

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703077



玻璃棉等温吸湿曲线测试 及其最适拟合分析

张婷婷, 冉茂宇, 任晶, 王波, 徐佳蕙

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为预测玻璃棉在不同湿度下的受潮含湿量,采用干燥器法测试密度为 $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的玻璃棉在常温环境下的等温吸湿曲线.然后,用 OriginPro 软件和多种典型公式对所测实验数据进行拟合.最后,利用其他学者报道的玻璃棉吸湿数据对 Peleg 公式拟合的适宜性进行验证.结果表明:玻璃棉的等温吸湿曲线呈 S 型, Peleg 公式拟合具有最小残差和最大相关系数,且 Peleg 公式为拟合玻璃棉等温吸湿曲线的最适公式.

关键词: 玻璃棉;平衡含湿量;等温吸湿曲线;拟合公式

中图分类号: TU 111.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)02-0205-05

Measurement and Optimal Fitting of Isothermal Moisture Absorption Curve for Fiberglass

ZHANG Tingting, RAN Maoyu, REN Jing,
WANG Bo, XU Jiahui

(College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to predict the moisture content of fiberglass under different air relative humidity, the isothermal moisture absorption curve of fiberglass with $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ density was tested by desiccator method. The test data of moisture content were fitted by OriginPro software and various typical formulas. The rationality of fitting by Peleg formula was verified by the data in references. The test results show that the isothermal moisture absorption curve is S-type. It is found that the fitting by Peleg formula has the minimum error and maximum correlation coefficient. It is also confirmed that Peleg formula is the optimal fitting formula for the isothermal moisture absorption curve of fiberglass.

Keywords: fiberglass; equilibrium moisture content; isothermal moisture absorption curve; fitting formula

玻璃棉具有吸湿性^[1-3],会因吸湿而降低其保温隔热性能^[4-5].对此,国外学者一般用等温吸湿曲线来描述多孔材料的吸湿受潮情况^[6-11].为预测多孔材料吸湿受潮情况,许多学者提出多种预测与拟合公式进行假设^[12-19].事实上,将多孔材料进行密闭封装,既可防潮也可阻断外界液态水对其浸润,这对多孔材料应用在建筑中非常有效.但多孔材料封装后的含湿量变化取决于外界气温变化和初始封装时密闭空间内含湿总量的多少.因此,无论是对敞开空间材料含湿量的预测,还是对密闭封装空间内材料含湿量的预测,寻求多孔材料最适等温吸湿曲线拟合公式十分必要.本文选取密度为 $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的玻璃棉,

收稿日期: 2017-03-29

通信作者: 冉茂宇(1967-),男,教授,博士,主要从事建筑热工与建筑节能、室内外热湿环境、绿色建筑与生态技术的研究. E-mail: 373664489@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678254)

在 23 ℃ 环境温度下进行等温吸湿曲线的测试,寻求玻璃棉最拟合公式.

1 等温吸湿曲线测试

1.1 试样制备及干质量测试

准备密度为 $48\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的玻璃棉,将其切割成 7 个 $35\text{ mm}\times40\text{ mm}\times30\text{ mm}$ (质量为 2 g) 的试样,分别编号为 1#~7#,用于等温吸湿实验. 吸湿实验需先测量试件的干质量. 常规干燥分为吸附干燥和烘干干燥两种^[20]. 烘干干燥是将湿物品置于烘箱中,通过高温低湿空气对流或辐射加热,使水分从物品迁移到空气中,这种方法干燥速度较快且可近似得到绝对干质量,但要求物品性状不能因加热而受到破坏. 考虑到玻璃棉是由许多细小的无机玻璃丝组成,其性状不会因加热而改变,因此,采用烘干干燥方法测定玻璃棉试样的干质量.

首先,用 TP-213 型电子天平(量程为 210 g,精度为 0.001 g)对 7 个玻璃称样瓶称量,并记录数据;然后,用称量瓶盛装 1#~7# 试样,置于 DHG-202 型的烘箱中(温控精度为 1%). 设置烘箱温度为 105 ℃,进行 48 h 连续烘干称量后,每隔 2 h 称量 1 次,当相邻 3 次称量标准差不大于 0.1% 时,认为玻璃棉达到绝对干质量. 目前,关于物品称量方法有直接称量、线性修正称量^[21]、环境调节称量^[22]、密封称量等. 为缩短称量时试样与空气进行热湿交换时间,在进行样品干质量测试及吸湿平衡测试时,均采用国际标准^[23],美国标准^[24] 及国家标准^[25] 推荐的密封称量法,即将烘干试样从烘箱中取出后,迅速转移至称量瓶中进行密封,再一同称量. 每个试样干质量测试完成后,继续密封保存,用于平衡含湿量测试.

1.2 平衡含湿量测试

分别配制 7 种不同的饱和盐溶液,在干燥器内产生和维持不同的空气相对湿度. 将 1#~7# 干质量试样连同称量瓶分别置于干燥器中,让玻璃棉与干燥器内空气直接接触,再将干燥器密封. 采用平衡含湿量测试温度法,将干燥器置于气候舱中,温度设置为 23 ℃. 连续 14 d 后,用上述天平进行 1 次称量,随后每隔 4 h 称量 1 次,当相邻 3 次称量标准差不大于 0.1%,认为玻璃棉试样与干燥器内空气达到湿平衡. 干燥器中放置的试样、饱和盐溶液及在 23 ℃ 下维持的相对湿度值,如表 1 所示. 表 1 中: m_0 为干质量; ϕ 为空气相对湿度; m 为吸湿平衡质量; U 为平衡含湿量.

表 1 玻璃棉试样干质量及其平衡含湿量

Tab. 1 Dry weight of fiberglass sample and its equilibrium moisture content

试样	m_0/g	饱和盐溶液	$\phi/\%$	m/g	$U/\%$
1#	2.094	MgCl_2	22.75 ± 0.30	2.122	1.337 2
2#	1.978	K_2CO_3	32.90 ± 0.17	2.029	2.578 4
3#	2.060	NaBr	43.16 ± 0.36	2.113	2.572 8
4#	1.954	NaCl	58.20 ± 0.42	2.005	2.610 0
5#	2.006	KCl	75.36 ± 0.13	2.067	3.040 9
6#	2.286	K_2SO_4	84.65 ± 0.27	2.371	3.718 3
7#	2.181	$\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	97.42 ± 0.47	2.440	11.875 3

不同相对湿度的测试结果,如图 1 所示. 由图 1 可知: 玻璃棉的等温吸湿曲线呈 S 型. 吸湿速率以相对湿度值划分为 3 个阶段: 1) 相对湿度处于 20%~40% 时,有明显吸湿现象; 2) 相对湿度处于 40.00%~75.36% 时,斜率较小,吸湿速率缓慢; 3) 相对湿度高于 84.65% 时,斜率迅速增大,吸湿性能明显增强,平衡含湿量迅速增加.

2 等温吸湿曲线拟合

2.1 拟合公式的选取

关于多孔材料平衡含湿方程的公式模型有很多种,吸附形态与实际固体属性有直接关系,著名的 BET(Brunauer-Emmett-Teller)模型描述吸附自由能水及

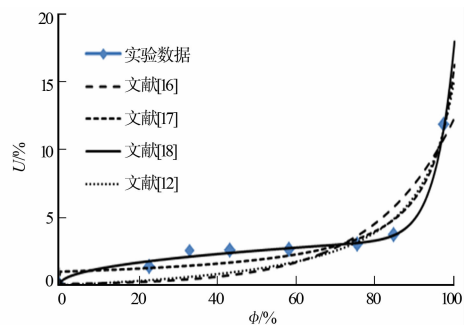


图 1 等温吸湿曲线

Fig. 1 Isothermal hygroscopic curve

同质特性是基本的假设之一,但大部分情况下,多孔材料属于异质多分子层,选取 Henderson^[15],Caurie^[16],GAB^[17],Peleg^[18],陈启高^[12]等 5 个适合多分子层吸附的典型公式模型进行拟合,5 种拟合公式及参数,如表 2 所示.

表 2 拟合公式及参数
Tab.2 Fitting formula and parameters

来源	公式	参数				残差和	相关系数
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		
文献[15]	$U=\{[\ln(1-\Phi)]/a\}^b$	2.986 42	1.009 88	—	—	184.986 70	-1.881 80
文献[16]	$U=\exp(a+b\Phi)$	-2.437 73	4.956 14	—	—	15.475 99	0.758 91
文献[17]	$U=ab\Phi/[(1-a\Phi)(1-a\Phi+ab\Phi)]$	0.938 80	-1.68×10^{-45}	—	—	3.693 11	0.942 47
文献[18]	$U=a\Phi^b+c\Phi^d$	14.135 11	19.058 45	3.337 30	0.420 51	0.608 42	0.984 20
文献[12]	$U=a\Phi/(1-b\Phi)$	1.320 85	0.913 54	—	—	9.573 99	0.850 85

2.2 误差比较

选用 Origin 软件对实验数据进行回归.为便于直观分析,各公式拟合的最大残差及相关系数,如图 2 所示.图 2 中:由于 Henderson 公式^[15]拟合度极低,无法得出合理结果,因此,仅显示剩下 4 组公式模型对应的拟合结果.由图 2 可知:Peleg 公式拟合的残差和最小,而相关系数最大.

3 Peleg 公式拟合最适性验证

在大量玻璃棉等温吸湿曲线测试的文献中,除 Gnip 等^[19]研究的玻璃棉渗入粘结剂,其他大部分研究者都采用常规态玻璃棉测试.因此,选取常规状态下较为典型的测试结果拟合验证 Peleg 公式的最适性.其测试数据如表 3 所示.表 3 中: ρ 为玻璃棉密度.

用 Origin 软件拟合法对不同公式不同实验数据进行拟合并对比,结果如表 4 所示.由表 4 可知:GAB 公式在部分情况下拟合精度较高;Henderson 公式模型精度较差;Peleg 公式具有较好的拟合精度,适宜拟合玻璃棉平衡含湿量.

表 3 测试数据
Tab.3 Test data

数据来源	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	参数	测试结果/%									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
文献[7]	—	Φ	8.89	15.35	31.00	35.73	55.00	63.60	75.66	83.94	94.96	
		U	0.35	0.42	0.65	0.72	0.97	1.21	1.74	4.61	5.99	
文献[8]	—	Φ	22.80	32.90	43.20	58.20	75.40	84.70	97.40	—	—	
	24	U	0.58	0.62	0.66	0.67	1.09	1.15	2.01	—	—	
	40	U	0.59	0.63	0.65	0.66	1.06	1.26	3.36	—	—	
文献[9]	80	Φ	20.05	43.12	48.08	57.17	65.14	81.13	—	—	—	
		U	2.42	4.29	4.89	5.00	5.01	7.18	—	—	—	
文献[10]	122	Φ	11.30	32.90	43.20	58.00	78.70	84.50	93.80	97.40	—	
		U	0.63	3.06	4.31	5.74	9.15	11.30	16.40	24.60	—	
文献[11]	160	Φ	25.00	45.00	60.00	75.00	90.00	—	—	—	—	
		U	6.66	7.77	9.13	11.97	17.88	—	—	—	—	
文献[10]	215	Φ	12.70	33.92	56.11	75.31	98.00	—	—	—	—	
		U	5.37	8.31	10.94	14.18	28.87	—	—	—	—	

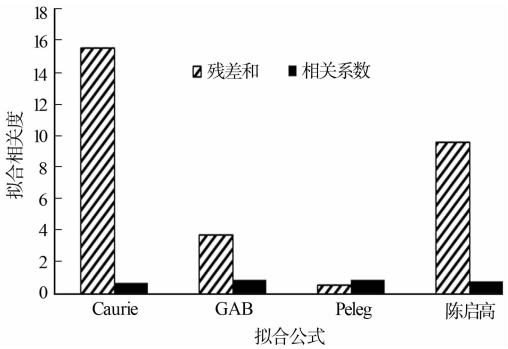


图 2 不同公式拟合的残差和与相关系数
Fig.2 Residuals and correlation coefficients for different fitting formulas

表 4 不同公式拟合不同测试数据得到的残差和相关系数
Tab. 4 Residuals and correlation coefficients for different fitting formulas and different test data

数据 来源	Henderson 公式		Caurie 公式		GAB 公式		Peleg 公式		陈启高公式	
	残差和	相关系数	残差和	相关系数	残差和	相关系数	残差和	相关系数	残差和	相关系数
文献[7]	63.804	-1.212	1.854	0.935	2.288	0.920	1.488	0.927	2.170	0.924
文献[8]	8.161	-5.158	0.181	0.863	1.420	-0.071	0.028	0.964	0.307	0.768
文献[8]	15.600	-2.125	0.904	0.818	0.725	0.854	0.031	0.989	0.595	0.880
文献[9]	149.693	-14.999	0.918	0.901	24.120	-1.578	0.851	0.817	0.977	0.895
文献[10]	1 146.816	-2.039	25.011	0.933	80.661	0.786	0.761	0.997	13.934	0.963
文献[11]	651.074	-9.780	4.311	0.928	156.766	-1.595	2.54×10^{-5}	1.000	12.168	0.798
文献[10]	1 252.074	-3.962	11.988	0.952	245.999	0.025	0.024	0.999	29.055	0.884

4 结 论

1) 密度为 $48\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的玻璃棉在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的等温吸湿曲线呈 S 型. 在相对湿度处于 $20\%\sim40\%$ 时, 有明显吸湿现象; 在相对湿度处于 $40.00\%\sim75.36\%$ 时, 吸湿速率缓慢; 在相对湿度高于 84.65% 时, 吸湿性能明显增强.

2) 玻璃棉的等温吸湿曲线用 Peleg 公式拟合误差最小, 其次是 Caurie 公式, 再次是陈启高公式, Henderson 公式基本无法拟合. 用 Peleg 公式对封装的玻璃棉平衡含湿量进行计算, 具有较好的精度.

参考文献:

[1] KUMARAN M. Moisture transport through glass-fibre insulation in the presence of a thermal gradient[J]. Journal of Building Physics,1987,10(4):243-255. DOI:10.1177/109719638701000405.

[2] KUMARAN M K. Comparison of simultaneous heat and moisture transport through glass-fibre and spray-cellulose insulations[J]. Journal of Building Physics,1988,12(1):6-16. DOI:10.1177/109719638801200103.

[3] HOKOI S,KUMARAN M K. Experimental and analytical investigations of simultaneous heat and moisture transport through glass fiber insulation[J]. Journal of Building Physics, 1993, 16 (3): 188 - 192. DOI: 10.1177/109719639301600307.

[4] TAO Y X,BESANT R W,REZKALLAH K S. Unsteady heat and mass transfer with phase changes in an insulation slab: Frosting effects[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1991,34(7):1593-1603. DOI:10.1016/0017-9310(91)90139-6.

[5] TAO Y X,BESANT R W,REZKALLAH K S. The transient thermal response of a glass-fiber insulation slab with hygroscopic effects[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1992,35(5):1155-1167. DOI:10.1016/0017-9310(92)90176-s.

[6] SIMONSON C J,TAO Y X,BESANT R W. Thermal performance and hysteresis in fibrous insulation exposed to moisture and step changes in the cold temperature boundary condition[J]. Energy and Buildings,1994,21(3):251-257. DOI:10.1016/0378-7788(94)90041-8.

[7] 傅正惠. 玻璃棉吸湿性能的研究[J]. 土木建筑与环境工程,1991(2):85-89.

[8] 翁文兵,程斌,黄介平,等. 离心保温棉吸湿特性及湿传递性能实验研究[J]. 建筑科学,2015,31(12):54-57. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2015.12.09.

[9] KUMARAN M,MITALAS G P. Analysis of simultaneous heat and moisture transport through glass fibre insulation [J]. Heat Transfer in Buildings and Structures,1987,78:1-6.

[10] BURCH D M,DESJARLAIS A O. Water-vapor measurements of low-slope roofing materials[J]. NISTIR 7040, 2010,122:58-75. DOI:10.6028/nist.ir.5681.

[11] LALATOS Á. Moisture induced changes in the building physics parameters of insulation materials[J]. Science and Technology for the Built Environment,2016,22(3):232-260. DOI:10.1080/23744731.2016.1131567.

[12] 陈启高. 多孔围护结构中湿度计算理论[J]. 土木建筑与环境工程,1984(3):4-21. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.1984.03.001.

[13] 冉茂宇. 封闭空间调湿材料新的调湿特性指标及其理论基础[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2003,24(1):64-69.

- DOI:10.3969/j.issn.1000-5013.2003.01.012.
- [14] ANDERSON R B, Hall W K. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller equation[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1948, 70(5):1727-1734. DOI:10.1021/ja01185a017.
- [15] HENDERSON S M. Equilibrium moisture content of hops[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1973, 18(1):55-58. DOI:10.1016/0021-8634(73)90032-2.
- [16] CAURIE M. A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 1970, 5(3):301-307. DOI:10.1111/j.1365-2621.1970.tb01571.x.
- [17] ARSLAN N, TOG'RUL H. The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2006, 42(2):112-135. DOI:10.1016/j.jspr.2005.01.001.
- [18] PELEG M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1993, 16:21-37. DOI:10.1111/j.1745-4530.1993.tb00160.x.
- [19] GNIP I Y, VEYALIS S A, KERSHULIS V I. Isotherms of water vapor sorption by light inorganic and polymer heat-insulating materials[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2006, 79(1):40-47. DOI:10.1007/s10891-006-0064-7.
- [20] YAN Zhengyong, MARIAJ S G, FERNANDAAR O. Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86(3):342-348. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2007.10.009.
- [21] RICHARDS R F, BURCH D M, THOMAS W C. Water vapor sorption measurements of common building materials[J]. *Ashrae Transactions*, 2014, 98(2):475-485. DOI:10.1520/stp22955s.
- [22] RODE C, HANSEN K K. Hysteresis and temperature dependency of moisture sorption-new measurements[J]. 2011(2):647-654.
- [23] ISO Central Secretariat. Hygrothermal performance of building materials and products-determination of hygroscopic sorption properties: ISO 12571—2000[S]. Geneva:ISO copyright office, 2010.
- [24] ASTM Committee. Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials: C1498-04a[S]. Pennsylvania:ASTM International, 2014.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑材料及制品的湿热性能吸湿性能的测定: GB/T 20312—2006 [S]. 北京:中国标准出版社, 2006.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)