

文章编号: 1001-4888(2014)04-506-07

锈蚀槽钢受弯承载力试验研究^{*}

徐善华, 任松波, 崔焕平, 王友德

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 710055)

摘要: 通过 7 根锈蚀槽钢构件和 2 根未锈蚀槽钢构件的受弯试验, 研究了锈蚀对槽钢受弯承载力的影响。试验表明: 锈蚀槽钢的承载力随其点蚀因子的增大而降低; 翼缘的锈蚀对钢构件受弯承载力的影响较腹板显著, 其中受压翼缘与受拉翼缘影响程度基本相同。最后, 结合试验结果, 利用 Matlab 软件分别对锈蚀槽钢试件上、下翼缘点蚀因子与构件受弯承载力损失值进行数据拟合, 定性给出上、下翼缘点蚀因子与受弯承载力损失比之间的关系式。

关键词: 槽型钢; 受弯试验; 点蚀因子; 承载性能

中图分类号: TU511.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-103

0 引言

锈蚀是钢结构的一种主要损伤形式, 锈蚀导致钢结构截面面积减小, 承载能力下降, 整个结构的使用寿命将大大降低。基于此, 为了能及时对锈蚀钢结构采取合理措施以保障其在服役期内的安全性, 需要掌握腐蚀对钢结构力学性能的影响。

国内外已开展过关于锈蚀钢结构受力性能方面的一系列研究, 并取得了显著的成果。这些成果大致分为两方面: 其一是从锈蚀内部机理出发。T. Nakai 等^[1]由船体货舱区肋骨锈蚀数据研究提出点蚀作用对材料强度具有一定的削弱作用, 并且建立了相关数学模型, 阐述了点蚀程度与材料强度之间的量化关系。路民旭等^[2]利用 GC-4 钢进行锈蚀试验, 其研究表明: GC-4 钢腐蚀疲劳裂纹扩展属于包含平台阶段的应力腐蚀型, 符合过程竞争模型, 但要对 Austen 模型进行修正。陈鸿海^[3]研究表明, 点蚀坑扩大造成钢材大面积锈蚀, 而点蚀锈坑会造成钢结构表面应力集中, 而且局部受力提前达到极限荷载造成整体承载力下降。其二是从宏观角度研究锈蚀对钢结构及构件承载性能。薛以年等^[4]利用断裂力学的方法对板状焊接接头在空气中和海水中自由腐蚀条件下的疲劳裂纹扩展寿命进行了估算, 并讨论了初始裂纹尺寸的选取对估算裂纹扩展寿命的影响。徐善华等^[5]通过室内盐雾加速试验下锈蚀 H 型钢的偏压承载力试验, 详细探讨了锈蚀对钢结构偏心受压残余承载力的影响, 并得出 H 型钢构件偏心受压承载能力损失值与受压翼缘锈蚀率的增长呈显著的线性递增关系, 但与受拉翼缘及腹板锈蚀率的增加间的线性关系则不显著。白焱^[6]通过腐蚀钢构件的偏压承载性能试验, 探讨了锈蚀状态与锈蚀槽钢的最大承载力之间的关系, 得出的锈蚀构件的实际厚度与最大承载力近似呈线性关系, 为评估锈蚀试件受弯承载力衰退提供了思路。L. V. Beaulieu 等^[7]通过对多根电化学腐蚀下的角钢进行抗压承载性能试验, 得到了角钢的锈蚀与其抗压承载力之间的关系。

综上所述, 目前由锈蚀影响槽钢内部机理来研究其承载力劣化的成果尚较少, 尤其关于锈蚀条件下槽钢残余承载力的研究更少, 结合目前存在大量已锈蚀钢结构承载力需要评定的原因, 必须开展相关研

^{*} 收稿日期: 2013-07-02; 修订日期: 2013-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778151), 国家自然科学基金项目(51078307)

通讯作者: 任松波(1985—), 男, 博士研究生, 研究方向: 工程结构抗震, 结构耐久性。E-mail: rensongbo0105@sohu.com.cn

究以了解锈蚀对钢结构及构件承载力的影响,以利于指导工程实际活动。

本文对 7 根锈蚀槽型钢试件和 2 根未锈蚀槽型钢试件进行受弯试验,分别研究受压上翼缘、腹板和受拉下翼缘的腐蚀程度对锈蚀槽钢受弯承载力的影响,并详细探究锈蚀对槽钢残余承载力的影响,以便为锈蚀对槽钢受弯承载力的进一步研究提供有效的参考数据。

1 试验概况

近年来,国内外大量采用室内加速腐蚀试验来研究结构耐久性的劣化,可在短期内得到试验结果,而且具有很好的重现性^[8],故本文也采用室内加速试验法来研究锈蚀对槽钢受弯残余承载力的影响。

槽钢梁的受弯试验采用 YE-200A 压力试验机通过分配梁三分点处两点加载完成,该试验机最大量程 2000kN,精度 1%,两立柱间跨度为 580mm,上下压板间有效高度 5000mm。槽钢梁为两端简支,用液压千斤顶将集中荷载通过分配梁传递并施加在槽钢梁上,为了保证荷载传递的均匀性,每个试件按照单调静力连续加载,无冲击作用。

1.1 试件设计

采用同一批号 Q235 钢手工焊接 7 根槽钢试件。试件均为长度大于 600mm、厚度为 5mm 的热轧槽型钢(HW50×37×5×5),见图 1。为避免试验过程中槽钢梁出现扭转变形及深梁现象,在荷载作用点及两端设置端板和加劲肋,尺寸分别为 50mm×37mm×6mm 和 40mm×37mm×5mm,端板较厚,以避免构件焊接处高温变形,降低试验误差。焊角尺寸和焊缝长度均满足强度要求。试件分两组,一组为 A0~A7,置于盐雾箱内进行室内加速腐蚀;另一组规格相同,未腐蚀,编号为 B1~B2,作为锈蚀的对比试件。

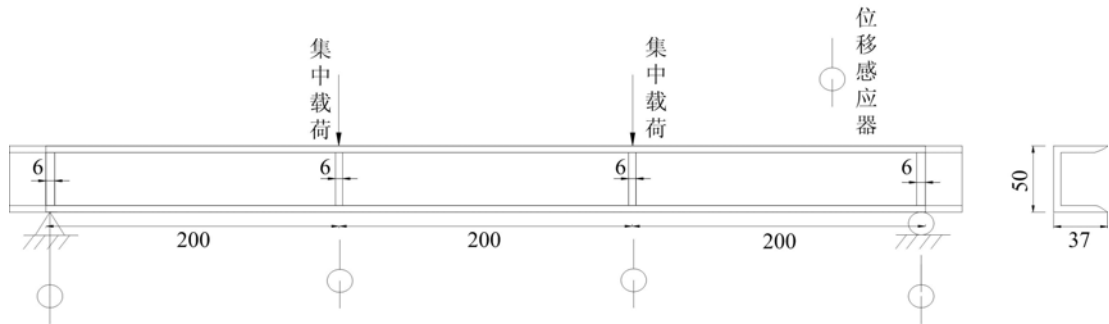


图 1 槽钢试件尺寸及承载力试验加载简图(单位:mm)

Fig.1 Size and load carrying capacity test and of channel-beams

表 1 给出了各锈蚀试件的弹性模量及屈服强度。由于试件表面锈蚀程度不同,各锈蚀槽钢梁试件的材性指标存在差异。

表 1 材料性能

Tab.1 The material properties

试件编号	B1	B2	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07
弹性模量(GPa)	183	179	178	171	159	163	150	155	157
屈服强度(MPa)	285.5	289	271.4	258.6	256.4	251.7	258.9	243.8	246.9

1.2 室内加速腐蚀试验和试件表面形貌参数采集

将 A0~A7 置于盐雾加速腐蚀箱内,依据国家试验标准 GB/T 10125—1997《人造气氛腐蚀试验箱——盐雾试验》的相关规定设定室内加速试验条件。图 2 为盐雾腐蚀箱及腐蚀试件。

试验采用 YMX/Q-020 型盐雾箱,测试溶液为 5%(质量百分比)NaCl,溶剂采用蒸馏水。试验时,将 9 组试件按照相同条件分批置于盐雾箱,设置箱内温度为 35℃,饱和器温度为 37℃,RH>95%,进气压力为 0.2~0.3MPa,压缩空气压力为 0.07~0.17MPa,喷雾量为 1.0~2.0ml/80cm²·h, pH 值为 6.5~7.2。采用间隙喷雾,周期为 12h,单周期内连续喷雾 6h,停喷 6h,停喷不加热,箱体密封。试验周期



图 2 室内盐雾加速腐蚀试验箱及槽钢试件

Fig. 2 Testing box for indoor salt spray accelerated corrosion and specimens

为 6 个月。待期满后,从试验箱中取出试样并进行表面处理。从试验箱中取出试样,去除表面易剥离腐蚀物,然后将其浸入 12%(体积比)稀盐酸溶液中,待 30min 左右取出,用钢刷轻轻取出表面残存腐蚀物,然后用 NaOH 溶液中和,取出清水冲洗干净后干燥。

采用 PS50 三维非接触式表面形貌仪分别对各试件上、下翼缘及腹板的表面进行测量,不同部位的测区分布在两端及中间位置,每个测量区域大小为 $40\text{mm} \times 30\text{mm}$ (40mm 沿试样宽度方向,步长 $18\mu\text{m}$, 30mm 沿试样长度方向,步长 $220\mu\text{m}$),然后通过自带 3D 分析软件得到采样区腐蚀前后表面各粗糙度参数,通过统计方法得出构件各部位的最大腐蚀深度、平均腐蚀深度以及点蚀因子(其中点蚀因子为构件测区最大腐蚀深度与该区平均腐蚀深度的比值),再将三个测区的平均值作为该部位的试验测量值。

1.3 受腐蚀试件的受弯承载力试验

本试验在西安建筑科技大学土木工程学院实验室完成,试验装备采用 YE-200A 压力试验机,该试验机最大量程 2000kN ,精度 $\leq \pm 1\%$,两立柱间跨度为 580mm ,上下压板间有效高度为 5000mm 。受弯试件试验装置见图 3。



图 3 受弯试件试验装置

Fig. 3 The experimental set-up for flexural test

受弯试验中,试件两端铰接约束,左端为固定铰支座,右端为滚动铰支座,两端均不限制转动,如图 3 所示。试验开始前先预加荷载并观察各仪表是否正常,若不正常应该及时进行调整,待检查无问题后,卸载到零,再开始正式加载。

加载方式为分配梁在简支梁的三分点处两点分级加载,每级荷载为构件理论承载力的 10%,持续时间 10min,当构件开始进入塑性后连续加载直至荷载不能继续增加,试件达到极限荷载且随后出现显著下降(降至极限荷载的 80% 以下)后停止加载^[9]。

2 试验结果及分析

2.1 锈蚀钢构件腐蚀深度表征

根据三维非接触式扫描仪采集的数据,计算出各试件测量区域每一点的腐蚀深度值,再通过统计方法得出各试件不同部位的平均腐蚀深度和最大腐蚀深度代数值,见表 2。

表 2 腐蚀深度计算结果
Tab. 2 Calculated results of corrosion size

部位	构件编号	B1	B2	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07
上翼缘	平均腐蚀深度(μm)	8	11	159	156	135	219	163	286	180
	最大腐蚀深度(μm)	18	19	732	795	811	658	946	1174	754
	点蚀因子	2.3	1.7	4.6	5.1	6	3	5.8	4.1	4.2
下翼缘	平均腐蚀深度(μm)	12	7	256	256	170	163	153	132	122
	最大腐蚀深度(μm)	15	9	922	1024	986	831	798	846	879
	点蚀因子	1.3	1.3	3.6	4	5.8	5.1	5.2	6.4	7.2
腹板	平均腐蚀深度(μm)	14	21	85	189	129	162	276	183	222
	最大腐蚀深度(μm)	22	23	765	681	621	1348	966	899	1352
	点蚀因子	1.6	1.1	9	3.6	4.8	8.3	3.5	4.9	6.1

由表 2 可知,各构件经锈蚀试验后均发生了不同程度的锈蚀,上、下翼缘和腹板的平均锈蚀深度最大值分别达到 286μm、256μm 和 276μm,最大点蚀因子分别为 6、7.2 和 8.3。

2.2 受弯试验结果分析

受腐蚀钢材受弯承载力的降低直接影响服役构件的安全可靠性,本文着重对腐蚀槽钢的受弯承载力进行研究。文献[10]和文献[11]表明点蚀因子对金属的腐蚀具有明显的表征意义。因此,本文着重对不同点蚀因子下的槽钢梁受弯承载力进行研究。

本文以未锈蚀的 2 根槽钢受弯承载力平均值作为本试验未锈蚀槽钢压弯承载能力,其值为 38.8kN。

对比表 1 和表 3 可知,钢材试件的弹性模量和屈服强度随其点蚀因子的增加而降低。另外,表 3 还给出了各锈蚀构件的受弯承载力试验结果,依据该结果可得到锈蚀槽型钢对应不同程度的点蚀因子与其受弯承载力之间的关系,见图 4。从图 4 可以看出,槽型钢的受弯承载力随点蚀因子的增大呈递减趋势,该递减趋势与上、下翼缘点蚀因子的关系较腹板点蚀因子的关系明显,且具有一定的波动性。此外,当上、下翼缘点蚀因子分别大于 5.5 和 6.0 时,槽钢试件的受弯承载力急剧下降。

表 3 锈蚀及受弯试验结果
Tab. 3 The results of corrosion and flexural test

试件编号		B1	B2	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07
点蚀因子	受压上翼缘	2.3	1.7	4.6	5.1	6	3	5.8	4.1	4.2
	受压下翼缘	1.3	1.3	3.6	4	5.8	5.1	5.2	6.4	7.2
	腹板	1.6	1.1	9	3.6	4.8	8.3	3.5	4.9	6.1
最大承载力(kN)		39.1	38.5	35.4	34.4	34	33.3	33.4	33.1	28.9
理论承载力(kN)		38.1	38.1	34	33.4	32.9	31.4	30.5	29.2	27.5

由此可见,翼缘锈蚀对槽钢梁承载能力的影响比腹板锈蚀对其的影响更为显著,且腹板锈蚀对其承载力的影响可以忽略;点蚀因子对锈蚀钢材试件材性的影响与其对受弯承载力的影响规律一致。

参考《钢结构设计规范》(GB50017—2003)4.1.1 条、4.1.2 条以及 4.2.2 条规定,受弯槽型钢构件需进行抗弯强度、整体稳定和抗剪强度的验算,并应满足下列条件:

$$\sigma_1 = \frac{M_x}{\gamma_x W_{nc}} \leq f \tag{1}$$

$$\sigma_2 = \frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f \tag{2}$$

$$\tau = \frac{VS}{It_w} \leq f_v \quad (3)$$

根据锈蚀对槽型钢承载力劣化机理,本文将不同点蚀水平的构件利用锈蚀“有效厚度”方法处理^[12],见图 4。

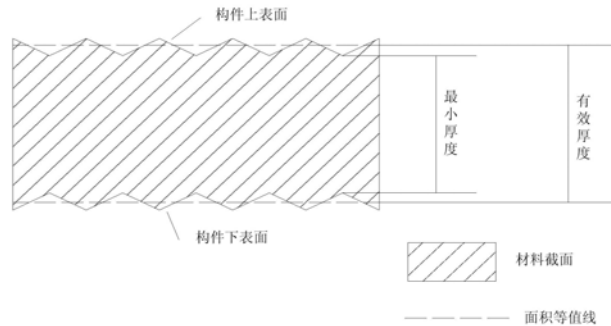


图 4 “有效厚度”法机理图

Fig. 4 The diagram of equivalent thickness

将有效厚度代入公式(1)、(2)和(3)中,可得各点蚀因子下槽型钢梁试件的理论最大受弯承载力,见表 3。

由表 3 可知,槽型钢梁试件在各锈蚀水平下的理论受弯承载力均小于试验测量值,即以《钢结构设计规范》(GB50017—2003)对锈蚀槽钢梁的受弯承载力计算仍然可行。

试验测得不同锈蚀程度的槽钢梁受弯承载力散点图如图 5、图 6 所示。

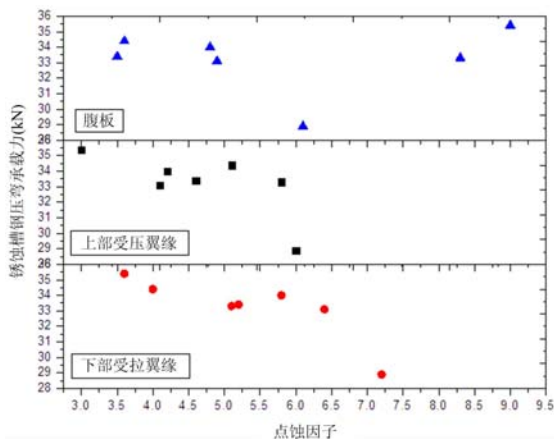


图 5 承载力一点蚀因子散点图

Fig. 5 The results of the tests in terms of corrosion pitting factor and flexural capacities

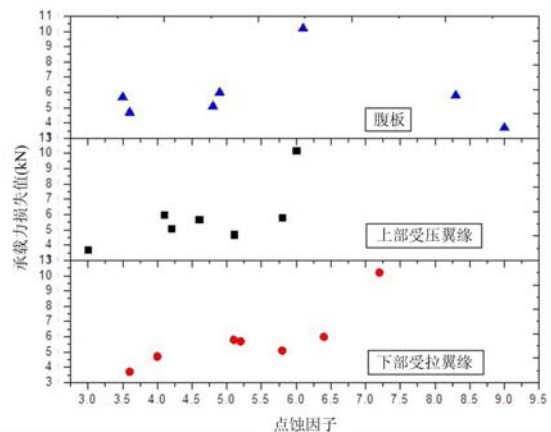


图 6 承载力损失值一点蚀因子散点图

Fig. 6 The results of the tests in terms of corrosion pitting factor and flexural capacities loss

图 6 为点蚀因子与构件承载力损失之间的关系。从图中可以看出,锈蚀槽钢受弯承载力损失值随其点蚀因子的变化而变化。构件承载力损失值随上、下翼缘的点蚀因子增大而增大,当上、下翼缘的点蚀因子分别大于 5.5 和 6.0 时,点蚀因子对承载力损失值的影响显著。而腹板的点蚀因子增长对试件的受弯承载力损失值几乎不产生影响。

通过对图 5、图 6 的综合考虑可知锈蚀槽钢的受弯承载力对其上、下翼缘点蚀因子较为敏感,而对腹板点蚀因子对其承载力几乎不存在影响。分析原因如下:

(1) 在槽钢的轧制过程中,不同部位所需要的轧制工艺不同,进而机械性能存在差异。在轧制过程中,腹板所受压力较翼缘大,其内部晶格也较后者致密,致使腹板机械性能优于后者。

(2) 当槽钢作为受弯构件时,翼缘的应力大于腹板,承载能力主要取决于翼缘^[13],上翼缘和下翼缘

承受压应力和拉应力。

(3) 当点蚀因子增加到一定量时,该部分点蚀坑周围将存在显著的应力集中,进而造成试件承载能力下降。

(4) 受荷槽钢结构因腐蚀而产生的表面锈坑导致不同程度的应力集中,使其表面强度降低,尤其对槽钢受弯承载力贡献显著的翼缘来说,应力集中对表面强度的影响更为明显,因此翼缘的锈蚀对槽钢受弯承载力的影响更显著。

3 结论

本次单向偏压试验共采用9根槽型钢构件,其中7根为锈蚀试件,未锈蚀的对比试件为2根,通过本次试验可以得出以下结论:

(1) 由于腐蚀作用的持续,点蚀因子逐渐增大,试件表面锈坑逐渐扩大、加深,其表面强度下降,进而造成承载力降低。

(2) 由于槽型钢构件的独特结构形式,其受弯时的主要承载能力取决于翼缘,因此其受弯承载力对翼缘的锈蚀较为敏感,并且上、下翼缘的锈蚀所产生的效果水平相当。随着上、下翼缘点蚀因子的增大,锈蚀构件的受弯承载力呈线性降低,而腹板的点蚀因子对构件承载力的影响波动性较大。

(3) 槽钢构件的受弯承载力损失值随翼缘点蚀因子的增大呈增大趋势,且上、下翼缘点蚀因子对承载力的削弱度相同,而腹板的锈蚀基本上对槽钢构件受弯承载力的损失值影响可忽略不计。

参考文献:

- [1] Nakai T, Matsushita H, Yamamoto N, et al. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st Report)[J]. Marine Structure, 2004, 17(5): 403—432.
- [2] 路民旭, 刘晓坤, 王建军, 郑修麟. 微机辅助直流电位法腐蚀疲劳裂纹扩展速率测试研究[J]. 实验力学, 1991, 6(2):197—201 (Lu Minxu, Liu Xiaokun, Wang Jianjun, Zheng Xiulin. Microcomputer and potential method for measuring corrosion fatigue crack propagation rate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1991, 6(2):197—201 (in Chinese))
- [3] 陈鸿海. 金属腐蚀学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994:167—174 (Chen Honghai. Corrosion of Metals [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1994:167—174(in Chinese))
- [4] 薛以年, 徐纪林, 李禾. 焊接接头热影响区的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率[J]. 实验力学, 1990, 5(4): 396—402 (Xue Yinian, Xu Jilin, Li He. Seawater corrosion fatigue crack growth rate in heat zone at welded joints[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1990, 5(4):396—402 (in Chinese))
- [5] 徐善华, 邱斌. 锈蚀 H 型钢偏心受压承载性能试验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4):536—541 (Xu Shanhua, Qiu Bin. Experimental study on eccentric compression strength of corroded steel H-shape members[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4):536—541(in Chinese))
- [6] 白烨. 锈位槽钢受弯性能试验研究与理论分析[D]. 西安建筑科技大学, 2009 (BAI Ye. Experimental study and theoretical analysis on the bending behavior of the corroded channel steel [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2009(in Chinese))
- [7] Beaulieu L V, Legeron F, Langlois S. Compression strength of corroded steel angle members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66:1366—1373.
- [8] 牟献良, 田月娥, 汪学华. 碳钢和低合金钢模拟和加速试验和大气腐蚀试验相关性[J]. 环境技术, 2001, 4:14—17 (Mou Xianliang, Tian Yuee, Wang Xuehua. The relativity of the simulated accelerated test of carbon steel and low alloy steel and atmospheric corrosion test[J]. Environmental Technology, 2001, 4:14—17(in Chinese))
- [9] 史炜洲, 童乐为, 陈以一 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7):53—60 (Shi Weizhou, Tong Lewei, Chen Yiyi, et al. Experimental study on influence of corrosion on behavior of steel material and steel beam[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7):53—60(in Chinese))
- [10] GB/T 18590—2001. 金属和合金的腐蚀 点蚀评定方法[S]. 中国: 国家质检总局, 2002 (GB/T 18590—2001. Corrosion of metals and alloys — Evaluation of pitting corrosion[S]. China: General Administration of Quality

- Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2002 (in Chinese))
- [11] DIN EN ISO 11463—2008. Corrosion of metals and alloys—Evaluation of pitting corrosion [S]. German: DE-DIN, 2008.
- [12] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto. Effect of pitting corrosion on strength of web plates subjected to patch loading[J]. Thin-Walled Structures, 2006(44):10—19.
- [13] 陈绍蕃. 钢结构设计原理(第三版)[M]. 北京:科学出版社, 2005 (Chen Shaofan. Principles of steel structure design(Third Edition)[M]. Beijing: Sciences Press, 2005(in Chinese))

Experimental Study of Bending Capacity of Corroded Channel Steel Member

XU Shan-hua, REN Song-bo, CUI Huan-ping, WANG You-de

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Object of this paper is to investigate the effect of corrosion on the bending capacities of corroded channel steel members. Seven corroded channel steel members and 2 uncorroded members were adopted in the bending experiment. Experimental results indicate that the bending capacity of corroded channel steel member decreases significantly along with the increase of pitting corrosion factor. The influence of corrosion on flange on the bending capacity is more obvious than that of member corroded on web. The influence of compression flange on bending capacity is basically same as that of tension flange. Finally, combined with the experimental results, the fitting between the member's bending capacity loss and the pitting corrosion factors at upper and bottom flange was carried out respectively by using Matlab software. A qualitative relation connecting bending capacity loss and the pitting corrosion factors at upper and bottom flange is proposed in this paper.

Keywords: channel steel; bending test; pitting corrosion factor; bearing properties