

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.011

钢桥面板顶板与竖向加劲肋连接角焊缝疲劳试验

田 圆¹,吉伯海¹,杨沐野¹,傅中秋¹,姜竹生²

(1.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098; 2.江苏省交通运输厅工程质量监督局,江苏 南京 210004)

摘要:为研究钢桥面板顶板与竖向加劲肋连接角焊缝的疲劳性能,采用机械型振动疲劳试验机对制作的 9 个试件进行等幅疲劳加载,并通过名义应力和热点应力 2 种方法对试件焊缝疲劳性能进行评价。试验结果表明:疲劳荷载作用下,试件疲劳裂纹开展路径均从焊趾处萌生、沿焊趾开展、最终垂直于焊趾沿板横向往两侧对称扩展。采用名义应力法时,试验结果均位于 JSSC-G 疲劳强度为 50 MPa 的 *S-N* 曲线上方;采用热点应力法时,试验结果均位于 Eurocode 3 规范疲劳强度为 100 MPa 的 *S-N* 曲线上方。建议本试验构件疲劳细节的角焊缝疲劳强度取名义应力 50 MPa、热点应力 100 MPa。

关键词:钢桥面板;竖向加劲肋;角焊缝;疲劳试验

中图分类号: TG405 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)05-0433-06

Fatigue experimental investigation of steel bridge deck plate and vertical stiffener connection fillet weld

TIAN Yuan¹, JI Bohai¹, YANG Muye¹, FU Zhongqiu¹, JIANG Zhusheng²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Engineering Quality Supervision Bureau, Department of Communications of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China)

Abstract: In order to study the fatigue performance of a steel bridge deck and a vertical stiffener connection fillet weld, a mechanical vibration fatigue testing machine was used to test nine specimens with constant amplitude fatigue loading, and the fatigue performance of the welds of the specimens was evaluated with two methods, the nominal stress and hot spot stress methods. The test results show that, under the fatigue load, the specimens' fatigue crack initiation occurs on the weld toe, and then the cracks grow along the weld toe and finally extend in bilateral symmetrical manner along the plate transverse, which is perpendicular to the weld edge. With the nominal stress method, the test results are above the *S-N* curve in JSSC-G, which has a fatigue strength of 50 MPa. With the hot spot stress method, the test results are above the *S-N* curve in Eurocode 3 specification, which has a fatigue strength of 100 MPa. The results suggest that the fatigue strength of the fillet weld of the test specimens' fatigue details should be set at 50 MPa for nominal stress and 100 MPa for hot spot stress.

Key words: steel bridge deck; vertical stiffener; fillet weld; fatigue test

正交异性钢桥面板由于施工便捷、极限承载力高、自重小、造型美观等特点,在国内外桥梁建设中得到广泛应用,几乎运用于各种桥型^[1]。但由于正交异性钢桥面板构造复杂,构件间交错连接和焊接部位多,在荷载作用及结构本身缺陷、焊接残余应力等因素影响下极易出现疲劳破坏^[2]。钢桥面板疲劳分类、产生时间统计表明,大部分钢桥面板顶板裂纹发生在通车 30 a 左右,少部分发生在通车 7 a 内^[3]。钢桥面板疲劳裂

收稿日期: 2013-09-25
基金项目: 国家自然科学基金(51278166);高等学校博士学科点专项科研基金(20120094110009);江苏省交通科学研究计划(2013Y10-1)
作者简介: 田圆(1989—),女,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事钢桥疲劳与维护研究。E-mail: bs911@163.com
通信作者: 吉伯海,教授。E-mail: hhhbj@163.com

纹初期检测难、发展迅速,严重的可能会造成突发性桥面坍塌等事故。国外对各地区的钢桥面板疲劳进行了大量研究,并从疲劳损伤、裂纹路径等方面对多种疲劳细节开展了大量试验和分析工作^[4],制定了较为系统的设计规范。

我国正交异性钢桥面板的应用发展迅速,已广泛应用于大跨桥梁。我国现行的公路桥梁钢结构设计规范是交通部1986年颁布的《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》^[5],该规范对于疲劳设计依旧采用容许应力法,而新规范尚在修订之中^[6]。现行的《铁路桥梁钢结构设计规范》^[7]中虽在构造细节的S-N曲线中加入了可靠度的方法,但在设计方法上依旧采用基于容许应力法的无限寿命方法。尽管国内学者近年来针对钢桥面板的疲劳性能进行了大量研究^[8-11],但不足以适应实际工程的需求发展。由于没有成熟的设计参考,目前国内桥梁钢结构设计与研究单位大多借鉴国外规范^[12]。

在正交异性钢桥面板中,钢桥面板与竖向加劲肋连接处角焊缝是典型的疲劳细节之一,在车辆荷载等因素作用下由于应力集中、焊接缺陷等原因极易产生疲劳裂纹。本文针对该疲劳细节进行试验研究,并根据试验结果,提出该疲劳细节的建议疲劳强度曲线,以期为钢桥面板疲劳设计提供一定的试验依据。

1 试件模型设计

1.1 试件尺寸及材料

试验共设计制作9个试件,编号分别为SJ1-1~SJ1-9。依据我国实桥设计图纸,竖向加劲肋与钢桥面板顶板垂直相交,采用角焊缝围焊方式连接固定。制作该焊缝疲劳细节的局部足尺模型,模型几何尺寸设计借鉴类似疲劳细节试件^[4],试件几何尺寸设计如图1所示。

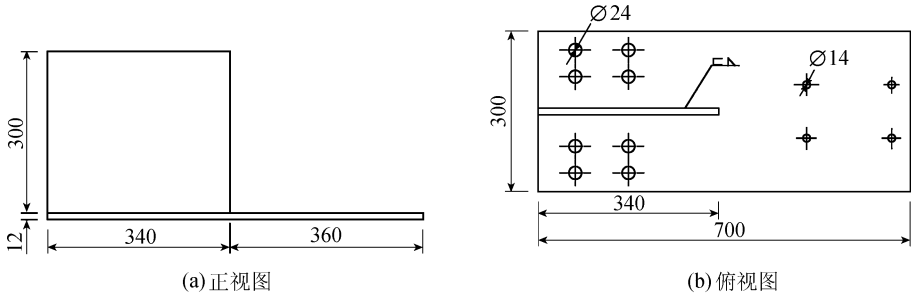


图1 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometry of specimens (units: mm)

试件材料与实桥材料一致,采用12 mm厚的桥梁专用Q345qD钢板。经检测,该批次试件材料化学成分检测结果及力学特性检测结果符合《桥梁用结构钢》^[13]标准,钢材屈服强度 $R_e=453$ MPa,抗拉强度 $R_m=594$ MPa,伸长度 $A=26\%$,弹性模量 $E=2.06\times10^5$ MPa。

1.2 试件加工工艺

由于焊接质量直接影响焊缝疲劳性能,因此试件加工工艺对试验结果有重要影响。试验试件委托国内大型专业桥梁钢结构加工厂——中铁宝桥(扬州)有限公司进行加工;试件焊接加工工艺和实桥焊接加工工艺一致,采用CO₂气体保护焊进行俯焊焊接,角焊缝焊脚尺寸为6 mm。焊前清除板件上焊缝周围30 mm区域内的锈蚀、污垢等。焊接工作由加工厂具有焊接资质的焊接工人进行。通过点焊立件,尾部使用引弧板,采用角焊缝围焊一道焊顺序完成焊接。焊缝包角处弧状焊缝需严格要求,需要一次完成,不得断弧,以减少焊缝包角处因分段焊接所引起残余应力不均等对试件焊缝包角处疲劳性能的潜在影响。焊接完成后切去引弧板,并对焊缝表面进行清渣处理。焊接后变形的试件需进行机械调直。通过统一的机械化及标准化操作流程,保证试件工艺水平和加工质量稳定。对加工完成后的试件逐个进行磁粉探伤检测以及超声波探伤(I级)检测,检测结果表明该批次试件合格。

2 试验加载方案

2.1 测点布置

每个试件上布置4个测点(CD1~CD4),如图2所示。根据欧洲规范Eurocode 3^[14],热点应力通过测点

应力外推得到,测点布置有两点外推及三点外推 2 种方式,本次试验采用两点外推法,角焊缝包角处焊趾部位热点布置测点为 CD1、CD2。名义应力法对各个疲劳细节尚无统一的测点布置^[15],本次试件测点布置参考同类型试验^[4]测点布置,以便试验结果间进行比较。名义应力测点布置选择角焊缝附近数值稳定、受边界条件和焊缝影响较小的测点,以便比较不同试件的受力和应力状态。名义应力测点对称布置为 CD3、CD4。

2.2 试验加载

试验采用机械型振动疲劳试验机对悬臂试件进行弯曲疲劳加载。将试件一端与机架固定,在悬臂端固定机械型振动疲劳试验机,通过电机偏心转动带动试件上下振动,实现对试件的弯曲疲劳加载。试验加载装置如图 3 所示。

根据名义应力幅将 9 个试件分成 3 组进行加载,3 组名义应力幅等级分别为 60 MPa、85 MPa、110 MPa,实际加载的名义应力幅浮动范围在 10% 以内。若试验中出现试件疲劳荷载循环超过 1 000 万次仍未检测出裂纹,则定性为试件失效,提高名义应力幅等级继续试验,其相关试验数据需特别标出,仅供参考。试验实际疲劳加载参数见表 1。

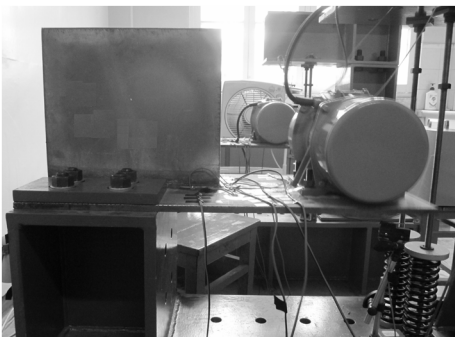


图 3 试件加载装置
Fig. 3 Loading device for specimens

2.3 疲劳失效判定

试验的疲劳失效判定以疲劳裂纹开展阶段为基准,根据实桥疲劳裂纹路径观测,此类焊缝疲劳裂纹从围焊端部弧型角焊缝焊趾处起裂,后垂直焊趾向两侧对称开展。在试验中,裂纹开展过程不便于肉眼观测,超声探伤仪器检测亦不适用于裂纹动态开展的情况,因为疲劳加载中试件振动剧烈,超声波探头位置难以固定,影响判断。本文试验采用一种简单有效的方式观测疲劳试验进行中的裂纹扩展情况,即裂纹扩展气泡动态指示法。疲劳加载过程中,在起裂部位喷涂少许除锈油,试件开裂位置由于裂纹开合使油体表面生成小气泡,可以直观有效地辅助判断裂纹扩展的位置。基于气泡动态指示检测法,定义试件疲劳寿命采用的标准为:(a) $N_{趾}$,初次观察到焊趾处裂纹时的试件疲劳循环次数,即裂纹萌生寿命。(b) N_{10} ,裂纹开展最长侧的裂纹尖端到焊趾最近点距离为 10 mm 时,定性为试件疲劳破坏,对应的疲劳循环次数定义为试件疲劳寿命。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

裂纹开展模式如图 4 所示,由图 4 可知其与实桥开展模式基本相同。根据观测,该疲劳细节裂纹开展路径方式较为一致,均从角焊缝包角处焊趾部位起裂,沿焊趾开展一段后垂直于焊趾方向沿板横向向两侧开展。整个裂纹开展过程疲劳裂纹两侧开展速率基本一致,裂纹成对称开展,如图 5 所示。SJ1 系列试件疲劳试验结果见表 2。

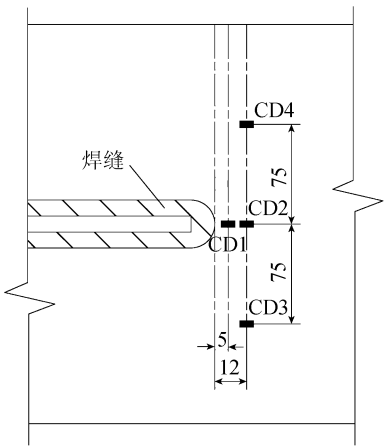


图 2 测点布置示意图(单位: mm)
Fig. 2 Schematic diagram of measuring point arrangement (units: mm)

表 1 试件加载参数

Table 1 Loading parameters for specimens		
试件编号	名义应力幅/MPa	加载频率/Hz
SJ1-1	95	18.5
SJ1-2	89	18.0
SJ1-3	78	17.0
SJ1-4	59	16.0
SJ1-5	59	15.8
SJ1-6	60(试件失效)	15.0
	93	18.0
SJ1-7	109	15.9
SJ1-8	110	15.8
SJ1-9	107	19.0

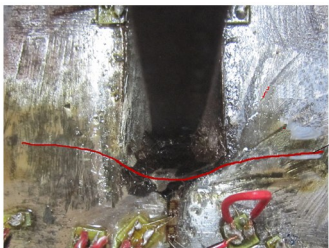


图 4 疲劳裂纹开展路径
Fig. 4 Fatigue crack growing path

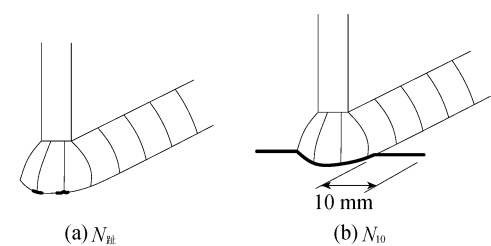


图 5 疲劳裂纹路径开展示意图
Fig. 5 Schematic diagram of fatigue crack growing path

试件破坏后的疲劳破坏断面如图 6 所示。该疲劳破坏断面最终形态一致,基本呈对称开展的半椭圆形曲线,在断面中间部位裂纹深度最大,并最终贯穿板厚方向。

3.2 疲劳强度评价

在国内,尚未见相关桥梁钢结构疲劳规范或指南为钢桥面板顶板与竖向加劲肋连接角焊缝疲劳细节提供可参考的 $S-N$ 曲线。因此,基于欧洲规范 Eurocode 3、日本钢道路桥疲劳设计指南^[16](简称为 JSSC)、英国规范 BS 5400^[17]中的近似疲劳细节对应的疲劳强度曲线对本文试验进行评价和比对。将试验结果与 Yamada 等^[4]进行的相似疲劳细节试件试验结果(简称为 JP)进行比较。



图 6 典型疲劳破坏断面
Fig. 6 Cross-sections of typical fatigue fractures

试验以 N_{10} 作为疲劳失效的疲劳循环次数,试验数据点全部落在 JSSC-G、BS 5400-F2 的 $S-N$ 曲线上方,部分数据落在 Eurocode 3 对应疲劳强度曲线下方,试验数据点落在 JP 的试验数据点群内,数据离散性较小,如图 7(a)所示。采用 BS 5400-F2 疲劳强度曲线评价,该疲劳细节偏安全;采用 Eurocode 3 对应疲劳强度曲线评价该疲劳细节,部分数据点落在 $S-N$ 曲线下方。根据试验结果,建议采用 JSSC-G 疲劳曲线对该疲劳细节进行评价,即建议采用疲劳强度为 50 MPa 的 $S-N$ 曲线对钢桥面板与竖向加劲肋连接处焊缝端部疲劳细节进行设计和评价。试验中 N_{10} 数据点落在 JP 的 N_{10} 点群中,且试验试件裂纹萌生寿命总体比 JP 的试验结果离散性小,如图 7(b)所示。

CD1 和 CD2 依据热点应力两点外推法进行测点布置,两点外推法公式为

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t}$$
 (1)

式中: σ_{hs} ——热点应力; $\sigma_{0.4t}$ 、 $\sigma_{1.0t}$ ——距离热点位置 0.4*t* 处及 1.0*t* 处的表面应力,*t* 为主板厚度。

根据式(1)对热点应力进行数值外推,以 N_{10} 为疲劳失效评价标准的热点应力法试验结果如图 8 所示,其中 II W-90(II W-100)代表国际焊接学会规定的钢板与加劲肋该类结构的 $S-N$ 曲线标准为在 200 万次加载下构件的疲劳强度为 90 MPa(100 MPa)。欧洲规范 Eurocode 3 的热点应力法焊接接头疲劳细节分类不包括本文试验试件疲劳细节,采用类似疲劳细节对应的疲劳强度对试验结果进行比较参照。与名义应力法相比,采用热点应力法评价该疲劳细节针对性更强,可以反映复杂受力影响下焊缝疲劳裂纹开展的实质,但试验结果的离散性更大,采用疲劳强度为 100 MPa 和 90 MPa 的 2 个等级疲劳曲线对试验结果进行评价结果均偏安全,对该疲劳细节设计和评价建议可参考 Eurocode 3 中热点应力法疲劳强度为 100 MPa 的 $S-N$ 曲线。

表 2 SJ1 系列试件疲劳试验结果			
Table 2 Fatigue test results of SJ1-series specimens			
试件编号	名义应力幅/MPa	N_{10}	N_{10}
SJ 1-1	94.86	57 600	372 800
SJ 1-2	89.30	159 400	531 100
SJ 1-3	78.07	187 700	711 800
SJ 1-4	58.81	372 100	—
SJ 1-5	58.50	1 689 900	4 083 800
SJ 1-6	60.15	—	—
SJ 1-7	93.42	10 047 900	10 459 800
SJ 1-8	108.56	67 200	218 200
SJ 1-9	109.80	—	—
SJ 1-9	106.71	62 000	315 900

注: SJ1-4、SJ1-8 的裂纹扩展最长侧的裂纹尖端距焊趾根部距离分别为 50.5 mm、67 mm,对应的疲劳循环次数分别为 2 747 700、556 000。

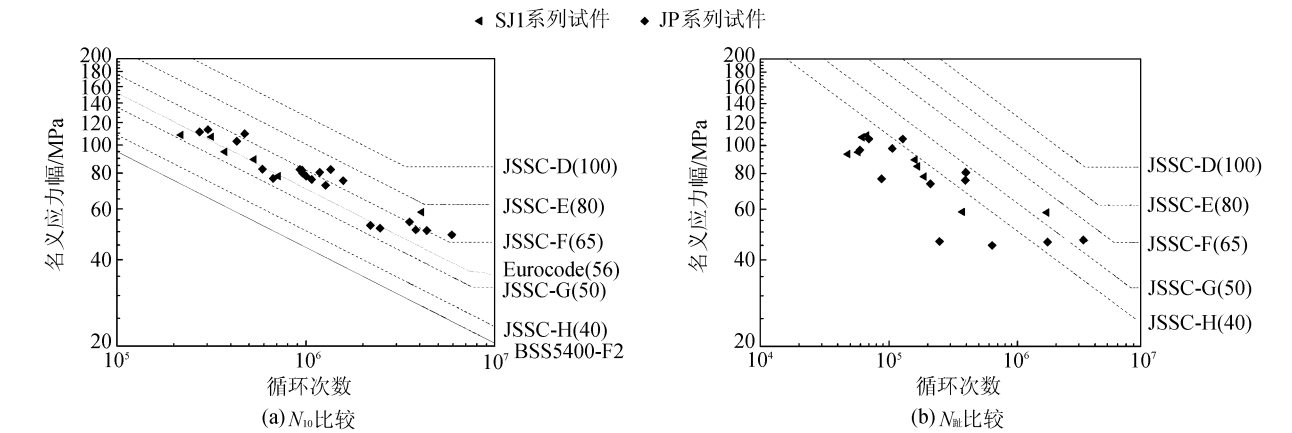


图 7 采用名义应力法对角焊缝疲劳性能评价

Fig. 7 Fatigue performance of fillet weld evaluated by nominal stress method

4 结 论

- a. 疲劳裂纹均从角焊缝包角处焊趾部位起裂,沿焊趾开展一段后垂直于焊趾方向沿板横向两侧开展。疲劳裂纹两侧开展速率基本一致,裂纹成对称开展。
- b. 通过参考比对 Eurocode 3、JSSC、BS 5400 等规范类似名义应力疲劳细节定义,建议采用 JSSC 中 G 等级的 S-N 曲线来设计与评价该疲劳细节,本文试验结果均位于 JSSC-G(疲劳强度为 50 MPa)的 S-N 曲线上方。对于本文试验试件疲劳细节,建议名义应力疲劳强度采用 50 MPa。
- c. Eurocode 3 中热点应力法两类 S-N 曲线评价试验结果均偏安全,建议试验试件疲劳细节参考 Eurocode 3 热点应力疲劳强度 100 MPa 的 S-N 曲线。

参考文献:

[1] 王春生, 冯亚成. 正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J]. 钢结构, 2009, 24(9): 9-13. (WANG Chunsheng, FENG Yacheng. Review of fatigue research for orthotropic steel bridge decks[J]. Steel Construction, 2009, 24(9):9-13. (in Chinese))

[2] 曾志斌. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J]. 钢结构, 2011, 26(2): 9-15. (ZENG Zhibin. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck[J]. Steel Construction, 2011, 26(2):9-15. (in Chinese))

[3] 唐亮, 黄李骥, 刘高, 等. 正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 112-122. (TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao, et al. Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model[J]. China Civil Engineering Journal , 2014, 47(3):112-122. (in Chinese))

[4] JI Bohai, LIU Rong, CHEN Ce, et al. Evaluation on root-deck fatigue of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 90:174-183.

[5] JTJ 025—1986 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S].

[6] 周泳涛, 鲍卫刚, 翟辉, 等. 公路钢桥疲劳设计荷载标准研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 79-85. (ZHOU Yongtao, BAO Weigang, ZHAI Hui, et al. Study of standard fatigue design load for steel highway bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11):79-85. (in Chinese))

[7] TB 10002. 2—2005 铁路桥梁钢结构设计规范[S].

[8] 童乐为, 沈祖炎. 正交异性钢桥面板疲劳验算[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 16-21, 70. (TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 16-21, 70. (in Chinese))

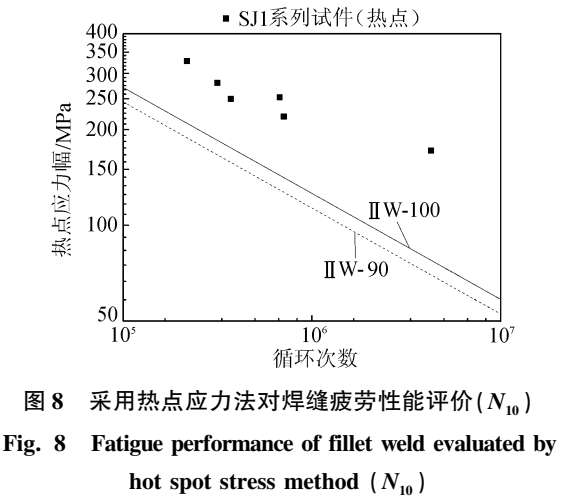


图 8 采用热点应力法对焊缝疲劳性能评价 (N_{10})

Fig. 8 Fatigue performance of fillet weld evaluated by hot spot stress method (N_{10})

[9] JI Bohai, CHEN Donghua, MA Lin, et al. Research on stress spectrum of steel decks in suspension bridge considering measured traffic flow[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2011,26(1): 65-75.

[10] 余波,邱洪兴,王浩,等. 正交异性钢桥面板构造细节疲劳性能及损伤演化研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 64-70. (YU Bo, QIU Hongxing, WANG Hao, et al. Experimental research on fatigue behavior and damage development of welded conformation of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2009,26(9): 64-70. (in Chinese))

[11] 荣振环,张玉玲,刘晓光. 天兴州桥正交异性板焊接部位疲劳性能研究[J]. 中国铁道科学, 2008,29(2): 48-52. (RONG Zhenhuan, ZHANG Yuling, LIU Xiaoguang. Research on the fatigue performance of the welded joint of the orthotropic deck on Wuhan Tianxingzhou bridge [J]. China Railway Science, 2008, 29(2): 48-52. (in Chinese))

[12] 张玉玲,辛学忠,刘晓光. 对正交异性钢桥面板构造抗疲劳设计方法的分析[J]. 钢结构, 2009, 24(5): 33-37. (ZHANG Yuling, XIN Xuezhong, LIU Xiaoguang. Analysis on fatigue design method of orthotropic floor details in steel bridge[J]. Steel Construction, 2009, 24(5): 33-37. (in Chinese))

[13] GB/T 714—2008 桥梁用结构钢[S].

[14] EN 1993-1-9:2005 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.9:fatigue[S].

[15] OH C K, BAE D. Fatigue test of an advanced orthotropic steel deck system using high performance steel for bridges[J]. International Journal of Steel Structures, 2013, 13(1): 93-101.

[16] 日本道路协会. 鋼道路橋の疲労設計指針 [M]. 東京: 丸善株式會社出版事業部, 2002.

[17] BS 5400—10—1980 Steel,concrete and composite bridges. Part 10:code of practice for fatigue[S].

· 简讯 ·

IWA 非常规水资源大会将在南京市召开

传统水资源的供需矛盾问题已经成为当今世界许多国家的共性问题,并制约着经济社会的可持续发展。开发利用污水、海水、雨水等非传统水源,可以有效缓解一些缺水地区水资源短缺的状况,优化区域水资源利用结构、减轻对常规地表与地下水资源的压力,改善水生态环境。

由 IWA 非常规水资源分会、河海大学主办,国际水协会非传统水资源利用工作组(中国)等承办的 IWA 非常规水资源大会将于 2014 年 11 月 6—8 日在南京市召开。会议主题包括:(a)非常规水资源的发展(市政/工业废水处理及回用、海水及苦咸水淡化、雨水收集、水源保护及水损失控制);(b)非常规水资源利用系统的设计和规划(城镇/地区供水系统、小型供水系统、小型供水系统的选择);(c)分析及评价方法(水资源需求分析、非常规水资源利用评估、风险评估及质量控制);(d)政策及管理(促进 AWR 发展的政策法规、水资源应急/短缺管理、水资源效能管理)。

会议网址:<http://www.iwa-awr.org/>

(本刊编辑部供稿)