



巫锡勇 朱宝龙 罗健 著

黑色岩层的风化过程 及其热力学分析



科学出版社

www.sciencep.com

黑色岩层的风化过程 及其热力学分析

巫锡勇 朱宝龙 罗 健 著

本书由西南交通大学出版基金资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍和阐述了黑色岩层风化过程热力学分析成果;利用“平衡态热力学理论”,对黑色岩层矿物的稳定性以及黑色岩层风化后所产生的酸性介质条件下岩石中各矿物的稳定性和可能发生的化学反应、生成产物等方面进行了分析;着重分析了地下水运动特征与岩石化学风化过程之间的关系以及水-岩相互作用的界面过程;同时,还分析了黑色岩层风化程度与其相应物理力学性质之间的关系。本书始终围绕黑色岩层的风化过程中水-岩相互作用的化学过程展开热力学分析,并用热力学分析结果指导工程实践。

本书可供地质工程、岩土工程等专业的研究人员参考,也可作为相关专业高校师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黑色岩层的风化过程及其热力学分析/巫锡勇,朱宝龙,罗健著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020834-7

I. 黑… II. ①巫…②朱…③罗… III. 岩石-风化(化学)-研究 IV. P584

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002024 号

责任编辑:耿建业 吴伶俐/责任校对:陈丽珠

责任印制:刘士平/封面设计:耕者设计室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年1月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—2 500 字数:214 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

原 序

この度、巫錫勇先生執筆の「黒色岩石層の風化過程と熱力学分析」が刊行されるにあたり、一言お祝いの言葉を述べさせていただきます。

巫錫勇先生は、2002年10月から2003年9月にかけて中国政府の派遣研究員として、京都大学防災研究所の私の研究室に滞在されました。その間、私達は、巫錫勇先生の研究「黒色岩層的風化過程およびその熱力学分析」に関する様々な議論や、山地における集団移動についての研究を共に行いました。

巫錫勇先生は、水-岩石相互作用による岩石の風化および劣化について先進的な研究を進めてこられ、この度、それが著書として結実しました。この研究は、地質学に深い造詣をもって、さらに、それを工学に生かす気持ちがあり、初めて可能になったものであると、私は考えています。巫錫勇先生が本書の中で述べられているように、岩石の中に僅かに含まれている黄鉄鉱は、様々な地質学的重要性を持っています。そして、それは、今まで乖離した学問分野とされてきた地質学、地球化学、熱力学、地質工学を横系でつなぐことによって初めて正しく理解され、また、実用にも生かすことができるものです。たとえば、黄鉄鉱が酸化することによって硫酸が形成され、この硫酸は岩石と反応してその強度を低下させ、特徴的な風化帯の構造を形づくりします。また、黄鉄鉱の酸化が短期的に起こって、土壌や廃水を酸性にすることもあります。このことの理解は、岩石の中の劣化した部分の分布と性状を評価したり、岩石や排水の長期的挙動を予測したりすることに科学的な裏づけとなります。

岩石の力学的性質が岩石の成因と風化とによって支配されていることは周知の事実です。そして、風化の中の重要な過程が地球化学的過程であることも認識されていることなのですが、正面から風化作用を地球化学的過程としてとらえ、さらに、その結果を岩石の力学的性質の評価にまで反映するような研究は極めて少ないのが現状です。従来、地質工学というと、工学の「道具」として捉えられることが多く、地質学の基本的な原理原則が工学に生かされることは少なかったように思います。この状況はおそらく世界各国で共通しているようです。

本書が基礎的科学,そして,その応用科学の分野に貢献することを確信し,また,このような姿勢の科学が発展することの端緒となることを期待して,本書の前書きの言葉とさせていただきます。

日本京都大学防災研究所 教授

千本良雅弘

2007年10月

前 言

岩石风化是一个古老而又复杂的课题,随着岩石风化程度的加剧、风化深度的加深,在荷载作用下,岩石的不可逆过程变形程度也将增加,造成岩石边坡等工程的逐渐失稳与破坏。但是,目前人们在研究岩石风化问题时还没有一套较完整且具特色的理论,始终得不到岩石风化问题的满意结果。岩石的风化与地质灾害的形成有十分密切的关系,因而也一直被学术界和工程界所关注。

近年来,有关水-岩相互作用的岩石风化研究一直是国内外学者关注的重点,也是岩土工程领域的前沿课题之一。尤其是对一些特殊的岩石,水在岩石中所起的作用存在很大的差异,其作用方式、作用过程以及水-岩相互作用的时间、空间效应等方面都有很大的不同,而黑色地层正是这样一种特殊的岩层,这类岩层中含有大量的硫化矿物,这些矿物在地表条件下表现极不稳定,在富氧地表水和地下水的作用下,经水解和氧化、有机酸的游离,将会形成强烈侵蚀性的酸性环境水,并可迅速造成岩石的破坏。由于国内外目前系统论述特殊岩石风化过程及工程应用的书籍十分少见,我们将黑色岩层风化过程热力学分析成果在此以著作形式发表,但愿本书能够对特殊岩石风化的研究起到抛砖引玉的作用。

本书第一作者于1989年初有幸参加了罗健教授主持的国家自然科学基金项目“酸性环境水水化硅酸盐风化的热力学分析”(编号:48970156)的研究工作,开始接触到有关岩石的风化问题;于1992年初又和该课题组研究人员一起合作参加了罗健教授主持的国家自然科学基金项目“黑色岩层风化的热力学过程及对岩体工程性质的影响”(编号:49272152)的研究工作;并于1993年9月师从于罗健教授攻读博士学位,继续从事该国家自然基金课题方面的研究,在黑色岩层风化机理及影响因素方面取得了一批有意义的研究成果。这些研究成果的取得在很大程度上充实了本书的内容,使本书具有较高的理论价值及实用价值。本书第二作者自2001年攻读博士学位始,进行岩石风化、地质灾害方面的研究,对崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害及岩石风化方面进行了具有一定成效的研究,并将研究成果和实践经验纳入本书,因而使本书的内容更加丰富。

全书共由13章内容组成。第一章主要对岩石风化的研究现状以及岩石风化的研究内容、研究方法进行介绍,主要包括:岩石的风化速率、岩石的风化程度、岩石风化的地球化学研究,黑色岩层风化的研究现状等;第二章主要对湘西地区黑色岩层的地球化学特征进行了分析,主要包括:黑色岩层的岩性特征、黑色岩层的地球化学组成等;第三章主要对气候特征、黑色岩层风化及其产物的表

观特征以及黑色岩层风化的环境水特征等湘西地区黑色岩层风化的地球化学特征进行了分析；第四章主要针对硫化矿物中黄铁矿在不同条件下的氧化过程及其产物进行热力学分析；第五章主要对黑色岩层风化后侵蚀性酸性环境水的形成过程及其影响因素进行分析研究；第六章利用“平衡态热力学理论”对黑色岩层风化后所产生的酸性介质条件下岩石中各矿物的稳定性和可能发生的化学反应、生成产物等方面进行了分析，即从黑色岩层中水岩相互作用的化学反应角度分析了黑色岩石的化学风化过程；第七章通过实验研究黑色岩层在不同水介质作用下，其岩石内部组成成分的变化过程及变化趋势；第八章着重分析了水的存在状态、地下水运动特征与岩石化学风化过程之间的关系；第九章着重就水-岩相互作用的界面过程对岩石的化学风化过程的影响进行了分析；第十章主要针对湘西地区陡山沱组黑色岩层风化的物理、化学和力学特征及其变化趋势进行了分析；第十一章为黑色岩层风化的动力学初步研究；第十二章主要是对黑色岩层地区工程建筑物因黑色岩层风化所形成的酸性水对混凝土侵蚀的实例分析；第十三章结束语；书后附录中列出了本书应用到的矿物、化合物、离子的热力学性质数据。

本书可供地质工程、岩土工程等专业的研究人员参考，也可作为土木工程、水利工程、矿业工程、石油工程、地球科学等相关专业高校师生的教学参考书。

在本书撰写的过程中，得到西南交通大学地质工程系胡厚田教授和其他同事的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。另外，书中应用了课题组成员魏有仪高级工程师、王岫霏副教授、肖允发副教授、钟生军讲师、黄代勇高级工程师等专家提供的资料和研究成果，对此深表谢忱。特别值得感谢的是，日本著名岩石风化及地质灾害研究专家、京都大学防灾研究所副所长千木良雅弘教授为本书作序。胡卸文教授、王鹰教授以及京都大学防灾研究所王功辉博士等专家在百忙之中对本书进行了认真审阅，并提出了宝贵意见，在此一并致谢。

本书得到包括“黑色岩层风化的热力学过程及对岩体工程性质的影响”（编号：49272152）在内的多项国家自然科学基金项目的支持。

限于作者的水平，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正！

作者

2007年10月于成都

译 序

巫锡勇先生等执笔的《黑色岩层的风化过程及其热力学分析》即将出版，在此表示热烈的祝贺。

第一著者巫锡勇先生于2002年10月~2003年9月作为中国政府的派遣研究员，在京都大学防灾研究所本人的研究室进行访问研究工作。在此期间，我们就和巫锡勇先生一起对有关“黑色岩层的风化过程及其热力学分析”的问题进行过各种各样的探讨以及有关山地灾害方面的研究。

著者在由水与岩石的相互作用所引起的岩石风化及弱化方面开展的是甚为前沿性的研究工作，该专著可谓著者在该方面的工作结晶。我个人认为，这项开拓性的研究工作之所以能成功，正是由于著者在地质学方面有很深的造诣以及把其用于工程实际中去的强烈愿望。正如著者在书中陈述的那样，岩石中的黄铁矿含量虽然很少，却有广泛的地质工程意义，这种工程意义正是通过地质学、地球化学、热力学及工程地质学的交叉而得以正确的理解，且具有很高的实用性。举例而言，黄铁矿的氧化可以导致硫酸的形成，而硫酸与岩石所进行的化学反应将导致岩石的强度降低，最终将形成具有不同特征的风化带构造，而且黄铁矿的氧化可在较短时期内发生，使土壤及废水有可能被酸化。对这种现象的正确理解，可以为岩石中的弱化部分的分布及性状的评价、岩石及排水的长期行为预测提供科学依据。

众所周知，岩石的力学性质是由岩石的成因及后期风化所支配，地球化学过程作为岩石风化中的重要过程也得到一般共识。但是，直接把岩石风化作用当作地球化学的过程来看待，且把研究结果运用到岩石力学性质的评价方面之类的研究目前在世界范围内还甚为罕见。本人觉得地质地球化学历来基本上作为地质学的一个工具，地质地球化学的基本原理和原则在工程应用领域中得到充分运用的事情还很少，这种状况或许是世界各国的一个共同现象吧。

本人确信该书对基础科学及应用科学领域将做出贡献，也期待该书对诸类科学的发展起到抛砖引玉的作用。

日本京都大学防灾研究所 教授

千本良雅弘

2007年10月

目 录

原序	
译序	
前言	
第一章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 岩石风化作用的研究现状	2
1.2.1 岩石风化的地球化学过程研究	4
1.2.2 岩石风化过程矿物组分稳定性的热力学研究	4
1.2.3 风化对岩石材料工程性质影响的评价及岩石风化速率方面的研究	5
1.2.4 风化程度指标的判定	6
1.2.5 黑色岩层风化研究的现状	7
第二章 湘西地区黑色岩层的地球化学特征	9
2.1 研究区地质背景	9
2.2 研究区黑色岩层的岩性特征	10
2.3 研究区黑色岩层的地球化学组成	15
第三章 湘西地区黑色岩层风化的地球化学特征	18
3.1 研究区气候特征	18
3.2 黑色岩层风化及其产物的表观特征	18
3.3 黑色岩层风化地区的环境水特征	22
第四章 黑色岩层中硫化矿物风化的热力学分析	24
4.1 生物、化学氧化	24
4.2 电化学氧化	26
4.3 黄铁矿氧化的热力学分析	28
4.3.1 铁硫化物的风化	29
4.3.2 一个实例水样的平衡分析	40
第五章 黑色岩层中硫化矿物的风化与侵蚀性酸性环境水的形成	41
5.1 硫化矿物水解对环境水的 pH 影响	41
5.2 硫化矿物氧化对地下水水质的影响	43
5.3 黄铁矿氧化对天然水性质的影响	47
5.4 围岩对硫酸型酸性环境水的影响	49

5.5 侵蚀性酸性环境水的基本类型·····	53
第六章 酸性环境条件下其他矿物的稳定性分析 ·····	60
6.1 酸性条件下其他矿物失稳的地球化学过程·····	60
6.2 酸性条件下岩石中矿物化学行为的热力学分析·····	62
6.3 酸性环境条件下混凝土的风化过程及产物·····	69
6.3.1 侵蚀反应分析的理论基础·····	70
6.3.2 水化硅酸盐建造物(混凝土)自然侵蚀特征研究 ·····	72
第七章 黑色岩层风化的试验研究 ·····	79
7.1 浸泡试验及结果分析·····	79
7.2 潮湿条件下的风化试验及结果分析·····	87
7.3 淋滤试验·····	90
7.4 水动力条件下岩石浸泡试验研究·····	90
第八章 地下水存在状态及运动特征对岩石风化过程的影响 ·····	92
8.1 水在岩体中的存在形式·····	92
8.2 地下水在岩石中的运动·····	95
8.3 水溶液在岩石中的水动力弥散·····	96
8.4 地下水的运动与岩石风化过程之间的关系 ·····	103
8.4.1 岩石裂隙发育程度对岩石化学风化的影响 ·····	103
8.4.2 水-岩相互作用过程对岩石风化的影响 ·····	105
8.4.3 水-岩相互作用过程中因物质结晶在岩石风化过程中的作用·····	105
第九章 水-岩相互作用的界面过程 ·····	109
9.1 反应进度和反应亲和势·····	109
9.2 岩石化学风化的界面过程 ·····	112
9.2.1 水-岩相互作用的界面反应过程 ·····	112
9.2.2 水-岩相互作用的不可逆过程分析 ·····	114
第十章 岩石风化与岩石物理力学性质关系研究 ·····	118
10.1 岩石风化分带的确定·····	118
10.2 陡山沱组黑色岩层的物理、化学及力学特征分析·····	119
10.3 混凝土风化腐蚀程度的确定·····	123
10.3.1 影响混凝土回弹值的因素·····	124
10.3.2 含水量对混凝土回弹值影响的试验研究 ·····	125
10.3.3 混凝土腐蚀程度回弹值判定标准 ·····	126
10.4 岩石的矿物组成及结构、构造与岩石物理力学性质之间的关系 ···	128
第十一章 黑色岩层风化的动力学初步研究 ·····	129
11.1 化学动力学的理论要点·····	129

11.1.1 有效碰撞、活化分子、活化能、反应实质	129
11.1.2 反应机理及速率控制机制	130
11.1.3 化学反应速率方程及影响因素	130
11.2 黑色岩层风化的动力学过程	131
11.2.1 黄铁矿化学风化动力学	131
11.2.2 其他风化过程的动力学研究	136
第十二章 黑色岩层风化所形成酸性水对工程建筑物侵蚀的实例分析	139
12.1 乐所二号隧道腐蚀分析	139
12.1.1 乐所二号隧道腐蚀概况	139
12.1.2 砂岩夹泥岩带的特性	140
12.1.3 乐所二号隧道混凝土腐蚀状况分析	141
12.2 罗依溪隧道腐蚀分析	144
12.2.1 隧道地质概况	144
12.2.2 地下水及混凝土腐蚀分布状况	144
12.3 大江口二号隧道腐蚀分析	147
12.3.1 隧道地质概况	147
12.3.2 大江口二号隧道工程状况	147
12.3.3 隧道水文地质特征	148
第十三章 结束语	149
13.1 主要结论	149
13.2 有待进一步研究的问题	151
参考文献	152
附录	162

第一章 绪 论

1.1 问题的提出

随着人类经济、工程活动的加剧,人们所遇到的复杂工程以及地质灾害方面的问题越来越多,它们大多与岩石的风化密切相关。因此,对岩石的风化作用方面的研究,即岩石风化的机理、岩石物性的变化及趋势、风化作用进行的速率、风化作用的持续性以及它们之间的相互制约关系,做到在空间上、时间上和强度上的定量预测和预报,对于大规模工程的建设及控制与防御各种地质灾害现象的发生,已成为人们认识各种工程地质问题的关键。

岩体作为地质历史时期的产物,当早期的成岩环境条件与现有的环境条件存在差异时,岩石矿物原有的平衡稳定状态将被打破,为适应新的地质环境,岩石的矿物组成、结构、构造都将产生相应的变化,以达到新的平衡。因此,处于地表附近的岩石,时刻都会受到周围地质环境不断变化的影响,经过一段时间后,其岩石的成分、结构、构造的变化将会导致岩石的工程力学性质的变化。由于工程建设大多数是以地表以下数百米以内的地层岩石为对象的,地质作用的影响非常强烈,在这个区域内,风化作用所带来的岩石工程性质的下降,是引起工程建设中各种工程地质问题的重要原因之一。

作为地表附近的岩石,受地表的外动力地质作用的影响,使岩体的工程性质降低,并最终成为土,这一变化过程即为岩石的风化作用。通常情况下,岩石的风化作用过程本质上应是两种过程:一是物理风化过程,它是由于重力作用和应力释放等产生的岩层松弛,以及气温相差较大的地区因热膨胀系数不同的矿物颗粒之间的分离和疲劳破坏,还有寒冷地区的冰劈作用、盐类结晶风化、干湿风化等过程,这样一些过程并不改变岩石的矿物成分,只发生岩石的碎石化过程;二是化学风化过程,它主要是岩石与地下水和空气接触产生的,水不仅能溶解岩石中的矿物成分,而且与空气同时作用于岩石产生的化学反应所形成的化学溶液可继续与岩石其他矿物成分产生作用,该过程可看作是成土化的过程。应该看到,以上两种过程是互补的,物理风化破坏可使岩石的表面积增大,进而加速化学风化作用的速度,因而物理风化成为化学风化的控制性因素。但对于完整的岩石,化学风化进行的速度十分缓慢。

化学风化是一个非常复杂的过程,它主要是由构成岩石的造岩矿物由于水、空气等介质的介入而产生的,特别是水沿着各种裂隙进入岩石内部与岩石产生各种

化学反应从而造成岩石的破坏。水不仅溶解岩石中的矿物成分,而且其与岩石接触作用所产生的化学溶液继续与岩石中的其他矿物成分进行化学反应,在整个化学风化过程中,包含有许多复杂的环节和步骤,而每一个环节和步骤又同时受到许多因素的控制,这包括水-岩化学反应的类型、水的运动特征、水-岩作用的界面控制等。因此,研究岩石化学风化的这些过程,对因水作用而产生的各类岩土工程问题具有非常积极的意义。

长期以来,人们都认为岩石的风化是极其缓慢的。人类几乎难以目睹其过程的始终。近十年来,大量的工程事例和文献资料表明^[1~7],不少矿物、岩石的风化,短则数月,长则数年、数十年就会发生转变,乃至造成严重的工程事故。因此,运用化学热力学的理论和方法,重新描述矿物岩石风化问题及其对工程的影响,有助于半定量、定量地探讨工程期岩土稳定性的边界条件,为防治措施的设计提供理论依据。

在各类岩层的风化研究中,研究黑色岩层风化有特殊的意义。1984年,罗健^[8]就此类工程问题进行了研究,发现这类岩层由于其重要组分之一硫化矿物在富氧地表水和地下水的淋滤作用下,经水解与氧化、有机酸的游离,将会形成强烈侵蚀性的酸性环境水,并可迅速造成岩石的破坏。由于酸性环境水的中和、分解作用异常迅速,水化学专家几乎一致认为,此类反应迅速,一般不必着重分析其动力学方面,而应主要致力于寻求反应进行的各组成物的平衡关系分析上^[9]。由酸性引起的岩层组分、结构、构造的迅速改变不仅发生于岩层本身,而且能促使其邻近岩层及与邻近岩层接触的工程建筑物中有关建筑材料的风化、侵蚀,从而带来一系列的工程问题^[9,10],因此,对黑色岩层风化过程的研究,无论从反应本身的机理,还是对工程影响的评价方面,都有理论、实际意义。

研究岩石的化学风化问题,岩石中矿物成分与水之间所进行的各种化学反应无疑是岩石产生化学风化的重要原因,对水-岩作用过程中可能产生的化学反应的研究是极其重要的,罗健等^[11]在黑色岩层的化学风化问题的研究中对此进行了较为详尽的讨论,但除了岩石风化过程中可能产生的化学反应外,其他一些因素(如地下水的动力特征、水-岩作用的界面过程等)也不可忽视,因为这些因素对岩石化学风化过程中的化学反应起控制性的作用。因此,开展对地下水的动力特征、水-岩作用的界面过程与岩石化学风化关系方面的研究是十分必要的,同时也为今后深入研究岩石化学风化奠定了一定的基础。

1.2 岩石风化作用的研究现状

历年来,各国对岩石风化过程的研究都非常重视^[12~24]。但岩石的风化所带来的工程问题却越来越多。另外,岩石作为一种建筑材料,可用来进行装饰、雕像、制

作纪念碑等,其目的是为了永久保存,然而,这些材料随着时间的推移,都将遭受极大的破坏,其风化腐蚀变质现象十分普遍。为此,人们对与岩石风化有关的工程问题进行了大量的研究,并得出一些有意义的成果^[25~30]。在这些研究中,矿物学家和地球化学家着重研究风化过程与表生带成矿作用的关系、母岩风化、原生矿物的黏土化过程及风化壳的形成机理以及水岩作用与水质变化等问题^[10,11,31~35],而工程地质学家在风化壳的结构、力学特征与工程活动关系方面做的工作比较多。通过几十年来发生的工程期岩石风化事故工程地质人员要逐渐关注对风化过程的认识及其重要性。但遗憾的是,人们对风化过程及风化反应机理的认识大都停留在定性的物质转变关系的描述上。

就风化作用与工程的关系而言,工程期岩石风化的研究具有特殊的现实意义。按岩石风化性质可分为物理风化和化学风化。工程活动期间,究竟哪种性质的风化控制着岩石的耐久性(durability),目前多数学者趋向于物理风化,认为物理风化对岩石耐久性影响最为重要^[36]。现实工程活动中,如上所述,很多工程病害都发生于工程施工或使用过程中,是由岩石的化学风化造成的,这种工程期内发生的较快的化学风化过程已越来越受到重视。近年来,有人提出的工程地球化学^[37,38]已将这类风化过程的研究纳入该学科的体系中。

风化速率在定量评价风化对工程影响方面的重要性已被不少学者所认识,很多学者在风化速率定量研究方面都进行了很多努力^[39~51],但迄今为止还没有找到一种令人满意的研究方法。

风化速率的早期研究是利用墓碑以及有时间标记的古建筑,通过对其表观状态的观测,确定岩石与平均蚀入深度^[52]。几十年来,对岩石矿物风化速率的研究已有不少理论和方法出现:① Velbel^[25]、Berner^[53]等创立并发展起来的地球化学平衡理论,通过定量研究地表环境中某一控制区域(如流域)元素,建立输入-输出平衡方程式,通过对方程式联合求解获得区域内某一控制区域某一统计时间内所进行的每一物理化学过程的总的计量单位,从而可确定出基岩及矿物的风化速率,推算土壤的演化速率及风化壳的形成历史,认为只要地球化学体选择得当,所给出的速率值是可靠的,但这种方法对工程建设的工点风化的研究不适用,且费时、费力。② 室内试验方法^[4,54~56],在室内特定的环境介质条件下,用试验方法研究矿物岩石的风化和溶解速率。目前,对单体矿物风化速率的研究多用此方法。③ 基于影响速率的反应模式及动力学机理的研究^[57~59]。④ 岩体风化的现场模拟观测^[60]。

以上所述方法,或是从纯动力学理论出发,或是从试验方法出发。从纯粹的试验测试入手,再通过统计方法获得速率公式,缺乏对风化机理、控制风化机理和控制反应的动力学机理的全面深入认识,所得出的实验结论易于出现错误,难以向各种自然条件外推应用;而从纯粹的动力学理论研究速率问题,一些重要的必不可少的参数不能取得,从而不能建立确定的速率定量关系式。目前,将二者统一起来给

出风化速率的定量关系式是一个正在发展的研究方向,但文献还比较少^[61~65],仅限于对几个经典的单矿物的风化研究(如长石^[66~75]等)。

在风化对岩石材料工程性能影响的评价方面,Fookes^[36]、Winkler^[76]等工作卓有成效。Fookes等^[36]在总结和讨论前人大量工程的基础上,提出了评价工程期“岩石耐久性综合指标(RDI)”。在岩石风化的工程评价方面大大前进了一步。首先,岩石耐久性综合指标(RDI)主要针对天然岩石用作骨料、填料或建筑石料时的抗风化耐久性问题,而对于赋存于环境复杂,本身的结构、构造的各向异性等因素控制风化过程作用的天然岩体,用该指标对岩体风化稳定性评价是很困难的;其次,使用岩石耐久性综合指标(RDI)对岩体的工程性质进行评价似乎也不尽合理;再者,通过一系列物理、力学指标试验,得出的耐久性只反映了岩石的“当前”状态,对于富含像硫化矿物这类有害组分的岩层,在试验的时间范围内可能不会出现明显的物理、力学性质变化,试验给出的指标不能反映这类岩石的真实的工程期耐久性行为,因此,从这个意义上讲,给出的“岩石耐久性综合指标(RDI)”只是岩石物理、力学性质综合指标的代名词,不能充分体现“耐久”的含义。

1.2.1 岩石风化的地球化学过程研究

作为矿物学家和地球化学家,着重研究岩石风化过程中矿物组分的变化过程,即研究风化过程与表生带成矿作用的关系、母岩风化、原生矿物的黏土过程及风化壳的形成机理,以及水岩作用与水质变化等方面的问题。这些研究大多停留在定性的物质转变关系上,而且多以通过分析岩石及其风化产物的化学成分进行^[77,78],而对岩石的风化过程及环境条件变化的岩石风化趋势等的研究很少^[79,80],因而在理论上、方法上还没有重大突破。

1.2.2 岩石风化过程矿物组分稳定性的热力学研究

地质学中,运用热力学方法研究矿物组分的稳定性,分析矿物之间转变的可能性,以及反应的边界条件,且大多是针对高温、高压条件下的岩浆作用过程或变质作用过程中矿物间的转化和共生关系^[81~84],显示出热力学方法在研究矿物组分变化方面的优越性。在研究风化过程时,这些工作是值得借鉴的。用热力学方法对低温、低压条件的风化过程的研究还比较少,但已有学者进行了成功的尝试^[85~90]。

鉴于岩石矿物组分的转变是化学风化的一个重要过程,人们开始意识到研究矿物组分的稳定性、分析矿物之间转变的可能性十分必要,为此,将热力学方法引进到岩石风化研究中^[91~98],从构成岩体物质诸成分的热力学性质稳定性出发,分析各组分在不同的介质条件下热力学性质改变的可能性、方向和边界条件(温度、压力、pH、Eh、溶解组分浓度、黏度、……),并进一步分析新生成物继续转变的可能性、方向和限度等。

1.2.3 风化对岩石材料工程性质影响的评价及岩石风化速率方面的研究

风化与岩石材料工程性质方面的关系,长期以来一直是人们所关心的研究问题,它不仅涉及世界范围内的石质文物的保护,还对工程建筑物的稳定性有很大的影响,在此方面,Fookes 等^[36]、Winkler^[76]提出的评价工程期岩石耐久性综合指标(RDI),对岩石风化的工程评价方面的研究有一定的促进作用,但也应该看到,他们的耐久性行为研究大多基于物理风化过程,这与所研究的岩石类型及环境条件有关。因此,在指标的选择上有一定的局限性,不能充分体现岩石的工程行为。

岩石风化速率的研究是与工程耐久性密切相关的,它的研究对工程事故的分析 and 预测是十分重要的。事实上,只有对构成岩石矿物在风化环境下的速率作出有定量意义的评价,并将其引入到耐久性和稳定性问题的研究,才能得出有工程意义的耐久性 & 稳定性评价的指标,也才能预测工程期内岩石的潜在物理力学行为。

槽谷赛司^[99]调查了包括花岗岩、凝灰岩、凝灰角砾岩、砂岩、安山岩、结晶片岩、黏板岩等岩石的风化状况,对风化的原因及风化机理进行了研讨,并调查了岩石风化状况与经历的时间(年)之间的关系,即当岩石风化深度达到 5 mm 时所需要的时间。值得注意的是,其所调查的岩石的抗压强度为 10~200 MPa,从研究的结果可以看出,抗压强度越大,抗风化能力越强,10 MPa 的岩石风化时间约为 20 年,而 200 MPa 的岩石风化时间需 900 年。

Ollier^[100]研究了波艾米亚玄武岩的风化,将风化厚度 d 用下式表示:

$$d = A \lg(1 + Bt)$$

式中: d ——风化的厚度,mm;

t ——时间,a;

A, B ——波艾米亚常数, $A = 4.64 \pm 0.5, B = 0.01 \pm 0.001$ 。

Barton^[101]观察研究了古埃及的花岗岩建筑物,在干燥气候条件下,在 1400 年的时间里剥离了 5~8 mm;飯島東^[102]研究了香川景五色台白峰寺的花岗岩十三重石塔,700 年剥离了 2~5 mm;而 Leneut 等^[103]在非洲象牙海岸,每年通过测定黑云母-白云母花岗岩上土壤中的水量和这些水所溶解的 Si、Ca、Mg、K、Na 等的含量来求其风化速率。

木宫一邦^[104]研究了三河富草地区花岗岩的风化,得出了风化抗拉强度 TSI 和风化时间的关系:

$$TSI = \lg S_t$$

$$TSI = 2.40 \exp(-6 \times 10^{-6} T) - 0.61$$

式中: S_t ——点荷载方法测定的抗拉强度值;

T ——风化时间,a。

以上所进行的研究从一定程度上可以对岩石的风化速率进行推测,但大都是

针对物理、力学性质相对较好的、岩石矿物组分相对较稳定的岩石类型,且观察的多以物理风化为主的风化过程,其岩石的风化速率均显得较为缓慢。由于研究手段的单一和诸多限制,以及对岩石、矿物及所处的环境缺乏足够的认识,因而他们的研究结果具有较大的局限性。

1.2.4 风化程度指标的判定

在对岩石的耐久性 or 物理、力学性质变化进行评价时,得出定量化的岩石风化程度指标是十分必要的。目前,表征岩石风化程度的指标很多,但由于岩石的风化过程十分复杂,不同的岩石类型其风化方式、风化机理各有不同,至今在岩石风化程度的评价指标方面还没有得出一个满意的结果。概括起来,岩石风化程度指标的判定主要有以下几种方法:

1) 化学的、矿物学的风化程度指标

化学的、矿物学的风化程度指标主要是针对化学风化的岩石,从化学、矿物学的角度出发,把风化岩石与新鲜岩石的化学成分、矿物成分进行比较而得出的指标。

Reiche^[105]给出了风化潜在性指标(weathering potential index, WPI)和风化进行指标(progressive index, PI),即

$$WPI = \frac{w_{CaO} + w_{Na_2O} + w_{K_2O} + w_{MgO} - w_{H_2O^+}}{w_{SiO_2} + w_{Al_2O_3} + w_{Fe_2O_3} + w_{FeO} + w_{TiO_2} + w_{MgO} + w_{CaO} + w_{Na_2O} + w_{K_2O}} \times 100\%$$

$$PI = \frac{w_{SiO_2}}{w_{SiO_2} + w_{TiO_2} + w_{Fe_2O_3} + w_{FeO} + w_{Al_2O_3}} \times 100\%$$

三浦清^[106]根据岩石风化中某些物质成分对风化的敏感程度,得出因风化增加的成分(Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 H_2O^+)和减少的成分(K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 FeO)的比值作为风化的指标,即化学新鲜度 DF,该值依据岩石类型的不同而不同。计算公式如下:

$$DF = \frac{w_{FeO} + w_{MnO} + w_{MgO} + w_{CaO} + w_{Na_2O} + w_{K_2O}}{w_{Al_2O_3} + w_{Fe_2O_3} + w_{H_2O^+}} \times 100\%$$

同时,为了比较不同岩石的风化度,以新鲜岩石化学新鲜度 DF 为标准,得出绝对化学新鲜度 ADF,即

$$ADF = \frac{\text{风化岩的 DF}}{\text{新鲜岩的 DF}} \times 100\%$$

Ruxton^[107]提出的风化指标较为简单,即 SiO_2 量与 Al_2O_3 量之比,即

$$SAR = \frac{w_{SiO_2}}{w_{Al_2O_3}}$$

大見美智人和本田彰儀^[108]与九里尚一和阿部ほか^[109]也提出了自己的风化