

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108044

赵文, 付文丽, 张建国, 等. 石膏质岩水化特性及矿物含量确定方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 175-182.

ZHAO Wen, FU Wenli, ZHANG Jianguo, *et al.* A study of the hydration characteristics and determination method of mineral content of gypsum rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 175-182.

石膏质岩水化特性及矿物含量确定方法研究

赵 文¹, 付文丽¹, 张建国², 程帅涛², 侯旭涛¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031;

2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 硬石膏和石膏的膨胀性和腐蚀性是石膏质岩隧道工程主要致害因素, 查明矿物成分、水化特性、硬石膏和石膏含量是评价石膏质岩工程危害的基础, 但目前尚缺乏快速简便的石膏质含量确定方法。通过测定硬石膏岩水化过程中的波速及水化深度, 分析了石膏质岩的水化特性; 通过对硬石膏、石膏、方解石、白云石不同配比混合物的热重分析, 提出了快速测定石膏质岩矿物含量的热重分析法。结果表明: (1) 石膏质岩矿物成分的鉴别建议采用热分析、X 射线衍射、红外光谱等方法相互印证; (2) 硬石膏岩水化缓慢, 标准尺寸试件的硬石膏岩完全水化为石膏岩约需 2 a; (3) 完整硬石膏岩在纯净水环境下水化速率约 3 mm/a, 若地下水环境富含 SO_4^{2-} , 硬石膏岩水化速率将增加。文章建立的石膏质岩矿物含量确定方法可以快速确定硬石膏和石膏的质量分数, 研究成果可为分析石膏质岩的工程危害提供参考。

关键词: 石膏质岩; 水化特征; 硬石膏; 热重分析; 水化速率

中图分类号: P574

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0175-08

A study of the hydration characteristics and determination method of mineral content of gypsum rock

ZHAO Wen¹, FU Wenli¹, ZHANG Jianguo², CHENG Shuitao², HOU Xutao¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan

610031, China; 2. China Railway Liuyuan Group Co. Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: Expansibility and corrosivity of anhydrite and gypsum are the main disease-causing factors in gypsum rock tunnel engineering. Investigation of the mineral compositions, hydration characteristics, and contents of anhydrite and gypsum is the basis for evaluating the engineering hazard of gypsum rock. However, there is a lack of quick and simple method to determine the content of gypsum. By measuring the wave velocity and hydration depth in the hydration process of anhydrite rocks, the hydration characteristics of gypsum rocks are analyzed. Through the thermogravimetric analysis of anhydrite, gypsum, calcite and dolomite mixtures with different proportions, a thermogravimetric analysis method for rapid determination of mineral content of gypsum rocks is proposed. The results show that (1) thermal analysis, X-ray diffraction and infrared spectroscopy are recommended for the identification of mineral components of gypsum rocks. (2) Hydration of anhydrite rocks is slow, and it takes about 2 years for anhydrite rocks of the standard size specimen to be fully hydrated into gypsum rocks. (3) The hydration rate of intact anhydrite in the pure water environment is about 3 mm/a. If the groundwater

收稿日期: 2021-08-15; 修订日期: 2021-12-02

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2034205)

第一作者: 赵文(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事边坡及特殊岩土工程研究。E-mail: wenzhao@swjtu.cn

environment is rich in SO_4^{2-} , the hydration rate of anhydrite will increase. The established method for determining the mineral content of gypsum rocks can quickly determine the contents of anhydrite and gypsum. The study results provide a reference for analyzing the engineering hazards of gypsum rocks.

Keywords: gypsum rock; hydration characteristics; anhydrite; thermogravimetric analysis; hydrating rate

我国华北、西南地区广泛分布着硬石膏岩、石膏岩、含膏碳酸岩、膏溶角砾岩、含膏泥岩等石膏质岩。石膏质岩具有膨胀性和腐蚀性等特殊工程性质,给隧道工程建设及运营带来极大隐患。成昆线百家岭隧道^[1-2]、瓦日铁路南吕梁山隧道^[3]、巴东县十字垭隧道^[4]、宜巴高速公路凉水井隧道^[5]等均穿越含石膏质岩地层,运营后陆续出现路(轨)面起拱变形、二衬边墙开裂、拱墙裂缝、施工缝渗水、边墙混凝土软化等病害。硬石膏水化膨胀和石膏质溶出腐蚀是石膏质岩隧道产生病害的主要原因,硬石膏水化膨胀更是具有滞后性、渐进性、隐蔽性的特点。石膏质岩工程病害防治一直是隧道工程界的难题。

国内外学者对石膏质岩的研究主要针对特殊工程性质及其工程危害。如魏玉峰等^[6]研究了第三系红层中石膏溶蚀对工程的影响;吴银亮^[7]研究了石膏岩溶蚀速率与水环境及溶蚀时间的关系;吴银亮等^[8]研究了石膏质岩析出离子对混凝土的劣化机制。石膏质溶出腐蚀对工程的影响,工程界学者已形成共识。对石膏岩膨胀特性的研究主要集中在硬石膏膨胀机理、膨胀性测试、膨胀本构模型等方面。如罗健^[9]通过现场监测分析了膨胀力与硬石膏水化条件的关系;吴银亮等^[8]研究了石膏岩重塑样膨胀力与初始干密度和吸水率的关系;陈钊等^[10]研究了不同湿度条件下硬石膏岩膨胀随时间的变化特性,建立了含时间效应的膨胀本构模型;吴建勋等^[11]在脱水石膏、硬石膏和石膏膨胀试验基础上研究了石膏质岩膨胀应力-应变模型;苏承东等^[12]研究了高温脱水对石膏岩强度的弱化作用;白冷等^[13]研究了硬石膏水化过程,揭示了硬石膏水化缓慢的内在原因;Yilmaz等^[14]、Yilmaz^[15]研究了石膏岩含水率对其强度与变形特性的影响;吴建勋^[16]研究了水压对硬石膏膨胀性的影响;Alonso等^[17]分析了硬石膏长期水化膨胀对 Lilla 隧道变形的影响;Oldecop等^[18]结合硬石膏岩水化机理,提出了硬石膏岩水化反应微观膨胀理论。然而对于石膏岩的膨胀特性,不同学者的研究结果离散性极大,膨胀力可能相差1~2个数量级。膨胀特性把控不准可能导致工程上的误判。膨胀性数据离散除了试样及试验条件的差别,其根本原因在于硬石膏水化缓慢,完全

水化膨胀时间长,常规膨胀性试验中硬石膏未能完全水化释放全部膨胀力;此外,试验前可能并未测试石膏质岩试样的水化程度,未查明引起膨胀的关键矿物(硬石膏)的含量。

石膏质岩的膨胀潜势取决于硬石膏的含量。查明石膏质岩水化特征及矿物含量是评价石膏质岩工程危害性的基础。但目前尚缺乏快速简便的石膏质含量确定方法。论文在实践基础上,推荐了石膏质岩矿物成分鉴定方法;通过测定纯硬石膏岩水化过程中波速及水化深度,研究了硬石膏岩的水化特性;通过硬石膏、石膏、方解石、白云石不同配比混合物热重分析,获得快速测定石膏质岩中矿物质量分数的热重分析法,为正确认识和评估石膏质岩的工程危害提供依据。

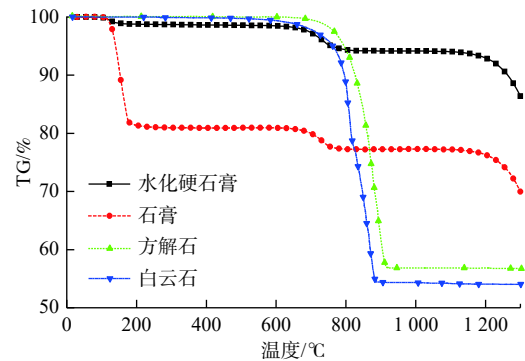
1 石膏质岩矿物成分鉴别

石膏质岩常与灰岩、白云岩等化学岩类共生,野外很难区分^[8]。石膏质岩包含硬石膏、石膏、方解石、白云石、黏土矿物等矿物成分。通过简单的化学试剂(稀盐酸和镁试剂)可以鉴定岩石是否含方解石和白云石,但是否含石膏或硬石膏,则需要借助其他鉴定方法。通常用于矿物鉴定的方法有X-射线衍射、热分析、薄片镜下分析、红外光谱分析、扫描电镜图像分析、电子探针等。对于石膏质岩矿物成分的鉴别,推荐采用以下几种方法。

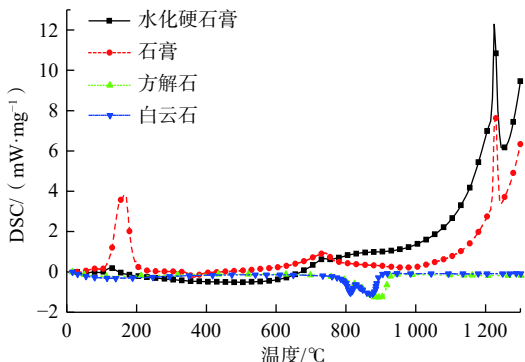
1.1 热分析

矿物在受热过程中,会发生晶型转化、脱水、蒸发、分解、氧化等物理化学变化。最常用的热分析方法有热重量法(Thermal Gravity, TG)、差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)等。图1为典型的石膏质岩矿物的热分析曲线。图1(a)为TG曲线,即矿物样品质量与温度的关系;图1(b)为DSC曲线,即矿物样品吸热或放热的速率与温度的关系。如图1(a)所示,石膏在168℃左右脱水,质量约降低19.04%,水化硬石膏在168℃左右时质量约降低2%;硬石膏在600~800℃左右脱水,质量降低且呈阶梯状。白云石和方解石在600~700℃脱水。如图1(b)所示,在持续增温的环境下,石膏在168℃和210℃

左右脱水出现 2 个吸热强峰,在 720 °C 左右出现吸热次强峰;硬石膏在 1280 °C 左右出现吸热强峰;白云石和方解石在 800 ~ 900 °C 左右出现 2 个放热峰。因此可以根据不同矿物 DSC 曲线出现峰值的温度及峰值强弱、TG 曲线质量降低幅度及质量降低时的温度范围来鉴定矿物成分^[19-20]。



(a) 典型石膏质岩矿物TG曲线



(b) 典型石膏质岩矿物DSC曲线

图 1 石膏质岩矿物热分析图谱

Fig. 1 Thermal analysis atlas of gypsum rock minerals

1.2 X 射线衍射分析

晶体由原子规则排列成的晶胞组成,不同原子散射的 X 射线相互干涉,在某些特殊方向上产生强 X 射线衍射,衍射线在空间分布的方位和强度与晶体结构密切相关,可以据此判定矿物类型^[21]。表 1 为典型石膏质岩主要矿物的衍射峰角,图 2 为石膏和硬石膏的 X 射线衍射图谱。

表 1 典型石膏质岩矿物的衍射峰角

Table 1 Diffraction peak angle of the typical gypsum rock minerals

矿物类型	最强峰/(°)	强峰/(°)	次强峰/(°)
石膏	12	28	22
硬石膏	25	34	38
白云石	32	43	53
方解石	28	46	39

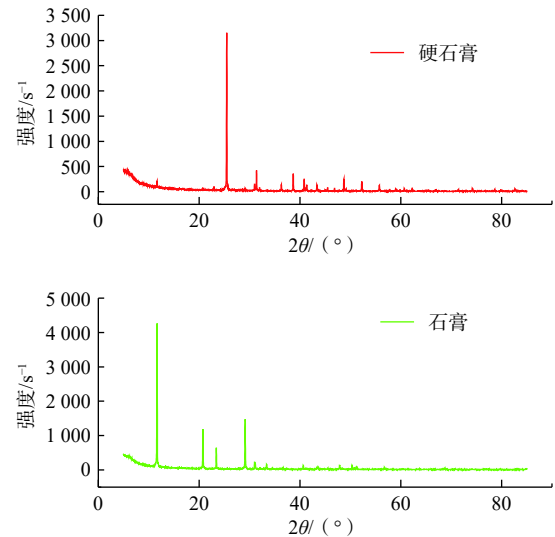


图 2 石膏-硬石膏 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of gypsum and anhydrite

1.3 红外光谱分析

红外光谱分析是利用红外光谱对物质分子进行分析和鉴定。每种分子都有其组成和结构决定的独有的红外吸收光谱,可以据此对分子进行结构分析和鉴定^[22]。图 3 为石膏和硬石膏的红外光谱图。

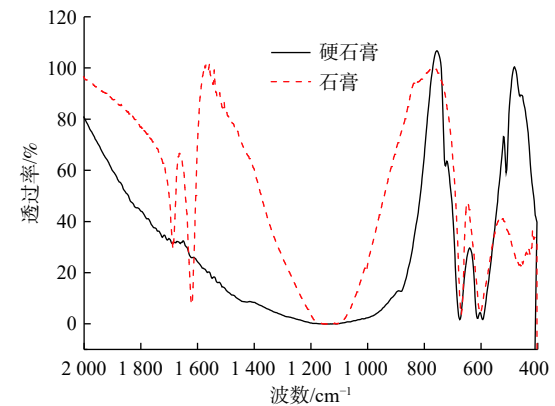


图 3 石膏-硬石膏红外光谱图

Fig. 3 Infrared spectrum of gypsum and anhydrite

石膏质岩主要矿物在热分析、X 射线衍射分析、红外光谱分析时具有明显的区别特征,因此可以采用上述方法鉴定石膏质岩的矿物成分,特别是石膏和硬石膏矿物。由于石膏质岩可能对工程建设造成极大隐患,在鉴定石膏质岩矿物成分时,建议在上述方法中至少选用 2 种方法进行鉴定以便相互印证。

2 石膏质岩水化时间

石膏质岩隧道病害的发生往往具有滞后性、渐进性和隐蔽性等特点,其原因在于硬石膏水化速率缓

慢^[7]。硬石膏岩水化速率随环境水、围岩应力及温度而变。试验通过硬石膏岩水化过程中的波速测试来研究硬石膏岩的水化程度。

将纯硬石膏岩制成20个标准直径50 mm、高100 mm的圆柱试样,编1—20号,如图4(a)所示;然后将其静置于纯净水中进行浸泡,模拟地下水对天然状态下硬石膏岩水化反应的影响。每隔30 d对试样进行一次波速测试,分析水化硬石膏岩波速的变化。波速测试装置如图4(b)所示,采用非受力状态下的直透法进行波速测试,其方法为:将试件置于压力架上,换能器置于试件轴线的两端;对换能器施加0.05 MPa的恒定压力使换能器与试样密切接触,耦合剂采用凡士林,通过测试声波走时及岩样长度换算波速。



(a) 试验样品

(b) 波速测试装置

图4 波速测试

Fig. 4 Wave velocity test

硬石膏浸泡水化试验持续进行了180 d,共进行了7次波速测试,每次测试结果取平均值进行分析。由于硬石膏岩波速大于石膏岩,硬石膏水化成石膏的程度越高,波速越低,因此可以采用波速保持率来间接表达硬石膏岩的水化程度(图5)。试验结果表明,硬石膏岩试样在水中浸泡后,波速随水化时间逐渐降低,180 d后衰减到82%左右。说明硬石膏岩在水的作用下持续发生水化反应,部分转化为石膏岩或水化

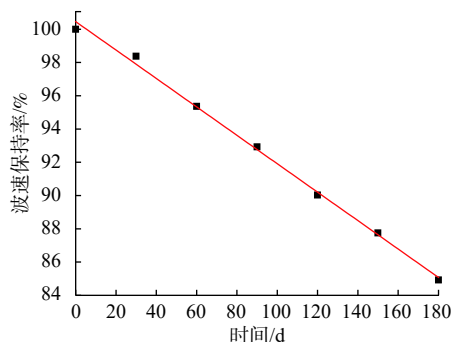


图5 波速保持率与水化时间关系

Fig. 5 Relationship between wave velocity retention and hydration time

硬石膏岩。

为了解硬石膏岩和石膏岩的波速特征,在南吕梁山隧道采取硬石膏岩和石膏岩,分别制成标准试件各5件。测得硬石膏岩平均波速为6 200 m/s,石膏岩平均波速为2 300 m/s,因此认为当硬石膏岩完全水化为石膏岩时,波速约衰减到硬石膏岩的37%。

根据图5可拟合得到波速保持率与时间关系曲线以推测硬石膏岩完全水化所需时间:

$$y = -0.0881x + 100.8 \quad (1)$$

式中: x ——水化时间/d;

y ——波速保持率($y \geq 37\%$)。

由式(1)可得,理想状态下硬石膏岩在纯净水中完全水化为石膏岩(波速衰减到37%)所需时间为724 d(约2 a)。该试验中样品较小且持续供水,硬石膏岩水化较充分。而实际工程中硬石膏岩完全水化所需时间可能更长,原因在于受季节影响可能有时无水或者水难以进入致密岩体内部。多数石膏质岩隧道运营后3~5 a后逐渐产生病害^[9,23],也证明了硬石膏水化缓慢。

3 硬石膏岩水化速率

将硬石膏岩切割成2块边长为200 mm的立方体试样(图6),分别以20 mm间距将岩块由上至下分为1~10层。设计2种水环境的对照试验,分别是纯净水和3%的 NaHSO_4 溶液。将2块岩样分别置于这2种水环境中浸泡,每30 d在试样表面取样,为避免取样后的干扰,按由上及下分层顺序取样,即第一次在第一层取样,第二次在第二层取样,以此类推。在每一层中每0.1 mm深度刮取一份粉末样。采用红外光谱法测试粉末样矿物成分,由此确定硬石膏水化深度。



(a) 纯净水浸泡试样

(b) NaHSO_4 溶液浸泡试样

图6 硬石膏岩块样

Fig. 6 Anhydrite sample

2块试样共浸泡了240 d,对试样进行了8次取样测试,测试结果见表2和图7。

无论是纯净水还是 NaHSO_4 溶液浸泡环境,硬石

表 2 硬石膏水化深度
Table 2 Hydration depth of anhydrite

浸泡时间/d	30	60	90	120	150	180	210	240
纯净水/mm	0.5	1.0	1.6	1.9	2.3	2.5	2.6	2.7
NaHSO ₄ /mm	1.5	2.9	4.3	5.5	6.2	6.7	7.0	7.2

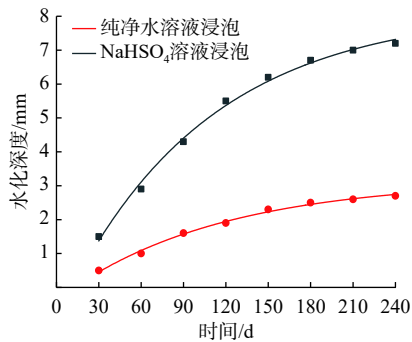


图 7 硬石膏岩水化深度与时间关系
Fig. 7 Relationship between hydration depth and time of anhydrite rocks

膏岩水化深度随时间均呈对数增长关系(图 7)。随着水化时间的增长,水化深度逐渐增大,但增长速率逐渐变缓。这是由于试验刚开始时硬石膏岩与水接触的比表面积较大,水化反应剧烈,水化速率快;而水化反应在岩体内部进行时,由于岩体致密,裂隙发育少,水进入内部困难,水化速率逐渐降低。在纯净水环境中,硬石膏水化速率约 3.0 mm/a;在 NaHSO₄ 溶液浸泡环境中,其水化速率明显高于纯净水浸泡环境,约 8.0 mm/a,说明富含 SO₄²⁻ 环境加速了水化反应。

4 石膏质岩矿物含量确定

硬石膏和石膏是石膏质岩产生工程危害的关键矿物成分,硬石膏的含量对正确评价石膏质岩的膨胀潜势至关重要,因此判别石膏质岩矿物含量是评价工程危害的基础。传统的石膏质岩矿物含量判别是通过测量石膏质岩中的结晶水含水率来换算石膏的质量分数^[8]。将石膏岩样品清理干净后,碾压成粉末状,然后将粉末状样品放入恒温烘箱中以 48 °C 的温度持续加热 48 h,得到干燥粉末样。将干燥称量过的粉末样置于烘箱内以 200 °C 温度加热 48 h,此过程中石膏将发生脱水反应,失去 2 个结晶水分子。石膏的结晶水含水率计算公式如下:

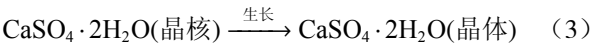
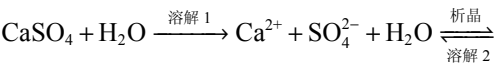
$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\%$$
 (2)

式中: w ——结晶水含水率/%;

m_1 ——干燥样品高温加热前质量/g;

m_2 ——干燥样品高温加热后质量/g。

硬石膏水化反应方程为^[13]:



根据结晶水含水率及硬石膏水化反应分子式可计算石膏的质量分数。具体计算公式如下:

石膏质量分数 = (1 mol 石膏/2 mol 水) · w (4)

上述方法适合于仅含石膏和硬石膏而不含其他杂质的石膏质岩。然而在实际工程中的石膏质岩往往与碳酸盐岩共生,多含方解石、白云石等组分,上述方法多数情况下不适用。石膏质岩主要矿物有典型的热重特征,为此提出采用 TG 分析确定石膏质岩矿物质量分数的方法。

4.1 试验方法

通过 TG 分析测试不同比例石膏、硬石膏、白云石、方解石的混合粉末样在持续增温环境下的失重比例及失重温度区间,定量分析石膏质岩矿物的质量分数。设计了两组试验:第一组用硬石膏和石膏的干燥粉末样品配制不同比例的混合样来研究纯硬石膏岩的水化程度及矿物质量分数;第二组用硬石膏、石膏、白云岩和方解石的干燥粉末样品配制不同比例的混合样来研究在其他矿物成分干扰条件下石膏质岩矿物质量分数如何确定。

4.2 试样制备

试验所采用的硬石膏为安徽含山硬石膏岩矿开采的新鲜硬石膏;石膏、方解石和白云石采自瓦日铁路南吕梁山隧道。通过 X 衍射、差热分析、红外光谱 3 种方法检测,各矿物均为无杂质的纯矿物样品。

第一组试验,制备纯硬石膏和石膏粉末样品各 500 g,石膏、硬石膏的质量分数按表 3 进行配制,配制后充分搅拌混合均匀。

第二组试验,制备纯石膏、白云石和方解石粉末样品各 500 g,纯石膏、白云石和方解石质量分数按表 4 进行配制,配制后充分搅拌混合均匀。由图 1 可知,方解石和白云石具有类似的热反应特征,白云石最终失重比例稍大于方解石,在试样配比时以白云石为主。

表 3 石膏和硬石膏配比表

Table 3 Proportion of gypsum and anhydrite

序号	配比样命名	石膏质量分数/ %	硬石膏质量分数/ %
1	硬石膏	0	100
2	轻度水化硬石膏	20	80
3	中度水化硬石膏	40	60
4	强水化硬石膏	60	40
5	特强水化硬石膏	80	20
6	石膏	100	0

表 4 石膏、白云石和方解石配比表

Table 4 Proportion of gypsum, dolomite and calcite

序号	石膏质量分数/ %	白云石质量分数/ %	方解石质量分数/ %
I	40	40	20
II	40	30	30
III	60	40	0
IV	60	20	20
V	80	20	0
VI	0	100	0

4.3 试验结果

由硬石膏-石膏混合样 TG 分析结果(图 8)可以看出: (1)1 号、6 号配比样分别为纯硬石膏和石膏, TG 曲线具有各自独特的曲线特征; (2)2—5 号配比样为石膏和硬石膏的粉末混合样, TG 曲线既有硬石膏的特征, 又有石膏的特征, 均分别在 168~210℃ 和 590~700℃ 出现 2 个曲线台阶。168~210℃ 时 TG 曲线出现第一个台阶, 2—5 号配比样的失重台阶呈阶梯式下降。失重比例随石膏质量分数的增加依次增加, 且增加幅度大致相同, 失重比例与石膏质量分数线性相关。590~700℃ 时 TG 曲线出现第二个台阶, 2—5 号配比样的失重台阶呈阶梯式下降。失重比例

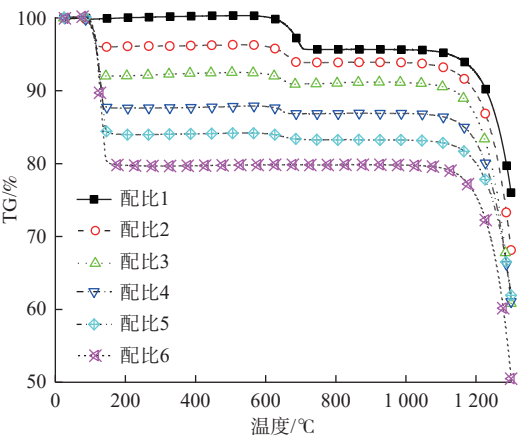


图 8 石膏和硬石膏配比样 TG 曲线

Fig. 8 TG curve of the gypsum and anhydrite proportioning samples

随硬石膏质量分数的减少依次减少, 且减少幅度大致相同, 失重比例与硬石膏质量分数线性相关。

由石膏-白云石-方解石混合样 TG 分析结果(图 9)可以看出: (1)VI 号样为纯白云石, TG 曲线具有白云石特有的曲线特征; (2)I—V 号样为石膏、白云石和方解石的配比样, TG 曲线均有 3 种矿物的曲线特征, 分别在 168~210℃ 和 570~800℃ 出现 2 个曲线台阶, 第一个台阶为石膏失重台阶, 下降幅度较小, 第二个台阶为白云石或方解石失重台阶, 下降幅度较大。随着石膏质量分数的增加, 第一个台阶的失重比例增加。随着白云石质量分数的减少, 第二个台阶失重比例减少, 且失重比例与白云石质量分数的减少比例呈良好的线性关系。白云石和方解石 TG 曲线类似, 白云石和方解石的质量分数之和相同时, 失重比例相差不大(差值小于 3%)。由于方解石和白云石对石膏质岩特殊工程性质影响不大, 因此在判定石膏质岩矿物的质量分数时, 主要针对石膏和硬石膏, 而不区分方解石和白云石。

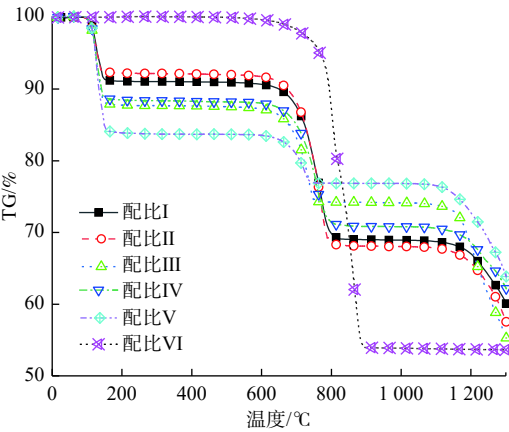


图 9 石膏、白云石和方解石配比样 TG 曲线

Fig. 9 TG curve of the gypsum, dolomite and calcite proportioning samples

不同矿物在代表性温度段失重比例与其质量分数的关系如图 10 所示。矿物失重比例与其质量分数线性相关。硬石膏在 800℃ 时失重比例约 5.1%, 石膏在 300℃ 时失重比例约 20.4%, 白云石(方解石)在 850℃ 时失重比例约 46%。

根据以上试验结果, 石膏失水温度比硬石膏、白云石(方解石)低, 因此对于以白云石、方解石、硬石膏、石膏等矿物成分为主的石膏质岩, 可以先通过 TG 分析获得岩样的 TG 曲线; 然后根据 300~500℃ 段、800~1 000℃ 段的失重比例依次确定石膏、硬石膏和白云石(方解石)的质量分数。

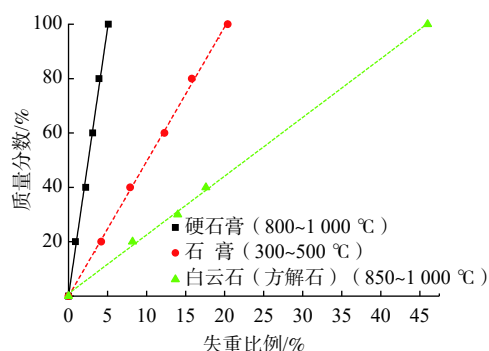


图 10 矿物质量分数与失重比例

Fig. 10 Mineral content and weight loss ratio

4.4 应用举例

以某石膏质岩为例,其 TG 曲线如图 11 所示。由图 11 确定其在 300~500 °C 段失重比例为 12.76%(石膏失重),在 800~1000 °C 段失重比例为 10.77%(硬石膏、白云石、方解石失重)。根据石膏失重比例换算得到该试样中石膏的质量分数: $12.76\%/20.4\%=62.55\%$,则硬石膏和其他矿物的总质量分数为 37.45%。令硬石膏质量分数为 x_1 ,则白云石(方解石)的质量分数为 $37.45\%-x_1$, $x_1 \times 5.1\% + (37.45\%-x_1) \times 46\% = 10.77\%$,解得 $x_1 = 15.79\%$,即硬石膏的质量分数为 15.79%,白云石(方解石)的质量分数为 21.66%。

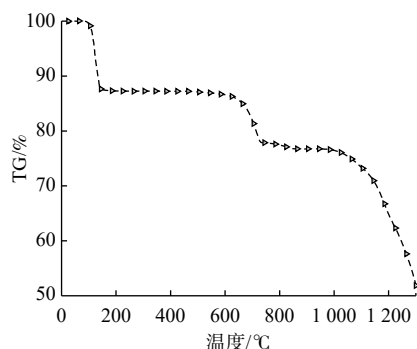


图 11 某石膏质岩 TG 曲线

Fig. 11 TG curve of a gypsum rock

本文提出的石膏质岩矿物质量分数确定方法以 TG 曲线为基础,因此仅适用于以白云石、方解石、硬石膏、石膏等矿物成分为主的石膏质岩。若石膏质岩含有较多其他矿物组分,该方法是否适用有待论证。

5 结论

(1)石膏质岩工程危害大,特别是硬石膏水化膨胀具有滞后性、渐进性、隐蔽性等特点。为准确查明石膏质岩矿物成分,建议采用热分析、X 射线衍射、红外光谱鉴定等方法相互印证。

(2)硬石膏水化缓慢,理想状态下标准试件硬石膏岩在纯净水中完全水化为石膏岩约需 2 a,而在实际工程中,由于水渗透环境差异,完全水化时间可能更长,反映了硬石膏岩水化的滞后性。

(3)纯净水环境中,完整硬石膏岩水化深度随时间呈对数增长,增长速率逐渐变缓。水中 SO_4^{2-} 对硬石膏岩水化反应有明显的促进作用。纯净水环境下,完整硬石膏水化速率约 3.0 mm/a。若岩石裂隙发育,地下水富含 SO_4^{2-} ,硬石膏岩水化速率加快。

(4)建立的基于 TG 曲线的石膏质岩矿物含量确定方法,可为分析石膏质岩工程危害提供依据。

参考文献 (References) :

- [1] 罗健. 含膏岩系及其对隧道工程的影响[J]. 西南交通大学学报, 1978, 13(1): 63 - 72. [LUO Jian. Gypsum rock series and its influence on tunnel engineering[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1978, 13(1): 63 - 72. (in Chinese)]
- [2] 石有才. 成昆线百家岭隧道病害整治施工技术[J]. 铁道建筑, 2004, 44(11): 39 - 41. [SHI Youcai. Disease treatment construction technology of Baijialing tunnel on Chengdu—Kunming Railway[J]. Railway Architecture, 2004, 44(11): 39 - 41. (in Chinese)]
- [3] 孟令宝. 南吕梁山隧道底鼓机理及整治措施研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017. [MENG Lingbao. Study on the tunnel floor heave mechanism and remediation measures of South Lvliangshan tunnel[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨荣. 十字垭隧道病害原因分析及治理[J]. 铁道标准设计, 2008, 52(10): 91 - 95. [YANG Rong. Cause analysis and treatment of diseases in Shiziya tunnel[J]. Railway Standard Design, 2008, 52(10): 91 - 95. (in Chinese)]
- [5] 吴银亮, 涂运良. 隧道石膏质岩危害及对策研究[J]. 西南公路, 2017(3): 21 - 24. [WU Yinliang, TU Yunliang. Study on hazards and countermeasures of tunnel gypsum rock[J]. Southwest Highway, 2017(3): 21 - 24. (in Chinese)]
- [6] 魏玉峰, 聂德新. 第三系红层中石膏溶蚀特性及其对工程的影响[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 62 - 64. [WEI Yufeng, NIE Dexin. The speciality of gypsum dissolution of the Neogene red clay and its influence to engineering[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(2): 62 - 64. (in Chinese with English abstract)]

- [7] 吴银亮. 石膏质岩工程地质特性及其对隧道混凝土结构危害机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013. [WU Yinliang. The engineering geological characteristics of gypsum rock and the damage mechanism on tunnel concrete structure[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 吴银亮, 汤晶. 石膏质岩工程特性及其对混凝土劣化机制试验研究[J]. 灾害学, 2019, 34(增刊1): 58–64. [WU Yinliang, TANG Jing. Experimental study on engineering characteristics of gypsum rock and its degradation mechanism for concrete[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(Sup 1): 58–64. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 罗健. 硬石膏岩膨胀性质的现场观测[J]. 水文地质工程地质, 1980, 7(4): 29–32. [LUO Jian. Field observation of swelling properties of anhydrite rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1980, 7(4): 29–32. (in Chinese)]
- [10] 陈钊, 吴建勋, 任松, 等. 基于湿度应力场理论的硬石膏岩膨胀试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2723–2731. [CHEN Fan, WU Jianxun, REN Song, et al. The swelling tests of anhydrite based on the humidity stress field theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2723–2731. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 吴建勋, 任松, 欧阳汛, 等. 石膏质岩膨胀性及其对隧道仰拱影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 142–149. [WU Jianxun, REN Song, OUYANG Xun, et al. Research on swelling of gypsiferous rock and its influence on invert arch of tunnel[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(1): 142–149. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 苏承东, 韦四江, 许崇帮, 等. 高温脱水石膏岩物理力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 254–266. [SU Chengdong, WEI Sijiang, XU Chongbang, et al. Experimental study on physico-mechanical effects of high temperature dehydrated gypsum rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 254–266. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 白冷, 彭家惠, 张建新, 等. 天然硬石膏水化硬化研究[J]. 非金属矿, 2008, 31(4): 1–3. [BAI Leng, PENG Jiahui, ZHANG Jianxin, et al. Study on hydration and hardening of natural anhydrite[J]. Non-Metallic Mines, 2008, 31(4): 1–3. (in Chinese with English abstract)]
- [14] YILMAZ I, YUKSEK G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 803–810.
- [15] YILMAZ I. Influence of water content on the strength and deformability of gypsum[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 342–347.
- [16] 吴建勋. 硬石膏岩吸水-膨胀演化及其对隧道施工期可靠性影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018. [WU Jianxun. Study on the watering-swelling evolution of anhydrite and its application in the reliability of tunneling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ALONSO E E, BERDUGO I R, RAMON A. Extreme expansive phenomena in anhydritic-gypsiferous claystone: the case of Lilla tunnel[J]. Géotechnique, 2013, 63(7): 584–612.
- [18] OLDECOP L, ALONSO E. Modelling the degradation and swelling of clayey rocks bearing calcium-sulphate[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 54: 90–102.
- [19] 黄伯龄. 矿物差热分析鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [HUANG Boling. Handbook of differential thermal analysis and identification of minerals[M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)]
- [20] 辽宁省地质局中心实验室. 矿物差热分析[M]. 北京: 地质出版社, 1975. [Central Laboratory of Liaoning Geological Bureau. Mineral differential thermal analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1975. (in Chinese)]
- [21] 南京大学地质学矿物岩石学教研室. 粉晶X射线物相分析[M]. 北京: 地质出版社, 1980. [Teaching and Research Office of Geology and Mineral Petrology of Nanjing University. Powder X-ray phase analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980. (in Chinese)]
- [22] 闻轲. 矿物红外光谱学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1989. [WEN Lu. The infrared spectroscopy of mineral[M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 1989. (in Chinese)]
- [23] 肖允发, 杨华琨, 罗健, 等. 硬石膏水化和芒硝结晶膨胀性的测定[J]. 勘察科学技术, 1985(5): 7–10. [XIAO Yunfa, YANG Huakun, LUO Jian, et al. Determination of hydration of anhydrite and crystal swelling of mirabilite[J]. Site Investigation Science and Technology, 1985(5): 7–10. (in Chinese)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 刘真真