

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201706044

不同湿度环境对岩石风化产生的影响*

杨继清^{1,2}, 张修硕^{1**}, 李靖², 陈积普¹, 丁红春³,
陆金才³, 申林方¹, 王建国², 王洪波⁴

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南农业大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650201;
3. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650041; 4. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:【目的】在地质灾害高发的温湿、湿热地区, 大部分的山体滑坡常与岩石的风化作用存在一定的关系, 为研究在不同湿度条件对岩石风化作用产生的影响, 本研究以水汽分子在玄武岩内部的扩散为研究对象。

【方法】在常温条件下, 假定岩石内部水汽分子贮存浓度达到岩石风化所需的水汽分子贮存浓度值的条件下岩石开始风化, 对不同湿度环境下岩石风化进程中水汽分子在岩石内部的扩散进行数值模拟。【结果】模拟结果表明: 相对湿度越高, 岩石的风化速率越快; 理想的岩石风化过程中, 风化速率遵循先减小后增大的规律; 低湿度条件下, 风化速率的变化主要受空气中实际水汽压的控制, 高湿度条件下主要受浓度梯度控制。

【结论】研究成果对于岩石崩塌、山体滑坡等地质灾害和工程问题具有一定的实际意义。

关键词: 湿度变化; 岩石风化; 相对湿度; 水汽分子; 数值模拟; 扩散

中图分类号: P 512.11 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X (2018) 01-0147-07

Influence of Different Humidity Environments on the Rock Weathering

YANG Jiqing^{1,2}, ZHANG Xiushuo¹, LI Jing², CHEN Jipu¹, DING Hongchun³,
LU Jincan³, SHEN Linfang¹, WANG Jianguo², WANG Hongbo⁴

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. College of Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
3. Sinohydro Bureau 14 Co., LTD., Kunming 650041, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: [Purpose] In humid and hot regions of geologic disaster frequently happens, most of the landslides and other geological disasters are often associated with rocks weathering. In order to study the effects of different humidity conditions on rock weathering, the diffusion of water gas molecules in basalt was studied in this paper. [Method] Under the condition of normal temperature, it is assumed that only until the concentration of water molecules in the rock reaches the value of water molecular storage for rock weathering, can the rocks begin to weather. Numerical simulation analysis was carried out of the diffusion of water vapor molecules in the rock during the process of rock weathering in different humidity environments. [Result] The numerical simulation results showed

收稿日期: 2017-06-22 修回日期: 2017-07-20 网络出版时间: 2018-01-20

*基金项目: 国家自然科学基金项目(U1502232, 51508253); 中国水利水电第十四工程局有限公司科研项目(201411)。

作者简介: 杨继清(1978—), 男, 云南大理人, 博士研究生, 主要从事岩土工程与工程地质方面的研究。

E-mail: yjq.98@163.com

**通信作者 Corresponding author: 张修硕(1991—), 男, 吉林白山人, 硕士, 主要从事工程地质与岩土工程研究。

E-mail: zxxss2008@163.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201706044](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201706044)

that the higher the relative humidity was, the faster the weathering rate of the rock was. In the course of ideal weathering process, the weathering rate decreased firstly and then increased later. Under the low humidity conditions, the weathering rate was mainly controlled by the actual water pressure. And under the condition of high humidity conditions, it was mainly controlled by the concentration gradient. [Conclusion] The research results have certain practical significance for geological disasters such as rock collapse and landslide and engineering problems.

Keywords: humidity change; rock weathering; relative humidity; water vapor; numerical simulation; diffusion

岩石一旦出露地表, 其矿物组成中的各种化学元素将与大气圈、生物圈接触, 为了适应地表环境体系, 岩石内部结构必然会发生变化, 谓之风化。这种变化不仅时间跨度大, 而且反应十分缓慢, 导致在时间和空间维度上, 岩石的风化水平不同。随着时间的增长, 岩石结构体风化程度逐渐加深, 逐渐分解为大小不等的岩屑或次生矿物^[1]。风化作用对于岩石圈内的物质循环意义重大, 同时也是地貌重塑的重要过程。大部分滑坡灾害中, 都存在岩石风化的痕迹。为了研究岩石风化过程中的物质转移及质量运移规律, 众多国内外学者展开了大量的室内实验及现场研究, 室内实验主要是人工配置高浓度溶液溶解造岩矿物, 测定造岩矿物的溶解速率及元素释放速率等方面; 现场实验主要是对岩石的风化现象进行分析和素描。风化产生劣化作用削弱了岩石的力学性质, 如岩石孔隙率增大、结构面弱化充填, 孔隙连通性提高等一系列现象已经得到国内外学者的广泛认同^[2-9]。

新鲜致密的母岩经过风化作用形成结构松散的腐岩, 新鲜岩石的风化始于岩石内部风化环的产生, 所以风化环的启动机理引起了部分学者的关注^[10-12]。BUSENBERG 等^[13]研究了花岗岩风化带中长石的风化速率, 认为化学风化的开始与大气水的湿化前锋 (wetting front) 到达的深度有关。TWIDALE 等^[14]对澳大利亚花岗岩进行研究, 结果表明: 花岗岩中的云母和长石一旦与湿气接触会自行发生反应。下覆层覆盖的区域风化速度比近地面区域更快, 这是因为前者存在持续的湿气, 后者临近地表, 湿气不易保存。部分学者已经意识到环境湿度对岩石风化的影响, 并开始运用湿化来描述液态水和气态水对岩石风化作用产生的影响, 但仅考虑水在岩石中扩散的研究还相

对较少。FRIEDMAN 等^[15]对黑曜石的水化率进行了研究, 实验结果表明: 在温度为 6 ℃ 的条件下, 水在黑曜石中的有效扩散系数处于 $1.1 \times 10^{-19} \sim 4.4 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{s}$ 之间。王承遇等^[16]研究了水对硅酸盐玻璃风化速率的影响, 结果表明: 风化初期水中的 $\text{H}^+(\text{H}_3\text{O}^+)$ 向玻璃内扩散, 形成附在表面的水化层, 同时玻璃中的 Na^+ 向水中扩散。 $\text{H}^+(\text{H}_3\text{O}^+)$ 的扩散系数 ($7.16 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$) 决定了二者相互扩散的过程。为了区分液态水和气态水迁移特性的不同, 研究人员对孔隙介质的传导性进行了研究。CARMELIET 等^[17]对多孔介质中水汽的渗透进行了研究, 结果表明: 低湿度下液态水在孔隙内壁形成吸附层, 气态水在介质内部进行扩散迁移。

有关湿度环境对扩散机制影响的研究多集中在岩石物理力学性质的变化、混凝土内部湿度扩散、空气流动及污染物扩散等方面^[18-22]。但在外界湿度环境变化对岩石风化产生的影响方面的研究则相对较少。

本研究主要研究不同湿度环境对岩石风化产生的影响, 在常温 20 ℃ 条件下, 假定岩体内部水汽分子贮存浓度达到风化岩石的水汽分子贮存浓度值的情况下, 岩石开始风化, 模拟不同湿度环境下岩石的风化过程。

1 材料与方法

1.1 模型的建立及材料参数

模型为 1 个 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 1$ (1 表示单位厚度) 的正方体, 模型四周的相对湿度设置为 $0.5 + 0.05n$ ($0 \leq n \leq 10$, n 取整数), 表示模型周围相对湿度的取值区间为 50%~100%。岩石内部的初始温度设置为 273.15 K, 外部温度为 293.15 K, 岩石内部的初始浓度为 0 mol/m^3 。选取材料为玄武岩, 材料参数见表 1。

表 1 材料模型参数
Tab. 1 Parameters of material model

材料名称 material name	孔隙率/% porosity	密度/(kg·m ⁻³) density	压强/Pa pressure	扩散系数/(m·s) diffusion coefficient
玄武岩 basalt	0.24	2.943 4×10 ³	101 325	8.6×10 ⁻¹⁵

1.2 空气湿度

空气的干湿程度称为湿度, 是一种表征大气中水蒸气含量的物理参数。具体表现为在一定的温度和体积下空气中的水汽蒸含量越多, 空气越潮湿, 反之, 则空气越干燥。湿度存在多种表征形式, 人们常用相对湿度、绝对湿度 (水汽压)、露点温度来衡量湿度的大小。

相对湿度 (空气中水汽的含量) 是指在一定的温度下, 空气中的实际水汽压和饱和水汽压的百分比。也可以表示为在相同温度下, 湿空气的绝对湿度与最大绝对湿度的百分比, 可由式 (1) 表示:

$$RH = p_1 / p_2 \times 100\% \tag{1}$$

式中, RH 为相对湿度, %; p_1 为空气中的实际水汽压, Pa; p_2 为相同温度下的饱和水汽压, 单位为 Pa。

1.3 基本假定

1.3.1 风化环境及其过程的基本假设

- (1) 反应年限内环境的相对湿度保持不变。
- (2) 水汽在浓度梯度及标准大气压的作用下侵入岩石内部, 期间只发生物理运动, 不考虑化学和生物变化。
- (3) 仅考虑 H₂O 的单一组分扩散。
- (4) 岩石为各向同性的均匀多孔介质, 水汽充满单位体积的孔隙后, 继续向其他孔隙侵入。
- (5) 不考虑化学风化造成的孔隙堵塞。

1.3.2 浓度及扩散系数假定

假定岩石结构体内部的孔隙是均匀的, 且可以被充满, 充满后水汽分子在浓度梯度的作用下继续向岩石内部扩散, 孔隙内部水汽浓度超过饱和水汽浓度时, 气态水开始转化为液态水。饱和水汽密度为 18.98 g/m³ 将其转化成浓度单位为 1.054 mol/cm³, 假定岩石内部孔隙中的水汽浓度超过该值时, 岩石开始风化。AUGUSTITHIS 等^[23]研究了哥斯达黎加太平洋海岸附近玄武岩的风化速率, 得到其扩散系数为 8.6×10⁻¹⁵ m/s, 同时假定该地区空气的相对湿度为 70%, 并将上述

两个参数作为初始条件带入模型。对于低渗透岩石, 水以气态形式进入岩石内部, 但由于岩石的低渗透特性, 水汽很难逆向迁出, 所以不考虑水汽的挥发。

1.4 接口设定

在二维空间维度中选择多孔介质稀物质传递及多孔介质传热两个物理场。多孔介质稀物质传递可以用来计算多孔介质中物质的浓度及传递规律。多孔介质传热接口可以用来模拟热传导、对流和辐射等情况, 同时考虑固体基质和流体的属性。这两个物理场接口同时使用瞬态分析, 这样可以获得水汽分子在岩石内部扩散随时间变化的规律。

1.5 边界条件及有限元模型

边界条件设定: 四周均为入口边界。为保证模型计算结果的准确性, 采用特别细化网格, 得到有限元模型 (图 1), 模型由 6 282 个域单元和 200 个边界单元组成, 求解的自由度数为 6 484 (加 408 个内部自由度)。

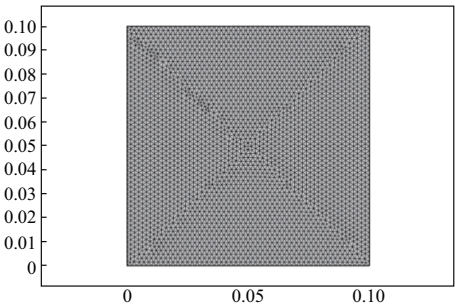


图 1 有限元模型
Fig. 1 Finite element model

2 结果与分析

2.1 完全风化时间

岩石结构体四周空气的相对湿度控制为 50%~100%, 温度为 20 °C(293.15 K), 水汽分子在大气压力和浓度梯度的作用下侵入岩石, 得到不同相对湿度环境下岩石完全风化的时间关系 (图 2)。

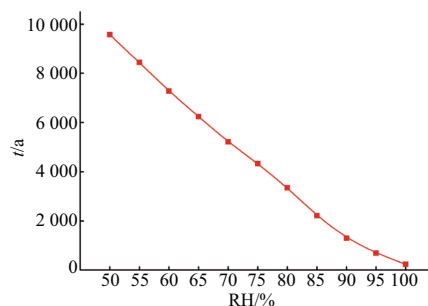


图 2 完全风化时间—相对湿度关系图

Fig. 2 Relation pattern of complete weathering time(t) and relative humidity(RH)

从图 2 可见：相对湿度越大，岩石的风化时间越短，处于相对湿度 50%~100% 环境下的尺寸为 0.1 m×0.1 m×1 的玄武岩完全风化的时间依次为 9 575、8 431、7 272、6 232、5 213、4 329、3 352、2 215、1 289、683、229 年。相对湿度 70% 条件下，时间分别为 1、1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、5 213 年时，玄武岩的风化情况见图 3。

可以看出：时间为 1 年时，水汽仅是附着于岩石表面，随着时间的增加，水汽逐渐深入，风化向岩石内部扩展，时间到 5 213 年时，玄武岩石已经完全风化。

2.2 风化速率

对相对湿度在 70% 条件下玄武岩在各时间点的风化情况研究发现 (图 3)：风化速率在每个时间段是不同的，具体见表 2。岩石风化过程中，其速率遵循一个先逐渐减小而后迅速增大的规律，这可能是因为风化初期和中期岩石内部贮存水汽浓度逐渐升高，风化后期岩石内部贮存的水汽浓度较高，其移动速率迅速增加所致，形成“先慢速后快”风化模式 (其他湿度环境下规律一致，见图 4)。半径与总时间的比值为风化速率与相对湿度之间的关系，如图 5 所示。

将玄武岩的风化速率—相对湿度关系与水在混凝土中扩散数值模拟进行对比发现 (图 6)：低湿度范围 (相对湿度 50%~80%) 内混凝土的扩散系数基本不变，但在玄武岩的风化速率—相对湿度关系中存在缓慢增长的现象，这主要是由于水在混凝土内部的扩散是由内至外的过程，仅受浓度梯度的影响。水汽在玄武岩石中的扩散是由外至内的过程，需要考虑水汽压对其产生的影响。二者在高湿度范围内 (相对湿度 80%~100%)

的变化规律较为接近，主要由浓度梯度控制。受孔隙率、内部结构及材料组成等因素的影响，二者扩散系数的量级相差较大。可以认为在低湿度条件下，风化速率产生的变化主要受空气中实际水汽压的控制；高湿度条件下，风化速率主要受浓度梯度控制。

3 讨论

在时间方面，随着相对湿度的增加，完全风化所需要的时间越来越少，从相对湿度 50% 时的 9 575 年到 100% 时的 229 年。风化速率方面，相对湿度对岩石风化产生的影响主要为风化速率的变化。在相对湿度稳定的条件下，处于相对湿度 50%~100% 的岩石的风化速率依次为 5.222、5.930、6.876、8.023、9.591、11.55、14.917、22.573、38.790、73.206、218.341 $\mu\text{m/a}$ 。

对于高湿度空气侵入结构体的机理是大气压力驱动还是湿空气的浓度梯度驱动的问题，可以认为初期的外部水汽侵入是在大气压力和浓度梯度作用下完成的。水汽分子在低渗透岩石结构体内部的扩展应该是由后者造成的。在不同相对湿度条件的作用下，水汽分子在岩石内部的扩展规律是可循的，即减小后增大。由图 5 可以看出：风化速率在初期先缓慢减小，后期会出现扩展速率激增的现象。这是因为风化前期水汽浓度需要贮存，风化速率减小；风化后期，核心石周围的水汽浓度积累较高，浓度差变大，风化速率加快。在天然环境下，这种情况比较容易出现在饱和带与非饱和带交界处的小块岩石上，因为岩石风化后存在腐岩壳，小块岩石外包裹的腐岩壳厚度较小，比较容易达到岩石风化所需的浓度要求，而大块的岩石因为外表面积及内径较大等原因，外表风化后，随着风化深度增加，水汽向内部的补给愈加困难，补给过程中不仅存在挥发作用，同时还存在吸附以及向周围环境扩散的流失现象，岩石风化需要的时间将倍于计算所得时间，只有常年保持在稳定湿度环境下的非饱和带小块岩石可以较好地符合计算所得规律。大块岩石比小块岩石达到浓度要求所需的条件更高，所以在相同的条件下较小尺度的岩石比较容易完全风化。

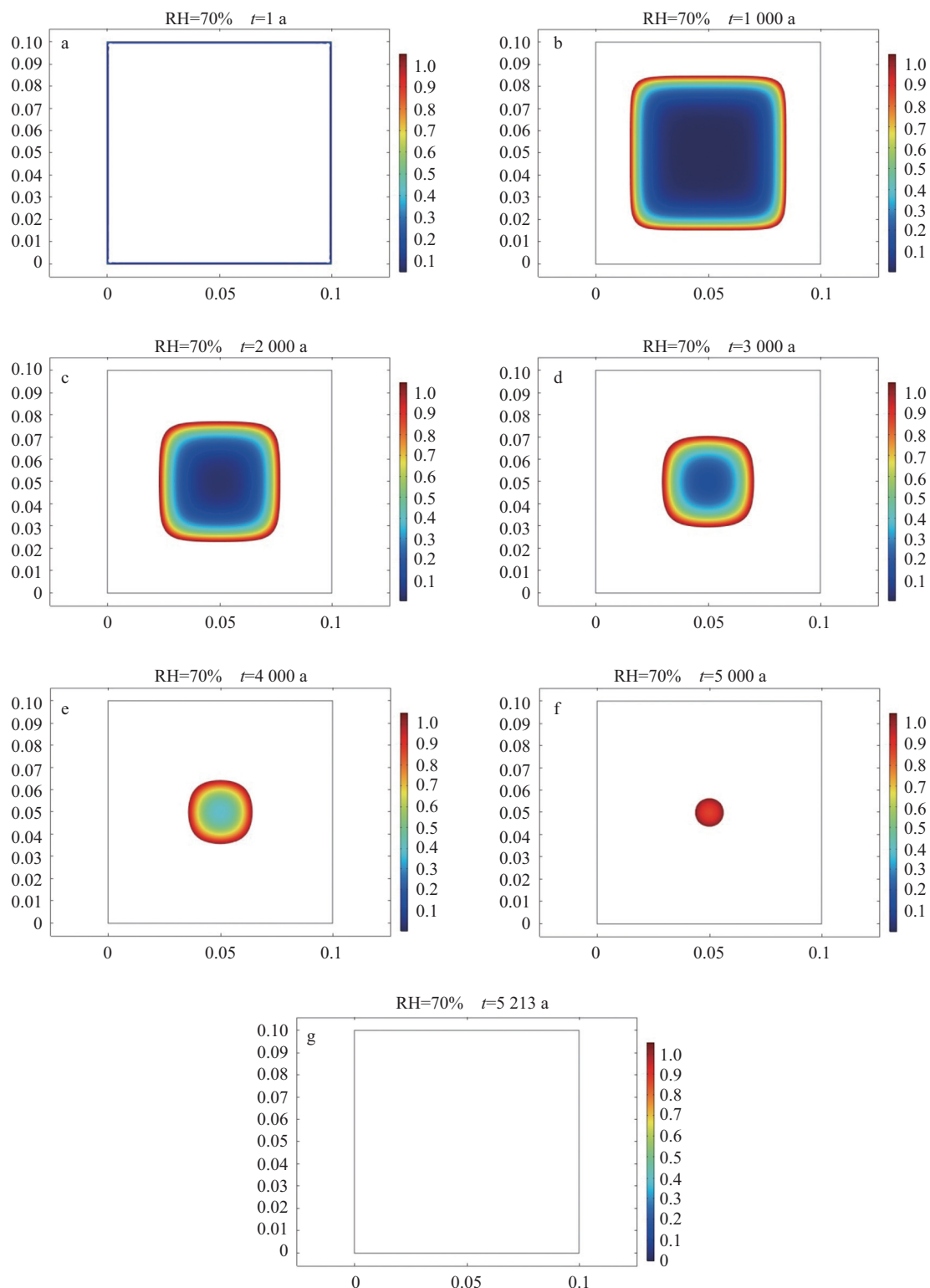


图 3 相对湿度 70% 条件下玄武岩在各时间点的风化情况

Fig. 3 Weathering condition of basalt at different time points under 70% relative humidity

4 结论

本研究主要研究环境湿度变化对岩石风化产

生的影响, 应用 COMSOL 软件对玄武岩进行风化过程模拟。结果表明: 外界环境的相对湿度会对岩石的完全风化时间和风化速率产生较大影

表 2 不同时间段岩石的风化速率

Tab. 2 The weathering rate of rock in different time periods

时间/a time	位置/m position	位移/m displacement	速率/ $(\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1})$ rate
0~1 000	0.015 2	0.015 2	15.2
1 000~2 000	0.023 0	0.007 8	7.8
2 000~3 000	0.029 5	0.006 5	6.5
3 000~4 000	0.035 7	0.006 2	6.2
4 000~5 000	0.043 7	0.008 0	8.0
5 000~5 213	0.050 0	0.006 3	29.6

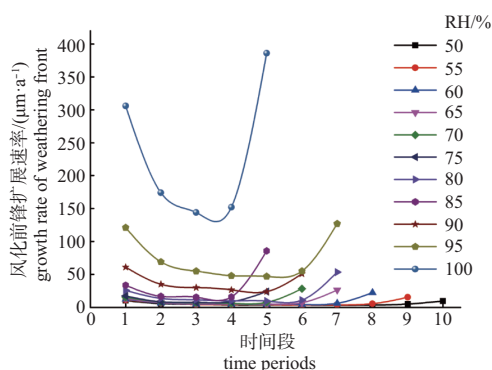


图 4 湿度—时间风化速率图

Fig. 4 Weathering rate in different humidity and different time periods

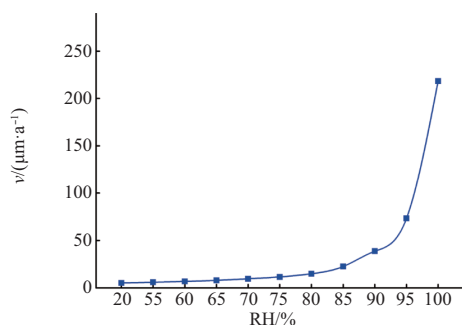


图 5 玄武岩风化速率 (v) —相对湿度 (RH) 关系图

Fig. 5 Relation pattern between basalt weathering rate (v) and relative humidity (RH)

响, 主要结论有:

(1) 外界环境中相对湿度越高, 岩石的完全风化时间越短, 风化速率越快; 理想的岩石风化过程中, 风化速率遵循先减小后增大的规律。

(2) 低湿度条件下, 风化速率的变化主要受空气中实际水汽压的控制; 高湿度条件下主要受浓度梯度控制。

受干湿季节性变化的影响, 实际情况往往不能保证相对湿度的稳定, 同时受补给挥发、吸附和流失等作用的影响, 致使研究存在一定的局限

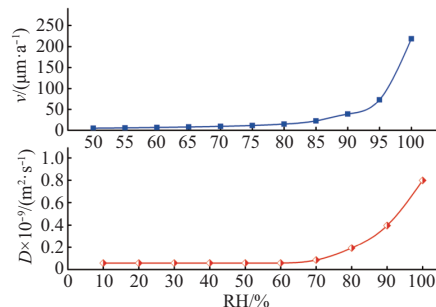
图 6 玄武岩风化速率 (v) —相对湿度 (RH) 与混凝土水分扩散系数 (D) —内部相对湿度关系对比图^[24]

Fig. 6 Comparison between basalt weathering rate (v)-relative humidity (RH) and concrete moisture diffusion coefficient (D)-internal relative humidity

性, 但对研究不同湿度环境对岩石风化产生的影响仍不失其意义。研究成果对于岩石崩塌、山体滑坡等地质灾害和工程问题具有一定的实际意义。

[参考文献]

- [1] 孙家齐. 工程地质[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000.
- [2] 刘作程. 岩石学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [3] MOON V, JAYAWARDANE J. Geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand[J]. Engineering Geology, 2004, 74(1): 57. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.02.002.
- [4] 尚彦军, 吴宏伟, 曲永新. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比——以香港九龙地区为例[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 279. DOI: 10.3321/j.issn:0563-5020.2001.03.003.
- [5] 巫锡勇, 罗健, 魏有仪. 岩石风化与岩石化学成分的变化研究[J]. 地质与勘探, 2004, 40(4): 85. DOI: 10.3969/j.issn.0495-5331.2004.04.019.
- [6] 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 硅酸盐矿物溶解动力学及其对滑坡研究的意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1479. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.09.004.
- [7] 江世贵. 结晶学及矿物学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [8] 汤连生, 王思敬. 水—岩化学作用对岩体变形破坏力学效应研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 433. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.1999.05.002.
- [9] 袁和忠, 王运生, 房冬恒, 等. 西南某水电站深风化现象及其机理浅析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 103. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2006.01.034.
- [10] 徐则民, 唐正光. 石灰岩腐岩的基本特征及其形成机制[J]. 地质论评, 2012, 53(3): 421. DOI: 10.3321/j.issn:0371-5736.2007.03.017.
- [11] MATSUKURA Y, HASHIZUME K, OGUCHI C T. Effect of microstructure and weathering on the strength anisotropy of porous rhyolite[J]. Engineering Geology,

- 2002, 63(1): 39. DOI: [10.1016/S0013-7952\(01\)00067-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00067-9).
- [12] YANG J Q, XU Z M, ZHANG R, et al. Formation and evolution of Emeishan basalt saprolite in vadose zones of Touzhai landslide source rockmass[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(6): 1174. DOI: [10.1007/s11629-016-4169-y](https://doi.org/10.1007/s11629-016-4169-y).
- [13] BUSENBERG E, CLEMENCY C V. The dissolution kinetics of feldspars at 25 °C and 1 atm CO₂ partial pressure[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40(1): 41. DOI: [10.1016/0016-7037\(76\)90192-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90192-7).
- [14] TWIDALE C R, BOURNE J A. International science “down under”: the British association meeting in Australia, August 1914, with special reference to related activities in Adelaide[J]. *Earth Sciences History: Journal of the History of the Earth Sciences Society*, 2002, 21(21): 166.
- [15] FRIEDMAN I, LONG W. Hydration rate of obsidian[J]. *Science*, 1976, 191(4225): 347. DOI: [10.1126/science.191.4225.347](https://doi.org/10.1126/science.191.4225.347).
- [16] 王承, 陶瑛. 硅酸盐玻璃的风化[J]. *硅酸盐学报*, 2003, 31(1): 78. DOI: [10.3321/j.issn:0454-5648.2003.01.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0454-5648.2003.01.017).
- [17] CARMELIET J, DESCAMPS F, HOUVENAGHEL G. A multiscale network model for simulating moisture transfer properties of porous media[J]. *Transport in Porous Media*, 1999, 35(1): 67. DOI: [10.1023/A:1006500716417](https://doi.org/10.1023/A:1006500716417).
- [18] 梅宁, 尹凤, 陆虹涛. 湿度变化对气体污染物扩散影响的研究[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2006, 36(6): 987. DOI: [10.3969/j.issn.1672-5174.2006.06.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5174.2006.06.027).
- [19] 张君, 侯东伟. 基于内部湿度试验的早龄期混凝土水分扩散系数求解[J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2008(12): 2033.
- [20] 唐春安, 唐世斌. 岩体中的湿度扩散与流变效应分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(3): 292. DOI: [10.3969/j.issn.1673-3363.2010.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3363.2010.03.002).
- [21] 唐世斌, 唐春安, 林皋, 等. 水泥基复合材料湿度扩散特性细观数值模拟研究[J]. *大连理工大学学报*, 2011(6): 868.
- [22] 杨佳玲. 湿度梯度作用下天然气泄漏扩散浓度场研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [23] AUGUSTITHIS S S, VGENOPOULOS A. On the hawleyite-sphalerite-wurtzite-galena paragenesis from Ragada, Komotini, (Rhodope) North Greece[M]// AMS-TUTZ G C, FRENZEL G, KLUTH C, et al. *Ore genesis: special publication of the society for geology applied to mineral deposits*, Vol 2. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1982.
- [24] OZAKA Y, FUJIWARA T, AKITA H. A practical procedure for the analysis of moisture transfer within concrete due to drying[J]. *Magazine of Concrete Research*, 1997, 49(179): 129. DOI: [10.1680/mac.1997.49.179.129](https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.179.129).