

建筑墙体霉菌生长特性模拟分析

李念平, 李炳华, 胡锦涛

湖南大学土木工程学院, 长沙 410082

摘要 为了分析墙体霉菌生长的条件,以长沙地区实测气候数据为边界条件,应用 WUFI-BIO 软件模拟房间室内和室外墙面霉菌孢子萌发的特性。结果表明,霉菌孢子的初始含水量对孢子自身萌发的影响小于环境相对湿度。不考虑太阳辐射和雨水侵蚀等不利因素,室外墙体表面除了冬季期间不容易发霉,其他季节都可能促使孢子萌发及菌丝体的生长。室内墙体表面发霉主要集中在 5 月中旬至 6 月中旬以及 8 月至 9 月中旬这两个时段。在这些霉菌可能生长的时间段,需采取有效措施降低霉菌生长的概率。

关键词 生物热湿模型; 临界含水量; 霉菌生长预测

中图分类号 X506

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)15-0041-04

Simulation of Mold Growth on Building Walls

LI Nianping, LI Binghua, HU Jinhua

College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract In order to analyze the conditions of mold growth on the wall, the climate data of Changsha are used as the boundary condition to simulate the mold spore germination on room's indoor and outdoor walls with WUFI-BIO software. The results show that the actual water content of fungal spores is related to its initial water content, the environmental temperature and the relative humidity. The initial water content of fungal spores has a less impact on spore germination than the relative humidity, whose influence would gradually decrease over time. Without consideration of solar radiation and rainwater erosion, or other unfavorable factors, except in winter, when it is not easy for mold to grow on outdoor walls, in other seasons, spore germination and mycelium growth would be promoted. Moldy indoor walls are mainly found in mid-May to mid-June and August to mid-September. The organic pollutants on indoor wall surface may help the mold spores germinate ahead of time, even enhance their growth. And the entire wall is at an increasing risk of mildew. The growth of mold is harmful to human health. In order to reduce the growth rate of mold during their growth period, it is necessary to take some measures to minimize the indoor relative humidity, and keep the indoor environment in a good condition.

Keywords biohygrothermal model; critical moisture content; mold growth predictive

0 引言

建筑墙体长霉一直是令人苦恼的问题。建筑外墙面由于长霉导致饰面层褪色甚至脱落^[1],不仅影响了建筑的美观,还破坏墙体的结构,降低墙体的使用寿命。室内墙体发霉更是给人带来极大的危害,长期接触和吸入霉菌可能引发呼吸道感染,产生流行性感冒、鼻黏膜炎、过敏反应、结核等症状^[2]。同时霉菌代谢产物包含微生物有机挥发物^[3-4](MVOC),也可能引起病态建筑综合症。

霉菌的生命周期一般分为芽孢的产生、萌芽期、菌丝长成期和繁殖期 4 个阶段^[5]。其中,孢子的萌芽期是霉菌生长的关键时期,也是控制霉菌生长的最佳时期。霉菌的孢子会通过气流、人和动物活动等传播到室内、室外各处,并慢慢沉积在建筑墙体表面或建材表面,此时孢子处于休眠状态。一旦这些孢子吸收足够的水分和营养物质后,便开始萌发。如果在此期间抑制孢子的萌发,就需要控制孢子所处环境的相对湿度及营养物质的供给。由于孢子所需的营养物质量少,且

收稿日期: 2010-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878078);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ02A10)

作者简介: 李念平(中国科协所属全国学会个人会员登记号:E121950002S),教授,研究方向为建筑节能与室内空气品质,电子信箱:linianping@126.com

其来源可能是建材本身或是其所含的污染物,也可能来源于空气中的粉尘及油脂性物质等,因此不太容易控制。相比较而言,环境中的相对湿度比较容易测定和控制。国际能源署推荐将 80% 平均相对湿度定为霉菌生长的临界值^[5]。事实上,影响霉菌生长的因素众多,在不同条件下霉菌生长的临界相对湿度都会改变。

1 霉菌生长的主要因素分析

影响霉菌生长的主要因素包括温度、相对湿度(水分活性)、营养物质、暴露时间,而 pH 值、氧气、光线、表面粗糙度、生物体相互作用等的影响相对较小^[6]。大部分霉菌能够在 pH 值 3~9 范围内生长,部分霉菌甚至能够在 pH 值 2~11 范围生长^[7]。尽管多种建材(如混凝土)的 pH>12,但是依然能够在上面发现霉菌的存在,其主要原因是这些霉菌能够释放有机酸^[8]改变环境 pH 值来适合自身生长,也就是说,pH 值对霉菌生长不起决定性作用。霉菌生长所需氧气量最低值为 0.14%~0.25%^[9],大部分建材表面含氧量都超过这个值。在光滑表面霉菌也能够生长,只是粗糙的表面更容易沉积养料和水分。生物体的相互作用只会引发建材表面不同种类霉菌此消彼长,不影响对整体霉菌的生长。

国内外学者针对影响霉菌生长的 4 个主要因素做了许多研究,并提出一些霉菌生长预测模型。苏向辉等^[9]对建筑墙体内部湿气迁移过程进行研究,通过热流和水蒸气迁移过程的分析,确定水蒸气迁移的方式和迁移量,寻找控制湿度的方法,并分析了霉菌污染产生的原因。Adan 等^[10]在室内稳态和瞬态条件下研究了黄青霉在石膏板材料上的生长过程。应用 TOW(Time of Wetness)全面评测有效水分在瞬态环境下对霉菌生长过程的影响。结果表明, $TOW \leq 0.5$ 时,霉菌在石膏板上生长受相对湿度影响的时间较短; $TOW > 0.5$ 时,霉菌将加速生长。Clarke 等^[11]通过对 6 种普通霉菌实验分析,得到了一定温度下建筑材料中霉菌生长所需的最小相对湿度,最终绘制出这些霉菌在稳态条件下生长温度和相对湿度的组合曲线。Viitanen 等^[12]以木材为研究对象,得出了霉菌在木材中繁殖的临界条件、恒温恒湿条件下霉菌生长所需暴露时间以及霉菌生长速度等数学模型。该模型可用于预测瞬态霉菌生长的情况。Moon 等^[13]提出一种在影响霉菌生长的各种因素不确定条件下,霉菌生长概率的概率性指数,并基于此提出对现有建筑物霉菌生长的风险控制策略。

2 霉菌生长的预测模型

根据影响霉菌生长的主要因素有温度、相对湿度和营养物质,Sedlbauer 等^[6]提出生物热湿模型及等值线模型,并开发出 WUFI-BIO 软件预测墙体表面霉菌的生长。软件计算模型将霉菌生长的基质划分为 4 类: class0、class1、class2、class3。同时一些霉菌可能对人体健康产生不利影响,为了评估这类霉菌生长的风险,模型还引入了 classK(针对关键霉菌,包括

烟曲霉、黄曲霉,纸葡萄穗霉等)。

2.1 瞬态生物热湿模型

瞬态生物热湿模型(图 1)建立在霉菌孢子内部具有一定的渗透势能,并能够从环境中吸收水分的基础上。在数学方法上用水分储存函数表示渗透势能。孢子吸收水分是以扩散方式通过孢子壁进入孢子内部。孢子壁的扩散阻力(S_d 值)随着孢子内部含水量的变化而变化,它能够延迟孢子内与外界环境水分的交换。

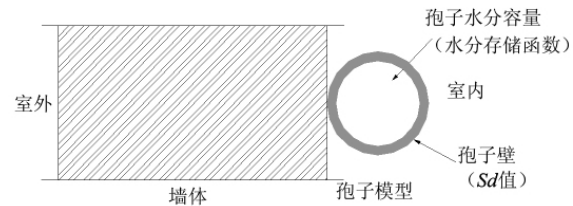


图 1 孢子在墙面上的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a spore on the wall surface

2.2 等值线模型

将霉菌孢子置于完全培养基培养,在不同温、湿度环境下可获得其萌芽所需的时间,再将一系列相等的时间点连成等值曲线。用同样的方法可以获得不同霉菌孢子萌发时间的等值曲线图。一旦霉菌孢子开始萌发,取决于温度和相对湿度的霉菌生长率也可以绘制出相似的等值线系统。这些将被应用于生物热湿模型中计算。

WUFI-BIO 在生物热湿模型和等值线模型的基础上,通过孢子的水分储存函数和 S_d 值计算孢子内的实际水分含量。根据等值线模型计算不同温度和相对湿度环境下孢子萌发的临界含水量。计算程序的原理是基于在瞬态气候环境下通过对比孢子内含水量与当前临界含水量的关系确定。当孢子内含水量超过临界含水量时,孢子开始萌发。在不同基质类别的墙体材料中,只需测出墙体表面温、湿度数据,即可计算出霉菌孢子的萌发时间。对于已经发霉的墙体,通过模拟计算推测出霉菌生长的时间段;对于可能发霉的墙体则可以预测其霉变的具体时间,并采取相应的措施抑制霉变。

3 实测数据模拟分析

本文以长沙地区一实验楼为例,对该实验楼某一房间的室内墙体表面及外墙室外侧霉菌生长特性进行模拟分析。实验楼外墙为普通砖墙,厚度为 260mm,其外侧为水泥砂浆抹面。内墙厚度为 200mm,均为石灰抹面。房间外墙上有一窗户,窗户上方设有遮阳挡雨板篷,且实验楼靠近外墙边有一棵大树,使房间所在外墙面基本可避免阳光的直射和雨水的正面侵袭,也给外墙面霉菌的生长创造了有利的环境。为了获得室内和室外墙面温、湿度数据,笔者将德图温湿度记录仪的探头贴近墙体表面,每隔 30min 记录一次温、湿度数据,测试时间从 2009 年 2 月 1 日至 2010 年 2 月 1 日,连续 12 个月(图 2 和图 3)。开始测量时,墙体表面并没有发现霉菌。经

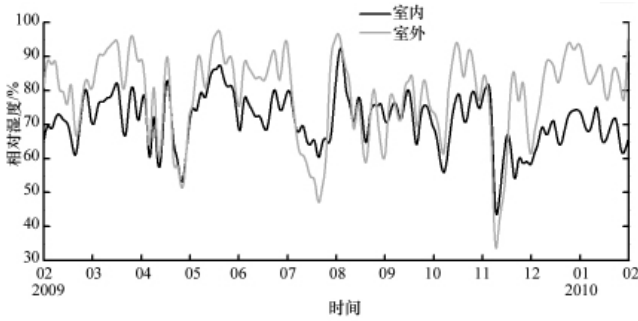


图2 2009—2010年室内、外墙面相对湿度
Fig. 2 Relative humidity on the indoor and outdoor wall surface between 2009 and 2010

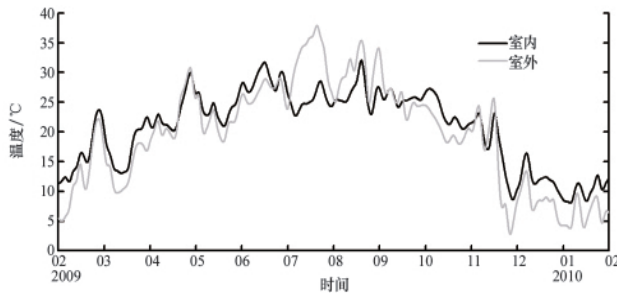


图3 2009—2010年室内、外墙面温度
Fig. 3 Temperature on the indoor and outdoor wall surface between 2009 and 2010

过一年后,墙面上出现发黑、发绿等霉菌生长迹象。本文利用测得的室内外墙体表面的温、湿度数据,通过软件模拟分析墙体表面发霉的温、湿度环境及其持续的时间范围。计算结果如图4~图6所示。

由于室内侧墙面是石灰抹面,按照建材提供的霉菌生长的营养物水平,属于 class2^[6]。假设墙面上霉菌孢子的初始含水量 RH 为 $0.4\sim 0.8$ ^[13],分别计算出这5种情况下孢子实际含水量随环境温、湿度变化的过程。同样的温、湿度条件下,改变孢子初始含水量,计算出孢子萌发的临界含水量不变。从图5可以看到,2009年2月,初始含水量不同的霉菌孢子经过计算得出孢子实际含水量有一定的差别,经过一个月后差别逐渐减小,到4月以后初始含水量不同的孢子其实际含

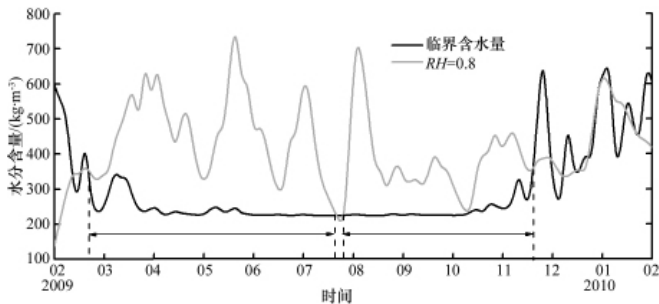


图4 2009—2010年室外墙面孢子含水量与临界含水量
Fig. 4 Water content and the critical water content of spores on the outdoor wall surface between 2009 and 2010

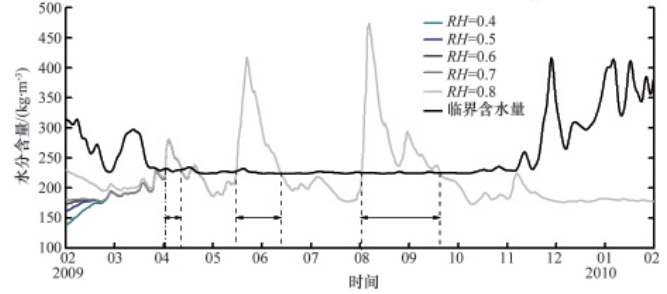


图5 2009—2010年室内墙面孢子含水量与临界含水量
Fig. 5 Water content and the critical water content of spores on the indoor wall surface between 2009 and 2010

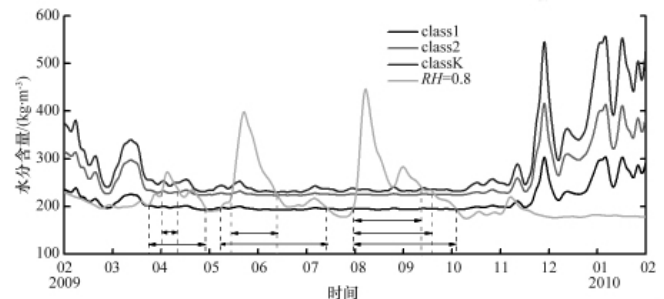


图6 2009—2010年室内墙面孢子含水量与不同基质下临界含水量
Fig. 6 Water content and the critical water content of spores on the indoor wall surface with different substrates between 2009 and 2010

水量基本相同。同样的情况也发生在室外墙体表面的计算结果上。如图2所示,2009年2月,室外墙面平均相对湿度在80%以上,霉菌孢子吸收环境中的水分很快达到相同水平,计算得到的孢子实际含水量曲线几乎重合。图4中只绘出孢子初始含水量 $RH=0.4$ 时其实际含水量曲线。从上述分析可以看出,孢子的初始含水量对孢子萌发的影响随着时间推移逐渐减小。另外从图4和图5可以看出,由于室内环境比室外环境稳定,模拟计算得出的室外墙面孢子实际含水量波动程度比室内墙面要大。

2009年2月底至11月中旬,除了7月的一小段时间外,室外墙体表面霉菌孢子的实际含水量都大于临界含水量。在这段时间内墙体表面霉菌孢子都有可能萌发。由于计算模型忽略了太阳辐射及雨水侵蚀等不利于孢子萌发的因素,实际上孢子萌发的时间范围比模拟计算得出的要缩小很多。2010年1月上旬和2009年2月中旬也存在孢子实际含水量大于临界含水量,但其持续时间较短,一般不会导致霉菌孢子的萌发。相比之下,室内墙体表面霉菌孢子实际含水量大于临界含水量的持续时间要短些(图5),主要在5月中旬至6月中旬以及8月至9月中旬,这两段时间是霉菌孢子萌发的风险期,而4月上旬的一段时间持续较短,孢子萌发可能性也较小。

室内环境是人们活动的主要场所,室内墙体表面可能会生长出一些对人体健康不利的霉菌,如烟曲霉、黄曲霉、纸葡

霉菌等^[6]。为预测有害霉菌在室内萌发的几率,模型引入基质类别 classK 计算这些有害霉菌孢子萌发的临界含水量。同时由于人的活动,墙面上也可能产生 class1 类的基质(如有机污染物等),因此也需要计算出在 class1 下孢子的临界含水量。假定孢子的初始含水量为 $RH=0.8$,在室内相同的温、湿度条件下,计算得到孢子的实际含水量不变。将在 class1、class2、classK 下计算出的孢子临界含水量以及 $RH=0.8$ 时孢子内的实际含水量一同绘制在图 6 上,可以看到,在 class1、class2、classK 下孢子实际含水量大于临界含水量的时间逐渐减小。如果墙体表面含有 class1 类基质,孢子萌发的时间就提前和延长,范围扩大,室内墙体发霉的风险增加。由于对人体不利的霉菌生长条件苛刻,因此在 classK 基质类别中孢子萌发的临界含水量比 class1、class2 高,其霉菌孢子萌发的时间可能略微缩小,主要在 5 月中旬至 6 月中旬以及 8 月至 9 月上旬。

4 结论

1) 霉菌孢子的实际含水量与孢子初始含水量、环境温度及相对湿度等有关。霉菌孢子的初始含水量对孢子自身萌发的影响小于环境相对湿度,并且随着时间的推移,其影响逐渐减小。

2) 不考虑太阳辐射及雨水侵蚀等不利孢子萌发的因素,室外墙面除了冬季期间不容易发霉,其他季节都可能促使孢子萌发及菌丝体的生长。室内墙面发霉主要集中在 5 月中旬到 6 月中旬以及 8 月至 9 月中旬这两个时段。

3) 如果室内墙体表面含有有机污染物,可能导致墙体霉菌孢子提前萌发,整个墙体发霉风险增大。对人体有害霉菌的生长,主要在 5 月中旬至 6 月中旬以及 8 月至 9 月上旬两个时段。在这些霉菌可能生长的时间段,要加强室内湿度控制,尽量减小室内相对湿度,同时保持室内的卫生良好,降低霉菌生长的概率。

参考文献 (References)

[1] Johansson S, Wadsö L, Sandin K. Estimation of mould growth levels on

rendered facades based on surface relative humidity and surface temperature measurements [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(5): 1153-1160.

- [2] Lotz W A, Arens E A. Indoor humidity and human health: Part1 - literature review of health effects of humidity -influenced indoor pollutants[J]. *ASHRAE Transactions*, 1996, 102(1): 193-211.
- [3] Miller J D. Fungi as contaminants in indoor air[J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26A(12): 2163-2172.
- [4] Bayer C W, Crow S A. Detection and characterization of microbially produced volatile organic compounds [C]//Indoor Air 93: Proceedings of the 6th International Conference on Air Quality and Climate. Helsinki, Finland, 1993: 297-302.
- [5] Moon H J. Assessing mold risks in buildings under uncertainty[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [6] Klaus S. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components [D]. Holzkirchen: Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001.
- [7] Deacon J W. Modern mycology [M]. Oxford: Blackwell Science-Verlag, 1997.
- [8] Fries N. Effects of volatile organic compounds on the growth and development of fungi [J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1973, 60(1): 1-21.
- [9] 苏向辉, 昂海松. 室内霉菌污染原因及其控制对策 [J]. 环境污染与防治, 2003, 25(3): 150-153.
Su Xianghui, Ang Haisong. *Environmental Pollution & Control*, 2003, 25(3): 150-153.
- [10] Adan O C G. On the fungal defacement of interior finishes[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1994.
- [11] Clarke J A, Johnstone C M, Kelly N J, et al. A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings[J]. *Building and Environment*, 1999, 34(4): 515-521.
- [12] Hukka A, Viitanen H A. A mathematical model of mould growth on wooden material[J]. *Wood Science and Technology*, 1999, 33(6): 457-485.
- [13] Moon H J, Augenbroe G. Evaluation of hygrothermal models for mold growth avoidance prediction[C]. Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, The Netherlands, 2003: 895-902.

(责任编辑 吴晓丽)

· 学术动态 ·

“第四届国际光电子探测与成像技术 学术交流大会”征文



中国宇航学会将于 2011 年 5 月 1 日在北京召开“第四届国际光电子探测与成像技术学术交流大会”。

征文内容包括:传感器与微机械光器件技术;激光探测和成像技术;红外成像技术及应用;成像探测器技术与应用;太赫兹技术与应用;空间探测技术与应用;生物激光及其医学应用。

摘要截止时间:2010 年 10 月 31 日。

联系电话:022-23669275,022-23613813;电子信箱:conf@cnoenet.com。

会议网址:http://www.ispdiconf.org。