MPa (inner wall) and 260.5 MPa (outer wall), both stress and displacement exhibited proportional responses to pressure, and no linear defects were found upon post-test re-inspection. Post-test welding residual stresses decreased notably, with average relief rates of 26.6%-36.6% on the inner wall and 27.9%-33.3% on the outer wall. The findings suggest that the selected domestic welding consumables and procedures can satisfy the hydraulic proof testing requirements for 1000 MPa-grade high-strength steel penstock welded structures within the scope of the mock-up configurations and test conditions presented.

Keywords: hydrostatic test; 1000 MPa-grade high-strength steel for hydropower; welding consumables; penstock; structural stress; welding residual stress

引用格式:惠振国,田野,田井成,等. 1 000 MPa级高强度钢配套焊材水电焊接模型水压试验验证及可靠性评估[J]. 电焊机, 2026, 56(8):105-115.

Citation:HUI Zhenguo, TIAN Ye, TIAN Jingcheng, et al. Verification and Reliability Assessment of Hydraulic Welding Models Using Welding Materials Compatible with 1 000 MPa-grade High-strength Steel for Hydrostatic Testing[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 105-115.

0 引言

扩大清洁能源应用规模、优化能源结构是推进社会经济可持续发展的迫切需求^[1],而加大水利资源的开发利用是构建新型能源体系的重要手段^[2]。随着水电站装机容量不断提升,对压力钢管等核心承压部件的服役性能要求日益严格。在水电站压力容器设计中,若沿用800 MPa级水电用钢,为保证使用刚度必增加板厚^[3],这将导致蜗壳、压力容器的设计壁厚在许多应用中突破70 mm,如此大的厚度将大幅度增加卷制成型、焊接及无损检测的技术难度^[4]。因此,水电压力容器制造需要应用具有更高屈服强度、抗拉强度以及良好低温冲击韧性的1 000 MPa级水电钢,以避免压力管道承受骤变载荷时引发的脆性断裂^[5-6]。

然而,母材的大规模推广使用不仅取决于其自身性能,更与焊材的焊接性能紧密相关。目前国际上能够生产1 000 MPa级焊材的主要厂家有伯乐、奥林康、日本神钢等^[7]。其中日本神钢焊材的优势较为突出,其焊接接头的力学性能可达到抗拉强度>950 MPa、0 °C冲击韧性>100 J、0 °C以下CTOD>0.10 mm、最低预热温度<150 °C的高强、高韧、高止裂能力、低冷裂纹敏感性的技术指标^[8]。相比之下,我国在1 000 MPa级水电用高强钢及配套焊材、焊接工艺的研究与应用尚处于起步阶段,国产焊材在承压工况下的实际服役行为尚缺乏系统性试验数据支撑。

针对1 000 MPa级高强度压力钢管焊接结构的水压验证,王建华等^[9]和李明等^[10]已开展了模型岔管水压试验研究,初步验证了1 000 MPa级高强度岔管结构的承载能力。但上述研究主要针对进口焊材或特定工况,对国产配套焊材在模拟件水压试验中的应力响应、残余应力演变及可靠性评估等方面的系统研究仍显不足。

基于此,本文设计了两套局部缩比压力钢管焊接模拟件,分别采用国产及进口1 000 MPa级气体保护焊丝、国产1 000 MPa级埋弧焊丝/焊剂及焊条电弧焊条进行焊接。通过在模型件关键焊缝区域布置应变测点和位移传感器,系统监测水压试验过程中的结构应力分布、残余应力变化及结构位移响应,结合无损检测结果,全面评估国产配套焊材在承压工况下的适用性和可靠性,以期1000 MPa级高强度国产焊材的工程应用提供试验依据。

1 模型件的设计与制造

1.1 模型件结构设计

为验证1 000 MPa级高强度国产配套焊材的使用性能,采用60 mm厚1 000 MPa级高强度钢板制作了两套水压试验模拟件。1#模型为正圆柱形压力容器,长度1 200 mm、中径2 823.8 mm,其焊缝结构示意图如图1所示。水压试验时,压力容器进、出水口均与闷头对接,构成密闭容器。

在完成1#模型水压试验后,沿直管段对接焊缝



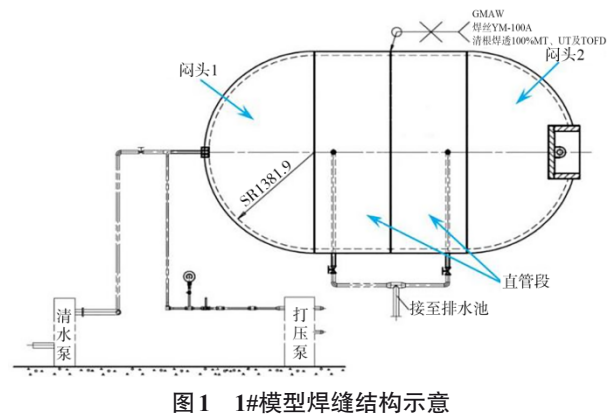


图 1 1#模型焊缝结构示意图

将两封头气割割除,打磨去除热影响区后,在两小阀头间增加一段压力容器,改造为2#模型,其焊缝结构如图2所示。2#模拟件在结构上增设了进人门,以进一步考验焊缝交叉区域的承压性能。

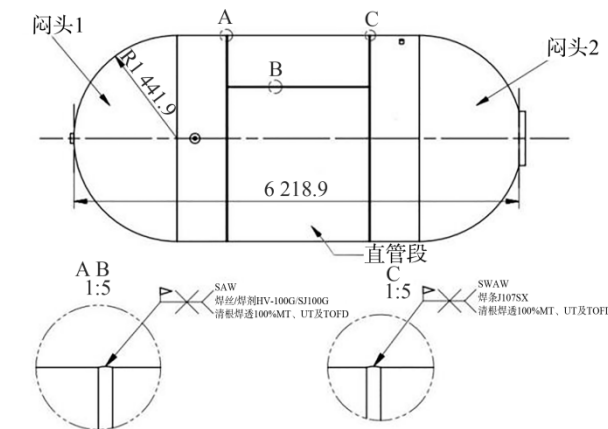


图 2 2#模型焊缝结构示意图

1.2 焊接材料与焊接工艺

1#模型直管段纵缝采用国产 1 000 MPa 级气体保护焊丝 HS-100S(GMAW)焊接;阀头与直管段环缝采用 600 MPa 级气体保护焊丝 ER90S-G(GMAW)焊接;两阀头与直管段组对焊接使用进口 1 000 MPa 级气体保护焊丝 YM-100A(GMAW)。模型焊接制造完成后,对 1#模型按 9.5 MPa 设计压力进行水压试验,验证国产气保焊丝的可靠性及其与进口气保焊丝的性能差异。

2#模型直管段纵缝采用国产 1 000 MPa 级埋弧焊丝 HW-100G 及其配套埋弧焊剂 SJ100G(SAW)焊接;无进人门端阀头环缝同样采用上述埋弧焊材焊接;带进人门端阀头环缝采用国产 1 000 MPa 级

焊条电弧焊条 J107SX(SMAW)焊接。对 2#模型进行 10.25 MPa 水压试验,以进一步验证国产埋弧焊及焊条电弧焊焊材的使用性能。

所有焊接坡口均采用机械磨削方式制备,坡口形式如图 3 所示。各焊材对应的焊接工艺参数见表 1。焊接完成后 48 h 后,依据 DL/T 5017 标准的规定,对所有焊缝分别进行 UT、TOFD、MT/PT 三种无损检测。

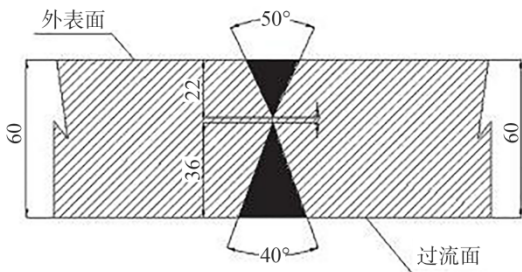


图 3 坡口加工示意图

表 1 焊接工艺参数				
Table 1 Welding process parameters				
焊丝 牌号	焊丝直径 /mm	焊接电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)
YM-100A	Ø1.2	22~28	140~290	200~350
HS-100S		23~30	130~300	180~350
ER50-6		20~26	160~230	200~300
ER90S-G		20~30	220~260	200~350
HW-100G	Ø4.0	30~33	550~680	420~520

2 水压试验方案与监测方法

2.1 数据监测点设计

2.1.1 1#模型应力测试点布置

1#模型件主要进行结构应力测试,采用应变电测法。数据测点集中布置于两阀头主体、阀头与直管段连接环焊缝右下半部及直管段主体纵缝附近,所有测点均布置在模型外壁侧,应变片距焊趾为 10 mm。电阻应变计采用 BE120-4BB(11)型双向电阻应变计。具体测点布置如图 4 所示。

2.1.2 2#模型焊接残余应力测试点布置

2#模型件水压试验前、后的焊接残余应力测试依据 GB/T 24179—2023 执行。测点选择具有代表性的焊缝或其附近部位,在压力容器上划定 A 区(阀头对接环缝)和 B 区(环 3、纵缝交叉处的丁字焊

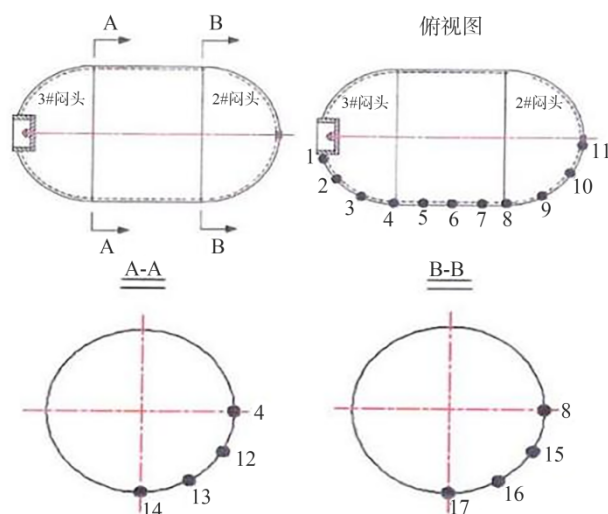


图4 1#模型应力测试点布置

Fig. 4 Layout diagram of stress test points for model 1#

缝)。A区布置2个测点(内壁A-1、A-2,对应外壁A'-1、A'-2),B区丁字缝区域布置4个测点(内壁B-1~B-4,对应外壁B'-1~B'-4),内壁和外壁测点一一对应。测试布点示意图如图5所示。

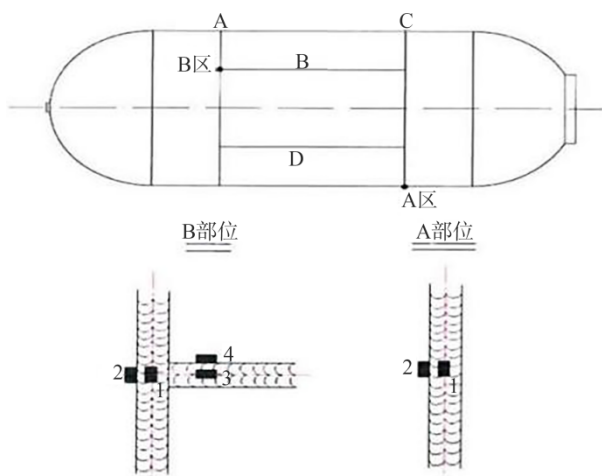


图5 2#模型残余应力测试布置

Fig. 5 Layout diagram for residual stress testing of model 2#

2.1.3 2#模型结构应力与位移测试点布置

2#模型水压试验应力测试在钢管内、外共布置32个测点。A、C环缝共布置14个测点,B、D纵缝共布置2个测点,内壁与外壁对应布置,测点距焊缝10~15 mm。测试点布置详见图6。

压力容器变形采用位移传感器进行测试。将位移传感器布置在压力容器外侧的腰部、顶部、底部位置,采集压力加载过程中的位移变化数据。压力容器位移测点位置布置如下:(1)B1、B2位于压

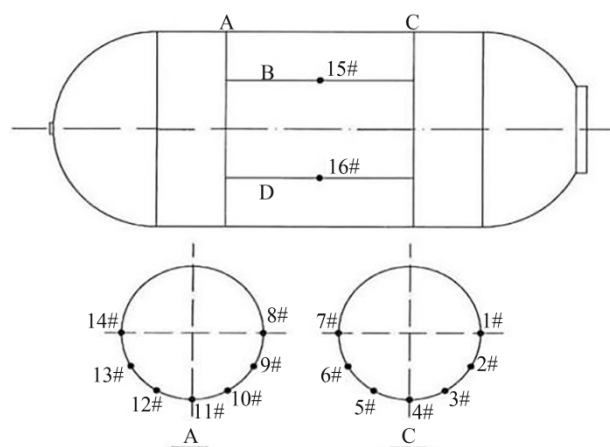


图6 水压试验压力容器结构应力测试点布置

Fig. 6 Layout diagram of stress testing points for pressure vessel structure during water pressure test

力容器右侧腰线位置;(2)B3、B4位于压力容器左侧腰线位置;(3)B5位于压力容器颈部位置;(4)B6位于压力容器底部位置。布点位置示意图如图7。

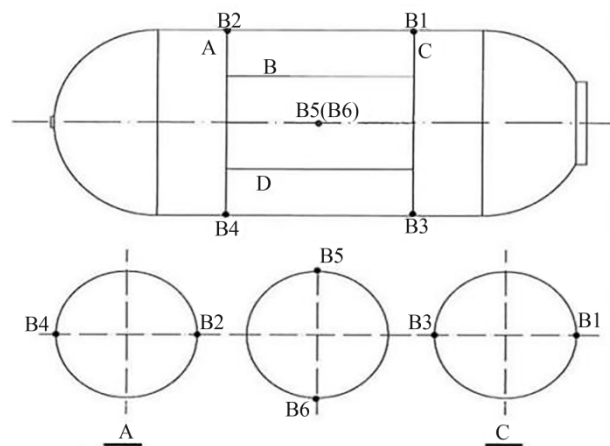


图7 水压试验压力容器变形测试位移传感器布置

Fig. 7 Pressure test vessel deformation test displacement sensor layout diagram

2.2 模型的水压试验方案

2.2.1 1#模型件的水压试验方案

1#水压试验主要分为预水压试验阶段和主水压试验阶段,其中预水压试验主要目的为检查闷头及试验管路的密封情况及各种检测设备的运行情况,低点进水、高点排气。整体试验压力循环线按图8执行。

2.2.2 2#模型件的水压试验方案

2#模型同样分为预水压试验和水压试验两阶段,水压试验设计压力为10.25 MPa。模型水平卧

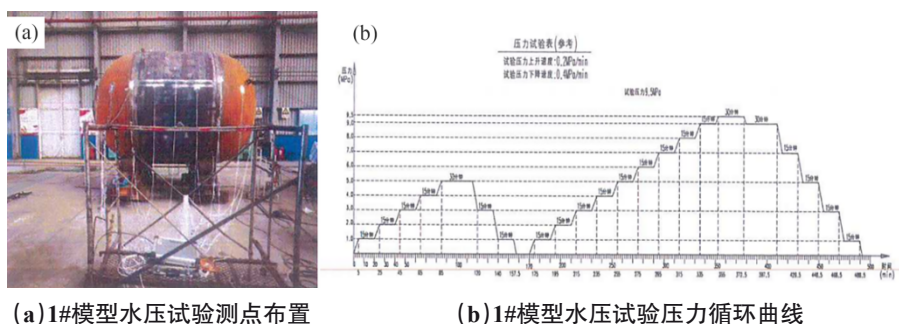


图8 1#模型水压试验测点布置及压力曲线

Fig. 8 Layout of pressure test measurement points and pressure curves for model 1#

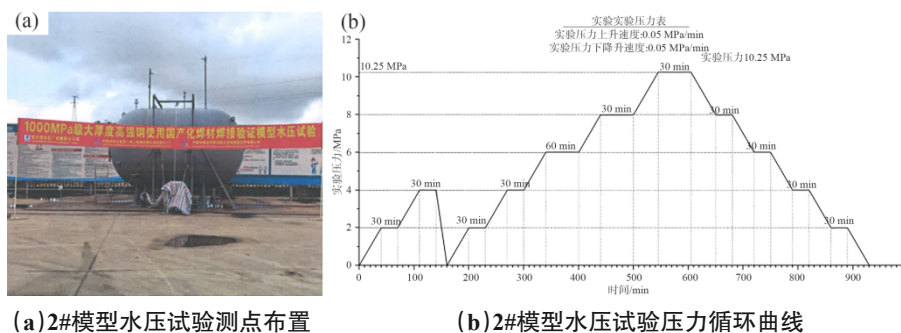


图9 2#模型水压试验测点布置及压力曲线

Fig. 9 Pressure test points and pressure curves for model 2#

放于两个鞍形支架上,两支座用聚四氟乙烯板垫在钢板平台上,保证水压时可自由位移,支座不对压力容器产生约束。水压试验压力循环见图9。

3 水压试验结果与分析

3.1 1#模型水压试验数据分析评估

1#模型水压试验实测应力值见表2。由表2可知,1#模型在加压过程中整体承受较大的环向拉应力。在测点分布的三个主要区域——闷头区、两闷头间连接环焊缝区、直管段拼接焊缝区,分别存在一个峰值应力点,即11#、15#、7#测点,对应的应力

值分别为99.2 MPa、137.4 MPa、175.8 MPa。为进一步验证此3个测点数据是否存在应力突变及应力集中,即是否存在焊缝区域失效行为,又分别对其进行了线性拟合分析,结果如图10所示。

图10为各典型测点的线性拟合情况。由图10可知,外壁的3个峰值应力测点的应力分量值与试验压力值呈良好的线性关系,表明应力测试系统稳定可靠且各测试部位均处于弹性变形状态。

王建华等结合中华人民共和国电力行业标准DL/T 5141—2001《水电站压力容器设计规范》(简称“中国钢管规范”),梳理了1 000 MPa级标准钢材的抗力限值^[9],见表3。

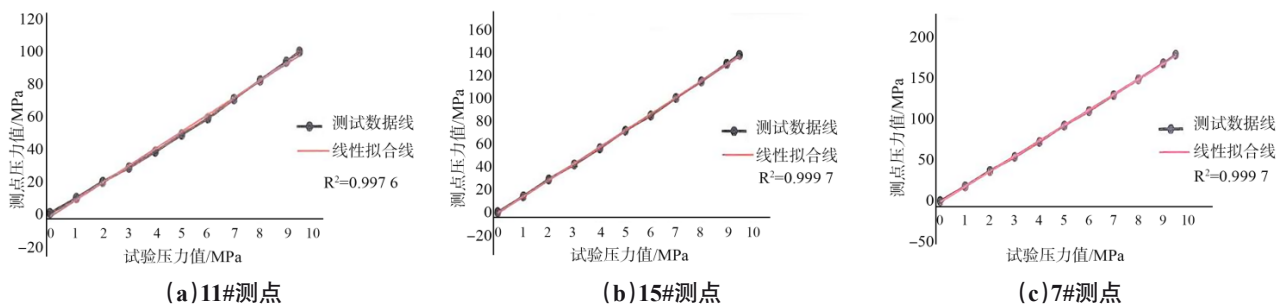


图10 各典型测点的线性拟合情况

Fig. 10 The linear fitting results of each typical measurement point

表2 各压力等级下1#模型件测点应力值

Table 2 Stress values of measurement points of the model components under various pressure levels

试验压力测点编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	9.5
1	σ_x	1.7	3.3	4.2	6.4	8.4	8.7	8.9	9.0	9.5	10.1
	σ_y	5.4	11.2	15.9	21.3	28.1	33.7	39.9	45.6	53.0	56.8
2	σ_x	4.0	8.2	11.4	16.0	20.7	24.8	29.6	34.2	39.6	42.5
	σ_y	4.2	8.3	11.5	15.4	20.8	25.0	30.0	34.4	40.5	43.4
3	σ_x	3.1	6.3	8.8	12.4	16.6	19.8	24.1	27.7	32.8	35.2
	σ_y	2.8	5.4	7.0	9.7	13.5	16.1	19.7	22.6	27.0	29.1
4	σ_x	2.8	6.2	8.6	12.1	15.9	19.3	23.4	27.3	32.5	35.1
	σ_y	6.2	12.5	17.4	23.6	31.1	36.7	43.9	50.5	58.3	62.4
5	σ_x	2.6	5.0	6.6	9.4	12.4	14.7	18.7	20.9	25.0	27.0
	σ_y	8.0	16.6	24.1	32.4	42.2	50.7	60.2	69.4	79.9	85.5
6	σ_x	5.3	9.7	13.7	18.3	23.7	28.3	33.5	38.0	43.3	45.9
	σ_y	16.5	33.9	49.5	66.4	84.8	101.1	119.7	137.9	156.4	166.5
7	σ_x	5.6	11.3	16.2	21.5	27.7	33.0	38.9	44.2	50.3	53.3
	σ_y	17.6	36.2	53.0	71.1	90.7	108.1	127.4	146.2	165.4	175.8
8	σ_x	7.1	14.7	21.2	28.8	37.1	44.7	54.3	63.9	74.1	79.6
	σ_y	11.5	23.5	34.0	45.4	58.5	69.4	81.6	93.1	105.0	111.3
9	σ_x	7.3	15.3	22.2	30.1	38.5	45.7	53.7	61.2	69.2	73.2
	σ_y	7.7	15.7	22.7	30.6	39.0	46.1	54.3	61.9	69.6	73.6
10	σ_x	8.5	17.8	26.5	35.1	44.8	53.5	62.5	71.3	80.3	85.0
	σ_y	8.5	17.5	25.3	34.2	43.4	51.3	60.3	68.6	77.1	81.4
11	σ_x	9.3	19.2	27.9	37.7	48.1	58.1	69.9	81.4	92.9	99.2
	σ_y	7.5	15.5	22.5	30.1	38.4	45.8	53.4	60.5	68.0	72.1
12	σ_x	3.2	4.9	6.1	7.8	7.5	9.3	12.6	17.2	23.2	26.3
	σ_y	13.7	27.9	40.6	53.7	69.1	81.9	95.9	109.2	123.7	131.1
13	σ_x	7.6	15.4	22.4	30.4	38.9	46.2	55.1	63.6	73.0	78.0
	σ_y	13.0	26.4	38.3	51.0	65.7	77.4	90.7	103.2	116.8	123.7
14	σ_x	7.1	15.0	31.8	29.7	38.0	44.8	51.5	58.4	66.3	71.0
	σ_y	12.6	25.9	37.4	50.4	64.4	76.3	90.2	104.4	119.5	127.9
15	σ_x	4.7	9.8	14.4	19.5	24.9	30.7	37.8	45.3	53.0	56.8
	σ_y	13.8	28.5	41.6	55.7	71.0	84.3	99.6	114.2	129.5	137.4
16	σ_x	5.4	10.9	15.6	21.2	26.8	32.0	38.1	44.3	50.7	54.1
	σ_y	12.1	24.7	36.1	47.8	61.3	73.0	85.4	97.2	110.1	116.9
17	σ_x	5.6	11.5	16.5	22.6	28.7	35.2	43.2	51.2	59.6	63.8
	σ_y	12.7	26.0	37.8	50.2	64.4	76.6	90.1	102.5	115.8	122.8

注:(1)表中 σ_x 表示轴向(沿水流方向)应力, σ_y 表示周向(垂直水流方向)应力;(2)表中正值表示拉应力,负值表示压应力,单位为“MPa”。

表3 中国钢管规范钢材的抗力限值

Table 3 Resistance limit values for steel materials in Chinese steel pipe specifications

应力种类		屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	设计强度 /MPa	结构系数 γ_d	运行工况	
						正常运行/MPa	水压试验/MPa
管壳	整体膜应力	885	950	572.9	1.6×1.1	295.92	361.68
	局部膜应力	885	950	572.9	1.3×1.1	362.20	445.15
	局部膜应力+弯曲应力	885	950	572.9	1.1×1.1	430.43	526.08
肋板	$t\leq 75$ mm	885	950	572.9	1.1×1.1	430.43	526.08

结合NB/T 35056—2015《水电站压力容器设计规范》中关于钢材强度设计值的确定原则,即钢材

强度设计值在满足式(1)的条件下,其强度设计标准值 f_k 按式(2)确定,强度设计值 f 按式(3)确定。由

于 1#模型为明管状态,因此选用明管对应各项系数:

$R_{p0.2}/R_m>0.7$ (1)

$f_{sk}=0.7R_m$ (2)

$f_s=f_{sk}/1.111$ (3)

根据上述公式得到 1 000 MPa 级母材对应的强度设计值,结合式(4)计算其钢管结构构件的抗力限值(N/mm²):

$\sigma_R = \frac{1}{\gamma_0 \psi \gamma_d} f$ (4)

式中 f_{sk} 为强度标准值(单位:MPa); f_s 为强度设计值(单位:MPa); σ_R 为钢管结构构件的抗力限值(单位:N/mm²); γ_0 为结构重要性系数,按安全级别I级,取 $\gamma_0=1.1$; ψ 为设计状况系数,按正常使用极限状态设计取 $\psi=1.0$; γ_d 为结构系数,水压试验情况下 γ_d 降

低 10%; f 为钢材强度设计值(单位:N/mm²)。

将母材性能参数代入强度计算公式得到强度设计值,再代入式(4)得到明管运行工况及明管水压工况下的抗力限值,结果如表 4 所示。

从安全系数角度分析,中国钢管规范中管壳在正常运行及水压试验条件下,整体膜应力对应于屈服点安全系数分别为 2.99 和 2.45,局部膜应力+弯曲应力对应于屈服点的安全系数分别为 2.06 和 1.68^[10]。1#模型安全系数高于标准值且未超出表 3、表 4 中各应力控制标准。卸压后对焊缝区域进行 UT 及 TOFD 探伤复检,各焊缝均未见超标缺陷指示。该结果表明,使用国产焊材焊接的焊缝在本文模拟件条件下具有可靠的承压性能,能够满足 1000 MPa 级母材焊接结构的工程应用需求。

表 4 使用中国钢管规范进行的 1000 MPa 级母材抗力限值计算

Table 4 Calculation of yield limit values for 1000 MPa grade base materials using Chinese steel pipe standards

应力种类		屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	设计强度/MPa	结构系数 γ_d	运行工况	
						正常运行/MPa	水压试验/MPa
明管管壳	整体膜应力	890	950	665	1.6	377.84	419.82
	局部膜应力	890	950	665	1.3	465.04	516.71
	局部膜应力+弯曲应力	890	950	665	1.1	549.59	610.65

3.2 2#模型水压试验数据分析评估

3.2.1 模型水压试验前、后残余应力数据分析

焊接过程中的局部热输入及内、外拘束度共同影响热影响区附近的原子运动,在焊接完成后于构件中形成宏观变化和宏观应力,即焊接变形和焊

接残余应力^[11]。水压试验前后的焊接残余应力测试数据如表 5 所示。试验前,最大残余应力值位于 B'-1 测点(外壁),为 717 MPa;该点水压试验后的残余应力降为 538 MPa,降幅为 25.1%。水压试验后,最大残余应力值位于内壁 B-1 测点,为 556 MPa,该

表 5 压力容器水压试验前、后残余应力测试数据

Table 5 Residual stress test data before and after water pressure test of pressure vessels

状态	测点位置	测点区	测点序号	Δx	Δy	σ_x /MPa	σ_y /MPa	状态	测点位置	测点区	测点序号	Δx	Δy	σ_x /MPa	σ_y /MPa
试验前	内壁	A	1	-778	-643	625	536	试验后	内壁	A	1	-677	-513	494	373
试验前	外壁	A'	1	-800	-709	662	604	试验后	外壁	A'	1	-544	-471	345	286
试验前	内壁	A	2	-743	-697	609	579	试验后	内壁	A	2	-694	-548	521	416
试验前	外壁	A'	2	-761	-662	616	550	试验后	外壁	A'	2	-599	-531	423	371
试验前	内壁	B	1	-816	-731	682	628	试验后	内壁	B	1	-722	-578	556	456
试验前	外壁	B'	1	-862	-700	717	629	试验后	外壁	B'	1	-688	-623	538	493
试验前	内壁	B	2	-792	-705	654	599	试验后	内壁	B	2	-543	-531	364	354
试验前	外壁	B'	2	-743	-599	582	483	试验后	外壁	B'	2	-611	-488	421	326
试验前	内壁	B	3	-724	-642	577	521	试验后	内壁	B	3	-622	-413	407	239
试验前	外壁	B'	3	-774	-698	637	588	试验后	外壁	B'	3	-733	-514	547	389
试验前	内壁	B	4	-784	-618	624	512	试验后	内壁	B	4	-623	-464	425	302
试验前	外壁	B'	4	-711	-651	567	527	试验后	外壁	B'	4	-623	-543	451	391

注:(1)表中 $\Delta\epsilon_x$ 和 $\Delta\epsilon_y$ 分别表示沿焊缝和垂直焊缝方向的应变增量; σ_x 和 σ_y 分别表示沿焊缝和垂直焊缝方向的残余应力,应力值单位为 MPa。(2)测点编号中,第一位字母为测点区域,A、B 号测点区域位于管壁内侧,A'、B'号测点区域位于管壁外侧。

点水压试验前的残余应力值为 682 MPa, 降幅为 18.5%。

将水压试验前、后的残余应力测试数据进行对比, 如图 11 所示。由图 11 可知, 经水压试验后各测点的残余应力值均呈降低趋势, 表明残余应力整体降低并发生重分布。

参照靳红泽^[11]等提出的焊接残余应力分布特征参数——残余应力峰值消除率 R_p 、残余应力平均消除率 R_a 、残余应力均化程度 σ_h 三个指标, 评价钢岔管水压试验消应效果。结合压力容器受力特点, 即每个测点要求至少测试轴向和环向两个方向的残余应力, 计算得到本文试验模型的残余应力平均消除率 $R_a=26.6\%$ (内壁 σ_x)、 36.6% (内壁 σ_y)、 27.9% (外壁 σ_x)、 33.3% (外壁 σ_y)。

$$R_p = \frac{\sigma_a - \sigma_{a后}}{\sigma_a} \times 100\% \quad (5)$$

式中 R_p 为残余应力峰值消除率; σ_a 为残余应力算数平均值 (单位: MPa); $\sigma_{a后}$ 为水压试验后的残余应力测试算数平均值 (单位: MPa)。

残余应力幅差反映了测试区域内残余应力的波动范围。参照靳红泽等^[11]的方法, 将水压试验前测区内残余应力最大值与最小值之差定义为残余应力幅度差 σ_d , 水压试验后测区内残余应力最大值与最小值之差定义为残余应力均化程度 σ_h 。计算得残余应力幅度差 $\sigma_d=234$ MPa, 残余应力均化程度 $\sigma_h=317$ MPa, 两者数值相近, 表明水压试验前后的焊接残余应力幅度差值相近。

$$\sigma_d = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (6)$$

$$\sigma_h = \sigma_{max后} - \sigma_{min后} \quad (7)$$

上述分析表明, 使用国产焊材焊接的焊缝经水压试验验证后, 焊接残余应力整体降低并趋于均匀化, 满足压力容器运行工况的性能需求。

3.2.2 2#模型应力数据分析

对 2#模型水压试验后的结构应力数据同样进行线性拟合分析, 结果如图 12 所示。各测点应力数据与压力等级呈良好的线性关系, 且应力数据符合模型在水压试验受力状态的应力分布规律。

在最大试验压力 10.25 MPa 下, 模型内壁测点的最大结构应力值为 348.9 MPa, 位于压力容器内壁的 N15 测点; 压力容器外壁测点的最大结构应力

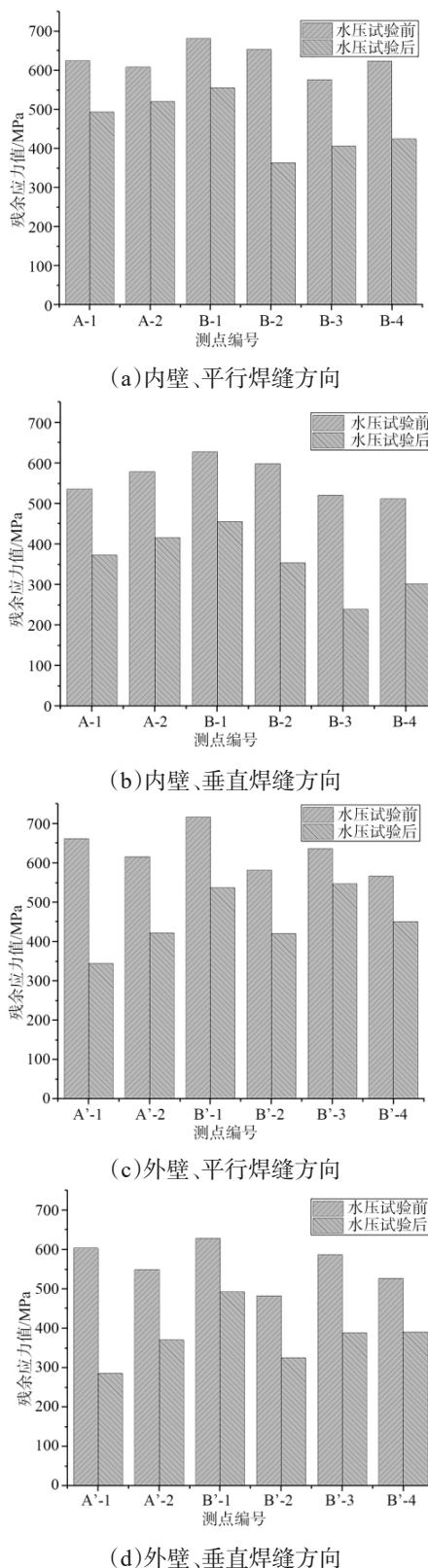
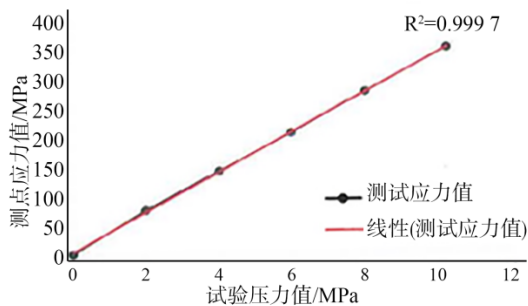
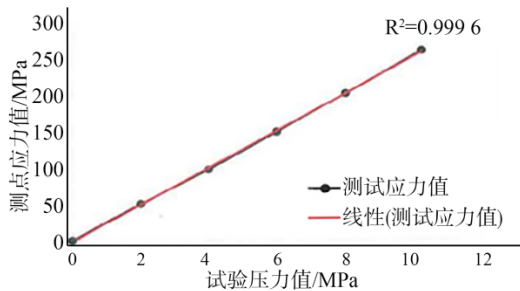


图 11 压力容器水压试验前、后各测点残余应力对比

Fig. 11 Comparison of residual stresses at each measuring point before and after the water pressure test of pressure vessels



(a)N15 测点



(b)W15 测点

图 12 N15、W15 测点线性拟合分析

Fig. 12 Linear fitting analysis of stress values at N15 and W15 measuring points

值为 260.5 MPa, 位于压力容器外壁 W15 测点。实测最大测点应力值低于许用压力和母材屈服强度, 2#模型件的安全裕度满足使用需求。

压力卸载后对焊缝进行 UT+TOFD 复检, 未见线性缺陷显示。2#模型件在首次压力循环至峰值 4.0 MPa 并卸载后, 重新加压到 10.25 MPa 时, 该测点最高应力为 348.9 MPa(内壁)、260.5 MPa(外壁), 仍处于弹性变形的线性区间^[12]。

3.2.3 2#模型结构位移(变形)数据分析

水压试验的变形监测是在充水和压力加载过程中, 通过测点监测模型件外形变化趋势, 根据模型外壁位移量大小评估试验安全性。2#模型件在最大试验压力 10.25 MPa 下, 压力容器结构最大位移点位于 B6 测点, 最大位移量为 -2.97 mm。各压力等级下测点的位移数据见表 6, B6 测点的线性分析结果如图 13 所示。

由表 6 可知, B3-B6 测点位置随压力上升逐渐向外膨胀(负值增大), B2 测点先膨胀后收缩, B1 测点随压力上升呈收缩趋势。这一变形规律与结构应力数据的分布特征基本一致。理论上, 当材料处于线弹性状态时, 试验压力与变形量应呈线性关

表 6 压力容器各压力等级下测点位移数据汇总表

Table 6 Summary table of measured displacement data at various pressure levels of pressure vessels

试验压力 测点编号	2.0	4.0	6.0	8.0	10.25
B1	-0.07	-0.01	0.14	0.54	0.94
B2	-0.11	-0.21	-0.07	0.53	0.94
B3	-0.26	-0.5	-0.77	-1.04	-1.32
B4	-0.22	-0.47	-0.71	-0.93	-1.15
B5	-0.24	-0.47	-0.69	-0.93	-1.22
B6	-0.52	-1.18	-1.76	-2.34	-2.97

注: 正值表示管壁收缩, 负值表示管壁膨胀。

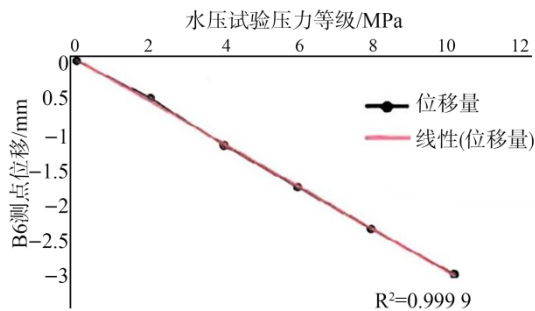


图 13 B6 测点位移数据线性分析

Fig. 13 Linear analysis of displacement data at B6 measuring point 系^[13]。考虑到模型在水压过程中可能出现整体水平、垂直移动, 对 B1/B2、B3/B4、B5/B6 三组典型位置测点的变形结果取平均值, 结果如表 7 所示。

表 7 水压试验各对称测点变形监测平均值

Table 7 Average values of deformation monitoring at each symmetrical measurement point during the water pressure test

试验压力/MPa	B1/B2	B3/B4	B5/B6
2.0	-0.9	-0.24	-0.39
4.0	-0.11	-0.49	-0.83
6.0	-0.04	-0.77	-1.23
8.0	0.54	-0.99	-1.64
10.25	0.94	-1.24	-2.10

由表 7 可知, 各对称方向测点的平均变形量随压力增大呈现出良好的线性关系, 这是由于熔敷金属中存在一定数量的 AF 和 BF 等大角度晶界组织, 有效阻碍了裂纹形成与扩展, 同时熔覆金属中的残余奥氏体组织通过 TRIP 效应也有效降低了细小裂纹尖端应力集中^[14]。模型最大平均变形值出现于 B5/B6 测点, 该区域最大平均变形量为 2.1 mm, 仍处于线性关系良好状态, 说明仍有足够安全裕度。从图 14 的拟合曲线可进一步看出, B1/B2 区域的线性关系稍差, 应力在 2 MPa、4 MPa、6 MPa 时变形不均



匀,有关其原因或为模型件在加压后局部残余应力消除及细小尖锐缺陷钝化不均所致的弹性变形^[15],但三个区域的总体线性拟合程度仍较好,说明被监测的焊缝区域仍处于线弹性变形范围。

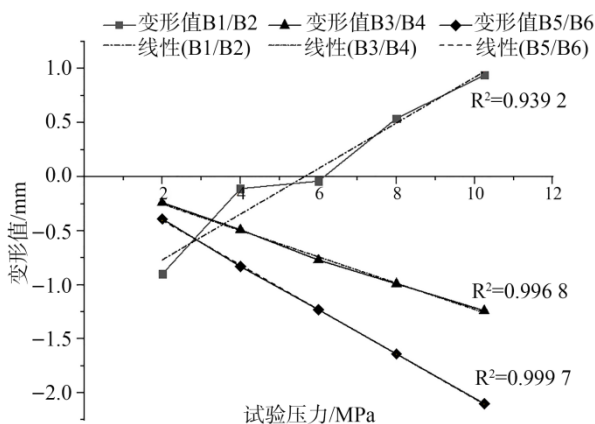


图 14 各对称点平均变形值线性拟合分析

Fig. 14 Linear fitting analysis of average deformation values at symmetrical measuring points

4 结论

(1)采用国产及进口 1 000 MPa 级气体保护焊丝、国产 1 000 MPa 级埋弧焊丝/焊剂和焊条电弧焊条,完成了两套局部缩比压力钢管焊接模拟件的制造和水压试验验证。焊后及卸压后无损检测结果均未见超标缺陷,表明所选焊接材料及配套工艺在本文模拟件条件下具有较好的工艺适应性。

(2)两套模拟件在试验压力范围内,各测点结构应力和位移均与压力呈良好线性关系,表明结构整体处于弹性响应状态。1#模拟件实测最大结构应力为 175.8 MPa,2#模拟件内壁和外壁最大结构应力分别为 348.9 MPa 和 260.5 MPa,均低于相应工况的许用应力,结构安全裕度充足。

(3)水压试验后,焊接残余应力总体降低并发生重新分布。需注意的是,残余应力消除率和均化程度应按明确公式重新计算,并结合各测点变化趋势进行表述;不宜仅以局部峰值下降直接推断整体残余应力均化效果。

(4)在本研究模拟件结构形式、焊接工艺及水压试验条件范围内,国产 1 000 MPa 级配套焊材(气体保护焊丝 HS-100S、埋弧焊丝 HW-100G/SJ100G、

焊条电弧焊条 J107SX)及其配套工艺能够满足水电用高强钢压力钢管焊接结构的水压验证要求,具备替代进口焊材的可行性。

参考文献:

- [1] 林伯强,杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报(社会科学版),2022,42(5):1-10.
LIN B Q, YANG M Q. China's Power System Research in the Context of Carbon Neutrality: Current Status, Challenges, and Development Direction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University: Social Sciences, 2022, 42(5):1-10.
- [2] 王超,孙福全. 科技创新支撑我国清洁能源产业发展战略研究[J]. 科学学研究,2026,44(1):86-93.
WANG C, SUN F Q. Research on the development strategy of Chinas clean energy industry supported by scientific and technological innovation [J]. Studies in Science of Science, 2026, 44(1):86-93.
- [3] 任卓亚,郭宁,解伦,等. 我国清洁能源发展规律分析及其与经济系统的协调发展评价[J]. 电网与清洁能源,2024,40(12):128-134.
REN Z Y, GUO N, XIE T, et al. A Study on the Development Patterns of Clean Energy in China and Evaluation of Its Coordinated Development with the Economic System [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(12):128-134.
- [4] LI M, JIANG W L. The application and the problems of high strength steel on penstock in Chinese hydroelectric station[J]. ISIJ International, 2002, 42(12):1419-1422.
- [5] HARA N, SATO M. Development and application of welding consumables for 950 MPa class high strength steels [C]//Proceedings of the Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants. Takasaki: Japan Welding Engineering Society, 2009:7-1-7-7.
- [6] Chen J, Li C S, Ren, J, et al. Microstructure and mechanical properties of 1000 MPa grade steel plate for hydropower station in different quenching processes-Gefüge und mechanische Eigenschaften einer 1000 MPa-Stahlplatte für Wasserkraftwerke nach verschiedenen Wärmebehandlungsprozessen [J]. Materials Science & Engineering Technology, 2022, 53(5):564-575.
- [7] ZHANG K L, LI J, WU S H, et al. Effect of cross section on the microstructure and mechanical properties of 950 MPa grade heavy steel plate for hydropower [J].



- Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(18): 9870–9878.
- [8] 吴双辉,李景,刘洁,等. 国产 B950CF 与日本 HT100 水电用高强度钢板成分、组织及力学性能比较[J]. 大电机技术, 2024(3): 103–109.
- WU S H, LI J, LIU J, et al. Comparison in Composition, Structure and Mechanical Properties Between Domestic B950CF and Japanese HT100 High-strength Steel Plates for Hydropower[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2024(3): 103–109.
- [9] 王建华,李明. 1000 MPa 级别高强度钢模型岔管水压试验研究[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集(2013). 北京:中国电力出版社, 2013.
- [10] 李明,刘婕. 1 000 MPa 级别高强度钢岔管模型的承载力试验研究[J]. 水力发电, 2014, 40(3): 85–89.
- LI M, LIU J. Study on Water Pressure Test of 1000 MPa High-strength Steel Bifurcated Pipe Model [J]. Water Power, 2014, 40(3): 85–89.
- [11] 靳红泽,曹佳丽,杜雅楠,等. 钢岔管水压试验消除焊接残余应力效果评价方法探讨[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(4): 71–74.
- JIN H Z, CAO J L, DU Y N, et al. Evaluation Method of the Effect of Welding Residual Stress Elimination in the Crescent-rib Reinforced Bifurcated Pipe Hydrostatic Test[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(4): 71–74.
- [12] 陈尚林,喻冉. 抽水蓄能电站钢岔管水压试验技术[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(6): 128–132.
- CHEN S L, YU R. Hydraulic Test Technology of Steel Bifurcated Pipe in Pumped Storage Power Station [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(6): 128–132.
- [13] 谭新,王光旭,姜胜先,等. 宁海抽水蓄能电站引水钢岔管水压试验技术研究[J]. 治淮, 2025(10): 17–20.
- [14] SOLEIMANI M, KALHOR A, MIRZADEH H, et al. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: A review [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 795: 140023.
- [15] 李旭. 高强度钢 B780CF 岔管制造工艺与水压试验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2015.
- LI X. Research on manufacturing process and hydrostatic test of high-strength steel B780CF bifurcated pipe[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

