

文章编号: 1000-7598 (2011) 07-1945-06

含浅层气砂土的赋存特征及其非饱和参数预测

王 勇, 孔令伟, 郭爱国, 田湖南

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 从地质成因角度分析了杭州地区浅层气藏的形成过程, 探讨了储层土体的原始赋存分带特征, 认为规模气藏中位于浅层气富集带内砂土的吸力变化范围不大, 初始赋存含水率大致与其残余含水率接近, 一般处于残余含水状态。基于 VG 模型描述的储气砂土-水特征曲线, 提出了间接获取储层砂土非饱和参数的工程预测方法。对比试验结果表明: 借助 VGM 模型、Parker 模型和乘幂形式的强度公式, 能够有效地预测含浅层气砂土的渗水系数、渗气系数和抗剪强度等非饱和参数, 可满足地铁工程超前采取防治措施、消除浅层气地质灾害的需要。

关 键 词: 浅层气; 储气砂; 赋存特征; 地质灾害

中图分类号: TU 42

文献标识码: A

Occurrence characteristics and unsaturated parameters prediction of shallow gassy sand

WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, TIAN Hu-nan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In view of geological origin, the formation of shallow gas in Hangzhou area was analyzed; and the original occurrence zonation characteristic of reservoir soil is investigated. It is shown that matric suction variation range of the gassy sand in enriched zone of scale gas reservoirs is not large, and its initial occurrence water content is close to its residual water content that means it is usually at the state of residual water content. Based on soil-water characteristic curve of the gassy sand described by Van Genuchten (VG) model, the indirectly engineering predictive methods to obtain unsaturated parameters of gassy soil are proposed. Results compared between the prediction and the experiment show that using Van Genuchten and Mualem (VGM) model, Parker model and strength formula described by the power function, it is effective to predict the unsaturated parameters such as water and gas permeability coefficients, and shear strength of the reservoir soil, which can meet the need of preventive measures taken before metro construction to eliminate the shallow gas geological hazards.

Key words: shallow gas; gassy sand; occurrence characteristic; geological hazard

1 引 言

正在营建的杭州地铁工程在勘察过程中遭遇到含气压较高的含气地层, 多次发生气体喷发并燃烧的现象。研究表明, 地层中所含气体为浅层生物型天然气, 其成份 90% 以上为甲烷, 压力最高可达 0.4 MPa; 具有含气面积分布广、埋深浅的特点, 给地铁工程的施工和后期运营构成了极大的安全威胁。而事实上, 我国东部沿海和长江中下游地区在工程建设中, 曾多次遇到过这种埋深较浅的天然气藏。因气体喷发、释放或燃烧而引起隧道、基坑、沉井、水工构筑物等沉陷、断裂, 导致工程事故、

造成人员伤亡的例子也屡有报道^[1-3]。随着工程建设领域的拓宽和对地下空间的不断开发利用, 浅层气这种特殊地质条件所引发的工程灾害问题日益受到人们的关注。由于含浅层气土体是工程实践中遇到的一种特殊土类, 目前对于它的土层特性和工程性状的研究较少, 人们对其认识尚不够清晰, 工程中采取的防灾减灾措施还带有较大的盲目性。因此, 认识浅层气藏的形成过程、弄清储层土体的原始赋存状态、获取含气地层的基本工程参数是地铁工程施工前采取针对性预防措施、避免或消除浅层气地质工程灾害的前提和基础。

储有浅层气的砂土可称之为储气砂。因其所含

收稿日期: 2010-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.10872210); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No.kzcx2-yw-150)。

第一作者简介: 王勇, 男, 1977 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事特殊土力学与工程灾害防治技术方面的研究工作。E-mail: wangyong@163.com

孔隙气相的特殊性(规模气藏中气相连续,但与大气隔绝且气压高于大气压),可将其视为一类特殊的非饱和土^[3],借助现有非饱和土力学理论来揭示其工程特性。储气层土体的渗水、渗气和强度等指标是地铁工程前期布设排气井,进行浅层气有控排放、减小后期危害性等超前工程措施中的重要控制性参数。由于杭州地铁所遇浅层气藏一般单个面积不大,但分布广泛且分散,工程前期若要直接获取地铁沿线不同区段内含气层土体的上述指标,则需要开展大量的非饱和土试验,这既不现实亦无法满足工程需求,实践中亟需寻求间接方法来获得这些工程控制性参数。

本文在认识杭州地区浅层气藏形成过程的基础上,探讨含浅层气土层的初始赋存状态,提出间接获取含气土层非饱和工程参数的预测方法,为地铁建设提供有益的借鉴。

2 气藏形成与储层土体的赋存状态

2.1 浅层气藏的形成

杭州地处杭嘉与萧绍平原、太湖和钱塘江下切河谷地带^[4]。第四纪以来,大量的有机质在该区域地层的快速沉积中得以快速封存,并在持续沉降作用下进入还原环境,给微生物群落的生存和繁殖创造出有利的条件和物质基础^[5];近乎中性的水质和适宜的温度与气候条件为气体的生成创造良好的外部环境^[6]。地理条件的特殊性,使得杭州地区在第四纪的几次海侵、海退中,形成了许多超浅层生物型气藏^[7]。

杭州地区的典型地层中,普遍上覆有厚度较大且富含有机质的淤泥或淤泥质黏土层。它们既是浅层气形成的主要气源层,又是气体的良好封盖层。淤泥质土中的有机质在厌氧菌作用下分解发酵,产生生物气体。气体首先被地层水溶解和受黏土吸附,大部分以水溶态形式存在或发生扩散。伴随区域地层的不断沉积,淤泥层中孔隙水被逐步排出,水溶气也随之排出,由渗透性差的淤泥层流向渗透性较好的砂层中。因生成气体的主要成分为甲烷,且位于地表浅部,甲烷在这种压力与温度环境下的溶解度较低,溶解和吸附饱和后,便出现了游离态气泡。毛细作用使得气泡从细颗粒土孔隙中向着粗颗粒土孔隙中迁移,并在浮力的作用下缓慢向上运动,最后因上覆淤泥层具有较大的毛管阻力束缚而被封闭在下部的砂层或砂透镜体顶部聚集成藏。气体持续产出、运移和聚集,同时又在微渗漏和扩散作用下通过上覆封盖层不断向外界漏失或随地下水流动而

散失,但最终因产气量大于漏失量使得储集层中的游离气量不断增多,气压逐渐增高,砂层毛管阻力较小,气体在压力作用下驱替砂层的孔隙水分而使得水气交界自由水面不断下移,并最终形成具有一定规模和厚度的天然气藏。因此,浅层气藏的形成是一个不断产气、溶解、吸附、游离、运移、积聚和扩散等过程的平衡产物,且该过程当前仍处于持续不断的动态进行中。

2.2 储层土体的原始赋存特征

认清地下储气层岩土体的原始赋存状态是合理确定其工程参数的前提。对于浅层气藏,虽已有相当多的原位勘探方法能够满足查明其存在、形状和分布范围的粗略勘测,但对气藏中储层土体的原始赋存状态却难以辨识^[8];而且在现场条件下,由于气体易逸散,很难获取含浅层气土层的原状样品,其初始赋存状态只能结合现场勘查资料,在追溯浅层气成藏过程的基础上来加以推断。

勘察资料显示^[9],杭州地铁所遇浅层气藏的主要储集层是以河漫滩相为主的砂层和贝壳层,储层砂体平面上错叠连片,剖面上呈大小不等的扁豆体、条带状透镜体或薄层砂与黏土互层出现;气藏一般气、水同产,而高产区往往为干气层。这说明水、气并非均匀遍布于整个储集层,气层中具有一个含水少、气相连通并且压力较高的区域。由前述浅层气藏的形成过程可以推断,储层砂土的初始含水率沿深度方向由上至下逐渐增大,状态应从非饱和逐步过渡为饱和态;气、水分布形态具有分带性,从储气层顶板至气底大致可分为气体富集带、水气过渡带和承压饱水带等3个区带,典型砂透镜体的储层土体原始赋存分带特征可如图1所示。浅层气富集带中,砂土孔隙大部分为压力气体所充填,气相相互连通,且初始含水率较低,渗水性较差;气、水过渡带中,孔隙气相和水相均相互连通,且水、气渗透性均较好;承压饱水带中,孔隙气相不再连通,赋存形态由孤立的小气泡逐步过渡到以完全溶解的形式存在于孔隙地下水中,其渗透运移方式逐步过渡为扩散方式。杭州地铁的现场勘探过程中,有相当多的静力触探孔喷发时先喷干砂和气,而后气、水同喷,最后水砂、气同涌的现象可为上述储层土体的原始赋存分带性推断提供佐证。

3 储气砂的土-水特征曲线

土-水特征曲线(SWCC)表征了土体的持水特性,是土中气、水各相微观运动规律的宏观反映。Fredlund曾指出^[10],土-水特征曲线与非饱和土体的

土性参数如：持水性、水力传导、温度传导、剪切强度、水分扩散和吸附等特性有密切的联系。这为以间接方法获取其他相关非饱和土性参数提供了依据。因此，测定杭州地铁浅层储气砂土的土-水特征曲线是间接获取非饱和参数的前提。

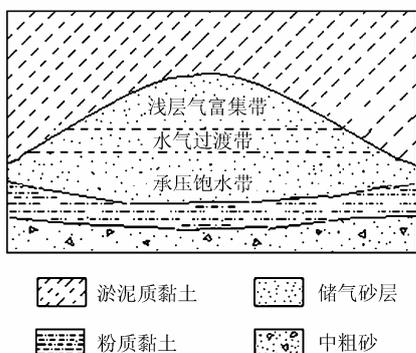


图 1 砂透镜体储层的原始赋存分带特征示意图
Fig.1 The occurrence zonation schematic diagram of reservoir sand in lens

3.1 土-水特征曲线测定

砂样取自杭州地铁典型含浅层气区段，地表以下 28~30 m，青灰色，呈稍密~中密态，含有机质腐植物，夹少量贝壳碎屑。为反映整体性，试验前将所取砂样混合拌匀，按 1.54 g/cm³ 的干密度制成环刀样，在非饱和土压力板仪中测定其土-水特征曲线。图 2 为试验测得的储气砂土-水特征曲线。由图可看出，储气砂土的进气值 ψ_{aev} 约为 5 kPa，饱和体积含水率 θ_s 为 42%，残余体积含水率 θ_r 约为 10%，残余饱和度 S_r 在 20% 附近，残余含水率对应的基质吸力 ψ_r 为 50~70 kPa。

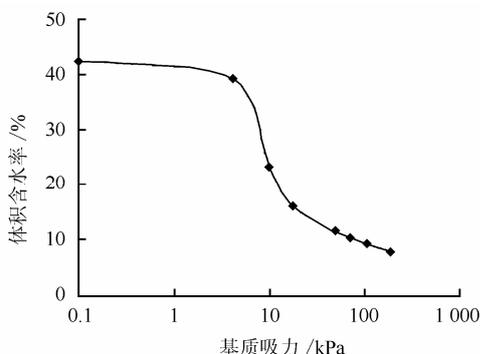


图 2 杭州地铁典型储气砂的土-水特征曲线
Fig.2 The typical SWCC of gassy sand in Hangzhou Metro

据已有的研究表明^[11]，杭州地区分布的浅层气藏均属常压气藏（地层压力系数介于 0.7~1.2 之间为常压气藏）。而杭州地铁典型区段的储气层顶板埋深一般在地表以下 25~33 m，其附近的静水压力

p_w 为 250~330 kPa。若按气藏压力系数最大值 1.2 来计算原始气藏压力 p_a ，可粗略得出储层砂土的最大基质吸力 ψ_{max} 变化范围为

$$\psi_{max} = p_a - p_w = 0.2 p_w \approx 50 \sim 70 \text{ kPa} \quad (1)$$

这恰与上述测定的储气砂土-水特征曲线中残余含水率对应的吸力 ψ_r 范围接近。由此可进一步推断，规模气藏中位于浅层气富集带内砂土的原始赋存一般处于残余含水状态，且初始含水率与其土-水特征曲线中对应的残余含水率接近。

3.2 储气砂土-水特征曲线的模型描述

将储气砂土的土-水特征曲线用数学方程形式描述可使其得到更为广泛的应用，利用它能够实现对其他相关非饱和土性参数的预测。迄今为止，国内外学者虽已提出了诸多有关土-水特征曲线的数学模型，但应用最为广泛的是 Van Genuchten^[12]提出的经典 VG 模型和 Fredlund 与 Xing^[13]利用统计方法给出的土-水特征曲线表达式。VG 模型具有函数连续、形式简单、参数少的优点，缺点是对于高吸力下，尤其是大于土体残余含水率对应基质吸力后的持水特性变化规律描述欠佳；而 Fredlund 与 Xing 模型适用于不同土类，可以描述全吸力范围（0~10⁶ kPa）土体的持水特性变化，但其参数较多且形式复杂。前述已知，储层砂土的非饱和状态主要在小于其残余含水率对应吸力的区间内变化，对比两种模型，采用 VG 三参数模型更易于描述浅层储气砂土的土-水特征曲线：

$$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (2)$$

式中： θ_w 为体积含水率； ψ 为基质吸力； α 、 n 、 m 均为模型参数。VG 模型拟合结果如图 3 所示。其中， θ_r 为 0.1， θ_s 为 0.424， α 取 0.168， n 为 3.5， m 为 0.46，相关系数 $R^2=0.995$ 。由此可知，利用 VG 模型能够有效地描述储气砂土在其吸力变化范围内的持水性态变化特征。

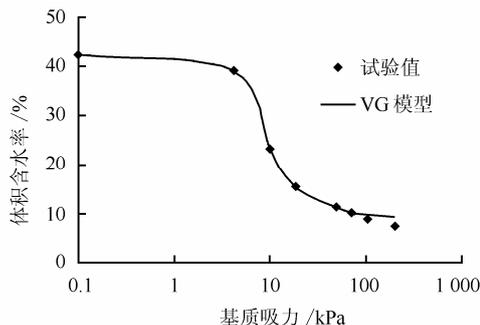


图 3 VG 模型拟合的储气砂土-水特征曲线
Fig.3 Fitting for SWCC of gassy sand with VG model

4 储层土体的非饱和参数预测

4.1 非饱和渗水系数

非饱和土的渗水系数不易测定，而且费时、费力。学者们发现，非饱和土的渗水系数曲线与土-水特征曲线存在一定的相似性，于是基于土-水特征曲线和较易量测的饱和土渗水系数，提出了各自不同的非饱和土渗水系数预测经验公式，比较典型的预测公式如表 1 所示。

表 1 典型的非饱和土渗水系数经验公式^[14]

Table 1 Typical empirical formulas of water permeability coefficient of unsaturated soil

经验公式	模型名称	模型参数
$k_w = \alpha \psi^{-n}$	Wind 模型	α, n
$k_w = k_s (\psi_{sew} / \psi)^{2+5.4/2}, \psi > \psi_{sew}$	Brooks and Corey 模型	λ
$k_w = k_s, \psi \leq \psi_{sew}$	Corey 模型	
$k_w = k_s \left(\frac{\theta_w}{\theta_s} \right)^p$	Campell 模型	p
$k_w = k_s \exp[\lambda(\theta_w - \theta_s)]$	Dane 模型	λ
$k_w = k_s \exp[\alpha(\psi - \psi_{sew})]$	Phillip 模型	α
$k_w = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$	Van Genuchten 和 Mualem 模型	m

注： k_w 为渗水系数； k_s 为饱和渗水系数； S_e 为有效饱和度， $S_e = (S_w - S_r) / (1 - S_r)$ ； S_w 为含水饱和度； S_r 为水相残余饱和度。

现场条件下土体的基质吸力很难直接量测，而含水率却易于获取，从表 1 中各式的对比可看出，Van Genuchten^[12]在 Mualem 提出的相对渗透系数基础上，得出的预测非饱和土渗水系数的 VGM 模型具有较多优点与适用性，且唯一参数 m 直接来源于前述 VG 模型的土-水特征曲线方程。由此，根据前述室内测定的储气砂土-水特征曲线，结合 VGM 模型可实现对储层砂土的渗水系数预测。为验证模型预测的有效性，在室内非饱和土-水力参数联合测试仪中^[15]，对与土-水特征曲线试验初始状态相同的储气砂样品进行了非饱和渗水系数进行测定，将所得试验结果与 VGM 模型的预测值进行对比，如图 4 所示。图中 VGM 模型参数 m 取自土-水特征曲线 VG 模型， $m=0.46$ 。由图可看出，VGM 模型能够较好地描述储气砂土的渗水系数变化规律，且形式简单，参数少，与土-水特征曲线 VG 模型直接对应，可满足工程中通过预测间接获取储层砂土非饱和渗水参数的需要。

4.2 非饱和渗气系数

非饱和土的渗气系数测定较渗水系数测定相对容易，但长期以来却未得到充分重视，研究的成果并不多。到目前为止，学者们也提出了一些预测非饱和渗气系数的经验公式，如表 2 所示。

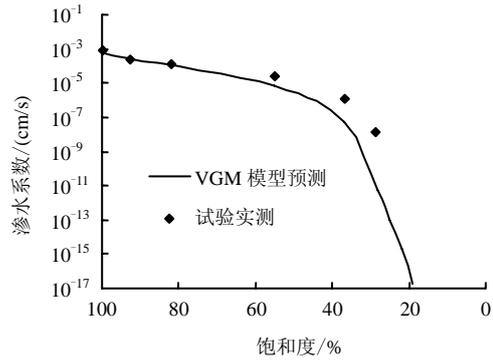


图 4 VGM 模型预测的渗水系数与试验结果对比
Fig.4 Comparison of water permeability coefficient between the predicted by VGM model and the measured results

表 2 典型的非饱和土渗气系数经验公式^[17]

Table 2 Typical empirical formulas of air permeability coefficient of unsaturated soil

经验公式	模型名称	模型参数
$k_a = k_d (1 - S_e)^3$	Irmay 模型	
$k_a = k_d S_e^2 [1 - (1 - S_e)^2]$	Corey 模型	
$k_a = k_d (1 - S_e)^2 (1 - S_e^{2+5.4/2})$	Brooks and Corey 模型	λ
$k_a = k_d \frac{B}{\eta_a} [e(1 - S_w)]^\beta$	Alonso 模型	B, η_a, β
$k_a = k_d (1 - S_e^{1/2}) \{1 - [1 - (1 - S_e)^{1/m}]^m\}^2$	Van Genuchten 模型	m
$k_a = a[e(1 - S_r)]^n$	Delage 模型	a, n

注： k_a 为渗气系数； k_d 为 $S_w=0$ 时的渗气系数； e 为孔隙比。

Parker 等^[16]在表 2 中 Van Genuchten 模型基础上进一步修正，得出非饱和土渗气系数表达式如下：

$$k_a = k_d (1 - S_e)^{1/2} (1 - S_e^{1/m})^{2m} \quad (3)$$

式中： k_d 为含水饱和度 S_w 为 0 时干土的渗气系数；唯一的模型参数 m 同样取自基于 VG 模型的土-水特征曲线方程。这样，根据土-水特征曲线和室内较易测定的干土渗气系数 k_d ，便能获得杭州地铁储层砂土在不同饱和度下的渗气系数。笔者^[18]曾对杭州地铁所遇的储气砂土渗气性进行室内试验研究，并将所得试验结果与式 (3) 的预测值进行对比，如图 5 所示。图中 Parker 模型参数 m 取值仍为 0.46。由图可看出，Parker 模型的预测规律与试验结果有较好的一致性，说明该模型能够有效描述储气砂土的非饱和渗气性变化规律。

4.3 非饱和抗剪强度

Fredlund^[19]提出了非饱和土的抗剪强度公式：

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4)$$

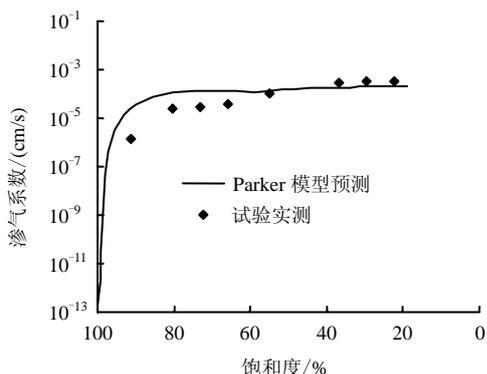


图 5 Parker 模型预测的渗气系数与试验结果对比

Fig.5 Comparison of air permeability coefficient between the predicted by Parker model and the measured results

式中： c' 、 ϕ' 分别为饱和状态下土的有效黏聚力与摩擦角； σ_n 为平均正应力； u_a 、 u_w 分别为孔隙气和孔隙水压力； ϕ^b 为与基质吸力相关的摩擦角，随基质吸力的增加，其值由 ϕ' 逐渐趋于 0 变化。右式中第 3 项 $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ 是由基质吸力引起的抗剪强度项，称为吸附强度或表观黏聚力 τ_{us} 。基质吸力与土体微小孔隙中水气交界面处的收缩膜形成的表面张力密切相关。由表面张力得出的基质吸力表达式为

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (5)$$

式中： T_s 为水的表面张力； r 为毛细孔半径； α 为水气交界面的接触角。由于 r 与孔隙水的面积密切相关，Fredlund^[20]提出了采用无量纲的孔隙水面积系数来衡量由基质吸力引起的强度 τ_{us} ：

$$\tau_{us} = a_w (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (6)$$

式中： $a_w = [\theta_w (u_a - u_w) / \theta_s]^\kappa$ ； κ 为根据土类而确定的参数； $\theta_w (u_a - u_w) / \theta_s$ 可由土-水特征曲线方程中获得，于是可以借助土水特征曲线对 τ_{us} 进行预测。众多学者根据大量试验统计结果也提出了许多结合非饱和土的土-水特征曲线和较易得到的饱和土强度指标来获取非饱和土强度的预测公式，比较典型的如：Oberg、Books 和 Corey、Khalili、Vanapalli 和 Fredlund 等。Kong 等^[21]在研究杭州湾大桥浅层气对桩基的影响时认为：含浅层气砂土由基质吸力引起的抗剪强度 τ_{us} 与基质吸力之间可用乘幂函数关系来表达，相应的砂土抗剪强度表述如下：

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + a(u_a - u_w)^b \quad (7)$$

式中： a 、 b 均为试验常数，可根据经验确定。笔者^[22]曾将上述预测公式进行对比研究发现，式 (7)

表达的抗剪强度与试验结果吻合性最好，说明该式可以有效地描述杭州地铁储气砂土的非饱和强度特性。

5 结 论

(1) 杭州所处的特殊地理条件，使得该地区在地质历史以来形成了许多超浅层气藏，气藏是一个不断产气、溶解、吸附、运移、扩散和积聚等过程的动态平衡产物，且该过程当前仍处于持续不断的动态进行中。

(2) 根据浅层气藏的形成过程，初步推断原始气藏中储层土体水气分布具有典型的赋存分带特征，且位于规模气藏浅层气富集带内砂土的吸力变化范围不大，一般处于残余含水状态，初始含水率大致与其土-水特征曲线对应的残余含水率接近。

(3) 采用三参数的 VG 模型可较好地描述储层砂土的持水特征变化规律。以此为基础，结合 Van Genuchten 提出的渗水系数预测模型、Parker 提出的渗气系数模型和乘幂形式的强度公式，能够间接获取储气砂土的渗水、渗气系数和非饱和抗剪强度等土性参数，可满足地铁工程前期合理制定浅层气地质防灾减灾措施的需要。

参 考 文 献

- [1] 唐益群, 叶为民, 张庆贺. 长江口软土层中沼气与隧道安全施工技术研究[J]. 同济大学学报, 1996, 24(4): 465—470.
TANG Yi-qun, YE Wei-min, ZHANG Qing-he. Marsh gas in soft stratum at the Estuary of the Yangtse River and safety measures of construction of the tunnel[J]. *Journal of Tongji University*, 1996, 24(4): 465—470.
- [2] 唐益群, 叶为民. 上海地铁盾构施工隧道中几个问题研究(二)[J]. 地下空间, 1993, 13(3): 171—177.
TANG Yi-qun, YE Wei-min. Study on several problems of Shanghai subway construction tunnel(2nd)[J]. *Underground Space*, 1993, 13(3): 171—177.
- [3] 孔令伟, 郭爱国, 陈守义, 等. 浅层天然气井喷对地层的损伤影响与桩基工程危害分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 375—381.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shou-yi, et al. Influence of shallow natural gas blowout on stratum damage and hazard analysis of pile foundation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2004, 24(4): 375—381.
- [4] 林春明, 李广月, 卓弘春, 等. 杭州湾地区晚第四纪下切河谷充填物沉积相与浅层生物气勘探[J]. 古地理学

- 报, 2005, 7(1): 12—24.
- LIN Chun-ming, LI Guang-yue, ZHUO Hong-chun, et al. Sedimentary facies of incised valley fillings of the Late Quaternary in Hangzhou Bay area and shallow biogenic gas exploration[J]. **Journal of Palaeogeography**, 2005, 7(1): 12—24.
- [5] 陈少平, 孙家振, 沈传波, 等. 杭州湾地区浅层气成藏条件分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 85—88.
- CHEN Shao-ping, SUN Jia-zhen, SHEN Chuan-bo et al. Reservoir formation condition of shallow gas in the area of the Hangzhou Bay[J]. **Marine Geology & Quaternary Geology**, 2004, 24(2): 85—88.
- [6] 关德师. 控制生物气富集成藏的基本地质因素[J]. 天然气工业, 1997, 17(5): 8—12.
- GUAN De-shi. Fundamental geologic factors controlling biogas accumulation[J]. **Natural Gas Industry**, 1997, 17(5): 8—12.
- [7] 勇振明, 金柏范, 王旭东, 等. 杭州湾地区第四系超浅层气的开发及营销[J]. 天然气工业, 1997, 17(3): 36—38.
- YONG Zhen-ming, JIN Bai-fan, WANG Xu-dong, et al. The development and management of quaternary extrashallow gas reservoirs in Hangzhou Bay[J]. **Natural Gas Industry**, 1997, 17(3): 36—38.
- [8] 林春明, 李广月, 李艳丽, 等. 杭州湾地区晚第四纪浅层生物气藏勘探方法研究[J]. 石油物探, 2006, 45(2): 202—208.
- LING Chun-ming, LI Guang-yue, LI Yan-li, et al. The exploration method of late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in Hangzhou Bay area[J]. **Geophysical Prospecting for Petroleum**, 2006, 45(2): 202—208.
- [9] 浙江省地矿勘察院. 杭州地铁1号线地下有害气体特性研究报告[R]. 杭州: 浙江省地矿勘察院, 2008.
- [10] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 1993.
- [11] 任光明. 我国浅层生物气气藏的压力特征及成因探讨[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 18—21.
- REN Guang-ming. Discuss on pressure characteristics and the causes of the shallow biological gas reservoir in China[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 1999, 26(3): 18—21.
- [12] VAN GENUCHTEN. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America**, 1980, 44 (5): 892—898.
- [13] FREDLUND D G, XING A. Equation for soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31 (4): 521—532.
- [14] SoilVision Systems Ltd. SVFlux user's and theory guide for Version3.0[EB/CD]. Saskatoon: SoilVision Systems Ltd., 2001.
- [15] 陈辉, 韦昌富, 陈盼, 等. 一种测定非饱和土-水力学参数的方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3348—3353.
- CHEN Hui, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. A method for determining hydraulic parameters of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3348—3353.
- [16] PARKER J C, LENHARD J C, KUPPUSAMY T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media[J]. **Water Resources Research**, 1987, 23(4): 618—624.
- [17] BA-TE. Flow of air-phase in soils and its application in emergent stabilization of soil slopes[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2004.
- [18] 王勇, 田湖南, 孔令伟, 等. 杭州地铁储气砂土的渗气性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 815—819.
- WANG Yong, TIAN Hu-nan, KONG Ling-wei, et al. Experimental research on gas permeability of shallow gassy sand in Hangzhou Metro project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 815—819.
- [19] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R S. The shear strength of unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15(3): 313—321.
- [20] FREDLUND D G, ANQING XING, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 440—448.
- [21] KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Jian-bin, et al. On strength property of gassy fine sand and model tests of pile foundation[C]//Proc. of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka: [s. n.], 2005, (4): 2009—2012.
- [22] 王勇, 田湖南, 孔令伟, 等. 杭州地铁储气砂土的抗剪强度特性试验研究与预测分析[J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊): 465—469.
- WANG Yong, TIAN Hu-nan, KONG Ling-wei, et al. Experimental study and predictive analysis of shear strength characteristics of gassy sand in Hangzhou Metro project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 28(Supp.): 465—469.