

文章编号:1673-2049(2011)01-0112-06

铝合金桥面板的耐腐蚀试验及寿命评估

班慧勇¹, 王元清^{1,2}, 李吉勤³, 石永久^{1,2}, 张振学⁴

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;
3. 中国建筑工程总公司, 北京 100037; 4. 天津城建设计院有限公司, 天津 300073)

摘要:通过对天津海河蚌埠桥铝合金桥面板进行耐腐蚀试验研究, 总结出了一套可行的试验方法, 并对其耐腐蚀寿命进行了评估。采用电化学试验方法进行铝合金桥面板耐腐蚀试验, 模拟当地大气环境条件并测定其腐蚀速率, 利用电镜观察铝合金的腐蚀形貌。结果表明: 天津海河蚌埠桥铝合金桥面板的耐腐蚀性能良好, 耐腐蚀寿命满足工程要求; 所提出的耐腐蚀试验方法对今后的道路桥梁工程耐久性研究有一定的指导意义, 试验结论也有利于促进铝合金材料在桥梁结构中的更广泛应用。

关键词:铝合金; 桥面板; 耐腐蚀; 寿命评估; 腐蚀速率

中图分类号: TU512.4 **文献标志码:** A

Experiment and Life Assessment on Corrosion Resistance of Aluminum Alloy Bridge Deck

BAN Hui-yong¹, WANG Yuan-qing^{1,2}, LI Ji-qin³, SHI Yong-jiu^{1,2}, ZHANG Zhen-xue⁴

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. China State Construction Engineering Corporation, Beijing 100037, China; 4. Tianjin Urban Construction Design Institute Co. Ltd., Tianjin 300073, China)

Abstract: The electrochemical test was conducted to get the corrosion rate and corrosion figures in the simulating atmospheric environments. The feasible test methods were proposed from the experimental research on the corrosion resistance of the aluminum alloy bridge deck of Tianjin Haihe Bengbu Bridge, and the life on corrosion resistance was assessed. The results show that the corrosion resistance behaviors of the aluminum alloy bridge deck of Tianjin Haihe Bengbu Bridge are qualified and the life on corrosion resistance can meet the project requirements. The test method proposed in the paper has practical guiding significance for future research on the durability of bridge engineering, and the conclusions are useful for the project application of aluminum alloy material in bridge structures.

Key words: aluminum alloy; bridge deck; corrosion resistance; life assessment; corrosion rate

0 引言

近几年来, 铝合金材料的产量跃居金属材料产量的第 2 位, 仅次于钢材, 并逐步开始在航空工业

外的机械制造和土木工程领域得到应用^[1]。目前世界铝产量的 27% 用于建筑行业^[2], 除结构如门窗、幕墙^[3]等外, 桥梁、大跨屋盖、网架网壳等承重结构也开始采用铝合金材料^[4]; 施工中现浇混凝土所用

收稿日期: 2010-12-10

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20090002110046)

作者简介: 班慧勇 (1985-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 工学博士研究生, E-mail: bhy03@mails. tsinghua. edu. cn。

模板同样出现了铝合金板木^[5]。此外,为克服铝合金材料弹性模量小的缺点,工程中还出现了 FRP-铝合金组合结构^[6]。

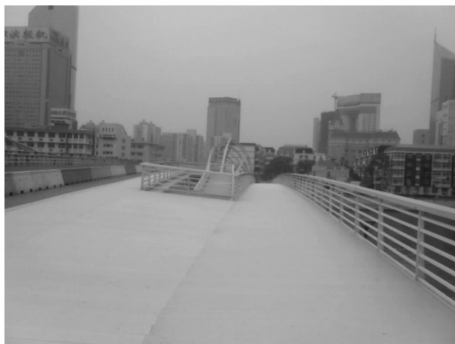
天津海河蚌埠桥人行道桥面板采用了铝合金材料,已有文献对该类桥面板的静力承载性能进行了试验研究^[7]。为了保证桥梁的整体美观效果,工程中铝合金桥面板直接暴露在自然环境中,这对铝合金的耐久性能提出了较高的要求。由于铝合金桥面板直接裸露在空气中,需要确定其耐腐蚀性能和耐腐蚀寿命。而针对铝合金桥面板的耐腐蚀试验,工程界尚无成熟的方法,也未见到相关研究成果。本文中笔者根据该工程的具体情况,结合材料科学的试验研究方法,提出了一套可行的铝合金桥面板耐腐蚀试验方法,研究了该铝合金桥面板的耐腐蚀性能,并给出其耐腐蚀寿命,为今后的工程研究提供了一定的参考价值。

1 工程背景

蚌埠桥横跨天津海河,主桥两侧设辅桥作为观光人行道。主桥宽 23.5 m;辅桥宽 3 m;桥梁全长 192 m。图 1 为天津海河蚌埠桥。



(a) 蚌埠桥全景



(b) 人行道桥面板

图 1 天津海河蚌埠桥

Fig. 1 Tianjin Haihe Bengbu Bridge

桥上观光人行道所用材料为铝合金桥面板,即该试验的研究对象。人行道桥面板均采用带防滑棱

的 6005-T5 铝型材^[8],安装在桥体主横梁间的次纵梁上。图 2 为人行道所用铝合金桥面板示意图。为增加桥面板的防滑性能,其上表面分布有 1 mm 高的三角凸起防滑棱。

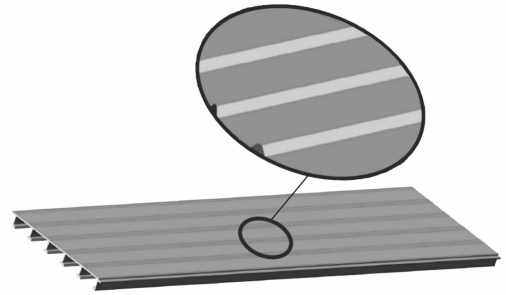


图 2 铝合金桥面板

Fig. 2 Aluminum Alloy Bridge Deck

2 试验方案

铝合金材料表面有致密的氧化膜,因此抗锈蚀性能较好,但其抗酸、碱、盐腐蚀的能力较差,尤其在酸雨的作用下更容易发生腐蚀^[9-10]。暴露在空气中的铝合金桥面板受周围环境的影响很大。天津海河地区大气呈酸性,且盐腐蚀也很明显,因此评价该工程中的铝合金桥面板在当地大气环境下的耐腐蚀性能显得很有必要。本文中的试验将研究桥面板所用铝合金材料在当地气候条件的模拟环境中的腐蚀形貌;分析计算所用铝合金材料在模拟环境中的腐蚀速率,并估算铝合金桥面板的耐腐蚀寿命。

腐蚀形貌的测定方案为将 4 组试件在不同的模拟环境下腐蚀一定时间后,用扫描电子显微镜 SEM 观察其表面腐蚀形貌,并与未腐蚀试件形貌作对比。

腐蚀速率的测定采用电化学方法。尹卓湘等^[11]利用电化学方法研究了铝合金中常见元素的耐腐蚀机理,邓祖宇等^[12]和李劲风等^[13]采用电化学方法和极化曲线分别定量研究了钢材和铝合金在盐溶液中的电化学特征。本文中利用三电极体系测定试件的自腐蚀电位变化,得到其极化曲线并由此计算腐蚀速率。三电极主要包括工作电极(试件铝电极)、对电极(铂电极)和参比电极(饱和甘汞);数据采集利用 IM6e 电化学工作站进行。试验包括测定在不同模拟环境的酸(盐混)溶液中的 6 组试件。图 3 为腐蚀速率的测定。

2.1 试件设计

试验所用试件尺寸均为 15 mm×15 mm,厚度为 2.7 mm,共 10 个试件,见图 4。

将试件 A-1~A-6 分别放在 6 种溶液环境中测

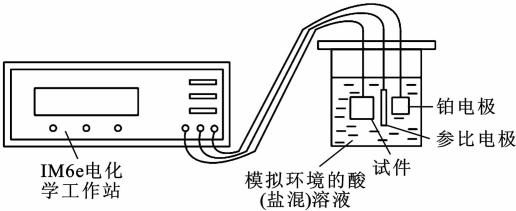


图 3 腐蚀速率的测定

Fig. 3 Determination of Corrosion Rate

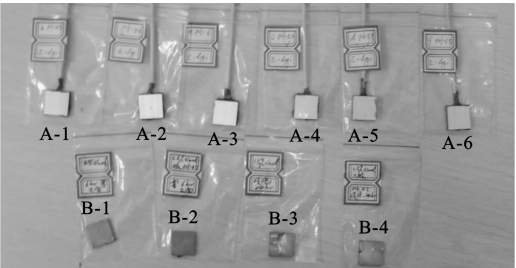


图 4 耐腐蚀试件

Fig. 4 Corrosion Resistance Specimens

定其腐蚀速率(导线用来接测量仪器),利用试件 B-1~B-4来观察在不同溶液环境下的腐蚀形貌。试件均取自桥面板肋间的翼缘板,以保证加工试件时不会破坏试件的上、下表面,避免试件表面与实际桥面板表面情况不符。

2.2 试验条件和量测内容

根据天津地区实际大气成分和酸雨统计情况,配制一定 pH 值的溶液模拟当地气候环境,来考察铝合金桥面板材料在这种环境下的耐腐蚀性能。表 1、2 分别为天津地区近年来大气部分化合物密度和酸雨频率及 pH 值^[14]。

表 1 天津地区大气部分化合物密度

Tab. 1 Parts of Compound Densities in Atmosphere in Tianjin Region			
Tianjin Region			mg · m ⁻³
年份	ρSO ₂	ρNO ₂	ρPM ₁₀
2003 年	0.074	0.052	0.133
2004 年	0.073	0.052	0.111
2005 年	0.076	0.047	0.106
平均值	0.075	0.050	0.110

注:ρSO₂、ρNO₂、ρPM₁₀ 分别为 SO₂、NO₂、PM₁₀ 的密度。

根据以上数据,模拟酸雨环境所采用的电解液为硫酸和硝酸(体积比 V_{H₂SO₄}:V_{HNO₃} = 1:1.22)的混酸溶液,并调节 pH 值,共试验 6 组来测量腐蚀速率;试件 A-1~A-5 试验 pH 值分别为 4.0、4.5、5.0、5.5、6.0;试件 A-6 试验电解液组分为质量分数为 3.5% 的 NaCl 加混酸溶液(体积比 V_{H₂SO₄}:V_{HNO₃} = 1:1.22),pH=4.5,模拟盐环境。

表 2 天津地区酸雨频率及 pH 值

Tab. 2 Acid Rainfall Frequencies and pH Values in Tianjin Region

年份	酸雨频率/%	酸雨 pH 值
1998 年	9.2	5.60
1999 年	7.4	6.10
2000 年	8.6	5.51
2001 年	14.1	5.60

将试件 B-1~B-4 放入另配的 4 种溶液环境来观察腐蚀形貌,表 3 为腐蚀形貌试验条件。测量内容主要为在 4 种模拟溶液环境下腐蚀一定时间后,利用 JSM6460 扫描电子显微镜观察不同腐蚀条件下的腐蚀形貌。

表 3 腐蚀形貌试验条件

Tab. 3 Test Conditions of Corrosion Figures

试件编号	试验条件
B-0	对比试件,即试件 B-1 腐蚀前扫描
B-1	质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,雾化腐蚀 6 h,pH=5.88
B-2	质量分数为 3.5% 的 NaCl 加混酸溶液,雾化腐蚀 6 h,pH=4.5
B-3	质量分数为 3.5% 的 NaCl 加混酸溶液,雾化腐蚀 24 h,pH=4.5
B-4	质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,浸泡腐蚀 24 h,pH=5.88

3 试验结果

3.1 腐蚀速率

采用年均腐蚀深度 D 表示试件在给定环境下的腐蚀速率,根据铝的自腐蚀平衡条件,可采用式(1)计算,即

D=3.153×10⁷M_{Al}ρ_{corr} / (3×96 500ρ_{Al}) (1)

式中:常数 3.153×10⁷ 为时间换算系数,即把“年”换算为“秒”;M_{Al}为铝的摩尔质量;ρ_{corr}为自腐蚀电流密度,通过测得的极化曲线计算得到;常数 3 为铝的价位;常数 96 500 为 1 mol 电子所带电荷;ρ_{Al}为铝的密度。

图 5 为试件 A-1~A-6 的耐腐蚀试验极化曲线,其中横坐标为电极电势 U,纵坐标为对数电流 i_{corr}。极化曲线是通过得到电极电势与通过电极的电流对数之间的关系,确定自腐蚀平衡时的对数电流(图 5 中 2 条斜直线的交点对应的纵坐标即为自腐蚀平衡时的对数电流),从而根据式(1)计算得到年均腐蚀深度 D。

通过图 5 中极化曲线得到的自腐蚀对数电流 i_{corr}可以求得各试件的自腐蚀电流 I_{corr},进而求得自腐蚀电流密度 ρ_{corr}。除试件 A-1 扫描 2 条极化曲线外,其余试件均扫描 3 条极化曲线,图 5 中只给出了

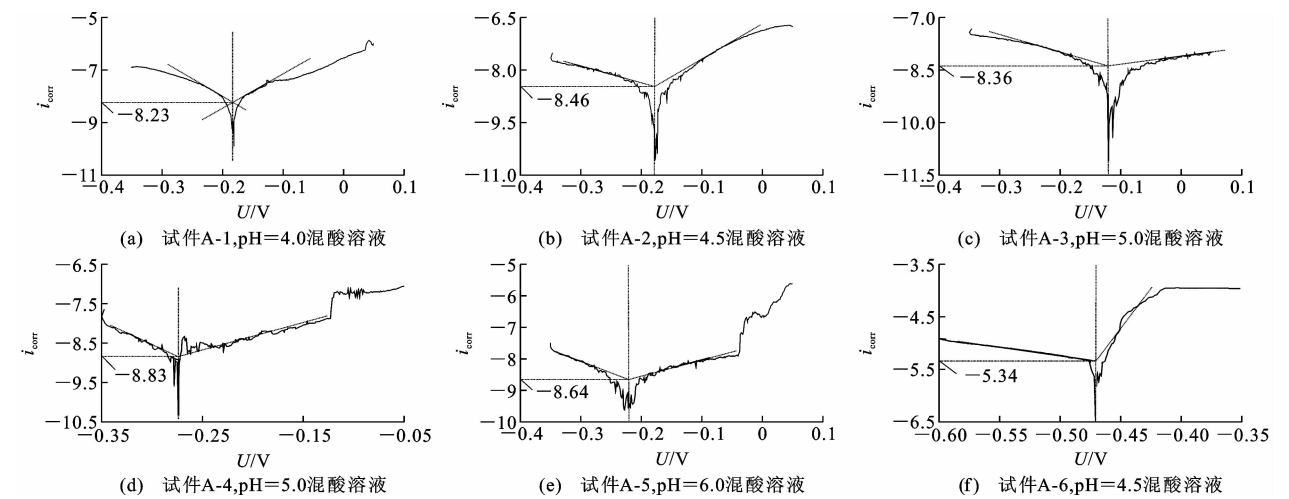


图 5 耐腐蚀试验极化曲线

Fig. 5 Polarization Curves of Corrosion Resistance Test

各试件的其中 1 条曲线。

自腐蚀电流 I_{corr} 采用式(2)进行计算,即

$$I_{\text{corr}} = 10^a \tag{2}$$

式中: a 为每个试件多条极化曲线测量结果的平均值。

自腐蚀电流密度 ρ_{corr} 采用式(3)进行计算,即

$$\rho_{\text{corr}} = I_{\text{corr}}/s \tag{3}$$

式中: s 为试件腐蚀表面面积,本文中试验采用的试件尺寸为 15 mm×15 mm。

以试件 A-1 为例,采用式(2)和式(3)进行自腐蚀电流密度的计算,即

$$I_{\text{corr}} = 10^{(i_{\text{corr}1} + i_{\text{corr}2})/2} = 6.92 \times 10^{-9} \text{ A}$$
$$\rho_{\text{corr}} = I_{\text{corr}}/s = 3.1 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中: $i_{\text{corr}1}$ 、 $i_{\text{corr}2}$ 分别为试件 A-1 两条极化曲线得到的自腐蚀对数电流。

将各个试件计算得到的自腐蚀电流密度 ρ_{corr} 代入式(1),可得腐蚀速率 D 。6 个试件的最终腐蚀速率试验结果如表 4 所示。

表 4 腐蚀速率试验结果

Tab. 4 Test Results of Corrosion Rates

试件编号	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
pH 值	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	4.5
$\rho_{\text{corr}}/$ ($10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$)	31.0	15.0	18.9	827.0	10.7	187.0
$D/(\mu\text{m} \cdot \text{年}^{-1})$	33.76	16.34	20.58	9.00	11.65	20.36

由表 4 可以看出,6 个试件的最快腐蚀速率为 $33.76 \mu\text{m} \cdot \text{年}^{-1}$,即最快约 30 年腐蚀 1 mm;平均腐蚀速率为 $18.62 \mu\text{m} \cdot \text{年}^{-1}$,即平均 54 年腐蚀 1 mm,由此可见,该铝合金桥面板耐腐蚀性能良好。

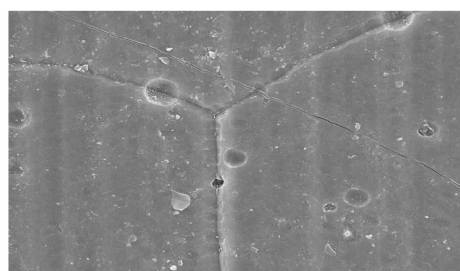
3.2 腐蚀形貌

在 4 种溶液中试件的表面腐蚀形貌如图 6 所示。图 6 中,试件 B-0 为空白试件,试件 B-1 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液雾化腐蚀 6 h(pH=5.88),试件 B-2 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 加混酸溶液雾化腐蚀 6 h(pH=4.5),试件 B-3 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 加混酸溶液中浸泡 24 h(pH=4.5),试件 B-4 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 24 h(pH=5.88)。由图 6 可以看出:未在模拟溶液中进行腐蚀的对比试件 B-0 除材料本身的缺陷外表面比较光滑;其他试件在酸和酸盐环境下主要腐蚀形貌为点蚀,且腐蚀试件越长(试件 B-3、B-4)、腐蚀溶液 pH 值越大(试件 B-1、B-4),点蚀的越严重;在腐蚀过程中,试件表面会不断产生新的氧化膜,这一现象有利于该类铝合金材料耐腐蚀寿命的提高。

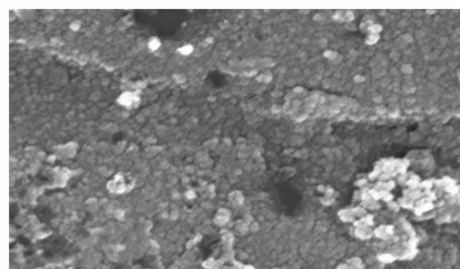
4 结 语

(1)在 pH=4.0~6.0 的酸性环境中,铝合金桥面板表现出较好的耐腐蚀性能;在模拟酸盐混合的电解液环境中(pH=4.5)试件的抗腐蚀性能相对较差。偏于安全地取试验中测得的最快年均腐蚀深度 $D \approx 34 \mu\text{m} \cdot \text{年}^{-1}$,则在较理想的腐蚀环境中(如试验所提供的条件),即 pH 值不变、不考虑物理磨损等不利条件的情况下,腐蚀 1 mm 的铝合金材料需要约 30 年;实际的耐腐蚀寿命可能会小于该理想条件下的计算值,而目前的试验条件和设备虽无法完全模拟实际环境和各种不利因素,但该计算值同样具有一定的工程参考价值。

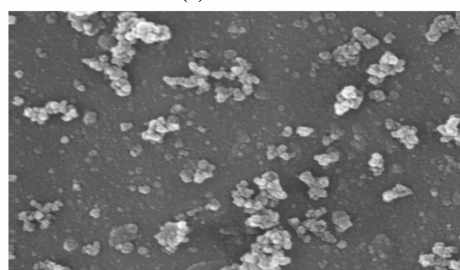
(2)试件在酸和酸盐环境下的腐蚀形貌主要为点蚀,且在腐蚀过程中伴随着新的氧化膜不断地生



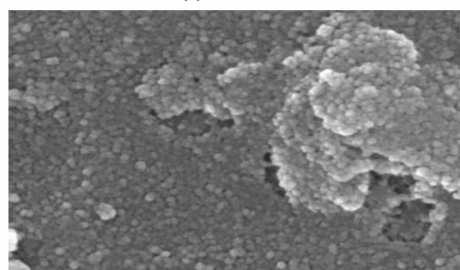
(a) 试件B-0



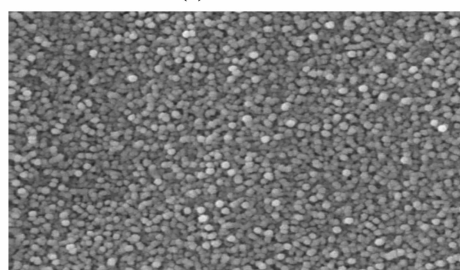
(b) 试件B-1



(c) 试件B-2



(d) 试件B-3



(e) 试件B-4

图6 不同溶液中试件腐蚀形貌的比较

Fig. 6 Comparisons of Corrosion Figures for Specimens in Different Solutions

成-腐蚀-生成,这对材料的耐腐蚀性能有利。

(3)对于该试验未考虑桥面板在实际使用中磨损与腐蚀同时存在并相互影响的情况,需要做进一步的试验研究来分析这一因素对铝合金材料耐久性的影响。

参考文献:

References:

- [1] MAZZOLANI E M. Aluminum Alloy Structures[M]. Boston: Pitman, 1985.
- [2] SHARP M L. Behavior and Design of Aluminum Structures[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [3] 董震, 张其林, 吴亚舸. 铝镁锰合金建筑板材的结构设计研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(1): 115-120.
DONG Zhen, ZHANG Qi-lin, WU Ya-ge. Construction Design Study on Al-Mg-Mn Alloy Building Sheets[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(1): 115-120.
- [4] 石永久, 程明, 王元清. 铝合金在建筑结构中的应用与研究[J]. 建筑科学, 2005, 21(6): 7-11, 20.
SHI Yong-jiu, CHENG Ming, WANG Yuan-qing. Application and Study of Aluminum Alloy in Building Structures[J]. Building Science, 2005, 21(6): 7-11, 20.
- [5] 苏汝培. 预制建筑施工工艺与铝合金板木的运用[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(3): 94-98.
SO F. Prefabricated Building Construction—the Use of Aluminum Alloy Formwork[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(3): 94-98.
- [6] 钱鹏, 叶列平. 铝合金及FRP-铝合金组合结构在结构工程中的应用[J]. 建筑科学, 2006, 22(5): 100-105.
QIAN Peng, YE Lie-ping. Aluminum Alloy Structures and FRP-aluminum Alloy Composite Structures in Civil Engineering[J]. Building Science, 2006, 22(5): 100-105.
- [7] 胡宗文, 王元清, 石永久, 等. 天津海河蚌埠桥铝合金桥面板静力承载力性能试验研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(1): 78-81, 58.
HU Zong-wen, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu, et al. Testing Research on Static Bearing Performance of Aluminum Alloy Bridge Deck of Tianjin Haihe Bengbu Bridge[J]. Building Science, 2009, 25(1): 78-81, 58.
- [8] GB/T 6892—2000, 工业用铝及铝合金热挤压型材[S].
GB/T 6892—2000, Wrought Aluminum and Aluminum Alloy Extruded Profiles[S].
- [9] 欧进萍, 匡亚川. 形状记忆合金增强弹性混凝土梁的变形特征[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 1-6.
OU Jin-ping, KUANG Ya-chuan. Deformation Characteristic of Concrete Beams Embedded Superelastic Shape Memory Alloy[J]. Journal of Architecture and

- Civil Engineering, 2007, 24(3): 1-6.
- [10] 李金波, 贡金鑫. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土圆柱抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 55-60.
LI Jin-bo, GONG Jin-xin. Influences of Rebar Corrosion on Seismic Behavior of Circular RC Columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 55-60.
- [11] 尹卓湘, 陈延超, 周红娟. 稀土与铝合金中常见元素的耐腐蚀机理研究[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2007, 36(5): 18-22, 39.
YIN Zhuo-xiang, CHEN Yan-chao, ZHOU Hong-juan. The Study of Corrosion-resisting Mechanisms of the RE-elements and Some Common-elements in Aluminum Alloy[J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 36(5): 18-22, 39.
- [12] 邓祖宇, 廖 钊, 何晓英, 等. NaCl 薄层液膜下 X70 钢腐蚀的电化学研究[J]. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2008, 29(1): 89-92, 100.
DENG Zu-yu, LIAO Fang, HE Xiao-ying, et al. Electrochemical Study of the X70 Steel Corrosion Under Thin Electrolyte of NaCl[J]. Journal of China West Normal University: Natural Sciences, 2008, 29(1): 89-92, 100.
- [13] 李劲风, 张 昭, 程英亮, 等. NaCl 溶液中 Al-Li 合金腐蚀过程的电化学特征[J]. 金属学报, 2002, 38(7): 760-764.
LI Jin-feng, ZHANG Zhao, CHENG Ying-liang, et al. Electrochemical Features of the Corrosion of an Aluminum-lithium Alloy in 3.0% NaCl Solution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(7): 760-764.
- [14] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
Editorial Board of China Environment Annual. China Environment Annual[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2006.
- ~~~~~
- (上接第 99 页)
- [4] HAO H, WU C Q. Scaled-distance Relationship for Chamber Blast Accidents in Underground Storage of Explosives[J]. Fragblast, 2001, 5(1/2): 57-90.
- [5] 赵跃堂, 梁 晖, 范 斌. 饱和土中爆炸波传播问题的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 352-357.
ZHAO Yue-tang, LIANG Hui, FAN Bin. Numerical Simulation of Explosion Wave Propagation in the Saturated Soil[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(4): 352-357.
- [6] 施 鹏, 邓国强, 杨秀敏, 等. 土中爆炸地冲击能量分布研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 240-244.
SHI Peng, DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min, et al. Study on Ground Shock Energy Distribution of Explosion in Soil[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 240-244.
- [7] WANG J. Simulation of Landmine Explosion Using LS-DYNA 3D Software: Benchmark Work of Simulation of Explosion in Soil and Air[R]. Salisbury: Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
- [8] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
HENRYCH J. Dynamics of Explosion and Its Applications[M]. Translated by XIONG Jian-guo. Beijing: Science Press, 1987.
- [9] WANG Zhong-qi, LU Yong, HAO Hong. Numerical Investigation of Effects of Water Saturation on Blast Wave Propagation in Soil Mass[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(5): 551-561.
- [10] TM 5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions[S].