

水工金属结构异种钢材焊接试验研究

黄孟生 孙义明

陈立 陈茂满

(河海大学 南京 210098) (江苏省治理太湖指挥部 苏州 215011)

摘要 针对在焊接过程中可能产生的质量问题,对标准与牌号均不相同的进口与国产的异种钢材的可焊性、焊接工艺、焊接质量以及用异种钢材焊接而成的水工钢闸门所产生的残余应力对闸门面板应力的影响等方面作了一些研究,根据力学性能和化学成份将几种国产和进口钢材分成几类,从而选用不同的焊条和焊接工艺,并采用盲孔法测试了闸门面板应力。

关键词 水工金属结构 异种钢材 焊接试验 残余应力 盲孔法

某水利工程从欧洲几个不同国家引进一批标准与牌号均不相同的钢材,其中有西班牙产 DIN 1700 标准 RST 37-2 牌号的型材,罗马尼亚产 SIJ G3106 标准 SM41B 和 SM50B 牌号的板材等。为把这批钢材更有效、更合理地用于水工金属结构中,针对两种不同标准的进口钢材与国产钢材混合使用时,在焊接过程中可能产生的质量问题,需对这些钢材的可焊性、焊接工艺、焊条选择、焊接质量以及用异种钢材焊接的钢闸门所产生的残余应力对闸门面板应力的影响等方面作一些研究。

1 异种钢材的可焊性研究

1.1 可焊性研究

异种钢材的可焊性主要表现在异种钢材焊缝与母材的金相组织结构、化学成份、物理力学性能之间的差异。本课题所研究的各种钢材均属珠光体钢,其金相组织相同。根据资料分析及抽取 9 种炉号的钢材的力学性能试验, RST 37-2、SM 41B 与国产 Q₂₃₅ 牌号的钢材的化学成份与力学性质基本相同,属于低碳钢,而 SM50B 与国产 16Mn 牌号的钢材的

化学成份与力学性质基本相同,属于中碳钢或低合金钢。

碳钢是以铁为基础、以碳为合金元素,含碳量不超过 0.30%,锰、硅等其它元素均不作为合金元素。碳钢的焊接性主要取决于碳含量,其它元素对焊接性的影响,通常把它们折算成碳当量 C_{eq} 。碳当量 $C_{eq} < 0.40\%$ 时,可焊性良好,除遇刚性结构或在低温条件下施焊以外,焊接时不必采取专门的工艺措施;碳当量 $C_{eq} > 0.45\%$ 时,可焊性变差,主要表现在冷裂纹的敏感性增加。以上两类钢材碳当量均小于 0.45%。

1.2 焊条的选择

焊条选择首先是根据母材类别选择相应的种类。焊接低碳钢或普通合金钢材时,应选用结构钢焊条。选择结构钢焊条的不同系列时,通常按“等强度”的原则选择与母材强度级别相同的焊条;如果是强度不同的异种钢材焊接,一般要求焊缝及接头的强度不低于较低母材的强度,且保证焊缝及接头的塑性、韧性和抗裂性不低于强度较高而塑性、韧性和抗裂性较低一侧的母材。表 1 给出两类钢材组

表 1 不同类别钢材组合的焊接材料选择

被焊钢材类别组合	焊 接 材 料		预热温度/℃	回火温度/℃
	手 工 焊	埋弧自动焊		
低碳钢	J ₄₂₁ , J ₄₂₂ , J ₄₂₃ , J ₄₂₄ , J ₄₂₆	H08 或 H08A	不预热或 100~200	不回火或 600~640
低碳钢与中碳钢或低合金钢	J ₄₂₇	H08A 或 H08MnA	不预热或 100~200	不回火或 600~640

合焊接时焊条选择^[1],其中,当厚度大于或等于 35 mm 或对机加工有精度要求时必须回火,含碳量小于或等于 0.30% 时可不预热。

1.3 焊接工艺

以上两类钢材是比较容易焊接的金属,几乎所有的焊接方法都适用。因其塑性和韧性优良,通常情况下,不会因焊接引起严重的硬化和淬火组织,因而焊接接头的塑性和韧性良好。因此,一般情况下不需采取特殊的工艺措施。为了减少焊接变形和残余应力、防止冷裂纹的产生、提高焊接接头的强度和塑性等,可采取下列工艺措施:^[2~4]

- 选择合适的焊接电流;
- 采用多层焊或多层多道焊;
- 根据结构和特点的坡口型式,预留反变形或选择合理的焊接顺序;
- 采用对称或分段等焊接方法,分段长度一般为 200 ~ 400 mm;
- 对于刚度大,易出现裂纹的构件,可采用含氢量低的碱性焊条;
- 为降低残余应力,特别是封闭焊缝焊接时,应配合锤击法;
- 必要时可采取焊前预热,焊后缓冷。

1.4 异种钢材焊接质量测试

对于在焊接水工钢闸门中可能采用的对接焊和贴角焊的材料进行组合后,按国家标准 BG2975-82 和 BG2649-2655-89 要求加工成标准试样,并进行试验。对接焊试件的拉伸与弯曲试验结果见表 2;贴角焊试件的搭接剪切试验结果见表 3。表 3 中 τ_h 为拉断时,贴角焊缝处的名义剪应力。

表 2 对接焊拉伸与弯曲试验

品名规格	对接拉伸		冷弯 $D = 2a$ $\alpha \geq 100^\circ\text{C}$
	σ_b/MPa	断口距焊缝中心距离/mm	
I ₁₆	452	25	完好
	450	25	完好
I ₂₀	487	28	完好
	491	31	完好
δ_{10}	472	0	完好
	485	35	完好

表 3 贴角焊剪切试验

搭接方式	σ_b/MPa	τ_h/MPa	断口位置/mm
$\delta_{10}(\text{罗}) \sim \delta_{10}(\text{罗})$	475	343	δ_{10} 一侧,距焊脚 80
	480	344	δ_{10} 一侧,距焊脚 70
$\delta_{10}(\text{罗}) \sim \delta_{11}(\text{国产})$	482	319	δ_{10} 一侧,距焊脚 70
	482	318	δ_{10} 一侧,距焊脚 60
$\delta_{10}(\text{罗}) \sim \text{I}_{16}(\text{西})$	460	276	I ₁₆ 一侧,距焊脚 70
	458	275	I ₁₆ 一侧,距焊脚 75
$\delta_{10}(\text{罗}) \sim \text{I}_{20}(\text{西})$	492	301	I ₂₀ 一侧,距焊脚 75
	497	305	I ₂₀ 一侧,距焊脚 80
I ₁₆ (西) ~ δ_{11} (国产)	457	253	I ₁₆ 一侧,距焊脚 60
	450	250	I ₁₆ 一侧,距焊脚 70

2 闸门面板残余应力测试

残余应力是指没有外部因素作用就存在于构件内部、并自成平衡的应力,又称初应力,金属结构经过焊接方法加工后,会在其内部产生残余应力。焊接产生的残余应力是因为在焊接加热过程中,构件加热产生的压应力达到材料的屈服极限、产生压缩塑性变形;当温度恢复到原始状态时,产生收缩并受到约束的限制而在构件内部形成新的内应力,即残余应力。

2.1 残余应力测试原理

盲孔法是残余应力测试比较成熟、准确的方法,又称为小孔释放法。它是一种半有损测试方法,该法是在被测构件表面粘贴电阻应变花后再钻孔,量测钻孔前后该点三个方向的应变差值,根据释放理论,结合材料系数标定试验,即可得到残余应力。

图 1 所示无限大平板,作用应力有 σ_1 , σ_2 ,如果在某处钻一直径为 $2a$ 的小孔,那么距孔心距离为 r ,方向角 α 的任一点 p 处钻孔前后的释放应变^[5,6]为

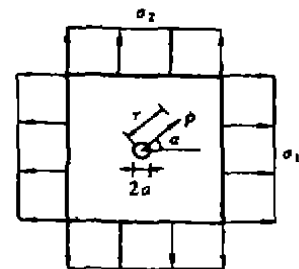


图 1 平面应力场

$$\varepsilon_r = (A + B\cos 2\alpha)\sigma_1 + (A - B\cos 2\alpha)\sigma_2 \quad (1)$$

式中 A, B 为释放系数, 与应变花的几何形状、尺寸、孔距 r 、孔径 $2a$ 、孔深 h 以及被测构件材料等因素有关。对于盲孔法必须由试验标定。

图2所示应变花, a, b, c 三个应变片与 σ_1 的方向角分别为 $\alpha, \alpha + 45^\circ, \alpha + 90^\circ$, 钻孔前后的释放应变为 $\varepsilon_a, \varepsilon_b$ 和 ε_c , 由式(1)得到

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2 &= \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4A} \pm \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4B\cos 2\alpha} \\ \tan 2\alpha &= \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

求得主应力及主方向后, 即可由材料力学公式计算 x, y 方向的应力。

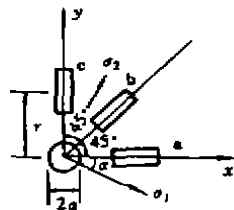


图2 应变片粘贴方位

2.2 释放系数标定

图3所示单向拉伸应力状态试件, $\sigma_x = \sigma_1 = \sigma, \sigma_y = \sigma_2 = 0, \alpha = 0$, 钻孔前后 x, y 方向的释放应变差分别为 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$, 由式(2)得

$$A = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2\sigma}, B = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2\sigma} \quad (3)$$

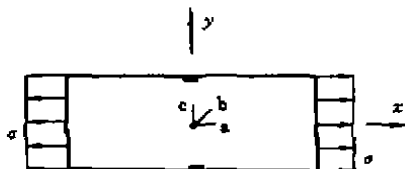


图3 单向拉伸标定试件

试验标定时采用 $\frac{1}{4}\sigma_s$ 应力水平下的荷载, 钻孔前可测定弹性常数, 钻孔后测试释放系数

和方向角。当方向角 2α 在 $-2^\circ \sim +2^\circ$ 范围内时, 结果才有效。标定结果见表4。

2.3 残余应力测试成果与分析

钢闸门残余应力测试是以闸门一区格为研究对象, 区格净尺寸为 $600\text{ mm} \times 650\text{ mm}$, 面板采用 $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ 罗马尼亚产 δ_{10} 钢板, 主梁腹板采用 $1000\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ 国产 δ_{12} 钢板, 小横梁采用西班牙产 16 号槽钢, 隔梁腹板采用 $600\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ 罗马尼亚产 δ_{10} 钢板(见图4)。

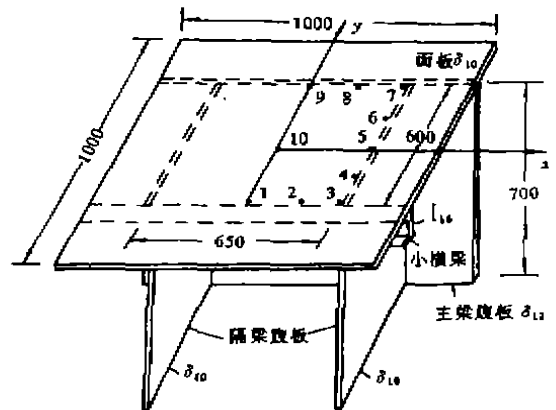


图4 闸门区格尺寸及测点布置

根据对称性, 先进行隔梁腹板与面板之间的贴角焊接, 然后进行主梁腹板、小横梁与面板之间的贴角焊接, 最后进行各梁腹板之间的贴角焊接。贴角焊缝焊脚尺寸 $k = 5 \sim 6\text{ mm}$, 焊条为 J_{422} 型号。

根据对称性, 分别在闸门区格的正面(迎水面)和反面各布置 10 个测点。由于钻孔装置的限制, 反面测点距梁腹板有 25 mm 左右的距离。

采用盲孔法对 20 个测点逐一进行残余应力测试, 应力分量 σ_x, σ_y 和 τ_{xy} 的结果见图5。

闸门区格长边(1, 2, 3 点和 7, 8, 9 点)对应边的残余应力正面和反面的分布相似, 符合残余应力的分布规律。长边沿长度方向的

表4 释放系数标定结果

$\varepsilon_x / \mu\epsilon$	$\varepsilon_y / \mu\epsilon$	$\varepsilon_{45} / \mu\epsilon$	σ / MPa	$2\alpha (\text{度})$	E / MPa	ν	$A / \mu\epsilon \cdot \text{MPa}^{-1}$	$B / \mu\epsilon \cdot \text{MPa}^{-1}$
-50	9	-21	64.64	0.97	2.09×10^5	0.397	-0.3171	-0.4564

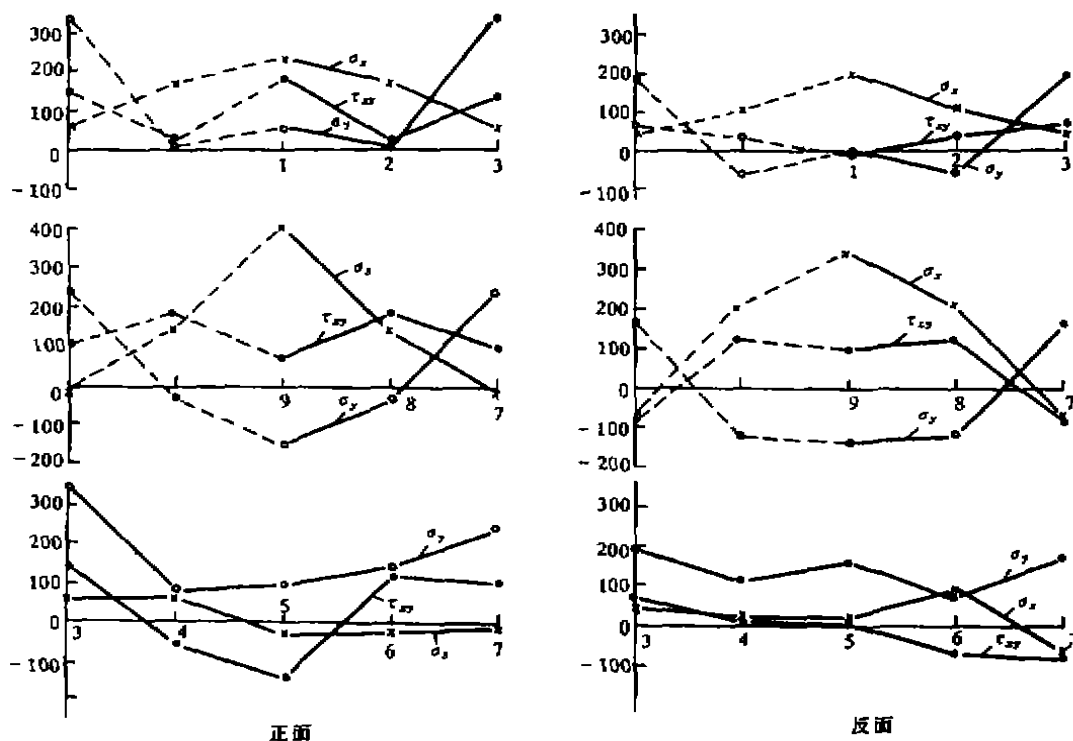


图5 闸门区格测点残余应力分布(单位:MPa)

残余应力 σ_x , 无论是正面还是反面均呈抛物线分布, 中间大, 两端小, 最大值都达到或超过材料的屈服极限 σ_s , 超过 σ_s 实际上是由于应力、应变非线性关系引起测量的应变偏大所致。主梁腹板焊缝位置(7, 8, 9点)上的残余应力比小横梁焊缝位置(1, 2, 3点)要大, 说明残余应力随刚度增加而增大; 反面各点的残余应力比正面小, 说明离焊缝越近, 残余应力越大。长边垂直于长度方向的残余应力 σ_y , 最大拉应力均发生在端部角点, 这是由于后焊部分的收缩受到先焊部分的约束所致。闸门面板验算点的残余应力: 主梁长边正面中点(9点) σ_x 为拉应力, 其数值等于 σ_s , σ_y 为压应力; 小横梁正面中点(1点), σ_x 为拉应力, 其数值等于 σ_s , σ_y 也为拉应力, 数值很小; 短边反面中点(5点) σ_x 与 σ_y 均为拉应力, σ_y 的数值比 σ_x 要大得多。

3 结 语

综上所述, 可得出以下几点结论:

a. 进口的 RST37-2 和 SM41B 牌号的钢

材属于低碳钢, 相当于我国 Q235 牌号的钢材; SM50B 牌号的钢材属于中碳钢或低合金钢, 相当于我国 16Mn 牌号的钢材。低碳钢的碳当量 $C_{eq} < 0.4\%$, 可焊性良好; 低合金钢碳当量 $C_{eq} < 0.45\%$, 可焊性稍差, 两类钢材组合施焊时要防止冷裂纹的产生。

b. 低碳钢焊接一般结构可选用 J422 型号的焊条; 对于焊缝塑性、韧性和抗裂性要求较高的重要结构, 厚度大、刚度大的结构, 或在低温条件下施焊的其它结构应选用含氢量低的碱性焊条; 两类钢材组合施焊时, 应选用 J427 型号的焊条, 必要时可选用 J427-G 型号的焊条。

c. 闸门面板验算点的残余应力: 主梁与小横梁长边中点的 σ_x 均为拉应力, 数值等于屈服极限 σ_s ; 短边反面中点 σ_x 也为拉应力, 它们将与闸门面板相叠加。要消除残余应力、闸门整体焊接时, 必须采取适当的工艺措施。

参考文献

1 何康生等. 异种金属焊接. 北京: 机械工业出版社

- 社,1986
- 2 斯重遥.焊接手册 第二卷:材料的焊接.北京:机械工业出版社,1992
- 3 潘际奎.焊接手册第一卷 焊接方法与设备.北京:机械工业出版社,1992
- 4 田锡唐.焊接结构.北京:机械工业出版社,1982
- 5 唐慕尧.焊接测试技术.北京:机械工业出版社,1988
- 6 陆才善.残余应力测试.西安:西安交通大学出版社,1991

(收稿日期:1996-07-27)

新书介绍

《水电站工程水文》——水电站工程水文/王维第,朱元性,王锐琛编著.——南京:河海大学出版社,1995,12

本书为《水力发电工程进展》丛书中的一册,综合介绍了水电站工程水文的全部内容。全书以径流、洪水、暴雨水文分析计算为重点,并扼要介绍一些有关的内容如水库泥沙、水文预报、河道不稳定流、厂坝区的水位流量关系以及电算技术的应用等。具有理论联系实际的特点,突出专业性、综合性、探索性和实践性。全书共14章,包括绪论、基本资料 and 基础工程、基本概念和基础理论、水电站与水库工程特性和水库水量平衡、设计径流分析计算、设计洪水分析计算、通过设计暴雨推求设计洪水、可能最大暴雨和洪水的估算、水电站水文预报、水库泥沙分析计算、水电站下游河道不稳定流计算、水电站厂坝区的水位流量关系、人类活动影响分析、电算技术的应用等内容;书末有附录,列出一些常用表格。本书可供从事水电站和水利工程规划、设计、科研工作者参考使用,也可供大专院校有关专业教师、研究生和高年级学生阅读参考。

《水力机械优化设计和计算机辅助分析》——水力机械优化设计和计算机辅助分析/沈祖诒,田树棠,支培法编著.——南京:河海大学出版社,1996,7

本书为《水力发电工程进展》丛书中的一册,着重介绍现代分析方法、计算机辅助设计和计算机辅助分析在水电站水力机械设计方面的应用。全书共6章,分为四部分:第一章介绍现代分析方法在水力机械设计中的应用,主要有回归分析法、系统分析法、价值工程和模糊优化等新方法;第二、三章介绍水力机械CAD的一些基本原理,主要介绍方案确定、数据处理和特性曲线绘制等;第四章介绍水力机械流场分析计算;第五、六章介绍水力机械和调节系统过渡分析。本书是在作者十几年的设计经验和研究成果基础上写成的,作者力图从理论上加以系统的阐述,并注意提高本书的实用性。本书主要供水力机械设计、科研人员使用,也可供大专院校学生阅读参考。

《土石坝变形与稳定分析》——土石坝变形与稳定分析/王复来编著.——南京:河海大学出版社,

1996,10

本书为《水力发电工程进展》丛书中的一册。全书共分六章:土石坝的发展与经验;土的变形与强度;渗透与渗透稳定分析;稳定分析;应力和变形分析;抗震分析。本书的特色之一是工程实例介绍翔实,作了客观的描述和评价。目前有的文献只介绍工程的设计施工,缺乏运行情况描述,不了解工程发生过什么事故,如何补救加固,易误认为都是成功的。本书则全面描述,有利于正确吸取经验教训。本书的特色之二是作者对坝坡稳定分析和应力应变分析有独到的见解,有利于读者独立思考和发展提高。本书最后一章抗震分析,介绍了美国个别专家提出的方法,尽管有的尚有争议,但仍不失为一种参考。本书主要供从事土石坝设计、科研工作者参考使用,也可供大专院校相关专业师生参阅。

(龚俊 供稿)

《Proceedings of the Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering》——第13届国际土力学及基础工程会议论文集/国际土力学及基础工程协会主编,——荷兰:A. A. Balkema 出版社,1994

该书为1994年1月5~10日在印度新德里举行的每隔3年一次的第13届土力学及基础工程会议论文集,一套六册。第一至第四册共收录来自47个国家1000名作者的技术论文412篇,研究的课题有17个:①土壤性质;②地基;③挡土建筑物的性能与设计;④土石坝与坝基;⑤减缓自然灾害;⑥土地改良;⑦液化;⑧地球物理方法;⑨专业实践;⑩计算机在土工中的应用;⑪古建筑与古迹地基;⑫土工教育;⑬干燥气候下的土壤;⑭环境土工学;⑮海洋土工学;⑯施工、仪表测量和实时管理;⑰道路与铁路。第五册收录有关科技发展的报告,有关专家就专门课题的见解及4篇土工讲座文章。第六册收录的3篇文章描述了会议的活动情况,收录了会后所收到的技术性论文、技术委员会举行的讨论、报告情况以及协会的有关资料。

(元国江 供稿)