

文章编号: 1000-7598-(2007) 03-0461-06

磷石膏物理力学特性初探

张 超¹, 杨春和¹, 余克井², 付四乌², 陈 锋¹

(1.中国科学院 岩土力学重点实验室, 武汉 430071; 2.宁波华东核工业工程勘察院, 浙江 宁波 315800)

摘 要: 通过大量的室内试验, 研究了磷石膏的烘烤温度与含水率的关系、烘烤时间与含水率关系、溶解度与温度关系。按土工试验规范进行试验, 测得磷石膏的含水率随着烘烤温度的升高而增加, 也随着烘烤时间的增长而增加, 但是含水率应该是一个恒定的指标, 所以磷石膏的含水率的测定不能按照现行规范进行, 必须加以改进。建议在 55~60℃ 条件下烘烤 36 h 或更长时间来测定磷石膏的含水率。从试验还可以得知磷石膏有一定的溶解度, 且其溶解度随着温度的升高而降低。也正是由于磷石膏的溶解特性, 所以在进行渗透试验和三轴剪切试验时要使用室温条件下的饱和磷石膏溶液替代水, 从渗透试验结果来看, 磷石膏坝渗透特性不同于一般的尾矿坝, 其垂直渗透系数要大于水平渗透系数。从磷石膏的固结不排水三轴剪切试验可知, 磷石膏是一种有明显的剪胀性的材料, 在剪切条件下其破坏发生在孔隙水压力为负的情况下, 且其破坏时的应变受围压的影响不明显。利用磷石膏的剪切破坏发生在负孔压的这一特性, 理论上可以通过坝体内孔压变化的监测来预测磷石膏坝的安全性。

关 键 词: 磷石膏; 物理力学特性; 含水率; 溶解度; 渗透系数; 剪胀性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study on physico-mechanical characteristics of phosphogypsum

ZHANG Chao¹, YANG Chun-he¹, YU Ke-jing², FU Si-wu², CHEN Feng¹

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Ningbo East-China Engineering Survey Institute of Nuclear Industry, Ningbo 315800, China)

Abstract: Concerning the rare study on physico-mechanical properties of phosphogypsum, the relationship of water content with baking temperature and baking time, as well as the relationship of solubility with temperature is investigated by lots of experiments. According to specification of soil test, the tested water content of phosphogypsum increases with the increasingly baked temperature and baked time. In fact, the water content should be a constant, so the experimental method has to be improved. Phosphogypsum is suggested to test the water content under 55—60℃ for more than 36 hours. Through the experimental results, phosphogypsum has certain solubility, which decreases with the growing solution temperature. Because of the solution property, the distilled water must be substituted by the saturated phosphogypsum solution when the seepage experiments and triaxial compression tests are done. It is found that the coefficient of permeability in vertical direction is more than that in horizon direction from the seepage test results. And this property is different from the normal tailings. It is also found that phosphogypsum has obvious dilatancy when being sheared through the consolidated-drained triaxial compression tests. A conclusion can be drawn that the pore water pressure is minus when phosphogypsum specimen is damaged, and that the strain of damage is not sensitive with the confining pressure. Making use of the dilatancy of phosphogypsum, the safety of phosphogypsum dam can be forecasted theoretically by the pore water pressure monitoring system.

Key words: phosphogypsum; physico-mechanical characteristics; water content; solubility; coefficient of permeability; dilatancy

1 引 言

磷石膏是化工厂用磷灰石与硫酸作用湿法生产磷酸时的副产品。一般每生产 1 t 湿法磷酸, 约排出

5 t 磷石膏。据报道, 全世界每年磷石膏的排放量高达 $(1.1 \sim 1.3) \times 10^8$ t。其中只有 $(4.5 \sim 5.0) \times 10^6$ t 磷石膏得到了利用, 利用率仅为 4.1%~4.5%^[1]。我国磷石膏是化学石膏中排放量最大的废料, 年产量为

收稿日期: 2006-01-05

修改稿收到日期: 2006-04-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2002CB412704); 中国科学院武汉岩土力学研究所博士科研启动基金资助项目(No. Q220604)。

作者简介: 张超, 男, 1978 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事尾矿坝稳定性、边坡稳定性及土动力学方面的研究工作。E-mail: czhang@whrsm.ac.cn

$7.0 \times 10^6 \text{ t}$, 居世界第三。磷石膏中二水硫酸钙含量一般可达 90 % 以上, 是一种重要的再生石膏资源。但磷石膏中含有磷、氟、有机物等诸多有害杂质, 使其不能直接用于生产石膏建材。由于大量的磷石膏不能及时有效的利用, 需要进行堆置处理, 既占用土地, 又污染环境。其现状是大多数磷石膏采用筑坝堆放, 这与矿山处理尾矿的手段极其相似^[2]。

近年来, 我国一批大中型磷酸装置相继营运。磷酸装置生产时, 吃进大量的矿, 排出更大量的磷石膏渣, 磷石膏坝实际上应视作磷酸装置的一部分。磷石膏坝 (又称渣场) 的运行是动态的, 情况比装置更复杂, 问题的出现带有一定滞后性, 这些情况可能还没有引起人们足够重视。随着渣场磷石膏渣量的大量增加, 会不断出现新问题, 需要去研究解决。目前国内的磷石膏坝最大设计高度为 134 m, 且其筑坝方法采用的还是上游法, 由于磷石膏的力学特性还没有研究透彻, 所以利用磷石膏材料堆如此高的坝体是有一定风险性的。

磷石膏坝在堆置方法和存在的问题上和矿山尾矿坝极为相似, 在稳定性分析的方法上可以沿用尾矿坝的评价方法, 磷石膏的形成与尾矿的形成也有很多共同点, 但是磷石膏有其自身的特点, 所以有许多问题值得注意。由于研究磷石膏的物理力学性质的文献较为少见, 所以有必要对此进行研究, 即可以为磷石膏坝的稳定性打下基础, 也可以作为其他磷石膏研究的参考。

2 矿物及颗粒组成

磷石膏主要矿物成分为石膏, 全料中石膏含量为 96 %~97 %; 次为石英, 含量为 3 % 左右, 并含选矿剂残渣。在显微镜下观察到石膏呈长柱状、针棒状, 形体随其颗粒大小不同而不同, 其长短轴尺寸比为 3:1~10:1。本次试验磷石膏样取自湖北省某磷化工集团公司磷石膏坝, 分别从沉积滩的靠近坝顶、中间及靠近水面处取样。根据沉积规律可知, 这 3 处取样应该在颗粒分布上是由粗到细。本次试验还从放矿支管取了部分全尾矿样进行研究。这 4 种尾矿样品的颗粒分析结果见表 1, 颗粒分析曲线见图 1。

从表 1 可以看出, 不论是全料磷石膏还是经过筛分以后的粗粒磷石膏和细粒磷石膏, 它们的不均匀系数 C_u 均小于 10, 曲率系数 C_s 在 0.7~1.1 之间变化, 粗粒和细粒磷石膏属于级配不良的土样, 其液化可能性大, 全料磷石膏和中粒磷石膏的级配则相对较好。经过沉积分选后的磷石膏以级配不良的

粗粒和细粒居多, 因此, 要重视其动力特性, 笔者对其动力特性将有另文介绍, 在此不再赘述。在取样和试验过程中还发现磷石膏尾矿有静力液化现象, 在轻微的振动或是扰动下, 其试样表面产生液化现象, 且很明显。磷石膏尾矿的这种性质是其他尾矿材料所不具备的, 这种性质是进一步研究的重点之一。鉴于磷石膏的静力液化和易于振动液化的特性, 在土工试验过程中要特别注意尽量减少对试样的扰动。

表 1 磷石膏的级配常数

Table 1 Particle distribution constant of phosphogypsum

参数	材料名称			
	全料	粗粒料	中粒料	细粒料
限制粒径 D_{60}/mm	0.082	0.101	0.071	0.046
平均粒径 D_{50}/mm	0.066	0.085	0.059	0.032
30 % 的粒径 D_{30}/mm	0.028	0.070	0.026	0.015
有效粒径 D_{10}/mm	0.009	0.056	0.009	0.007
不均匀系数 $C_u=D_{60}/D_{10}$	9.11	1.80	7.89	6.57
曲率系数 $C_s=D_{30}^2/(D_{10} D_{60})$	1.06	0.87	1.06	0.70

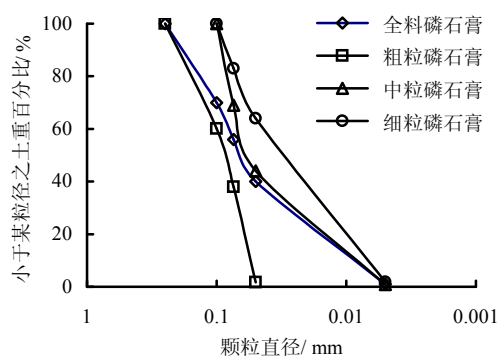


图 1 磷石膏颗粒分析曲线图

Fig.1 The grain-size analysis result of phosphogypsum

从图 1 的颗分曲线可知, 粗粒磷石膏中基本不含大于 0.25 mm 粒径的颗粒, 粗粒磷石膏的颗粒主要分布在 0.05~0.25 mm 之间, 其不均匀系数为 1.80, 中粒级和细粒级的磷石膏颗粒主要集中在 0.05~0.1 mm 之间。从以上分析可知, 磷石膏尾矿的粒径较为集中, 分布范围窄, 均匀性好, 不利于其稳定性。

3 温度、时间与含水率关系

根据化工设计部门提供的资料, 磷石膏主要成分为二水石膏^[2], 结晶水随着温度不同而产生不同程度析出。为了探索其变化规律, 以正确选择试样烘烤温度和时间, 作为土工试验中制样和测定干密度的统一标准, 进行了不同恒定温度和烘烤时间的

比较试验。试验分两种情况:第1种情况是取均匀原样5个,分别在55,70,80,90,100℃共5种不同温度下烘烤48h,测定其含水率,其结果见图2。第2种情况是对同一试样先以55℃作为控制温度,依次测出8d中每天的含水率,绘制恒定温度下含水率与烘烤时间关系曲线,见图3。再依次升温烘烤测定不同温度时的含水率,每种温度恒温时间与第1种情况相同,取48h,试验结果见图2,每个试样均为三盒平行测定。

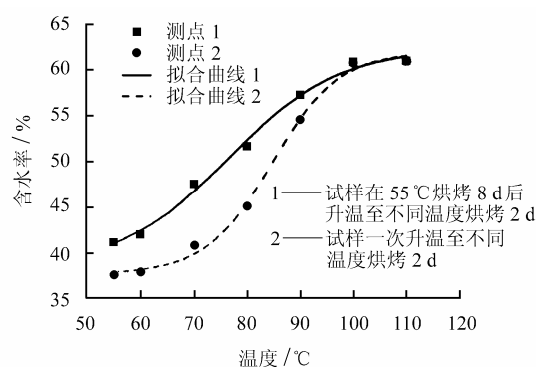


图2 烘烤48h条件下温度-含水率关系曲线

Fig.2 Baked temperature- water content curves in the condition of 48 baked hours

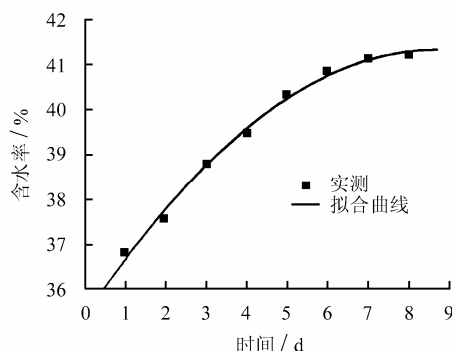
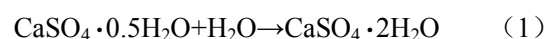


图3 55℃烘烤温度条件下时间与含水率关系

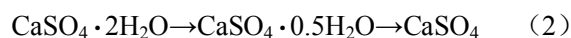
Fig.3 Baked time - water content curve under the baked temperature of 55°C

从图2可知,在温度从60~100℃之间,测定的磷石膏样的含水率是随着温度的升高而迅速增大,而在55~60℃之间测定的含水率差别很小,故笔者认为,当温度超过60℃以后,磷石膏中的主要成分二水石膏中的结晶水开始脱水,从而测定的含水率中有一部分是二水石膏的结晶水,是一个虚假的含水率,且这种差别随着温度的增加而增加。当温度超过110℃后,认为其脱水过程基本完成,所以测定的含水率无明显变化。二水石膏的吸水与脱水的反应方程式如下:

(1) 加水胶凝:



(2) 加热脱水:



从图2还可以看出,不同的加温路径对测定结果有一定影响,这种影响在55℃和110℃时不明显,而在中间温度时比较明显。

从图3可知,磷石膏在55℃时烘烤1~8d,测定的含水率由36.8%增大到41.1%,增加4.3%,但是含水率不是线性增长,烘烤3d以后速率开始减缓,至第7d开始趋于稳定。也就是说,磷石膏在55℃条件下烘烤时间越长,水分蒸发的速度就越来越慢,7d后蒸发基本完成,测定的含水率基本趋于稳定。

因为磷石膏的试验数据国内很少,也没有相应的试验规范和标准。根据以上试验资料,笔者建议在测定磷石膏的含水率时要严格地将温度控制在55~60℃,烘烤时间在36h以上,如果条件允许,最好能够保证烘烤7d。

以上的方法用于测磷石膏的含水率,对于已知磷石膏中二水硫酸钙的含量的情况,可以采用下式计算磷石膏的含水率:

$$w = \frac{w_1 - (1 + w_1)rP}{1 + (1 + w_1)rP} \quad (3)$$

式中: w_1 为常规方法测定的含水率; P 为磷石膏材料中二水硫酸钙的含量; r 为结晶水脱水系数,二水硫酸钙的结晶水脱水系数为0.209。

本节以一组磷石膏样为试验对象,按照本节建议的测试方法测得的含水率见表2,按照常规方法测试及根据式(3)进行计算得到的含水率也列于表2。从结果来看,两种方法测得的最大差值为3.9%,应该说这个误差是在可以接收的范围之内的。从表2可知,按上述建议方法测定的含水率都大于计算得到的含水率,笔者认为,在55~60℃之间测定的含水率时也存在轻微的结晶水脱水现象,这种现象的存在在一定程度上影响了测试结果,而且在110℃条件下烘烤磷石膏,二水硫酸钙也没有完全脱掉结晶水,如果采用煅烧条件测得含水率,再用式(3)计算会更接近实际值。对于磷石膏材料很难避免在烘烤测定含水率时完全不发生结晶水脱水现象,降低温度可以减少结晶水脱水现象,但如果烘烤温度太低则很难将非结晶水完全烘出,而且必将要求更长烘烤时间,这样的条件对于试验也不太现实。

综上所述,笔者建议在磷石膏中二水硫酸钙的含量未知的情况下还是采用本节建议的测试方法,如果已知磷石膏中二水硫酸钙的含量,则按常规方法进行测试,并将测得的数据按式(3)进行处理,得到真实的含水率。

表2 不同方法得到的磷石膏含水率对比结果

Table 2 Comparison of different methods to measure water content of phosphogypsum

试样编号	测定含水率/%	计算含水率/%	常规试验含水率/%
1	29.1	25.2	63.8
2	28.1	24.9	63.2
3	29.3	26.3	65.6
4	28.8	25.9	64.9

试验求解含水率的错误会直接导致磷石膏的干密度及其饱和密度的错误,在这种错误数据的基础上进行各种工况的稳定性分析是徒劳的,甚至会认为危险坝体是安全的,这样的结果是不能接受的,所以建议严格按照上述标准进行含水率的测定。

4 温度与溶解度

与一般的尾矿材料相比,磷石膏具有比较明显的溶解特性,对于一般的尾矿,可以不用考虑这种溶解特性,因为其溶解度极小,基本上可以忽略不计。但是对于磷石膏,这种特性是不能忽视的,因为磷石膏的溶解度将会直接影响土工试验的结果。

磷石膏被水溶解程度,依温度不同而异,对原样进行过 20, 30, 40, 50, 60 °C 共 5 种不同温度下溶解度试验,因当时试验的气温近 20 °C,更低的试验未进行。

试验取干样 50 g, 加入 250 cm³ (水土比 5:1) 蒸馏水在预定温度下浸泡 2 h, 并加以搅动, 然后滤去残渣, 取 25 cm³ 溶液以 55 °C 烘干测出重结晶磷石膏, 计算出每 100 cm³ 溶液中的溶质数, 见图 4。

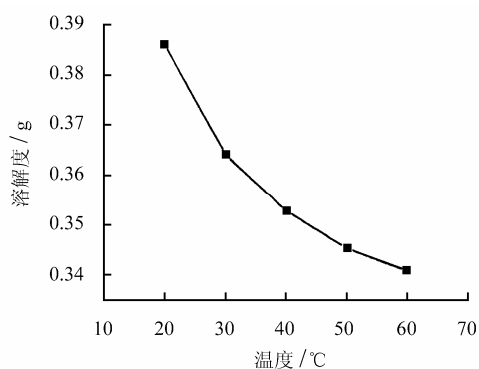


图4 磷石膏温度-溶解度曲线

Fig.4 Temperature - solubility curve

由图 4 可知,溶解温度在 20~50 °C 之间时,溶解度变化较大,温度每增加 10 °C,溶解度降低 0.004 6~0.022 2 g, 而且随着温度的升高,溶解度的减小速度越来越慢。对于磷石膏库而言,40 °C 以上的溶解度基本上没有太大的工程意义。

5 渗透特性

由于磷石膏的主要成分是二水石膏,由图 4 可知,磷石膏有一定的溶解度,笔者曾尝试用蒸馏水进行渗透试验,但所测得的渗透系数的结果很紊乱,且渗透系数明显的偏离实际,其差别可能达到两个数量级。究其原因,主要是因为磷石膏的溶解特性造成的,由于用水进行测定磷石膏的渗透系数时,水在渗透磷石膏的过程中,溶解了一部分磷石膏,其过水通道随着时间的推移而不断扩展,造成测定的渗透系数比实际的渗透系数偏大,且不稳定。这种现象也从一个方面说明了解磷石膏溶解特性的重要性。所以在室内试验测定磷石膏的渗透系数时一定要使用室温下的饱和磷石膏溶液代替蒸馏水进行测定,图 5 为测定磷石膏渗透系数的试验系统,渗透仪器及容器中的液体均为室温下的饱和磷石膏溶液。方法为采用磷石膏样适量置于蒸馏水中,经过充分搅拌,放置一段时间,然后将上部的澄清溶液倒出,经过滤纸过滤。按上述要求进行的渗透试验测定该磷石膏库的磷石膏的垂直渗透系数范围是 $4.64 \times 10^{-4} \sim 1.38 \times 10^{-5}$ cm/s, 平均值 $K_v = 1.3 \times 10^{-4}$ cm/s, 水平渗透系数范围是 $1.13 \times 10^{-4} \sim 3.31 \times 10^{-5}$ cm/s, 平均值 $K_h = 6.0 \times 10^{-5}$ cm/s。总体而言,磷石膏库的垂直渗透系数要大于水平渗透系数,即层间的渗透性大于水平层内的渗透性,对于一般的金属尾矿,其水平方向的渗透系数要明显大于垂直方向的渗透系数,而磷石膏与尾矿的渗透特性的特点是不同的。该磷石膏库的磷石膏的渗透试验数据可以作为国内其他磷矿的磷石膏渗透系数的参考。

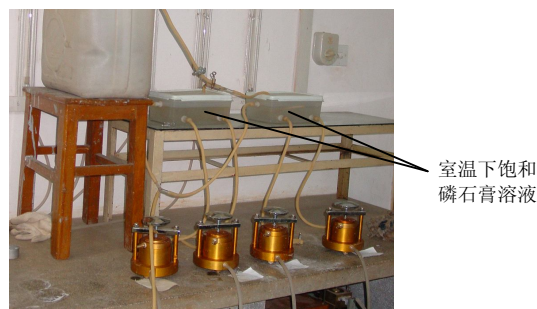


图5 测渗透系数试验

Fig.5 Test for coefficient of permeability

6 力学特性

磷石膏坝稳定性分析的可靠程度主要取决于磷石膏材料的强度指标的精确程度, 获得精确的力学性质指标是非常关键的。为了取得可靠的稳定性分析的计算力学参数, 进行了大量的直接固结快剪试验和三轴剪切试验。

三轴剪切试验采用圆柱型试样, 尺寸为直径 39.1 mm, 高度 80 mm。先抽气, 而后施加反压使其饱和, 然后在应变控制式三轴仪上进行剪切试验。前面已经提到了磷石膏是一种很容易液化的材料, 所以在切样时动作一定要轻柔, 应尽量避免或尽可能减少对其扰动。

三轴试验中有一点和做渗透试验相类似, 就是三轴仪上使用的水要换成饱和磷石膏溶液, 否则在固结阶段磷石膏样的力学特性可能会因为溶解特性而受到影响, 从而很难得到正确可信的力学参数。按照以上要求进行了数组三轴剪切试验, 其典型的试验结果如图 6~8 所示。图 6 为磷石膏固结不排水三轴试验的典型应变-应力关系曲线。从图 6 可以看出, 主应力差随着应变的发展不断上升, 当上升到一定程度时达到其峰值, 此后, 应变继续增加, 但主应力差却随着应变的增加而缓慢下降, 且其变化趋于平缓。

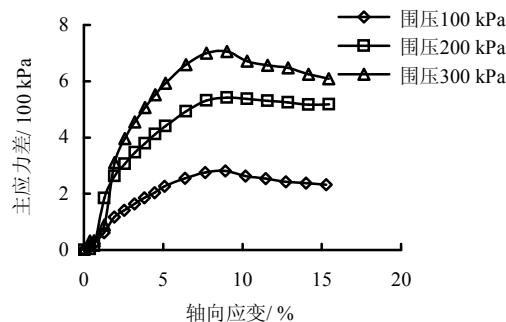


图 6 应变-应力关系曲线
Fig.6 Strain-stress curve

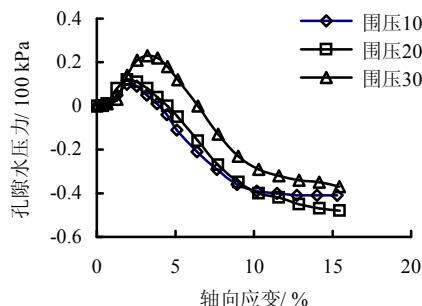


图 7 应变-孔压关系曲线
Fig.7 Axial strain-pore water pressure curve

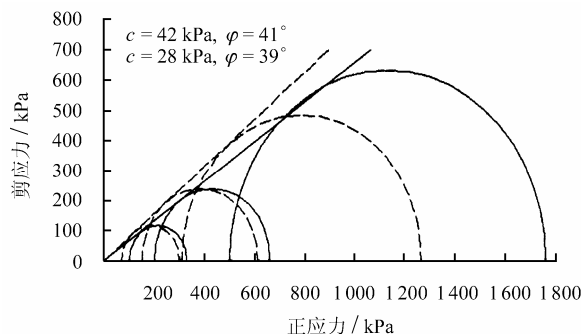


图 8 摩尔-库仑强度包线 (虚线表示有效应力)
Fig.8 Mohr-Coulomb strength envelopes
(dashed represents effective stress)

磷石膏材料是一种应变软化材料, 由图 6 可知, 当材料发生剪切破坏时, 其强度慢慢下降, 并趋于残余强度。比较各围压下的应力-应变曲线可知, 不同的围压下, 其破坏几乎都发生在轴向应变达到 8% 时, 所以围压对磷石膏材料的破坏变形值的影响不敏感。

图 7 为相应的磷石膏固结不排水三轴试验的应变-孔压关系曲线。从图可看出, 孔隙水压力在试验初始阶段上升较快, 在轴向应变达到 2%~5% 时, 孔隙水压力达到峰值, 这一阶段磷石膏试样处于剪缩状态下, 随着轴向应变的增加, 试样的体积压缩不断增大, 孔压不断增高。在达到峰值后开始下降, 直到围压再次降到负值时, 试样开始进入破坏阶段, 破坏发生的过程磷石膏试样继续发生膨胀, 孔隙水压力持续为负压, 且负孔隙水压力值慢慢增大, 直到破坏过程完成后, 负孔压慢慢趋向稳定, 同时磷石膏材料的剪胀特性也慢慢结束。从图 7 还可以看出, 围压越大, 其剪缩过程就越长。从应变-孔压曲线总的过程来看, 磷石膏的剪胀过程要远长于其剪缩过程, 其剪缩过程只是发生在应变较小的阶段, 所以可以认为, 磷石膏材料具有明显的剪胀特性。文献 [3~5] 的研究表明: 一般尾矿材料的剪胀性很小, 甚至根本不发生剪胀。

比较磷石膏材料的应变-应力曲线和应变-孔压曲线可以看出, 当磷石膏试样的孔压值上升到峰值以后, 材料的主应力差继续大幅攀升。而一般尾矿材料在固结不排水三轴剪切试验时, 当孔压达到峰值开始下降时, 试样此时已经开始进入破坏阶段, 主应力差值会开始出现峰值而后缓慢下降。对于没有明显剪切破坏发生的尾矿材料, 主应力差则是缓慢上升至峰值。磷石膏试样的破坏一般都发生在孔隙水压力产生负压以后, 且负压值比较明显, 磷石

膏的这一特性有点类似于强超固结土的特性,但尾矿材料这种人工材料是很少具有这种特性的。如果利用磷石膏材料的这种破坏前的明显剪胀性机制进行孔压监测,有望实现磷石膏坝破坏的提前预报,且可以通过孔压变化了解坝体的安全程度,该研究对于磷石膏高坝的安全性是非常有意义的,也是笔者的后续研究工作之一。

图 8 是典型的磷石膏摩尔-库仑强度包线,其中虚线表示有效应力摩尔圆和强度包线。对于一般材料,有效应力的摩尔圆在总应力摩尔圆的左侧,而磷石膏材料的有效应力的摩尔圆在总应力摩尔圆的右侧,这是由于磷石膏材料具有明显的剪胀性以及试样的剪切破坏基本上都发生在负孔压时。

7 结 论

(1) 通过室内试验研究了磷石膏的温度与含水率的关系、烘烤时间与含水率的关系,根据试验结果,笔者推荐两种测定磷石膏含水率的方法,并将两种测试结果进行了比较,两种结果比较接近。

(2) 从溶解度与温度关系试验可知,磷石膏具有一定溶解度,且溶解度随着温度的升高而降低。磷石膏的这种溶解特性将会影响磷石膏材料的渗透试验和三轴剪切试验,所以在进行渗透试验和三轴剪切试验时要使用室温条件下的饱和磷石膏溶液替代水。

(3) 磷石膏坝渗透特性不同于一般的尾矿坝,磷石膏坝在垂直方向的渗透系数要大于其在水平方向的渗透系数。

(4) 磷石膏是一种具有明显剪胀性的材料,在剪切条件下其破坏发生在孔隙水压力为负的情况下,且其破坏时的应变受围压的影响不明显。

(5) 磷石膏还具有一定的结晶特性和一定的化学反应,其具体特性还需进一步研究。另外,磷石膏的高压强度软化特性及其动力液化特性也都是磷石膏材料的力学特性的研究重点之一,目前相关的研究资料还很鲜见,而在这些方面的研究可以解决磷石膏高坝的稳定性问题以及地震区的磷石膏坝的稳定性问题。

参 考 文 献

- [1] 姜洪义, 刘涛. 磷石膏颗粒级配、杂质分布对其性能影响的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(1): 28—30.
JIANG Hong-yi, LIU Tao. Study on the Influence of grading and impurity distribution for the properties of phosphogypsum[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2004, 26(1): 28—30.
- [2] 邓志拓. 磷石膏煅烧条件的研究[J]. 河北化工, 2003, (6): 49—51.
DENG Zhi-tuo. Study on the calcining conditions for phosphogypsum calcining[J]. **Hebei Chemical Engineering and Industry**, 2003, (6): 49—51.
- [3] 保华富, 张光科, 龚涛. 尾矿料的物理力学特性试验研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1999, 3(5): 115—121.
BAO Hua-fu, ZHANG Guang-ke, GONG Tao. The test study of physico-mechanical properties for tailings[J]. **Journal of Sichuan Union University (Engineering Science Edition)**, 1999, 3(5): 115—121.
- [4] 张超, 杨春和, 孔令伟. 某铜矿尾矿坝的尾矿砂力学特性研究及该坝的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 858—862.
ZHANG Chao, YANG Chun-he, KONG Ling-wei. Study on mechanical characteristics of tailing dam of a copper mine and stability analysis of tailing dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 858—862.
- [5] 张超, 杨春和, 徐卫亚. 尾矿坝稳定性的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 706—1 711.
ZHANG Chao, YANG Chun-he, XU Wei-ya. Reliability analysis of tailings dam stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1 706—1 711.