

膨胀土微波干燥曲线特性研究

刘龙武, 谢尧, 宁泽宇, 龚德峰, 周斌

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:本研究利用进气值与残余含水量之间的内在关系,依据土壤热力学和微波干燥的均匀脱湿特性,推导膨胀土的微波干燥动力学模型,揭示该过程中膨胀土含水量与微波干燥时间的对数关系,并对高岭土与钙基蒙脱石的混合料进行试验研究。试验结果表明:微波干燥动力学模型能较好地呈现膨胀土的微波干燥过程,且膨胀土的微波干燥曲线特征参数与其比表面积之间存在内在关系。

关键词:膨胀土;脱湿曲线;比表面积;微波干燥

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Study on characteristics of microwave drying curve of expansive soil

LIU Longwu, XIE Yao, NING Zeyu, GONG Defeng, ZHOU Bin

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In this study, the relationship of the soil water characteristic curve between the air intake value and the residual water content is analyzed and used, the microwave drying kinetic model of expansive soil was established, based on soil thermodynamics and uniform dehumidification characteristics in the process of microwave drying. The logarithmic relationship between water content of expansive soil and microwave drying time was revealed. And the experimental study on the mixture of kaolin and calcium montmorillonite was carried out. The results showed that the microwave drying process of expansive soil can be described by the microwave drying kinetic model. And the obvious regularity can be presented by the characteristic parameters of microwave drying curve and specific surface area of expansive soil.

Key words: expansive soil; dehumidification curve; specific surface area; microwave drying

膨胀土具有吸水膨胀、失水收缩等不良工程特性^[1-2],其胀缩变形与土体脱湿和吸湿等有直接关系^[3-5],不同的水分迁移路径会引发膨胀土不同的变形行为。而土水特征曲线可表征非饱和土基质吸力与饱和度(体积含水量)之间的曲线关系,反映非饱和土的持水性能^[6-8],对实际工程具有指导意义。

微波干燥是通过分子振动并相互摩擦使物料升温。与常规加热方法相比,微波干燥具有反应灵敏、加热速度快、加热均匀、可选择性加热及易于控制等优点^[9-10]。因此,微波干燥在化工、医疗、环保、食品等行业的应用研究广泛,但应用于黏土的研究

较少见。因此,本研究拟采用微波干燥法,实现膨胀土的快速脱湿,探究膨胀土脱湿过程中含水量随微波时长的变化规律和膨胀土的微波干燥曲线特性,以期为类似膨胀土工程提供参考。

1 微波干燥动力学模型

干燥动力学模型^[11]研究物料的含水量与时间的变化关系,用数学模型反映物料质量变化和热量传递效率。现有微波干燥模型的应用主要集中于农业与食品行业,其物料厚度大多为毫米级,且假

收稿日期:2021-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51778067)

作者简介:刘龙武(1961—),男,长沙理工大学教授,博士。

定物料内部无温度梯度存在。在实际工程中,膨胀土的物料厚度不符合现有微波干燥模型的假定条件。在环保领域有针对污泥的微波干燥动力学模型^[12],该模型是基于初始温度、加热环境均匀及无能量损耗等假定条件建立的,虽能较好地反映污泥的干燥过程,但也只适用于污泥干燥的饱和阶段。因此,现有的微波干燥模型均不适用于膨胀土。

为探索膨胀土微波干燥的动力学特性,本研究依据土壤热力学、能量平衡方程、质量守恒定律及非饱和土力学理论建立膨胀土微波干燥的数值模型,并对膨胀土的实际干燥过程进行预测和修正。

本研究以李志刚^[12]提出的污泥干燥模型为基础,考虑非饱和土的土体系统中的自由能变化,干燥模型式(1)可改写为式(2):

$$Pt = \Delta m C_w (T_1 - T_0) + \Delta m \gamma + (m - \Delta m) C (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$Pt = \Delta m C_w (T_1 - T_0) + \Delta m \gamma + (m - \Delta m) C (T_2 - T_1) + \Delta W_f \quad (2)$$

式中: P 为微波炉功率; t 为微波炉干燥时间; m 为物料质量; Δm 为 t 时间内物料质量的变化量,即水分蒸发量; C_w 为水的比热容, T_1 为水在常压下的饱和温度,试验中取为 $100\text{ }^\circ\text{C}$; T_0 为初始温度; γ 为水在常温下的汽化热; C 为剩余物料的比热容; T_2 为微波加热过程中某测量点的温度; ΔW_f 为物料自由能的变化量。

土力学中含水量的定义为:

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \quad (3)$$

式中: ω 为土的含水量; m_w 为土中水的质量; m_s 为土粒质量;

根据含水量的定义与加热前后土体含水量大小的关系,物料质量可表示为:

$$m = m_s + m_s \omega \Delta m = m_s (\omega - \omega_0) \quad (4)$$

式中: ω_0 为试样的初始含水量; ω 为试样在干燥时段内 t 时刻的含水量。

将式(4)代入式(2),可得:

$$Pt = m_s (\omega_0 - \omega) [C_w (T_1 - T_0) + \gamma] + m_s (1 + \omega) C (T_2 - T_0) + \Delta W_f \quad (5)$$

在饱和土阶段,土中水的自由能未发生变化, $\Delta W_f = 0$,则式(5)为:

$$Pt = m_s (\omega_0 - \omega) [C_w (T_1 - T_0) + \gamma] + m_s (1 + \omega) C (T_2 - T_0) \quad (6)$$

土中含水量与微波加热时间呈线性关系。

当试样进入非饱和土阶段,土中水自由能发生变化,可通过土的吸力变化对土中水的结合能进行表征。包承纲^[13]提出进气值和残余含水量两点之间的土水特征曲线近乎为一条直线,可通过对数方程对其进行表征:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = F(\psi) = \frac{\ln \psi_r - \ln \psi}{\ln \psi_r - \ln \psi_b} \quad (7)$$

式中: ψ_b 为土的进气值; θ 为体积含水量; ψ 为基质吸力; θ_s 为饱和体积含水量; θ_r 为残余含水量; ψ_r 为残余含水量所对应的吸力值。

对式(7)进行变形,得到:

$$\psi = \psi_r e^\lambda \quad (8)$$

式中: $\lambda = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (\ln \psi_b - \ln \psi_r)$ 。

体积含水量与含水量的关系为:

$$\theta = \frac{G_s \omega}{1 + e} \quad (9)$$

式中: G_s 为土粒比重; e 为孔隙比。

则 λ 可变化为:

$$\lambda = \frac{\frac{G_s \omega}{1 + e} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (\ln \psi_b - \ln \psi_r) \quad (10)$$

因此,非饱和土阶段的能量守恒公式为:

$$Pt = m_s (\omega_0 - \omega) [C_w (T_1 - T_0) + \gamma] + m_s (1 + \omega) C (T_2 - T_0) + \psi_r (e^\lambda - e^{\lambda_0}) \quad (11)$$

式中: $\lambda_0 = \frac{G_s \omega_0}{1 + e} - \theta_r$; ω_0 为初始含水量。

假定初始阶段土样吸力近似于0,忽略自由水的蒸发和土样温度变化所吸收的能量,则式(11)为:

$$\omega = \frac{(1 + e)(\theta_s - \theta_r)}{G_s (\ln \psi_b - \ln \psi_r)} \ln \left(\frac{P}{\psi_r} t \right) + \theta_r \frac{1 + e}{G_s} \quad (12)$$

干燥曲线的表达式可简化为:

$$\omega = A \ln(x) + B \quad (13)$$

式中: $A = \frac{(1 + e)(\theta_s - \theta_r)}{G_s (\ln \psi_b - \ln \psi_r)}$; $B = \theta_r \frac{1 + e}{G_s}$ 。

由式(13)可知,在非饱和土阶段,土中含水量与微波加热时间之间呈对数关系。其中,系数 A 与孔隙比、土粒比重、进气值以及残余含水量等土力学参数有关。常数项 B 值则由孔隙比、土粒比重以

及残余含水量这三项参数决定。因此,在土样孔隙比保持不变的情况下,通过测量微波干燥曲线的 B 值,可换算得到土样的残余含水量。

虽可通过测量进气值与残余含水量等求出模型的参数,但不同土样的进气值与残余含水量均不相同,二者的变化规律也存在差异。因此,需对模型做进一步的简化。研究表明:膨胀土的土水特征曲线的进气值^[14]与残余含水量^[15]均与土的比表面积(蒙脱石质量分数)呈正比,进气值与残余含水量皆为蒙脱石质量分数(比表面积)的一次函数,则有:

$$A = \frac{(1 + e)[\theta_s - (k_1 y + b_1)]}{G_s[\ln(k_2 y + b_2) - \ln \psi_r]} \quad (14)$$

$$B = (k_1 y + b_1) \frac{1 + e}{G_s} \quad (15)$$

式中: y 为土的比表面积(蒙脱石质量分数); k_1 、 b_1 、 k_2 、 b_2 均为常数; $k_1 y + b_1$ 为蒙脱石质量分数; $k_2 y + b_2$ 为蒙脱石质量分数所表征的进气值。

由式(14)、(15)可知,微波干燥曲线的 A 、 B 值均与土的比表面积存在函数关系。

2 试验

2.1 试验材料制备

自然界中的土大多为伊利石、蒙脱石、高岭土及石英等矿物混合而成,其成分、粒径级配和比表面积等各项土力学参数均不明确,不适用于科学研究。为便于研究计算,本试验使用的土样是商业高岭土、钙基蒙脱石二者混合而成的,其成分相对简单,便于分析其各项特性,其参数见表1。

表1 膨胀土和高岭土的基本参数

Table 1 Basic parameters of the expansive soil and kaolin

矿物成分	天然含水量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	相对密度
高岭土	21.5	46.3	20.6	25.7	2.66
钙基蒙脱石	33.4	147.1	45.5	101.6	2.71

为探究不同土样的微波干燥特性,试验材料按照0%、2%、4%、6%、7%、8%、10%、12%、14%、18%、22%和30%12种质量分数进行调配,以混合土代替自然界中不同质量分数蒙脱石含量的土样。

2.2 试验仪器

试验所使用的微波加热设备为商业微波炉。该微波炉的大小为302 mm×509 mm×248 mm,其中,

其内腔容量为23 L。微波炉有不同的功率档。可通过外部的相关按钮进行调节,同时可以设定不同的加热时间。将试验样品装入微波炉内腔中,设置好微波功率档与加热时间,即可加热样品。质量称量设备为电子天平,精度为0.000 1 g。

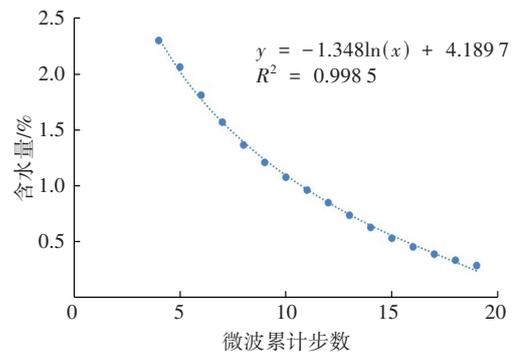
2.3 试验方法

先将土料烘干后按照掺量混合并搅拌均匀,在微波试样盒内放入100 g搅拌均匀的干土,然后,放入80 g蒸馏水,密封浸泡7 d。每种掺量制样6个。

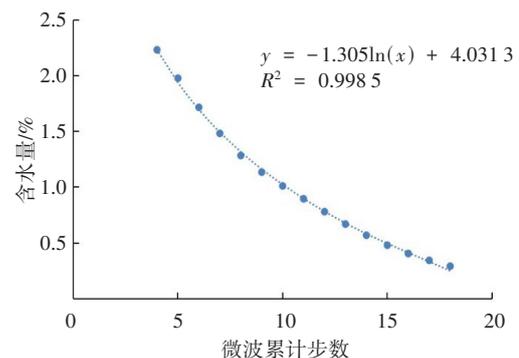
试验使用两个同品牌同规格的微波炉共同加热,在单个微波加热设备中放入3个试样,加热150 s后,再将试样水浴冷却120 s后称重,称重后再放入装置中加热,直到试样前后两次重量变化小于0.5 g时停止。

3 模型检验及试验结果分析

本试验通过分时步加热干燥试样得到微波干燥曲线。在微波功率不变的情况下,微波时间可用微波累计步数表征。将试验所测的含水量进行正则化后,建立土样含水量与试验累计步数的关系,并绘制膨胀土的微波干燥曲线,如图1所示。



(a) 纯高岭土微波干燥曲线



(b) 质量分数为2%蒙脱石土样的微波干燥曲线

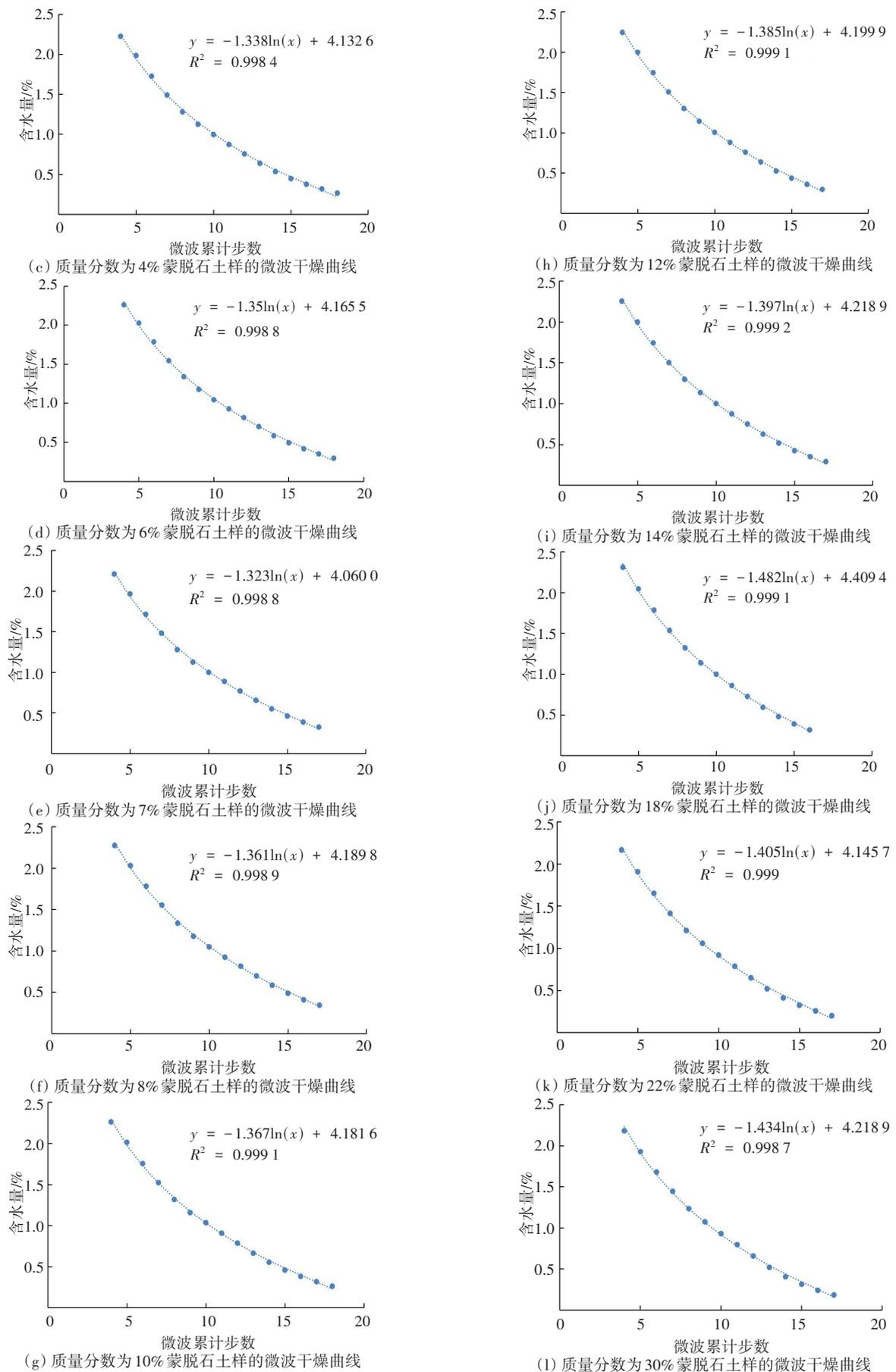


图1 不同质量分数蒙脱石土样的微波干燥曲线

Fig. 1 Microwave drying curve of soil samples with different montmorillonite content

从图 1 可以看出,实际测量值与模型吻合度较高,根据模型设定的趋势线与实测结果相关系数均在 0.998 以上,这表明该模型能较好地反映膨胀土的微波干燥过程。

提取弱膨胀土、中等膨胀土和非膨胀土试样的微波干燥曲线参数 A 、 B (A 值取绝对值),见表 2。

表 2 蒙脱石质量分数及 A 、 B 参数

Table 2 Montmorillonite content and the A , B parameters

蒙脱石质量分数/%	参数 A	参数 B	蒙脱石质量分数/%	参数 A	参数 B
0	1.348	4.190	8	1.361	4.190
2	1.305	4.031	10	1.367	4.182
4	1.338	4.133	12	1.385	4.200
6	1.350	4.166	14	1.397	4.219
7	1.323	4.060	18	1.482	4.409

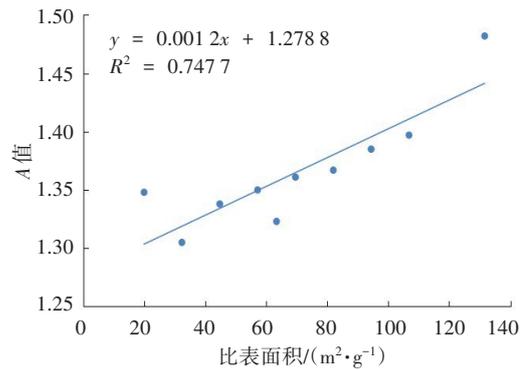
通过乙二醇乙醚法测得试验所用的高岭土与钙基蒙脱石的比表面积分别为 $19.83 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $633.71 \text{ m}^2/\text{g}$ 。取高岭土比表面积为 $20 \text{ m}^2/\text{g}$,钙基蒙脱石比表面积为 $640 \text{ m}^2/\text{g}$,按式 (16) 对混合土的比表面积进行计算:

$$S_b = \frac{\sum_{i=1}^n S_{b_i} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (16)$$

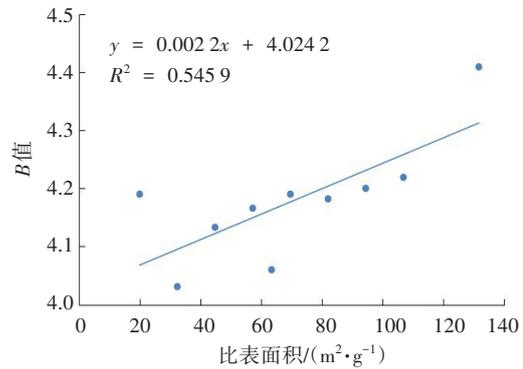
式中: S_b 为平均比表面积; S_{b_i} 为组分 i 的比表面积; m_i 为组分 i 的质量。

分析各微波特征参数与比表面积的关系,其函数图像如图 2 所示。

从图 2 可以看出,拟合曲线参数 A 与比表面积之间具有线性关系,这与推导的动力学模型相吻合,其相关系数为 0.747 7。拟合参数 B 与比表面积之间也具有一定的线性关系,但相关系数也不高。拟合参数 B 与比表面积的相关系数不高的主要原因是试验过程中土样孔隙比的变化。膨胀土在干燥脱湿的过程中往往伴随着收缩固结,且不同蒙脱石含量的土样收缩固结程度不同,蒙脱石含量越高,体积收缩量越大,这使得 A 、 B 参数与比表面积关系的规律性都不强。除此以外,质量分数为分别为 2%、7% 的蒙脱石试样在试验过程中均有少量的干土丧失,但计算含水量时并未考虑干土损失,仍按照原干土重计算,造成了试验误差。



(a) 参数 A 与比表面积的关系



(b) 参数 B 与比表面积的关系

图 2 脱湿曲线特征参数与比表面积的关系

Fig. 2 Relationship between the characteristic parameters of dehumidification curve and the specific surface area
为减低土样孔隙比变化的影响,引入参数 K 与比表面积进行拟合,其表达式为:

$$K = \frac{B}{A} = \frac{(k_1 y + b_1) + [\ln(k_2 y + b_2) - \ln \psi_r]}{\theta_s - (k_1 y + b_1)} \quad (17)$$

由式 (17) 可知, K 值与比表面积的关系接近于二次函数。因此,采用二次函数对结果进行拟合,拟合结果如图 3 所示。

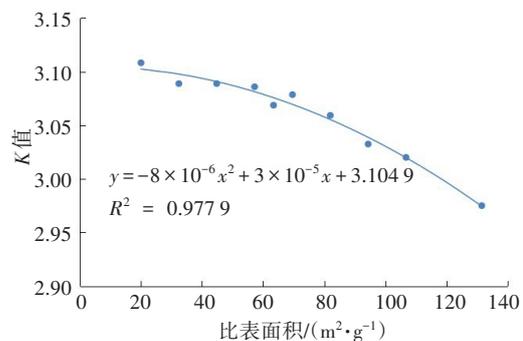


图 3 K 值与比表面积的关系

Fig. 3 Relationship between the K value and the specific surface area

从图3可以看出,土样的比表面积与 K 值之间存在较好的二次函数关系。

微波干燥脱湿曲线的特征参数由土水特征的进气值与残余含水量等决定,而土水特征函数的进气值与残余含水量与比表面积之间呈正比。因此,含水量变化函数的特征参数 K 值与比表面积之间也存在较好的二次函数关系。本试验假定虽并不完全符合实际情况,但试验结果基本符合客观规律,在一定程度上反映了土的比表面积与土水特征之间的关系。此外,对精度要求不高的工程在估测土样的比表面积时可采用本方法,相对于其他测试方法,该法具有简单、快速的优点。

4 结论

通过对不同质量分数的蒙脱石土料进行微波干燥,并对其微波干燥脱湿曲线进行分析,得出以下结论:

1) 在微波干燥过程中,在土样的进气值降至残余含水量阶段,土的含水量与微波时间两者呈对数关系。

2) 微波干燥脱湿拟合曲线的表达式为 $\omega = A \ln(x) + B$, A 、 B 参数都与土样的蒙脱石质量分数、土的物理力学性质有关。

3) 拟合曲线参数 A 、 B 的比值可以在一定程度上反映土样的蒙脱石质量分数,通过进一步的试验研究,可使用该参数对土样的蒙脱石质量分数进行判断,并根据参数对土样的土水特征函数进行预测,这对工程实际有重要指导意义。

微波干燥脱湿曲线分析方法为膨胀土脱湿特性和黏土矿物比表面积等微观特性的研究打开了新视野,对黏土工程性质的评价和土体工程的研究也有重要的启示作用,有待进一步开展深入研究。

参考文献(References):

[1] 雷军伟,蔡树生,王月春,等.安猴公路膨胀土路堑边坡浅层滑坡原因与对策[J].公路与汽运,2020(2):95-98,102.
LEI Junwei, CAI Shusheng, WANG Yuechun, et al. Causes and countermeasures of shallow landslide on expansive soil cutting slope of Anyang Highway [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(2): 95-98, 102.

[2] 邓鹏,王桂尧,梅智鹏,等.根系分布对膨胀土干缩开裂影响试验研究[J].交通科学与工程,2021,37(1):19-25.
DENG Peng, WANG Guiyao, MEI Zhipeng, et al. Test study on the effect of root growth direction on cracking characteristics of expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 19-25.

[3] 孔令伟,李雄威,郭爱国,等.脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探[J].岩土工程学报,2009,31(3):335-340.
KONG Lingwei, LI Xiongwei, GUO Aiguo, et al. Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 335-340.

[4] 徐锴,耿之周,李雄威.脱湿速率对膨胀土堑坡稳定性的影响分析[J].岩土工程学报,2017,39(S1):131-134.
XU Kai, GENG Zhizhou, LI Xiongwei. Influence of different drying rates on stability of cut slope of expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 131-134.

[5] 李雄威,孔令伟,郭爱国,等.吸湿速率对膨胀土工程性状影响的初步分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(11):154-157.
LI Xiongwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Preliminary analysis on influence of moisture absorption rate on engineering properties of expansive soil [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2008, 35(11): 154-157.

[6] 林鸿州,李广信,于玉贞,等.基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J].岩土力学,2007,28(9):1931-1936.
LIN Hongzhou, LI Guangxin, YU Yuzhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1931-1936.

[7] 刘艳华,龚壁卫,苏鸿.非饱和土的土水特征曲线研究[J].工程勘察,2002,30(3):8-11.
LIU Yanhua, GONG Biwei, SU Hong. Study on characteristic curve of soil and water for unsaturated soil [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002, 30(3): 8-11.

[8] 李志清,胡瑞林,王立朝,等.非饱和膨胀土SWCC研究[J].岩土力学,2006,27(5):730-734.
LI Zhiqing, HU Ruilin, WANG Lichao, et al. Study on SWCC of unsaturated expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 730-734.

[9] 牟群英,李贤军.微波加热技术的应用与研究进展[J].

(下转第25页)

- [7] 谢勇,张逸圣,辛顺超. 基于钢渣骨料的沥青混合料路用性能研究[J]. 公路,2014,59(12):186-190.
XIE Yong,ZHANG Yisheng,XIN Shunchao. Research on performance of asphalt mixtures for pavement with steel slag aggregates[J]. Highway,2014,59(12):186-190.
- [8] 向晓东,习嘉晨,李灿华. 钢渣AC-10C型改性沥青混合料配合比及性能[J]. 兰州理工大学学报,2016,42(6):142-146.
XIANG Xiaodong,XI Jiachen,LI Canhua. Mixture ratio and performance of mixture of steel slag with AC-10C-type modified asphalt[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2016,42(6):142-146.
- [9] 牟存玉,凌天清,陆亚,等. 钢渣SAC-10沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路,2019,39(2):249-255.
MOU Cunyu,LING Tianqing,LU Ya, et al. Study on road performance of steel slag SAC-10 asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(2):249-255.
- [10] 卢发亮,李晋. 钢渣沥青混合料级配特征研究[J]. 公路,2013,58(7):222-227.
LU Faliang,LI Jin. Study on gradation characteristics of steel slag mixture[J]. Highway,2013,58(7):222-227.
- [11] 杨俊霖,罗蓉,樊向阳,等. 基于多孔钢渣的沥青混合料设计与路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(1):68-71.
YANG Junlin,LUO Rong,FAN Xiangyang, et al. Research on design and road performance of asphalt mixture with porous steel slag [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2018,42(1):68-71.
- [12] ARRIBAS I, SANTAMARÍA A, RUIZ E, et al. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete [J]. Construction and Building Materials,2015,90:68-79.
- [13] 许丁斌. 钢渣沥青混合料的材料及性能研究[D]. 南京:东南大学,2018.
XU Dingbin. The material and performance research of steel slag asphalt mixtures [D]. Nanjing: Southeast University,2018.
- [14] 李友云,陈佳,王硕,等. 沥青混合料劈裂疲劳损伤力学特性多尺度研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(1):1-11,80.
LI Youyun, CHEN Jia, WANG Shuo, et al. Multi-scale research on mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 1-11, 80.

(责任编辑:刘国奇;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)

(上接第6页)

- 物理,2004,33(6):438-442.
MOU Qunying, LI Xianjun. Applications of microwave heating technology[J]. Physics,2004,33(6):438-442.
- [10] TORRINGA E, ESVELD E, SCHEEWE I, et al. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms [J]. Journal of Food Engineering,2001,49(2/3):185-191.
- [11] 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备,2009,7(2):51-56.
WANG Baohe. Review of drying kinetics [J]. Drying Technology & Equipment,2009,7(2):51-56.
- [12] 李志刚. 城市污水厂污泥微波干燥效能研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
LI Zhigang. Study on microwave drying efficiency of sludge from municipal sewage plant [D]. Chongqing: Chongqing University,2007.
- [13] 包承纲,詹良通,龚壁卫. 非饱和土的特性及其抗剪强度问题[C]//中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 南京:中国土木工程学会,1999:184-187.
BAO Chenggang, ZHAN Liangtong, GONG Biwei. Properties and shear strength of unsaturated soils [C]// Proceedings of the 8th Conference on soil mechanics and geotechnical engineering of Chinese society of civil engineering. Nanjing: China Civil Engineering Society, 1999:173 - 176.(in Chinese))
- [14] PEDARLA A, ACHARYA R, BHEEMASETTI T, et al. Influence of mineral montmorillonite on soil suction modeling parameters of natural expansive clays [J]. Indian Geotechnical Journal,2016,46(3):291-298.
- [15] 朱赞成,孙德安,王小岗,等. 基于膨润土微观结构确定土水特征曲线的残余含水率[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1211-1217.
ZHU Zancheng, SUN Dean, WANG Xiaogang, et al. Determination of residual water content in SWCC based on microscopic structure of bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(7):1211-1217.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:陈璐)