

磁测法测试钢结构桥梁的焊接残余应力

刘小渝

(重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要:磁测法是基于铁磁材料压磁效应的应力测量的一种新方法,对这种方法的原理进行了介绍,并通过在3个观音岩长江大桥足尺比例构件试验研究中,对焊接完成后的焊缝应力和超声波冲击后的焊缝应力采用磁测法进行了测试。测试结果表明,在熔透焊缝中,平行和垂直焊缝方向都存在着相当大的焊接残余应力,很多测点应力已经接近钢材的屈服强度;局部构造设计对于防止焊接应力集中有着重要的意义;超声波冲击对消除焊缝残余应力效果明显。磁测法能方便有效地测试出桥梁钢构件的焊接应力,为人们了解桥梁复杂节点的焊缝应力的分布状况,掌握消除焊缝残余应力工艺处理后的效果情况,提供了切实可行的测试手段,是一种测试灵敏度高、测试系统简单、操作灵活的很具发展前景的焊缝应力测试方法。

关键词:钢结构桥梁;磁测法;焊接应力;测试;疲劳强度

中图分类号:U443.34

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2010)01-0038-04

Magnetic Measurement Method to Test Steel Bridge Welding Residual Stress

LIU Xiao-yu

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Magnetic measurement method is a new method of stress measurement, based on the piezomagnetic effect of ferromagnetic materials. Firstly, the principle of magnetic measurement method is introduced. The welding stress after completion of welding and after ultrasonic impact is tested by magnetic measurement method, in the cases of studying 3 full-scale models of Guanyinyan Yangtze River Bridge. The test results show that there is a large welding residual stress in parallel direction and the direction perpendicular to welds, and most of them are close to the yield strength of steel; local structural design is significant for the prevention of welding stress concentration; the ultrasonic impact is showed significant to eliminate welding residual stress. Experimental results show that the magnetic measurement method can effectively test the welding stress of the bridge steel members and that it is a reliable means for people to understand the weld stress distribution of the bridge. The proposed magnetic measurement method has good potential because of its high sensitivity, simple test system and the flexible operation.

Key words: steel bridge; magnetic measurement method; welding residual stress; test; fatigue strength

在大跨径钢结构桥梁中,构件由于受力大采用厚钢板的情形越来越多;此外构件与构件间的连接接头以及重要节点的节点板也由于其传力大,越来越趋于采用厚钢板,因而桥梁结构中的连接焊缝复杂,焊接完成后在焊缝区域和热影响区产生的焊接残余应力问题越来越突出。结构构件在制造过程中留下的残余应力是产生变形和开裂等工艺缺陷的主要原因,将直接影响到焊接构件的疲劳强度、结构的刚度和稳定承载力^[1-2]。因此在钢结构桥梁的构件制作和现场安装过程中,残余应力的水平、性质及分布情况是设计、制造和使用者共同关心的问题,准确

测定出构件的残余应力就显得十分重要。及时对焊接完成后的焊缝进行应力检测,了解焊接残余应力的分布规律,一方面可为后续的消除残余应力技术方案提供可靠的科学数据;另一方面对消除残余应力工艺后的焊缝进行应力检测,可掌握焊缝应力重分布情况,明确处理后的效果,对提高焊缝的疲劳强度、保证构件的制作质量、满足结构的受力安全有着重要的意义。

1 残余应力的主要测试方法

测量焊接残余应力的方法按其对被检测对象是否产生损伤分为有损法和无损法两大类,有损法又

收稿日期:2009-08-27;修订日期:2009-11-13

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(200731800092)

作者简介:刘小渝(1955-),女,重庆市人,教授,研究方向为桥梁及结构工程。E-mail:liuxiaoyu@cquc.edu.cn。

称为机械法测残余应力,它是采用机械加工的手段,对被测构件进行部分解剖或完全剥离使被测构件上的残余应力部分释放或完全释放,利用电阻应变计测出残余应力的方法。常用的有盲孔法。无损法按其使用检测手段不同,分为 x 射线衍射法、超声声弹性法和磁测法等。其中超声声弹性法只能测试高值残余应力,目前还处于试验研究阶段。

盲孔法、 x 射线衍射法、磁测法3种方法都有测试速度较快,都能用于不均匀的应力场,但 x 射线衍射法由于仪器设备的复杂性只能用于实验室,盲孔法和磁测法则因仪器的轻便性可用于实验室和现场测试。盲孔法是采用在预测工件的表面中心钻一小孔,使其产生局部应力释放,再由黏贴在孔周的应变片感受出应变的变化,该应变称为释放应变,通过弹性力学公式可得到主应力值和方向角。

与盲孔法相比,磁测法在测量残余应力时,对被检测对象不造成任何破损,此外它能测出同一点在不同状态下的应力情况。如超声波冲击等工艺处理前后的焊接残余应力的变化情况,而且它既能测平面光滑试样的应力又能测复杂形状部位处(如各构造部件相交部位或角焊缝处等)的焊缝残余应力。而盲孔法对于复杂部位的开孔则受到限制。

在钢结构桥梁的焊缝中,测试残余应力的目的是为了了解焊接残余应力的分布状况,为后续开展的减小和消除残余应力工艺及技术方案提供依据,并且在减小和消除残余应力工艺处理后,再次进行测试,以了解焊接残余应力重新分布的情况,评定工艺处理的效果,确认是否满足结构受力要求。

2 残余应力的磁测法

2.1 磁测法的测试原理

目前在我国应用的磁测法是一种无损检测的方法,它的基本原理是,基于铁磁性材料(如低碳钢等)的磁致伸缩效应,即铁磁性材料在磁化时会发生尺寸变化;反过来铁磁体在应力作用下其磁化状态(导磁率和磁感应强度等)也会发生变化,因此通过测量磁性变化可以测定铁磁材料中的应力。当试样内存在残余应力时,也会使磁畴的移动和转向均受阻而使磁化率减小,这种现象称为磁弹性现象^[3-5]。铁磁性材料其导磁率的相对变化量与应力之间存在下列线性关系:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu_0} = \lambda_0 \mu_0 \sigma$$

式中: $\Delta\mu$ 为导磁率的变化量, $\Delta\mu = \mu_0 - \mu_\sigma$ (μ_σ 为材料有应力时减小的导磁率); λ_0 为初始磁致伸缩系数; μ_0 为材料无应力状态时的导磁率; σ 为应力。

上式说明导磁率的相对变化量与应力成正比。

通过传感器和一定的电路将磁导率变化转变为电流(或电压)的变化,建立应力和电流(电压)的变化,建立应力和电流(或电压)的函数关系,通过电量测量来确定内应力。应力和电流(或电压)之间不存在单值的函数关系。但是,平面应力状态,主应力方向输出的电流差和主应力差有单值的线性关系,其表达式:

$$(I_2 - I_1) = a(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为最大和最小主应力,MPa; I_1 、 I_2 分别为最大和最小主应力方向电流输出值,mA; a 为灵敏系数,mA/MPa。

可根据式(2)确定主应力差值:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{I_{90} - I_0}{a \cos 2\theta} \quad (2)$$

式中: θ 为最大主应力方向和 x 轴夹角; I_0 、 I_{90} 为 0° 、 90° 二方向电流输出值。

2.2 灵敏系数的确定

灵敏系数 a 可通过单向拉压或4点弯曲实验确定^[6-7]。为消除边界对测量结果的影响,试样的宽度需大于3倍探头的尺寸,试件长宽比取6较适宜,标定试样,选择与被测材料同样的化学成分和同一热处理状况的无内应力材料制成,通过标定可得一系列数据。由式(1)可知这些数据满足线性关系,所以利用最小二乘法计算出直线的斜率即灵敏系数 a ,计算公式如下:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta I_i \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i - n \sum_{i=1}^n (\Delta I_i \Delta \sigma_i)}{[\sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i]^2 - n \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i^2} \quad (3)$$

式中: ΔI_i 为 i 点的电流差,mA; $\Delta \sigma_i$ 为 i 点的主应力差,MPa。

2.3 主应力的确定

已知各测点的主应力差和主方向角,用切实力差法分离主应力。任一点 p 的主应力分量:

$$(\sigma_x)_p = (\sigma_x)_0 - \int_0^p \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \quad (4)$$

$$(\sigma_y)_p = (\sigma_x)_p - (\sigma_1 - \sigma_2)_p \sin 2\theta_p \quad (5)$$

$$(\tau_{xy})_p = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)_p}{2} \sin 2\theta_p \quad (6)$$

式中: $(\sigma_x)_0$ 为原点已知应力值。对自由边界 $(\sigma_x)_0 = 0$ 。

计算时用增量代替微分,任一点 p 的主应力:

$$(\sigma_1)_y = \frac{(\sigma_x)_y - (\sigma_y)_y}{2} + \sqrt{\left[\frac{(\sigma_x)_y - (\sigma_y)_y}{2}\right]^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (7)$$

$$(\sigma_2)_y = \frac{(\sigma_x)_y - (\sigma_y)_y}{2} + \sqrt{\left[\frac{(\sigma_x)_y - (\sigma_y)_y}{2}\right]^2 + (\tau_{xy})^2}$$

(8)

2.4 磁测法的应用情况及测前的准备工作

磁测法目前已经在三峡工程中的钢闸门、北京西站钢门楼主桁架、石油化工设备中的球罐等项目已经得到应用,但在大跨径钢结构桥梁构件焊接应力的测试中还没有应用的报道资料。

采用磁测法测试前首先要进行灵敏系数的标定。可通过单向拉压或 4 点弯曲实验确定。正式测试时首先将试件焊缝上的测点经过打磨,然后将测试仪器的一个探头直接接触在测点上,另一个探头则放在预先标定好灵敏系数的钢板上,探头底部有两个磁极,通过测定磁导率的变化来确定一点的应力状态。

对于需进行消除应力工艺处理的焊缝,必须选用同一测点对焊接残余应力进行测试;以便于确定工艺处理后的效果是否满足要求。

3 观音岩大桥构件焊缝应力测试

3.1 试件概况

重庆江津观音岩长江大桥为大跨径钢结构斜拉桥,其主桥跨径组合为 35.5 m + 186 m + 436 m + 186 m + 35.5 m,主桥长 879 m。斜拉索在钢梁上的锚固采用了锚拉板结构形式(图 1)。锚拉板焊接于主梁上翼缘顶板,锚管嵌于锚拉板上部的中间,两侧用焊缝与锚拉板连接,中部除开孔安装锚具外,尚需连接上下两部分。为了补偿开孔部分对锚拉板截面的削弱,以及增强其横向的刚度,在板的两侧焊接了加强板,并和主梁上翼缘板连接,各板件厚度情况见表 1。这种锚固方式有传力途径明确、构造简单,工地施工作业方便等特点。钢材采用 Q370qE。

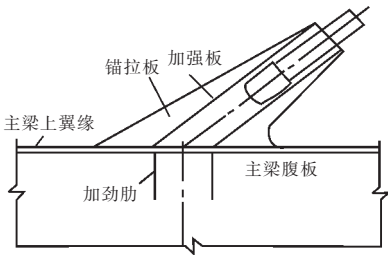


图 1 锚拉板与主梁连接试件

Fig.1 Specimen for the anchor plate connected with main beam

表 1 试件主要板件厚度/mm

Tab.1 Thickness of the main board parts of specimen/mm			
构件号	测试焊缝相关板件		
	锚拉板	加强板	主梁上翼缘板
CJ1、CJ3	60	40	50
CJ2	50	30	50

在锚拉板与主梁的这种接头形式中,锚拉板焊缝与主梁顶板急剧过渡,接头在外力作用下力线扭曲很大,易造成极不均匀的应力分布,焊缝处载荷应力和焊接残余应力集中程度较大,当焊缝根部或过渡处存在缺陷时,经长时间的疲劳应力影响会产生疲劳断裂。此外由于各板件厚度大焊缝多,焊接时产生焊接残余应力的问题比较突出。

为研究此类构件接头区域焊接残余应力的大小及分布情况,专门制作了 3 个足尺比例试验构件,通过对这 3 个试件的钢锚拉板与工字梁连接区域焊缝残余应力测试,以及超声波冲击后焊接残余应力变化情况的试验研究,以确定焊后残余应力的分布规律,并明确超声冲击方法对焊接残余应力的消除的作用及效果。

众所周之焊接应力是一种无荷载作用下的内应力,因此会在焊件内部自相平衡,在焊缝及热影响区产生拉应力,而在距焊缝稍远区段的母材内产生与之相平衡的残余压应力。焊缝的拉应力对焊缝的疲劳将产生非常不利的影响,是本次研究的对象,而残余压应力对焊缝没有不利的影响,此次测试以焊缝的残余拉应力为主要对象。测试采用了磁测法。3 个试件编号分别为 CJ1、CJ2 和 CJ3。

3 个研究试件中共设 43 个焊接应力测试点,其中 A 焊缝为锚拉板与钢主梁上翼缘的连接焊缝,相应于构件上的测点编号为 A1、A2、…、A10。B 焊缝为锚拉板与其加强板之间的连接焊缝,相应的测点编号为 B1、B2、…、B7。具体的测点布置图见文献[8]。焊后应力测试结果分别如表 2 和表 3。

表 2 A 焊缝测点应力

Tab.2 Stress value of points in A weld				
试件	测点	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa
CJ1	A1	113	163	163
	A2	176	373	399
	A3	164	314	316
	A4	238	322	359
	A5	182	337	398
	A6	271	376	379
	A7	174	321	323
	A8	161	331	339
	A9	175	338	378
	A10	210	366	380
平台段平均值		197	338	359
CJ2	A1	-9	100	134
	A2	109	148	156
	A3	103	269	277
	A4	205	355	359
	A5	184	325	336
	A6	244	342	391
	A7	196	373	385
	平台段平均值	207	349	368

(续表 2)

试件	测点	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa
CJ3	A1	136	241	250	127
	A2	179	342	351	170
	A3	262	351	390	223
	A4	199	316	319	196
	A5	278	369	373	274
	A6	184	351	403	132
	A7	149	207	210	146
	A8	153	286	293	146
平台段平均值		231	347	371	206

表 3 B 焊缝测点应力

Tab.3 Stress value of points in B weld

试件	测点	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa
CJ1	B1	71	145	145	71
	B2	111	286	347	50
	B3	125	283	297	111
	B4	167	297	302	162
	B5	147	279	291	135
	B6	181	312	348	145
	B7	139	263	267	135
平台段平均值		145	287	309	123
CJ2	B1	30	145	146	29
	B2	126	272	272	126
	B3	193	283	284	192
	B4	187	296	301	182
	B5	124	246	246	124
平台段平均值		168	275	277	166
CJ3	B1	-38	149	163	-52
	B2	91	203	228	66
	B3	111	247	277	81
	B4	174	273	273	174
	B5	169	284	300	152
	B6	199	289	324	164
平台段平均值		181	282	299	163

3.2 试验结果分析

表 2 和表 3 表分别为各构件 A 焊缝和 B 焊缝的焊后测点应力,其中 σ_x 为测点垂直焊缝方向应力; σ_y 为平行焊缝方向应力; σ_1 与 σ_2 为主应力。

从焊接残余应力测试结果中可以看出横向应力 σ_x 与主应力 σ_2 、纵向应力 σ_y 与主应力 σ_1 在大多数测点上较为接近,若只考虑平面应力则纵向、横向应力的方向就近似为主应力的方向。图 2 和图 3 分别为 A、B 焊缝的纵向残余应力分布情况。

从图 2 中可以看出,各试件的 A 焊缝在位于端部处残余应力值较小,之后便大幅增长,在距离焊缝端部 400~450 mm 以后焊接应力值波动较小,基本稳定在较高的应力水平上,形成了一个高残余应力平台段。如试件 CJ1 的 A3~A10 段、CJ2 的 A4~A7 段及 CJ3 的 A3~A6 段。3 个试件的平台段纵向焊接残余应力平均值分别为 338、349、347 MPa 均达

到了 Q370qE 钢材屈服强度的 90% 以上。由文献 [1] 可知平台段的长度是随着焊缝的长度同步增长的,而残余应力上升段根据不同的板厚在达到一定数值后将不再继续增长。因此 A 焊缝除去两端部小部分的焊接应力较小段和上升段外,大部分区段的纵向残余应力都处于屈服强度的 90% 左右的水平,这将对焊接接头性能与构件的疲劳强度产生较大的不利影响。

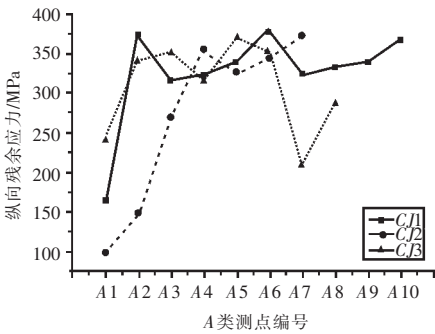


图 2 A 焊缝纵向残余应力分布

Fig. 2 The distribution of longitudinal residual stress in A weld

B 焊缝的纵向残余应力分布与焊缝有同样的规律,但焊接残余应力水平较 A 焊缝有明显的降低。这是因为连接 B 焊缝的两块钢板较 A 焊缝的薄。3 个试件的焊缝的残余应力升高段为距焊缝端部为 250~300 mm,在距端部 300 mm 以后形成高残余应力平台段,比 A 焊缝平台段纵向残余应力平均降低了 18%,如图 3。

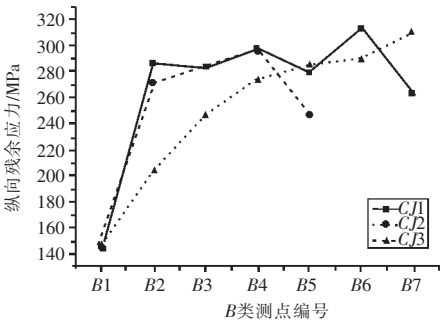


图 3 B 焊缝纵向残余应力分布

Fig. 3 The distribution of longitudinal residual stress in B weld

除了焊缝的分布特点外,节点的局部构造情况对焊缝应力也有明显的影响。在试件主梁上翼缘与锚拉板局部连接处,是截面突变的地方,也是内力变化最大的地方,最容易产生应力集中,由于设计在构造上比较周全的考虑,锚拉板截面在这里做了曲线型的平滑过渡,大大地降低了应力集中的影响。图 2 中的 3 个试件 A1 点的平均应力为 168 MPa,是前述 3 个试件平台段平均应力的 48.7%,说明锚拉板

(下转第 84 页)

- [5] Kwon E. Infrastructure, Growth, and Poverty Reduction in Indonesia: A cross-sectional Analysis [R]. Asian Development Bank, Manila Philippines: 2001.
- [6] Khandker S, Lavy V, Filmer D. Schooling and Cognitive Achievements of Children in Morocco: Can the Government Improve Outcomes? World Bank Discussion Papers, No. 264 [R]. World Bank, Washington, D. C.: 1994.
- [7] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [8] 李祚泳, 汪嘉杨, 熊建秋, 等. 可持续发展评价模型与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] 李祚泳, 沈仕伦, 邓新民. 社会、经济与环境协调发展指数评价模型 [J]. 上海环境科学, 2000, 19(5): 201-204.

(上接第41页)

在这里的局部构造非常重要, 曲线型的平滑过渡对降低焊接残余应力起到很重要的作用。

超声波冲击对焊缝残余应力的消除, 提高焊接接头的疲劳强度有较为理想的效果^[9]。此次试验研究采用了超声波冲击工艺消除焊接残余应力。经过超声冲击后, A、B 焊缝的大部分测点 σ_y 方向平均应力下降 73% 左右, σ_x 方向平均应力下降 65%, 不少测点的焊接残余应力从拉应力变为了压应力。这说明超声冲击可大幅度削减残余应力的峰值, 并能使焊接应力分布更趋合理化, 使焊缝及结构连接的受力状态得到根本改善^[8]。具体情况在文献 [8] 进行了详细的报道。超声波冲击的效果对改善焊缝及热影响区的疲劳强度和韧性, 提高构件的制作质量, 保证构件和连接部位的受力有着重要的意义。

4 结 论

在文中磁测法为消除焊接残余应力提供了方便、可行、准确的测试手段, 试验研究表明, 该方法具有测试灵敏度高、测试系统简单等特点, 特别是在复杂的节点焊缝测试中, 更显示出它的灵活、快捷、环保以及操作简便等诸多的优越性, 已越来越受到业

界的重视, 是一种很有发展前景的应力测试方法。相信在今后的桥梁及其它钢结构工程中, 磁测法将越来越广泛和深入地应用于焊缝应力的测试中, 发挥着越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 孟广喆, 贾安东. 焊接结构强度和断裂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [2] 王者昌. 关于焊接应力应变问题的再探讨 [J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 108-112.
- [3] 谢大吉. 磁测法测定焊接残余应力 [J]. 工程力学, 1999, 2(2): 68-71.
- [4] 石延平, 张永忠. 非晶态合金贴片磁测法在支柱载荷测量中应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2006, 25(3): 422-425.
- [5] 沈剑, 朱世根, 顾伟生. 两端自由边界工件磁测应力计算方法的改进 [J]. 现代铸铁, 2002(2): 36-38.
- [6] 苏阳. 无损磁测法边界效应的研究 [J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(3): 69-72.
- [7] 熊学忠. 建筑钢结构焊接残余应力磁测技术研究 [J]. 广东建材, 2007(8): 27-29.
- [8] 刘小渝, 姚文娟. 用超声波法消除锚拉板区域的焊接残余应力 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2008, 14(6): 646-651.
- [9] 王东坡, 周达. 超声冲击法提高焊接接头疲劳强度的机理分析 [J]. 天津大学学报, 2007, 40(5): 623-628.