



膨胀岩与巷道稳定

杨 庆 编著

冶金工业出版社



ISBN 7-5024-1708-7



9 787502 417086 >

ISBN 7-5024-1708-7

TD·259 定价 6.00 元

膨胀岩与巷道稳定

杨 庆 编著

冶金工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

膨胀岩与巷道稳定/杨庆编著. —北京: 冶金工业出版社,

1995.6

ISBN 7-5024-1708-7

I. 膨… II 杨… III. 岩体应力-巷道-压力-稳定性 IV.

TD322

中国版本图书馆CIP数据核字 (95) 第05099号

出版人 舞启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39号, 邮编100009)

测绘出版社印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1995年5月第1版, 1995年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/32: 3.75印张; 82千字; 114页; 1—1000册

定价: 6.00元

前 言

膨胀岩的工程灾害是个极为复杂且具有重大经济性工程意义的课题。如何才能做到经济有效地在这类围岩中建造巷道并维持其稳定性，一直是困扰着广大岩石力学和工程地质工作者的一个难题。其原因之一是当岩体受到扰动，特别是当湿度条件变化时，膨胀岩的性状常发生巨大的变化，产生体积膨胀，对其中的构筑物产生巨大的膨胀压力，严重影响着工程的稳定性；另一个更重要的原因是目前人们对膨胀岩膨胀的力学机制的认识还不太完善。膨胀岩灾害所造成的经济损失巨大，已引起国内外的足够重视。作者在广泛查阅、研究了国内外有关资料的基础上，对这一课题进行了深入的研究工作。

本书是作者根据近几年对这一课题的研究成果整理而成的。主要内容包括六章：第一章绪论，主要介绍膨胀岩课题研究的意义、国内外概况；第二章为室内膨胀试验，重点介绍了三轴膨胀试验方法；第三章介绍了作者根据三轴膨胀试验结果，对 Einstein 和 Wittke 的三维膨胀假说进行的分析以及膨胀本构关系的建立；第四章为膨胀性围岩中巷道地压显限规律的研究方法，包括模型模拟试验和有限元数值模拟方法；第五章介绍了巷道的数值模拟分析结果及巷道膨胀地压的显限规律；第六章介绍了国内外对巷道底鼓治理的方法，并对某矿巷道破坏实例进行了初步分析。

由于膨胀岩这一研究对象的复杂性，本人的工作尚有不完善之处，可以说是为了更好地理解膨胀岩的膨胀机制和其

ABF04/03

中巷道行为迈出的第一步。本书中的观点和方法如能被读者所借鉴、为膨胀岩课题研究的进一步发展起到抛砖引玉的作用，本人将不胜荣幸！

在本书出版之际，作者感谢廖国华教授和雷化南教授将作者引入了既有趣又富于挑战性的膨胀岩课题这一研究领域！感谢吴顺川同志对本书中的试验工作给予的大力帮助！本书的部分内容系冶金部教育司有偿与资助项目。

由于作者水平有限，书中难免会有不少错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

1995年1月于包头

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 膨胀岩研究的意义	(1)
第二节 国内外研究概况	(3)
第二章 室内膨胀试验	(16)
第一节 概述	(16)
第二节 试样采取和试件制备	(17)
第三节 侧向约束条件下的膨胀试验方法	(21)
第四节 三轴膨胀试验设计	(22)
第三章 试验结果分析及膨胀本构关系的建立	(26)
第一节 引言	(29)
第二节 试验结果分析	(31)
第三节 膨胀本构关系的建立	(50)
第四章 膨胀性围岩中巷道地压显现规律的研究	
方法	(55)
第一节 模拟膨胀地压的有限单元法	(55)
第二节 模型试验模拟方法	(67)
第五章 巷道支护的数值模拟分析	(71)
第一节 分析方案及基本参数	(71)
第二节 各种方案的模拟结果分析	(73)
第三节 膨胀性围岩中巷道开挖与支护的建议和措施	(86)
第六章 巷道底鼓破坏分析实例	(90)
第一节 国内外治理巷道底鼓的主要方法	(90)
第二节 梅山铁矿反拱破坏段的初步分析及对重新设计方 案的几点建议	(101)
第三节 小结	(106)
参考文献	(107)

第一章 绪 论

第一节 膨胀岩研究的意义

膨胀岩是指与水发生物理化学反应，引起岩石含水量随时间而增高且体积发生膨胀的一类岩石，属于易风化和软化的软弱岩石^{[1][2]}。膨胀岩具有较显著膨胀性能，当岩体受到扰动，特别是当湿度条件变化时，膨胀岩的性状常发生巨大变化，产生体积膨胀，对其中的构筑物产生巨大的膨胀压力，严重影响工程的稳定性，是进行各类工程建设时经常遇到且又难于支护和处理的一类特殊岩石。在工程实践中表现为围岩随时间的推移而大量向洞室内塑性挤出或底板大量隆起，不但给工程的正常使用和维护带来困难，更为严重的是在许多场合将导致洞室支护在持续发展而量值很大的膨胀压力作用下，产生裂损或破坏^[3]。

膨胀岩在世界范围内分布极广，迄今为止已发现存在膨胀岩土的国家达 40 余个，遍及五大洲^[4]。我国是膨胀岩土分布最广的国家之一。由于膨胀岩的显著胀缩特性，使在这些地区的各类工程建设经常遭受破坏。Grob^[5]报导了瑞士的一些公路隧道因膨胀而引起的底鼓破坏情况，最大底鼓量在几个月内达 90cm。在美国，每年因膨胀岩土对房屋、建筑、公路和管道的破坏所造成的经济损失高达 23 亿美元，是由于台风、洪水、地震灾害所造成经济损失总和的 2 倍多^{[6][7]}。在苏丹，存在潜在膨胀岩土的地区占整个国土面积的三分之一多，位于这些地区的水利灌溉系统、下水管、建筑物、道路以及其它结构物经常遭受到严重的破坏，估计每

年经济损失已超过了六百万美元。在挪威,隧道投入运营后,隧道额外加固费用有 75 % 与膨胀粘土有关^[8]。类似这种现象在德国、瑞典、英国等国家也常有发生^{[9]~[12]}。在我国的矿山、铁路和水利工程等部门的工程项目也常有这类灾害发生^{[13]~[16]},甚至导致了某些工程的下马^[17],造成了重大的经济损失。如沈北矿区主要巷道位于膨胀性软弱围岩中,建矿初期采用直墙半圆或圆弧形混凝土衬砌,砌筑 3~5 个月后几乎全部破坏。60 年代初,由北京煤炭科学院等七家单位进行了大量的巷道支护试验,先后采用了十多种支护形式,最终得到了以料石圆衬、短段掘砌为主的支护方案,初步满足了安全与生产的要求。近年来,由于采动的影响,使料石圆衬仍大量破坏,不得不再次进行支护的研究工作,影响了生产的正常进行。南方几条主要铁路干线膨胀岩土地区,路基下沉、基床翻浆冒泥、滑坡等灾害都十分普遍。仅据襄渝线施工决算统计,由于膨胀岩在施工期间造成的破坏,竟使路基每公里造价增加了 91.64 万元,实际投资约为设计造价的三倍。初步估计,我国每年因膨胀岩土造成各类工程建筑物破坏的损失,大约在数亿元以上^[16]。

造成这些灾害的主要原因不仅是因为人们事先不知它们的分布,而且对膨胀岩膨胀的力学机制的认识还不完全清楚而造成的。近 40 年特别是最近几年,国际上在土力学、岩石力学和工程地质学等领域十分重视对这一课题的研究和探索,国际岩石力学学会还专门成立了膨胀岩专业委员会,至今已召开了五届国际膨胀土学术会议。1981 年国际岩石力学学会在东京召开的“国际软岩会议”专门将膨胀岩列为一个专题来讨论。近十年来,膨胀岩课题已经引起我国岩土工程界的重视,1988 年工程地质专业委员会召开了首次“膨

胀岩学术讨论会”。这些会议促进了膨胀岩课题研究的进展，但如何准确地预测和防止由于膨胀引起的灾害，仍未能完善地解决^[18]。

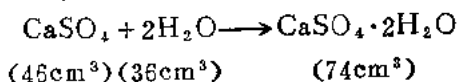
综上所述，在膨胀性围岩中开挖和维护坑硐已成为岩石开挖工程中存在的突出难题之一。随着我国工程建设事业的蓬勃发展，必将会遇到更多的膨胀岩课题，因此开展膨胀岩课题的研究在理论和实际两方面都具有重大意义。

第二节 国内外研究概况

经过几十年各国学者的研究和探索，在膨胀岩的膨胀机理、实验方法及数值分析等方面都取得了一定的成果，积累了一些经验。

1. 膨胀岩的膨胀机理和影响因素

工程中所遇到的膨胀性岩石有两种：一类是化学转化膨胀岩石，如硬石膏(CaSO_4)，无水芒硝(Na_2SO_4)和钙芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$)等。它们因吸水变相和结晶而引起体积的增大。例如硬石膏吸水^[19]：



体积增加量为

$$\frac{74 - 46}{46} = 61\%$$

石膏所处温度在38°C以下时，是相当稳定的，故这种膨胀被认为是不可逆的^[20]。这类岩石是在干旱半干旱气候条件下，在封闭半封闭的蒸发盆地中所形成的含石膏和芒硝的沉积物，经过成岩脱水作用而形成的^[21]。

目前，关于石膏的膨胀过程及膨胀机理的认识尚不很清

楚。Holliday^[23]研究的结果表明,岩石在石膏化过程中并无体积增加。另一些学者所做的长期室内试验说明,纯硬石膏吸水时的体积膨胀应变比硬石膏含量为50%的岩石的体积膨胀应变要小^[23],目前在理论上还很难解释产生这种现象的原因。

另一类膨胀岩是含有强亲水粘土矿物的粘土类岩。强亲水矿物主要有蒙脱石、高岭石和伊利石等,尤以蒙脱石最为显著。这几类矿物由于其晶体结构特殊,能将水分子吸附在晶层表面和晶层内^[24]。现在知道,未浸水粘土矿物的晶层间距为29Å,浸水后则变为33Å,引起体积增加近14%^[19]。这类矿物失水后会收缩,膨胀是可逆的。包含这类矿物的岩石有:泥岩、页岩、粘土岩、片岩、凝灰岩、蛇纹岩、玢岩等^[25]。本书仅对这一类膨胀岩的膨胀特性进行了论述。

影响岩石膨胀的主要因素有:

(1) 环境湿度的历史^[26]:岩石的膨胀应变与初始含水量近似呈线性关系,初始含水量越小,其膨胀应变就越大。Huang^[18]通过侧向约束试验,得出了最大膨胀压力与相对湿度RH和湿度活性指数 I_{RH} (Moisture Activity Index)的关系模型,并绘制了一系列湿度和膨胀压力的关系曲线,用以预测最大的膨胀压力。

其模型为:

$$P_{max} = 0.0686RH - 0.0008RH^2 + 1.7423I_{RH} - 0.0132I_{RH}^2 - 0.0145RH \times I_{RH} + 0.9594$$

式中 P_{max} ——最大膨胀压力(MPa)。

事实上,膨胀岩吸水膨胀是非常复杂的。可以描述成是由两个相互联系的过程所组成,在第一过程中,水被膨胀岩

土的空隙吸收后,在土的骨架中就会产生负的有效应力,导致体积发生膨胀,此时的膨胀变形发展进程同吸水过程是同步的。在这一过程中,由于岩土微粒之间水膜的变厚,也导致了微粒的机械膨胀,这种体积膨胀量直接取决于参与该过程中水的体积。在第二过程中,水被矿物集合体所吸收导致体积发生膨胀,这是一物理化学过程,在这个过程中,膨胀的进程是滞后于吸水过程的^[65]。

(2)围岩的应力状态:膨胀性岩石吸水膨胀过程与其所受的应力状态密切相关。许多学者通过膨胀试验得出了轴向膨胀应变与轴向压力的对数之间呈线性关系^{[24][27]}。1972年,Einstein指出围岩膨胀是由于应力第一不变量的变化所引起的^[28]。

(3)岩石的结构:岩石的内部结构以及胶结状态对其膨胀性态有相当大的影响^[28]。对无胶结的粘土岩,风干后再吸水会发生膨胀崩解,其体积可近十倍地增加。胶结情况对膨胀过程也有影响,如有钙质胶结的粘土砂岩,测定其最大膨胀压力的稳定时间过程需要十天左右,而无钙质胶结的只需3天^[29]。粒径小于0.1mm的硬石膏的膨胀系数为岩样相应值的2倍以上^[24]。Brackley^[30]认为在未饱和粘土中存在土颗粒团,这种颗粒团以及它们之间的空隙对膨胀特性有很大影响。陈宗基^[31]得出了膨胀应变与比表面积参数及用于表征粘土矿物活性的参数之间的关系。一般说来,阳离子代换量和比表面积较高的岩土,胀缩性能比较强烈^[32]。

(4)岩石的干容重及孔隙率:岩石的初始干燥密度对其膨胀有很大影响。在含水量一定的条件下,体积膨胀量随其干容重的增大而增加。Robertson通过试验建立了孔隙率与膨胀压力的关系,孔隙率越小,膨胀压力越大^[33]。

从影响岩石膨胀的主要因素可知,工程上膨胀性围岩发生膨胀是由于对围岩的湿度和结构扰动、以及因开挖造成应力降低所引起的。

2. 膨胀岩的室内试验

实验室试验(确定膨胀参数、导出膨胀本构)是在膨胀性围岩中进行结构设计和分析的基础。

在1954年,Holtz和Gibbs^[34]首先研究了膨胀性粘土的工程性质,他们做了一系列膨胀岩试验研究,如自由膨胀试验和有侧向约束条件下的膨胀试验。1970年,Huder-Amberg采用常规固结仪对泥灰岩进行了单轴膨胀应变试验,发现轴向膨胀应变与轴向膨胀压力的对数呈线性关系^[35]。

Huder-Amberg的这一试验结果得到了世界范围的公认,近20年来人们一直沿用这一试验方法及结果,试验仪器由固结仪发展为膨胀仪(Oedometer)。学者们针对影响膨胀特性的各种参数做了大量试验,主要有初始含水量、孔隙率、干容重、胶结情况等^{[19]、[36-39]、[47]}。这段时间的试验可归纳为以下三种主要类型。

(1) 膨胀压力试验:目的在于测量使试件在侧向约束条件下浸入水中时,保持试件高度不变的最大轴向压力。实验方法有平衡加压法、膨胀加压法、加压膨胀法^[40]。

(2) 膨胀应变试验:测量岩石试件浸入水中时的非约束最大自由轴向膨胀应变。

(3) 膨胀应变和轴向压力的关系。

1970年,Komornik和Zeitlen^[45]将固结仪的环刀改用0.03cm不锈钢片制成的柔性环刀,在环刀外侧缠绕了3根应变电阻丝,测出了径向膨胀应变,并由环刀的弹性模量

求出膨胀应力，获得了许多有价值的成果。环刀结构示意图如图 1-1 所示。1984 年，Franklin^[41] 在膨胀仪的柔性环刀外侧贴电阻应变片，测得了径向膨胀应变和应力。1985 年，我国学者孙钧、李成江^[24] 也做了这类试验，环刀厚度为 0.1275 cm，可视为均匀薄壁圆环，取得了较好的试验结果。

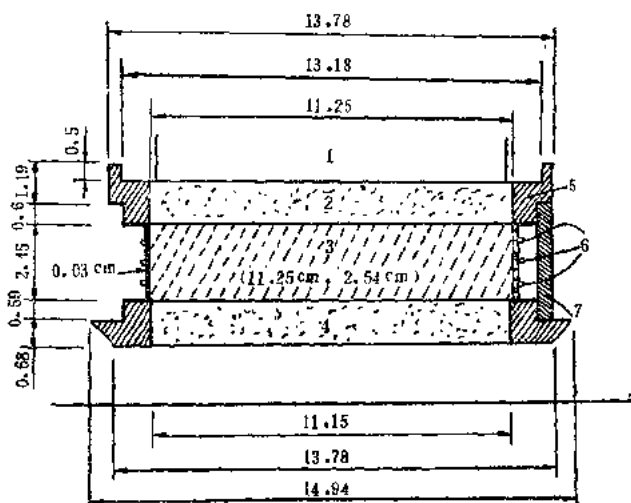


图 1-1 可测量径向膨胀应力的环刀示意图^[45]

1—加载圆盘；2—上透水石；3—试件；4—下透水石；5—环刀；
6—应变电阻丝；7—弧形支撑架

国际岩石力学学会膨胀岩专业委员会于 1989 年公布了“泥质膨胀岩试验的建议方法”^[42]，对测量最大轴向膨胀应变、轴向和径向自由膨胀应变，以及测量轴向膨胀应力与轴向膨胀应变关系的方法作了阐述，力图使之规范化，并提出应该继续开展实验室试验研究，特别是三维试验研究的观

点。1990年, Davison^[43]在常规固结仪试验的基础上, 发展了连续荷载膨胀试验方法, 使所测得的膨胀和固结参数更为准确。Lo^[44]描述了在单向和双向等压条件下, 同时测得三个正交方向上应变的新方法, 得出了在一主方向上施加压力, 不仅限制该方向的膨胀, 而且也限制了与其垂直方向上的膨胀应变的结论。

上面简要介绍的膨胀岩力学试验是一种宏观的试验。另外, 许多学者还从微观的角度出发, 来研究膨胀岩土的膨胀机理, 在此不作详细介绍, 仅将试验类型归结如下:

(1) 矿物分析: X射线测定; 电子显微镜扫描; 差热分析; 晶粒及组织的显微分析。

(2) 物理化学分析: 离子交换量; 比表面积测定; 化学分析, 特别是对力学性能起作用的胶接和补色剂 (Cementing and Coating) 进行化学分析^[31]。

3. 膨胀岩的本构关系

最典型的本构关系是由 Huder-Amberg 在实验室内用常规固结仪、对膨胀性泥灰岩的膨胀性态进行研究得出的经验公式^[35]:

$$\varepsilon = K \left(1 - \frac{\log \sigma}{\log \sigma_0} \right)$$

式中 ε —— 轴向膨胀应变;

σ_0 —— 最大膨胀应力;

σ —— 膨胀应力;

K —— $\sigma = 0.1 \text{ MPa}$ 时轴向膨胀应变。

在此基础上, Einstein (1972) 和 Wittke (1976) 提出了三维膨胀本构关系^[20]:

假定侧向应力为:

$$\sigma_z = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_x$$

则膨胀应变第一不变量和应力第一不变量的关系为:

$$\varepsilon_v = K \left[1 - \frac{\log \left(\sigma_v \frac{1-\mu}{1+\mu} \right)}{\log \left(\sigma_{vmax} \frac{1-\mu}{1+\mu} \right)} \right]$$

式中 ε_v —— 体积膨胀应变;

σ_v —— 第一应力不变量;

σ_{vmax} —— 最大体积膨胀应力;

μ —— 泊松比。

孙钧和李成江认为膨胀体积应变是第三应力不变量的函数^[24], 他们对在山东张家洼矿区所采岩样进行试验, 得出关系如下:

$$\varepsilon_v = 0.033805 - 0.002572 I_3$$

式中 ε_v —— 体积膨胀应变;

I_3 —— 第三应力不变量。

傅学敏、潘清莲借助于扫描电镜, 分析了膨胀过程中岩石内部颗粒结构的微观变化特征, 并做了大量的试验来研究膨胀过程的宏观显现规律。提出了用膨胀元件、弹性元件、粘性元件和塑性元件并联组合, 来模拟软岩膨胀的力学行为 (如图 1-2)。其本构模型为^[46]:

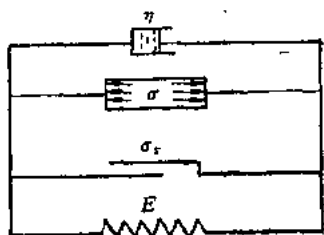


图1-2 岩石膨胀结构模型^[46]

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} + \sigma_r$$

式中 σ —— 某一时刻的膨胀应力;

ε ——某一时刻的膨胀应变,

σ_s ——材料的屈服极限应力,

E ——弹性模量,

η ——粘性系数。

并导出动变区(应力是时间的函数)和稳变区(应力为常量)的膨胀应变数学表达式:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \left[\dot{\sigma} t - \left(\sigma_s + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} \right) \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) \right]$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_s}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right)$$

陈宗基认为膨胀是物理化学和力学过程联合作用的结果, 其本构为^[31]:

$$e_v = 3\alpha H$$

$$H = H_0 \exp(\varphi/RT)$$

式中 e_v ——体积膨胀应变;

α ——取决于在膨胀过程中出露面的当时比表面积参数, 是一种力学因素的量度;

H ——用于粘土矿物之类膨胀活动性很强的物质参数;

φ ——激活能;

R ——气体常数;

T ——绝对温度。

一些学者从有效应力的观点出发, 把不饱和泥岩中产生的间隙空气压力和间隙水压力, 以及吸水膨胀压力总括起来用膨胀压力表示, 并把膨胀压力看作为内部应力。如果将岩石视为各向同性的均质体, 则关于土结构的有效应力理论对这类岩石也是适用的。有效应力 σ' 可以用全应力 σ 和膨胀