

# 敦煌莫高窟洞窟自然通风实验研究

王江丽<sup>1,2</sup>, 闫增峰<sup>1</sup>, 王旭东<sup>3</sup>, 张正模<sup>3</sup>, 尚瑞华<sup>1</sup>, 毕文蓓<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 河南科技大学建筑学院, 河南 洛阳 471003; 3. 敦煌研究院保护研究所, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:** 为了研究莫高窟洞窟内微气流的运动规律及形成原因, 分别进行实验室模型试验及莫高窟现场测试. 数据表明, 引起洞窟内气体流动的动力是热压作用和风压作用共同产生的. 当吹向窟门的东风小于0.4 m/s时, 洞窟内外温差超过5℃, 随着温差增大, 热压作用的控制力逐渐增强; 当吹向窟门的东风大于0.4 m/s, 即使洞窟内外温差达到14℃, 热压作用的控制力仍不明显, 窟内风速较小. 研究结果明确了引起洞窟内外空气交换的动力, 及空气交换机理, 为研究洞窟内保护环境打下理论基础.

**关键词:** 莫高窟; 单侧开口自然通风; 模型试验; 现场测试

**中图分类号:** TU834.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)05-0712-05

## Experimental research on natural ventilation of the Mogao Grottoes in Dunhuang

WANG Jiangli<sup>1,2</sup>, YAN Zengfeng<sup>1</sup>, WANG Xudong<sup>3</sup>, ZHANG Zhengmo<sup>3</sup>, SHANG Ruihua<sup>1</sup>,  
XU Jiangtao<sup>1</sup>, BI Wenbei<sup>1</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. School of Architecture, Henan Univ. of Scie. & Tech., Luoyang 471003, China; 3. Conservation Institute, Dunhuang Rese. Acad., Dunhuang 736200, China)

**Abstract:** In order to study the law of flow of the micro airflow and its formation in Mogao Grottoes, the laboratory simulation test and the site test were conducted separately. It indicates that the motivation exchange of the air inside and outside is thermal pressure and wind pressure. When east and west wind which blow the cave door is below 0.4 m/s and the temperature difference is higher than 5℃, the higher temperature difference is, the bigger the thermal pressure play a leading role gradually. When east and west wind which blow the cave door is over 0.4 m/s, although the temperature difference is up to 14℃, the role of thermal pressure is little and the air velocity is also small. The research defined the motivation and the principle for exchanging the air inside and outside in laying the theoretical foundation for environment protection work in caves.

**Key words:** Mogao Grottoes; single-sided natural ventilation; actual test

敦煌莫高窟位于鸣沙山东麓的西壁上, 南北延伸1 680 km, 现存有壁画、雕塑的洞窟492个, 是当今世界上现存规模宏大、艺术精湛的佛教艺术宝库, 在全世界都具有极其重要的艺术价值及考古价值.

莫高窟壁画、雕塑保存上千年, 在一定程度上得益于洞窟内相对稳定的保护环境. 研究表明, 洞窟内温湿度环境及气体流动状况直接影响壁画、雕塑等文物保存, 现在壁画出现的各种病害<sup>[1]</sup>, 归根结底都是由于洞窟内温湿度变化所引起的<sup>[2]</sup>. 洞窟内自然通风引起窟内外空气交换, 直接影响到窟内温湿度的变化. 因此, 研究洞窟自然通风对维持洞窟内稳定的保护环境至关重要. 多年来, 国内外研究人员陆续对莫高窟窟内保护环境及洞窟内外空气交换率进行监测<sup>[3-4]</sup>, 记录了大量监测数据. 但到目前为止, 引起洞窟内外空气交换原因的研究仅限于定性分析. 明确引起洞窟内外空气交换的动力, 研究莫高窟洞窟内外空气交换机理, 分析窟内外空

气交换规律, 能从本质上认识洞窟内外空气交换, 为研究洞窟内保护环境打下理论基础.

## 1 物理模型

### 1.1 通风模型

洞窟一面开口, 三面与岩体相连, 建立物理模型为单侧开口自然通风模型. 引起单侧自然通风的动力有热压作用与风压作用<sup>[5]</sup>.

Walker和Wilson<sup>[5]</sup>利用恒含量示踪气体技术测量风压和热压分别独立的两间房子的空气渗透, 发现在低风速(1.5 m/s)下主压力仅仅与热压相关.

洞窟位于崖体之中, 洞窟内冬暖夏凉, 温度在6~16℃间波动; 而莫高窟所处戈壁, 环境温度全年在-10~30℃之间波动. 莫高窟特殊的地形地貌, 使得窟前风速较小, 以2004年为例, 平均风速为0.61 m/s<sup>[6]</sup>.

由此分析, 推断洞窟自然通风模型为单侧开口热压为主的自然通风模型<sup>[7-9]</sup>.

收稿日期: 2015-05-07

修改稿日期: 2015-10-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51378412); 国家文物局课题(20110308)

作者简介: 王江丽(1978-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事土遗址保护、绿色建筑设计及建筑节能技术等的研究. E-mail: wjl\_hkd@126.com

## 1.2 数学模型

仅有浮升力引起的通过单侧开口的风量由式(1)确定<sup>[5]</sup>:

$$Q = \frac{C_d A}{3} \sqrt{\frac{g H \Delta T}{\bar{T}}} \quad (1)$$

式中:  $C_d$ 为流量系数, 经过前人大量的研究, 在计算中常取 $C_d=0.4\sim 0.8$ ;  $H$ 为百叶窗口高度, m;  $A$ 为通风截面积,  $m^2$ ;  $\Delta T$ 为内部和外部的平均温差, K;  $\bar{T}$ 为洞窟内平均温度, K.

$$v = Q/A \quad (2)$$

式中:  $v$ 为气流速度, m/s;  $A$ 为通风截面积,  $m^2$ ;

整理式(1)及式(2), 得出窟内气流速度与窟内外温差的根号值呈线性关系, 即:

$$v = C \sqrt{\Delta T} \quad (3)$$

式中:  $C$ 为系数.

## 2 模型试验

为了验证莫高窟洞窟通风适用于式(1)所示的理论模型, 课题组于2014年7月至8月间进行模型试验, 探索莫高窟洞窟在热压作用下的通风规律. 根据第131窟图纸, 建造模型(见图1). 模型外贴5 mm挤塑板保温层, 于模型后壁及侧壁安装制冷设备(见图2), 以模拟洞窟夏季窟内温度. 模型置于实验室, 排除风压干扰.

试验主要测试设备包括风速传感器(TSI 8475、E+E 66、swema03+)、温度块(testo、HOBO)、数据采集仪(Agilent 34972A)、专用线. 风速传感器TSI 8475启动风速为0.05 m/s, E+E 66启动风速为0.15 m/s, swema03+万向微风仪启动风速为0.05 m/s(以下测试数据中显示风速为0 m/s仅代表小于仪器的启动风速), 测量范围0.05~2 m/s, 测量精度为读数的 $\pm 3\%$ .



图1 第131窟模型

Fig.1 The model of the cave 131 in Mogao Grottoes



图2 模型制冷系统

Fig.2 The system of refrigeration in model

对2014年8月5日模型内外空气温度及上风口气流速度数据分析, 整理气流速度与 $\sqrt{\Delta T}$ 的关系图, 如图3所示.

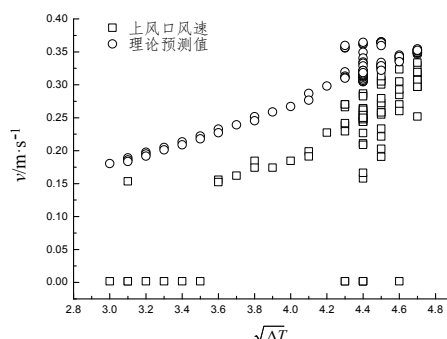


图3 模型试验实测值与理论值对比图

Fig.3 The comparison chart of theoretical values and measured values in model test

从图3可知, 在模型中, 测试结果基本符合理论模型的预测, 即在实验室无风环境下, 洞窟内气体流动主要由窟内外温差产生的热压作用引起的.

## 3 现场测试

根据气象数据显示, 窟前风以南北风向为主, 且风力较小. 为了验证窟前风环境不对洞窟内通风产生影响, 洞窟内风速完全由热压所控制的猜测, 课题组于2014年9月13日至2014年9月24日、2015年1月24日至2015年2月10日, 分别对莫高窟洞窟内外环境参数进行现场测试. 分析数据显示: 测试数据与实验室数据差异性较大, 即引起洞窟内气体流动的原因可能并非以热压为主.

以第172窟、第138窟的测试数据为例, 分析引起洞窟气体流动的原因. 该二窟均位于莫高窟南区二层, 均属于中型洞窟, 两窟相距不远, 可以认为窟外风环境相似.

### 3.1 夏季测试数据分析

分析2014年9月第172窟、第138窟测试数据, 对窟内外温度进行计算处理, 得出窟内气流速度与窟内外温差开根号值关系如图4、图5所示.

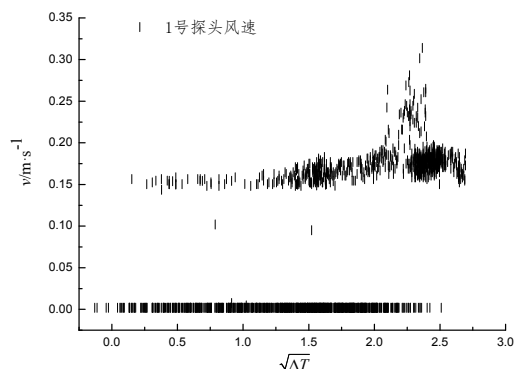


图4 9月17日—9月18日172洞窟窟内 $v-\sqrt{\Delta T}$ 关系图  
Fig.4 The context diagram of air velocity and square root values of temperature difference in the cave 172 from Sept. 17 to Sept. 18

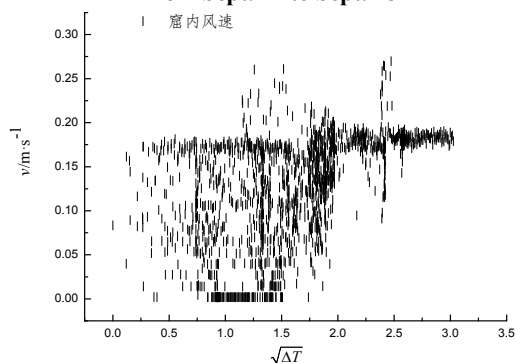


图5 9月23日—9月24日138洞窟窟内 $v-\sqrt{\Delta T}$ 关系图  
Fig.5 The context diagram of air velocity and square root values of temperature difference in the cave 138 from Sept. 23 to Sept. 24

由图4、图5可知,夏季现场测试结果与实验室测试结果差异很大:首先洞窟内气流与窟内外温差几乎不存在线性关系,即热压的控制力很小;其次,洞窟内气流速度较小,即使温差达到9℃,窟内风速基本在0.2 m/s.

### 3.2 冬季测试数据分析

2015年1月-2月对现场的测试数据显示,在测试时段内,窟内外温差同样较大,可达到14~16℃.分析此时间段内第172窟、第138窟测试数据,同样对窟内外温度进行计算处理,得出窟内气流速度与窟内外温差开根号值关系如图6、图7所示.

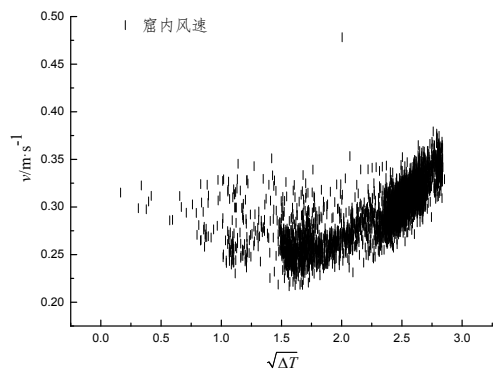


图6 1月29日—2月1日138洞窟窟内 $v-\sqrt{\Delta T}$ 关系图  
Fig.6 The context diagram of air velocity and square root values of temperature difference in the cave 138 from Jan. 29 to Feb. 1

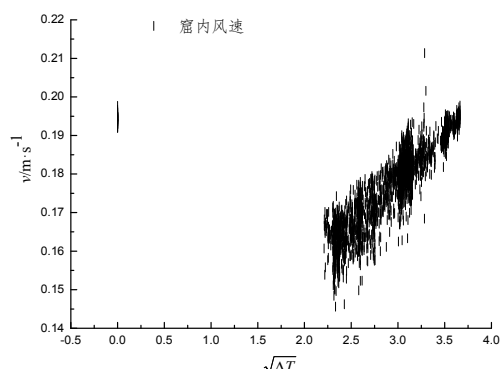


图7 1月24日—1月26日172洞窟窟内 $v-\sqrt{\Delta T}$ 关系图  
Fig.7 The context diagram of air velocity and square root values of temperature difference in the cave 172 from Jan. 24 to Jan. 26

由图6、图7可知,冬季,当窟内外温差小于4℃时,热压对洞窟内气体流动的控制力减弱,当窟内外温差大于5℃时,热压对洞窟内气体流动的控制力增强.并且在窟内外9℃温差时,洞窟内气流速度达到0.4 m/s,大于夏季测试数据.

### 3.3 洞窟外风速测试分析

为了分析风压对洞窟内气体流动的影响,在洞窟外栈道上放置一个一维风速传感器,测试正对窟门的大气风速,即东西向风.测试结果如图8、图9及图10所示.

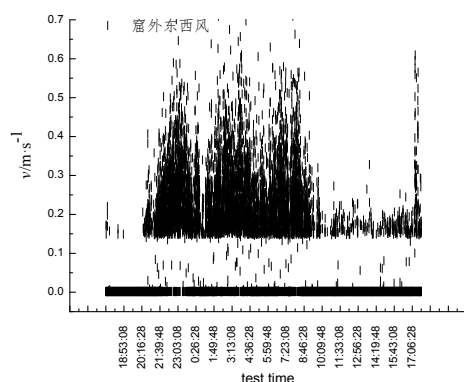


图8 9月17日—9月18日172洞窟窟外风速分布图  
Fig.8 The east and west wind speed-distributing map in the outside of the cave 172 from Sept. 17 to Sept. 18

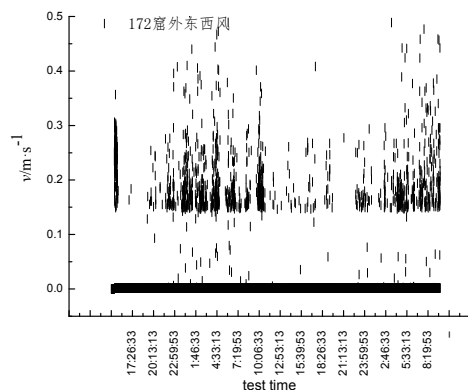


图9 1月24日—1月26日172洞窟窟外风速分布图  
Fig.9 The east and west wind speed-distributing map in the outside of the cave 172 from Jan. 24 to Jan. 26

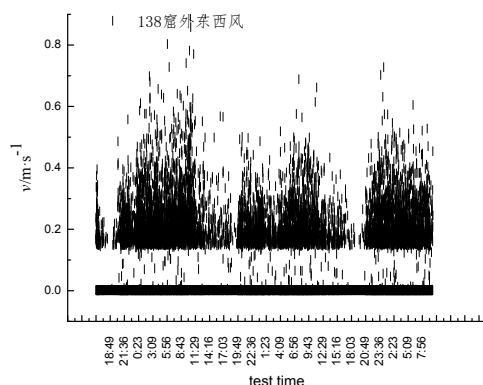


图10 1月29日—2月1日138洞窟外风速分布图

Fig.10 The east and west wind speed-distributing map in the outside of the cave 138 from Jan. 29 to Feb. 1

由图8~10可知,夏季吹向窟门的东风比冬季略为强烈,对洞窟内气体流动的影响力增加.对比发现,当吹向窟门的东风小于0.4 m/s,洞窟内外温差超过5℃,热压作用的控制力逐渐增强;当吹向窟门的东风大于0.4 m/s,即使洞窟内外温差达到14℃,热压作用的控制力不明显,并且对窟内气流速度有一定抑制作用.

### 3.4 洞窟内外温差分析

分别测试冬、夏季洞窟内外温度,根据图11、图12所示,发现洞窟在一年中温度较为稳定,冬夏温度在6~16℃间波动,在同一季节,窟内温度全天变化不大;由于莫高窟所处戈壁,环境温度具有冬夏波动大,昼夜也波动大的特点,波动值在-10℃~30℃之间.窟内外温差在午后16:00及清晨7:00前后达到最大,最高值达到14℃左右.可以推断全年中窟内外温差最大值为14℃左右.

热压作用不仅与窟内外温差相关,同时与通风口高差相关.对于大部分洞窟开说,通风口高差为门的高度,在2 m左右.这些因素致使在热压作用下的通风力度不大.因此,试验所测洞窟内自然通风风速普遍较小,最大在0.4 m/s左右,与测试时人员对空气的扰动相当.

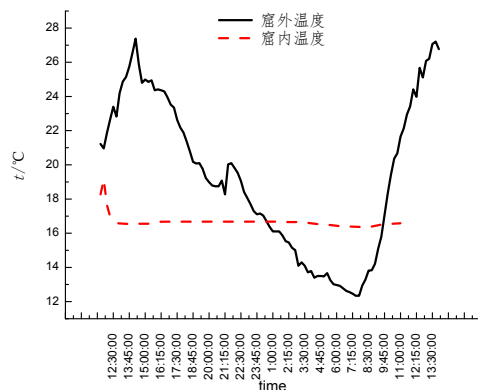


图11 9月23日—9月24日洞窟内外温度变化曲线

Fig.11 The curve of temperature variation inside and outside the cave from Sept. 23 to Sept. 24

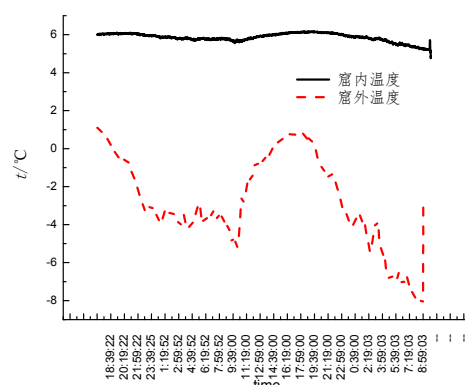


图12 1月24日—1月26日洞窟内外温度变化曲线

Fig.12 The curve of temperature variation inside and outside the cave from Jan. 24 to Jan. 26

## 4 结论

根据对莫高窟洞窟通风的理论模型猜测,经过实验室理想模型试验及现场测试,研究得到以下结论:

(1) 莫高窟洞窟是在鸣沙山东麓掏挖形成,洞窟南、北、西壁均处于山体内,仅东壁与空气接触,东壁开门.洞窟内外空气仅通过门进行交换,洞窟自然通风形式属于单侧开口自然通风模型.影响单侧开口自然通风的因素分别有热压作用和风压作用.

(2) 莫高窟的地形及绿化环境形成了特殊的窟前风环境,窟前风速较小.同时,由于气候条件及洞窟冬暖夏凉的温度特性,莫高窟窟内外温差在全年中变化不大,最大值基本在14℃左右,并且出现大温差的时间段较短.因此,引起洞窟内气体流动的动力是热压作用和风压作用共同产生的,且热压作用和风压作用力均不大,洞窟内通风整体来说较为微弱.

(3) 热压作用及风压作用产生的综合作用中,依据温差及风速的变化,二者的控制力不同.

当吹向窟门的东风小于0.4 m/s时,洞窟内外温差超过5℃,随着温差增大,热压作用的控制力逐渐增强;当吹向窟门的东风大于0.4 m/s,即使洞窟内外温差达到14℃,热压作用的控制力不明显,窟内风速较为不明显.

## 参考文献 References

- [1] 王进玉. 敦煌莫高窟洞窟现状调查与病害分类[J]. 敦煌研究, 2005(6): 113-117.  
WANG Jinyu. Research of current situation and category damage in Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2005(6): 113-117.
- [2] 陈港泉, 苏伯民. 莫高窟第85窟壁画地仗酥碱模拟试验[J]. 敦煌研究, 2005(4): 62-66.  
CHEN Gangquan, SU Bomin. Experimental research on mural disease for Cave 85 in Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2005(4): 62-66.

- [3] 王江丽, 闫增峰. 强降雨天气下的莫高窟洞窟环境调控方案初步研究[J]. 建筑与文化, 2014(3): 58-62.  
WANG Jiangli, YAN Zengfeng. The Environmental Control Equipment System of the Mogao Caves under Heavy rainfall[J]. Architecture & Culture, 2014(3): 58-62.
- [4] 张国彬. 莫高窟洞窟环境数据统计分析在洞窟管理中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.  
ZHANG Guobin. The Research on the environment Data statistics and analysis of Cave's Management Based on Mogao Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [5] HAZIM B Awbi. 建筑通风[M]. 李先庭, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
HAZIM B Awbi. Ventilation of Buildings[M]. LI Xianting, translated. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [6] 李红寿, 汪万福, 张国彬. 地形地貌对莫高窟区域微环境的影响[J]. 敦煌研究, 2008(3): 98-102.  
LI Hongshou, Wang Wanfu, Zhang Guobin. The influence of landform to micro-environment on Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2008(3): 98-102.
- [7] DASCALAKI E, SANTAMOURIS M. Predicting single sided natural ventilation rates in buildings[J]. Solar Energy, 1995, 155(6): 327-341.
- [8] De GIDS W, PHAFF H. Ventilation rates and energy consumption due to open windows: A brief overview of research in the Netherlands[J]. Air Infiltration Review, 1982, 4(1): 4-5.
- [9] GAN Guohui. Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation[J]. Energy and Buildings, 2000(31): 65-73.

(编辑 桂智刚)

(上接第688页)

- [4] MIKI C, HOMMA K, TOMINAGA T. High strength and high performance steels and their use in bridge structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58: 3-20.
- [5] AZIZINAMINI A, BARTH K, DEXTER R, et al. High performance steel: research front—historical account of research activities [J]. Journal of bridge engineering, 2004, 9(3): 212-217.
- [6] 施刚, 石永久, 王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(4): 32-38.  
SHI Gang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Engineering application of ultra-high strength steel structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(4): 32-38.
- [7] 段留省, 苏明周, 焦培培, 等. 高强钢组合Y形偏心支撑钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(12): 89-96.  
DUAN Liusheng, SU Mingzhou, JIAO Peipei, et al. Experimental study on seismic behavior of high strength steel composite K-type eccentrically braced frames [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (7): 89-96.
- [8] FOUTCH D A. Seismic behavior of eccentrically braced steel building [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(8): 1857-1876
- [9] PERERAL R, GOMEZ S, ALARCON E. Experimental and analytical study of masonry infill reinforced concrete frames retrofitted with steel braces [J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(12): 2032-2039.
- [10] MAZZOLANI F M, CORTE G D, ANIELLO M D. Experimental analysis of steel dissipative bracing system for seismic upgrading [J]. Journal of civil engineering and management, 2009, 15(1): 7-19.
- [11] BAHRAMPOOR H, SABOURI-GHOMI S. Effect of easy-going steel concept on the behavior of diagonal eccentrically braced frames [J]. International Journal of Civil Engineering, 2010, 8(3): 242-255.
- [12] 于安林, 赵宝成, 李仁达, 等. K形和Y形偏心支撑钢框架滞回性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 9-12.  
YU Anlin, ZHAO Baocheng, LI Renda, et al. Experimental study on hysteretic behavior of K and Y-eccentrically braced steel frames [J]. Building Structure, 2010, 40(4): 9-12.
- [13] AISC341-10 Seismic provision for structure steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [14] MASTRANDREA L, PILUSO V. Plastic design of eccentrically braced frames, I: Moment shear interaction [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65: 1007-1014.
- [15] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010
- [16] OKAZAKI T, ENGELHARDT M D. Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(6): 751-765.

(编辑 沈波)