

建筑调湿材料吸放湿速度变化规律

黄子硕, 于航, 张美玲

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 实验测得了 4 种建筑材料样品在不同相对湿度条件下的平衡含湿量. 将 4 种样品置于环境参数不同的恒温恒湿环境中进行 12 h 吸湿 12 h 放湿的吸放湿周期试验, 测得了样品在各个环境条件下吸(放)湿过程中每小时的吸(放)湿量. 实验结果表明, 在样品所处环境相对湿度相同时, 各实验样品的量纲为一的吸放湿速度是时间的同一幂函数. 数值拟合得到了环境相对湿度分别为 95% 和 75% 时样品的量纲为一的吸放湿速度的表达式, 给出了样品在恒温恒湿环境(风速在 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下)中材料每小时吸放湿量计算值的相对误差.

关键词: 调湿材料; 含湿量; 吸放湿速度; 幂函数

中图分类号: TU502

文献标志码: A

Humidity-control Materials and Their Humidity Absorption and Desorption Rate Variation

HUANG Zishuo, YU Hang, ZHANG Meiling

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The equilibrium moisture content under different humidity conditions of four test samples was tested. The weight changes of the samples were measured every hour at different temperatures with the relative humidity (RH). Experimental results indicate that in the same air environment the relationship between dimensionless absorption/desorption rate and the time can be fitted by the same power function. Through numerical fitting, the expressions of the dimensionless absorption and desorption rate were obtained with the ambient humidity 75% RH and 95% RH respectively. The relative error between the calculated value and the measured value of moisture absorption/desorption rate at any hour during the 12 hours was also formulated.

Key words: humidity-control materials; moisture content; absorption and desorption rate; power function

对室内相对湿度进行控制不仅可以提高室内环境的舒适性, 还有助于防止因墙体结露导致的围护结构的破坏以及霉菌的滋生^[1-3]. 目前, 调节室内相对湿度主要依靠空调或其他耗能调湿器, 不仅耗能而且不利于温室气体的排放控制. 因此, 依靠调湿材料所具有的吸放湿性能对室内湿度进行控制的被动式调湿方式受到人们的广泛关注. 国内对调湿材料的研究主要集中于调湿材料的研发及其性能测试^[4]. 2005 年, 李国胜^[5]对海泡石自调湿功能材料进行了实验研究, 得出其最大吸湿量和放湿量, 以及前 5 h 吸湿速度和前 30 h 放湿速度, 但未研究环境温度、风速对吸放湿量和吸放湿速度的影响. 2007 年, 王一萍^[6]制备出改性天然沸石的调湿功能材料, 并对其调湿性能进行了测试. 同年, 冯磊^[7]研究了多孔材料 SiO_2 气凝胶的调湿特性. 2008 年, 栾聪梅^[8]制备了石膏基复合调湿材料, 并用静态吸附法分别在模拟环境和自然环境下测试其吸放湿性能.

已有研究一般是通过制取某种调湿材料, 然后在恒定温度(一般为 23°C)不同相对湿度下测试材料的吸放湿量, 以获取某一温度下材料的吸放湿平衡曲线. 这些研究只是给出了调湿材料在相当长时间内的平衡含湿量, 但对于材料的吸放湿速度没有给出明确的说明, 不能满足工程实际应用的需求. 本文在已有研究的基础上, 通过实验得到了调湿材料在恒温恒湿条件下吸放湿速度随时间变化的规律, 并给出了基于该规律得到的调湿材料某一时间段内吸放湿量的计算值与实测值的相对误差, 为实际应用时确定材料的用量提供参考.

1 调湿材料平衡含湿量测定

1.1 调湿材料的制备

本文选用调湿性能较好的材料加工成型, 材料

质量配比及几何外形见表 1. 原料制作成型后干燥 48 h, 然后用电子天平(上海精密科学仪器有限公司 FA2004N, 最大量程 200 g, 精度 0.1 mg)称量得到材料干重. 实验设备及实验过程按照《建筑材料及制

品的湿热性能吸湿性能测定》(GB/T 20312—2006)的规定^[9]. 实验样品几何外形相同, 实验中样品各个表面均暴露在实验环境中.

表 1 实验样品参数

Tab.1 Test sample materials

样品编号	原料配比	质量配比	几何尺寸/(mm×mm×mm)
A	竹炭粉:石膏:硅酸盐水泥	100:50:5	100×100×25
B	竹炭粉:石膏:硅酸盐水泥:植物纤维	100:50:5:3	100×100×25
C	竹炭粉:石膏:硅酸盐水泥	100:100:5	100×100×25
D	稻草:刨花	100:100	100×100×25

1.2 调湿材料的平衡含湿量测定

将烘干后的实验样品置于恒温恒湿箱(DH-HP150A, 温度测定范围为-20~150℃, 相对湿度测定范围为20%~98%, 温度控制精度为±0.5℃, 相对湿度控制精度为±3%, 温度分布均匀性为±2℃, 相对湿度分布均匀性为±5%)中, 保持实验箱内恒温恒湿的环境, 直至实验样品质量不再发生变化(根据 ASTM C 870—96^[10], 24 h 后样品质量增加率不到 0.1% 可认为材料达到平衡含湿量), 得到不同实验条件下样品的平衡含湿量. 某一时刻含湿量及平衡含湿量计算式如下:

$$u_i = \frac{\delta_i - \delta_0}{\delta_0} \quad (1)$$

$$u_\infty = \frac{\delta_\infty - \delta_0}{\delta_0} \quad (2)$$

式(1), (2)中: u_i 为 i 时刻材料的含湿量, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; δ_i 为材料在 i 时刻的质量, g ; δ_0 为材料烘干后的质量; u_∞ 为材料的平衡含湿量, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; δ_∞ 为材料在所处环境中平衡后的质量, g .

实验样品的平衡含湿量见表 2. 可以看出, 实验所用的材料在环境相对湿度较低时其平衡含湿量较小, 在环境相对湿度较高时其平衡含湿量较大, 说明

表 2 实验样品在不同湿度条件下(温度均为 23℃)的平衡含湿量

Tab.2 The equilibrium moisture content under different humidity conditions (average temperature 23℃)

相对湿度/%	平衡含湿量/($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)			
	样品 A	样品 B	样品 C	样品 D
30	0.047 3	0.047 3	0.044 3	0.038 1
40	0.052 4	0.052 7	0.050 7	0.046 4
65	0.070 5	0.071 4	0.071 5	0.075 8
75	0.075 7	0.077 0	0.077 4	0.090 8
85	0.082 1	0.083 7	0.084 8	0.111 9
95	0.116 5	0.120 4	0.131 0	0.203 9

实验样品是具有一定调湿性能的湿容性材料. 其中样品 D 是用稻草和刨花一起压制的有机调湿材料, 在相对湿度 30% 和 95% 环境中, 材料含湿量相差达 $0.165 8 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 调湿性能优于其他无机调湿材料.

2 调湿材料吸放湿速度实验

2.1 量纲一吸放湿速度定义

量纲一吸放湿速度(如无特别说明, 本文中的吸放湿速度均指按照式(3)计算的量纲一的吸放湿速度)定义为样品在第 i 小时内的吸放湿量与 12 h 吸放湿总量的比值, 用 y_i 表示, y_i 定义式如下:

$$y_i = \frac{\text{第 } i \text{ 小时的吸放湿量}}{\text{12 h 内材料总的吸放湿量}} \times 100\% = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{\delta_{12} - \delta_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: i 为时间 ($0 < i$), y_i 为第 i 小时材料的吸放湿速度 ($i=1, 2, 3, \dots, 12$), 其他参数意义同式(2).

2.2 实验过程

实验中一个吸放湿周期包括样品在相对湿度为 95% 条件下吸湿 12 h, 在相对湿度为 75% 条件下放湿 12 h 的过程. 首先将样品在温度 23℃、相对湿度 75% 环境中培养至质量不变(本实验中培养时间为 72 h). 然后将恒温恒湿箱内湿度提高到 95%, 温度保持不变, 使样品开始吸湿过程, 每隔 1 h 称量样品的质量 δ_i ($i=0, 1, \dots, 12$). 吸湿 12 h 后再将恒温恒湿箱相对湿度降低到 75%, 样品开始放湿过程, 共放湿 12 h, 每隔 1 h 称量样品的质量 δ_i ($i=0, 1, \dots, 12$). 实验过程 1 进行了 12 次重复实验, 验证实验样品在多次实验下的稳定性, 实验过程 2~7 分别进行了一个周期的实验. 由于实验样品 A, B 在实验后期有所损坏, 只保留了实验过程 1 中 12 个周期的实验数据, 实验样品 C, D 完成了所有的实验过程.

表 3 实验环境参数(温度 T 、风速 v)及对应实验过程和结果编号表

Tab.3 The number of experiments' procedure and its enviromental parameters(temperature T , velocity v)

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	T		
	13 °C	23 °C	33 °C
0	C2,D2	A1,B1,C1,D1	C7,D7
0.5		C3,D3	
1.0		C4,D4	
1.5		C5,D5	
2.0		C6,D6	

注:字母 A,B,C,D 代表实验样品;数字 1,2,3,...,7 表示实验过程。

2.3 实验结果及数据处理

重复实验得到的 y_i 均比较接近,因此每个实验过程均选取任意一次重复实验的结果进行后续分析。将选出的实验结果的平均值按照式(4)进行曲线拟合,拟合结果如图 1,2 所示。

$$y(x) = ax^b \quad (4)$$

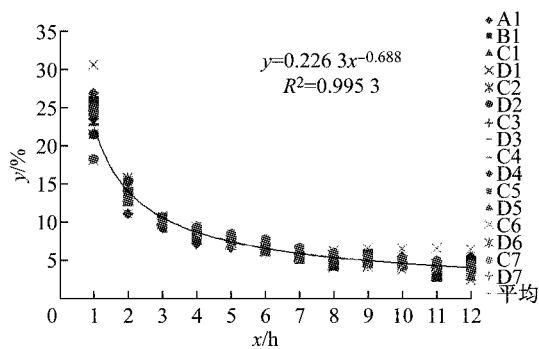


图 1 相对湿度为 95%时吸湿速度拟合曲线及拟合公式
Fig.1 Fitting curve and fitting formulation of dimensionless absorption rate with 95% of RH

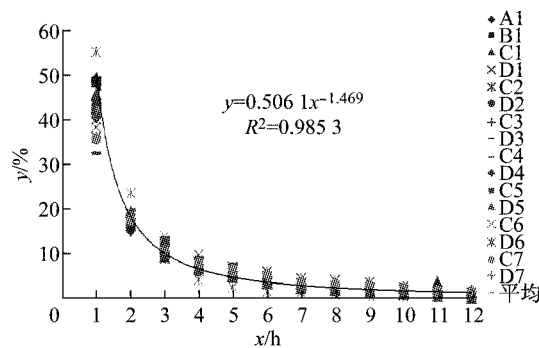


图 2 相对湿度为 75%时放湿速度拟合曲线及拟合公式
Fig.2 Fitting curve and fitting formulation of dimensionless desorption rate with 75% of RH

由图 1、图 2 可以看出,拟合结果具有较高的拟合度($R^2 > 0.98$).实验结果表明,当材料所处环境相

对湿度相同时,在给定的风速和温度范围内,样品吸放湿速度 y 与环境风速、温度无关,材料的吸放湿速度是吸放湿时间的幂函数。

3 实验结果分析

在恒定相对湿度环境中,所用实验样品具有相同的吸放湿速度,即在对应时间点上所有样品的吸放湿速度相同。Martin 和 Veschoor 对 50 种吸湿材料进行的循环吸放湿实验的结果表明,大多数材料的表面和内部的含湿量呈指数衰减特性^[11]。本文的实验样品吸放湿速度随时间的变化符合幂函数分布。文献[11]和本文的研究都证明材料表面和内部的含湿量存在某种衰减关系,据此可以推断同一类多孔材料的表面和内部含湿量衰减特性相同,该结论可以解释本研究中所用的实验样品吸放湿速度随时间变化相同的现象。

根据样品吸放湿速度相同的特点,可以计算某个时间段内材料的吸放湿量。在某一恒温恒湿环境中,通过实验及数值拟合得到该材料在不同湿度条件下参数 a 和 b 的值(该值与环境相对湿度相关),并测得调湿材料在该相对湿度条件下 12 h 内总的含湿量 u_{12} ,即可通过式(5)求得材料在该环境下 t 小时后($1 \text{ h} \leq t \leq 12 \text{ h}$)材料的吸放湿总量 $Y(t)$,及材料吸收(放出)的水分的质量 $\delta_0 \times Y(t)$ 。

材料在相对湿度为 φ 的环境中吸放湿 t 时间后吸放湿总量 Y 为

$$Y(t) = u_{12} \left(a + \int_1^t ax^b dx \right) \quad (5)$$

函数 $Y(t)$ 为关于自变量 t ($1 \text{ h} \leq t \leq 12 \text{ h}$) 的变上限函数。在给定的相对湿度条件下,参数 a, b 只与相对湿度有关, u_{12} 可由将材料置于对应环境中 12 h 后测得。

计算值与实验测量值的相对误差 ϕ 的计算公式如下:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^t y_i - Y(t)}{\sum_{i=1}^t y_i} \times 100\% \quad (6)$$

相对误差计算时 t 只取整数,表 4、5 给出了样品 C、D 吸放湿量计算值与测量值的相对误差。从表 4、5 可以看出,计算值同实验测量值相对误差大部分在 20% 以内。

表4 不同风速下吸湿过程吸湿量计算值与实测值的相对误差 $\psi_{\text{吸}}$ Tab.4 The relativity error $\psi_{\text{吸}}$ between the calculation value and test value during absorption

t/h	$\psi_{\text{吸}}$							
	样品 C				样品 D			
	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	2.36	-7.43	-0.05	-34.88	6.35	9.14	2.69	2.12
2	-10.84	-22.53	-11.76	-47.12	-6.32	-4.83	-13.37	-6.38
3	-12.29	-19.98	-13.64	-42.21	-12.36	-10.31	-14.80	-8.32
4	-10.93	-19.15	-12.75	-37.18	-13.53	-13.27	-14.60	-7.32
5	-10.09	-17.53	-11.05	-33.82	-13.01	-13.79	-14.39	-7.17
6	-9.78	-15.48	-10.87	-30.27	-12.23	-13.06	-13.91	-7.63
7	-10.06	-14.32	-10.95	-26.80	-11.25	-12.17	-13.01	-8.17
8	-10.72	-13.28	-10.06	-23.36	-10.48	-10.82	-11.86	-8.45
9	-10.92	-12.29	-9.80	-19.30	-9.62	-9.92	-10.57	-8.88
10	-9.94	-11.02	-9.43	-15.57	-8.90	-9.55	-9.23	-8.90
11	-9.21	-9.70	-9.11	-11.87	-8.43	-9.15	-7.95	-8.80
12	-8.54	-8.54	-8.54	-8.54	-8.54	-8.54	-8.54	-8.54

表5 不同风速下放湿过程放湿量计算值与实测值的相对误差 $\psi_{\text{放}}$ Tab.5 The relativity error $\psi_{\text{放}}$ between the calculation value and test value during desorption

t/h	$\psi_{\text{放}}$							
	样品 C				样品 D			
	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	-8.76	-34.74	-5.56	-9.37	6.46	-8.49	3.89	20.39
2	-22.67	-42.76	-20.11	-20.89	-6.62	-19.84	-9.75	9.49
3	-22.06	-39.39	-17.32	-16.05	-8.42	-20.22	-10.69	4.31
4	-20.40	-33.21	-18.84	-16.29	-10.13	-20.11	-11.21	-0.64
5	-19.35	-27.68	-18.73	-15.93	-11.57	-18.91	-11.90	-4.48
6	-19.90	-25.56	-17.68	-16.12	-12.96	18.18	-12.98	-7.68
7	-19.70	-23.62	-18.22	-16.66	-14.33	-18.13	-14.18	-10.19
8	-19.26	-21.94	-18.27	-16.58	-15.56	-18.31	-15.34	-12.28
9	-18.77	-20.29	-18.06	-16.56	-16.63	-18.45	-16.48	-14.17
10	-18.74	-19.27	-18.08	-17.09	-17.44	-18.55	-17.63	-15.90
11	-18.59	-18.93	-18.18	-17.79	-18.13	-18.63	-19.14	-17.39
12	-18.85	-18.85	-18.85	-18.85	-18.85	-18.85	-18.85	-18.85

4 结论

本文初步探讨了调湿材料在稳定环境中吸放湿速度的变化规律. 定义了量纲一的吸放湿速度为材料在单位时间内的吸(放)湿量占该材料 12 h 内吸(放)湿总量的百分比. 通过多个实验环境条件、多个实验周期的实验,得到了多组吸放湿速度. 给出了计算值与实测值的相对误差. 基于实验所用的调湿材料样品,得到以下几点结论:

(1)实验测得了 23 ℃ 恒温环境中实验样品在不同相对湿度条件下的平衡含湿量. 测试结果表明,以稻草和刨花为主要原材料的稻草板具有很好的调湿性能(环境相对湿度从 30% 变化到 95% 时含湿量变化 $0.1658 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$),该类材料可以用于特定场所的湿度调节.

(2)实验样品的吸放湿速度是吸放湿时间的幂

函数.

(3)环境温度和风速在较小范围内(温度变化值小于 10 ℃,风速在 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 内)变化时,不同实验样品的量纲一吸放湿速度随时间的变化规律相同. 该结论可用于计算恒温恒湿环境中实验样品在 12 h 内任意时刻样品的吸放湿量.

参考文献:

- [1] 李继领,于航,孟二林,等.被动调湿方式在高湿地区冬季的应用分析[J].建筑热能通风空调,2010,29(5):55.
LI Jiling, YU Hang, MENG Erlin, et al. The analysis of the application of passive humidity control method in high humidity area in winter [J]. Building Energy & Environment, 2010, 29 (5):55.
- [2] Baughman A X, Arens A E. Indoor humidity and human health: part I literature review of health effects of humidity-influenced indoor pollutants [J]. ASHRAE Transactions, 1996, 102(1): 193.

- [3] 贾树队, 唱斗, 王生, 等. 相对湿度对装修后室内空气中甲醛和氨浓度的影响[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(1): 35.
JIA Shudui, CHANG Dou, WANG Sheng, et al. Effect of relative humidity on the concentrations of formaldehyde and ammonia in indoor air after decoration [J]. Journal of Environment and Health, 2005, 22(1): 35.
- [4] 冉茂宇. 日本对调湿材料的研究及应用[J]. 材料导报, 2002, 16(11): 42.
RAN Maoyu. Review of research and application of humidity-control materials in Japan [J]. Materials Reviews, 2002, 16(11): 42.
- [5] 李国胜. 海泡石矿物材料的显微结构与自调湿性能研究[D]. 天津: 河北工业大学材料科学与工程学院, 2005.
LI Guosheng. Microstructure and humidity-control performance of sepiolite mineral material [D]. Tianjin: School of Materials Science and Engineering Hebei University of Technology, 2005.
- [6] 王一萍. 无机调湿材料的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2007.
WANG Yiping. Preparation and performance study of inorganic humidity-control materials [D]. Wuhan: School of Materials Science and Engineering of Wuhan University of Technology, 2007.
- [7] 冯磊. SiO_2 气凝胶调湿材料应用于建筑墙体的调湿特性分析与研究[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2007.
FENG Lei. Humidity-control performance analysis and study of SiO_2 aerogel humidity-control materials used in the building wall [D]. Beijing: The College of Architecture and Civil Engineering of Beijing University of Technology, 2007.
- [8] 栾聪梅. 石膏基自调湿材料的制备与性能[D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2008.
LUAN Congmei. Preparation and performance of gypsum-composites humidity-control materials [D]. Wuhan: School of Materials Science and Engineering of Wuhan University of Technology, 2008.
- [9] 全国绝热材料标准化技术委员会. GB/T 20312—2006 建筑材料及制品的湿热性能吸湿性能测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
National Technical Committee on Thermal Insulation Materials of Standardization Administration of China. GB/T 20312—2006 Hydrothermal performance of building materials and products-determination of hygroscopic sorption properties[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C870-11 Standard practice for conditioning of thermal insulating materials[S/OL]. [2012-12-20]. <http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/C870.1216860-1.pdf>
- [11] 德博尔 J H. 吸附的动力学特征[M]. 柳正辉, 译. 北京: 科学出版社, 1964.
de Boer J H. The dynamical characters of adsorption [M]. Translated by LIU Zhenghui. Beijing: Science Press, 1964.

(上接第 231 页)

围, 其影响较小, 可以忽略. 根据试验和有限元参数分析结果, 考虑环向肋板和主管轴力对节点极限承载力影响, 给出了 K 型管板节点的极限承载力计算公式.

参考文献:

- [1] Saeko S. Experimental study on strength of tubular steel structures[J]. Japanese Society of Steel Construction, 1974, 102(10): 37.
- [2] Ariyoshi M, Makino Y, Choo Y S. Introduction to the database of gusset-plate to CHS tube joints[C] // Proceedings of 8th International Symposium on Tubular Structures, Singapore: [s. n.], 1998, 26(28): 203-211.
- [3] Kim W B. Ultimate strength of tube-gusset plate connections considering eccentricity[J]. Engineering Structures, 2001, 23: 1418.
- [4] 余世策, 孙炳楠, 叶尹, 等. 高耸钢管塔节点极限承载力的试验研究与理论分析[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 155.
YU Shice, SUN Bingnan, YE Yin, et al. Experimental study and theoretical analysis of ultimate strength for steel tubular joint of tall towers[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 155.
- [5] 李正良, 韩枫, 白强, 等. 特高压输电线路钢管塔管-插板节点受弯性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 18.
LI Zhengliang, HAN Feng, BAI Qiang, et al. Bending performance of tube-gusset joint in steel tubular tower for extra-high-voltage transmission line [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 18.
- [6] Packer J A, Henderson J E. Hollow structural section: connections and trusses—a design guide [M]. Ontario: Canadian Institute Of Steel Construction, 1992.
- [7] Architectural Institute of Japan. Recommendations for the design and fabrication of tubular structures in steel[S]. [S. l.]: Architectural Institute of Japan, 1990.
- [8] 程睿, 黄宗明, 王槐福. K 型钢管-板节点受力性能与承载力计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 1.
CHENG Rui, HUANG Zongming, WANG Huaifu. Parametric study and design of the ultimate strength of tube-gusset plate connections [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 1.
- [9] Kostas N, Packer J A. A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59: 453.
- [10] Lu L H, De Winkel G D, Yu Y, et al. Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints[C] // Proceedings of Sixth International Symposium on Tubular Structures. [S. l.]: CRC Press, 1994: 341-347.