

国家自然科学基金重大项目(No. 50490270)
国家自然科学基金委创新研究群体基金项目(No. 50221402)
教育部科学技术研究重大项目(No. 10405)

中国煤矿软岩 黏土矿物特征研究

何满潮 杨晓杰 孙晓明 著

煤炭工业出版社

·北京·

前 言

软岩问题是阻碍我国煤炭工业可持续发展的老大难问题。我国煤矿软岩分布十分广泛,东起渤海之滨的山东龙口浏海煤矿,西到新疆六道湾煤矿;南起广东那龙煤矿,北到黑龙江鹤岗兴安煤矿,都存在软岩问题。“九五”和“十五”期间,我国铁法、鹤岗、龙口、兖州、徐州、大屯、鹤壁、开滦、峰峰、大同等多个煤炭建设基地和重要矿区,都相继出现了严重的软岩工程灾害,造成了矿井停产停建。随着煤矿开采深度的加深,软岩工程问题日趋严重。

研究表明,软岩巷道难支护的根本原因是其具有复合型变形力学机制,确定软岩巷道的变形力学机制,并把复合型转化为单一型是解决软岩问题的关键技术。因此,能否正确地确定复合型变形力学机制是必须解决的首要问题。在影响变形力学机制的诸多因素中,软岩性质和工程软岩类型是至关重要的,而决定软岩性质和工程软岩类型的主要因素正是软岩黏土矿物特征,所以说软岩黏土矿物特征研究是解决软岩问题的关键环节。然而,长期以来,人们在解决软岩问题时却往往忽略了软岩黏土矿物特征研究。多次实践表明,软岩工程失效的主要原因是掌握软岩性质和工程软岩类型,不能正确确定软岩巷道的变形力学机制。

国内首先开展煤矿软岩黏土矿物研究的是中国科学院地质研究所曲永新研究员(1985)。中国矿业大学(北京)岩土工程研究所自1990年起进行了38个矿井的系统研究,积累了丰富的资料。在上述研究的推动下,我国煤矿黏土矿物与黏土岩的研究,近年来发展十分迅速,已经形成一门新兴的综合性学科——软岩黏土矿物学。与这门学科有关的相邻学科有矿物学、结晶学、物理学、化学化工、建筑工程、土壤、农业等。这门学科有两个特点:①理论深度大,涉及学科多,是一个多学科探索的汇集点;②应用性强,应用面广,既可应用黏土材料的物理性质,也可应用其化学性质,直至从中提取金属元素与合金。这正是近年来软岩黏土矿物学迅速发展的原因。

在十多年的软岩工程实践中,我们在研究软岩力学性质的同时,非常重视软岩黏土矿物特征研究,总结出了一套系统、科学的软岩黏土矿物特征研究方法,揭示我国煤矿软岩黏土矿物在纵向地质年代和横向区域分布上的时空赋存规律,取得了我国煤矿软岩黏土矿物特征的重要成果。本著作正是我们关于我国煤矿软岩黏土矿物特征的系统总结和研究成果。

本著作在论述软岩性质的基础上,运用软岩工程力学和黏土矿物学理论及其研究方法,对我国煤矿三个主要成煤期(即新生代、中生代和古生代)的软岩黏土矿物特征进行了系统研究,总结了不同地质年代软岩黏土矿物特征规律,形成了中国煤矿软岩黏土矿物理论体系。全书共分五章;第一章论述了软岩的概念及其分类、软岩的成分及结构、软岩的力学特性、软岩的工程力学特性和黏土矿物及其研究方法;第二章至第四章分别对我国新生代、中生代和古生代的十多个矿区典型的软岩黏土矿物特征进行了系统研究;第五章总结了我国不同地质年代软岩黏土矿物的特征规律,包括成分组合特征、物理化学特征、水理特征、力学特征和赋存特征。

本著作是已出版的《软岩工程力学》(2002年,科学出版社)和《中国煤矿软岩工程设计与施工指南》(2004年,科学出版社)等专著的姊妹篇。杨晓杰副教授和孙晓明副教授多年来和我在一个课题组工作,为本著作理论的形成做出了重要贡献,杨晓杰副教授主要侧重于黏土矿物的测试工作,做了大量的黏土矿物微结构和成分特征的分析研究,孙晓明副教授侧重于现场采样和黏土矿物的物理力学性质的分析研究;我的学生江玉生博士后、邹正盛博士、李洪志博士、彭涛博士、姜衍祥博士、姚爱军博士、王旭春博士、武雄博士、王树仁博士、曹伍富博士、景海河博士、周莉博士等在攻读博士学位期间参加了本人主持的软岩科研项目,做了大量的工作;李桂刚、褚立孔、刘冬明、齐干、李乾、杨志勇、聂雯、乔雪垠等研究生在本著作的成稿过程中做了很多有益的工作;聂孟荀编审详细审阅了全书内容,并提出了许多宝贵的意见;本著作得到了国家自然科学基金重大项目(No. 50490270)、国家自然科学基金委创新研究群体基金项目(No. 50221402)和教育部科学技术研究重大项目(No. 10405)的资助,在此一并表示衷心的感谢!

我们在撰写过程中,全面认真地收集我们的科研资料、总结归纳,合理设计著作的结构层次,期望能给读者最完美的作品。尽管如此,书中难免还有不妥或错误,敬请广大读者批评指正!

何满潮

2006年3月26日于北京

Preface

Soft rock has almost always been a hard problem against the sustainable development of coal industry in China. Soft rocks widely distributed in many coal mines in different areas of China, where from the east, Longkou Liuhai in the Bohai bay of Shandong province, to the west, Liudaowan in Xinjiang Uygur autonomous region; from the south, Nalong in Guangdong province, to the north, Hegang Xing'an in Heilongjiang province, the stability of coal mining engineering is crucially associated with soft rock. For the duration of the 9th five-year plan and the 10th five-year plan, engineering hazards occurred in soft rock mining in many coal mine bases at Tiefa, Hegang, Longkou, Yanzhou, Xuzhou, Datun, Hebi, Kailun, Fengfeng, and Datong and many other important mines, which led to stopping production or canceling construction. With the increase of the depth of mining engineering, it is seriously believed that the stability of soft rock engineering will be threatened due to excavating and tunneling.

It is shown by our investigations that the essential reason for the difficulty in supporting the soft rock tunnel is its complicated deformation mechanism. Thus, the major point is how to determine this complicated mechanism and next how to transfer such a mechanism to a simple single one. Apparently, the former is the key issue that we have to tackle. In those factors which influence the complicated deformation mechanism, two crucial issues should be seriously treated, i. e., performance and classification for soft rock. However, the performance and the classification for soft rock are only just determined by the mineral characters of its corresponding clay. Therefore, the understanding of clay mineral characters is the critical step in solving soft rock problems. For a long time, people almost always neglected the research of the clay mineral character when they try to deal with the soft rock problems. It is also shown by engineering practices that the primary reason of soft rock engineering failure is that the performance and the classification for soft rock are not known distinctly, as well as the deformation mechanism of soft rock tunnel is not correctly determined.

In China, QU yongxin, a scientist from the Geology Institute of Academy of Science, is a pioneer, who first made the clay mineral study of coalmine soft rock in 1985. The Geotechnical Institute of China University of Mining and Technology (Beijing) has also performed a systematic investigation of 38 mines since 1990, and accumulated abundant data. Due to above work, the study of coalmine clay mineral and soft rock is rapidly developing these years, and further promoted as a burgeoning multidisciplinary subject, i. e., the so-called Soft Rock Clay Mineralogy. Many subjects are related to it indeed, for example, Mineralogy, Crystallography, Physics, Chemistry, Chemical Engineering, Civil Engineering, Soil Science, and Agriculture Science. Apparently, this new discipline is with two characters: advanced theoretical tool and

trans-multidiscipline knowledge, and being practically and abroadly applied on various fields of science and engineering. In other words, we can conveniently utilize either the physical properties or the chemical properties of clay mineral, and even separate metallic constituent from clay mineral, according to our aims. These features characterize so perfectly in this new discipline that it is not difficult for us to understand why Soft Rock Clay Mineralogy is rapidly developing these years.

In the past decades of soft rock engineering practices, we not only focused on the characteristic study of soft rock clay mineral, but also investigated the mechanical properties of soft rock. Moreover, we have summarized a systematic and scientific method of descriptive clay mineral features and elucidated the time-space distribution evolution law of coal rock clay minerals in the geological era. We here hope that the book will attract more engineers and researchers to a field which will reward study and research, and which will give an increasing application in soft rock engineering in China.

On the basis of discussing soft rock properties, we have provided a fairly chronological treatment of soft rock clay mineral which is closely associated with the three primary coal-formation periods in China, i.e., Cenozoic era, Mesozoic era, and Paleozoic era, using soft rock mechanics and soft rock clay mineralogy theory. We have also established a theoretical framework that addresses the soft rock clay mineral characters in various geology eras. The book is divided into five chapters. In Chapter 1, we first present some of basic concepts and definitions and classifications from the perspective of engineering mechanics and physical-chemical engineering, taking into account of the characteristic of constituent and structure of soft rock clay mineral. Then we introduce some of particular research methods developed recently. From chapter 2 to chapter 4, we detailedly discuss the special characteristics of the soft rock clay minerals which are selected from tens of coalmines in various geology eras respectively. In the last chapter of the book, we give a summarization of the basic characteristics of soft rock clay mineral from the perspective of geology era, including the composition ingredient, the physical-chemical behavior, the hydrological performance, the mechanical response, and the distribution character.

The book can be regarded as a sister series of *Soft Rock Mechanics* (Beijing: Science Press, 2002) and *A Guide on the Design and Construction of Coalmine Soft Rock Engineering in China* (Beijing: Science Press, 2004). Associate Prof. Yang Xiaojie and Sun Xiaoming have been working with me at my group of Geotechnical Engineering for many years, and did lots of work at theoretical aspect during the writing of the book. Dr Yang Xiaojie mainly focuses on test analysis of clay minerals and has completed a considerable investigations of clay mineral microscopic structure analysis and its constituent character. Dr Sun Xiaoming then emphasizes mainly on clay mineral sampling and its mechanical response. Some of my graduates, Postdoctor Jiang Yusheng, and Dr Zou Zhengsheng, Li Hongzhi, Peng Tao, Jiang Yanxiang, Yao Aijun, Wang Xuchun, Wu Xiong, Wang Shuren, Cao Wufu, Jing Haihe, Zhou Li, engaged in the soft rock projects led by me when they studied for their doctor's degree, and also made

a valuable contribution during the primary phase of the book. The book was typeset by our graduates, Li Guigang, Chu Likong, Liu Dongming, Qi Gan, Li Qian, Yang Zhiyong, Nie Wen, and Qiao Xueyin by using the MS Word document preparation system. Guest editor, Prof. Nie Mengxun thoroughly read the manuscript and provided many valuable suggestions. I gratefully acknowledge the Major Project of National Science Foundation of China (No. 50490270), Scientific & Technological Chief Research Project of Education Department (No. 10405), and Collective Innovation Fund of National Scientific Fund Committee (No. 50221402), without whose research support this book would not have been possible.

I cordially welcome and highly appreciate readers to point out the shortcomings of the book and to present useful suggestions.

He Manchao

2006.03.26

目 录

第一章 软岩与黏土矿物	(1)
第一节 软岩的概念及分类	(1)
一、软岩的概念	(1)
二、软岩的工程分类体系	(3)
第二节 软岩的成分与结构	(8)
一、软岩的成分	(8)
二、软岩的结构	(10)
第三节 软岩的力学特性.....	(13)
一、软岩的单轴抗压特性	(13)
二、软岩的抗拉强度特性	(15)
三、软岩的三轴抗压力学特性	(16)
第四节 软岩的工程力学特性	(17)
一、可塑性	(17)
二、膨胀性	(18)
三、崩解性	(19)
四、流变性	(20)
五、易扰动性	(22)
第五节 黏土矿物及其基本结构	(22)
一、黏土矿物概述.....	(22)
二、黏土矿物基本结构	(23)
第六节 黏土矿物研究方法	(28)
一、X射线衍射分析	(28)
二、扫描电镜分析.....	(33)
第二章 新生代软岩黏土矿物特征	(36)
第一节 广西那龙矿区白马煤矿软岩黏土矿物特征	(36)
一、矿区概况	(36)
二、工程地质背景	(37)
三、软岩黏土矿物特征.....	(39)
第二节 广西那龙矿区老虎岭煤矿软岩黏土矿物特征	(45)
一、研究背景	(45)
二、软岩黏土矿物特征	(45)
第三节 云南西双版纳勐养煤矿软岩黏土矿物特征	(53)
一、矿井概况	(53)

二、工程地质特征	(53)
三、软岩黏土矿物特征	(55)
第四节 山东龙口矿区柳海煤矿软岩黏土矿物特征	(59)
一、矿区概况	(59)
二、工程地质条件	(59)
三、软岩黏土矿物成分及其微观结构特征	(60)
四、结论	(86)
第三章 中生代软岩黏土矿物特征	(87)
第一节 内蒙古平庄矿区六家煤矿古山立井软岩黏土矿物特征	(87)
一、工程概况	(87)
二、工程地质条件	(88)
三、软岩黏土矿物特征研究	(91)
第二节 内蒙古大雁矿务局三矿软岩黏土矿物特征	(94)
一、矿区概况	(94)
二、工程地质条件	(95)
三、软岩黏土矿物特征	(96)
第三节 辽宁铁法矿区小康煤矿软岩黏土矿物特征	(100)
一、矿区概况	(100)
二、软岩黏土矿物特征	(101)
第四节 黑龙江鹤岗矿区兴安煤矿软岩黏土矿物特征	(108)
一、矿区概况	(108)
二、工程地质条件	(109)
三、软岩黏土矿物特征	(110)
四、结论	(166)
第四章 古生代软岩黏土矿物特征	(167)
第一节 河北峰峰矿区通二煤矿软岩黏土矿物特征	(167)
一、矿区概况	(167)
二、工程地质条件	(168)
三、软岩黏土矿物特征	(170)
第二节 河南焦作矿区古汉山煤矿软岩黏土矿物特征	(180)
一、研究背景	(180)
二、工程地质条件	(180)
三、软岩黏土矿物特征	(181)
第三节 河北开滦矿区东欢坨煤矿软岩黏土矿物特征	(183)
一、工程地质条件	(183)
二、软岩黏土矿物特征	(185)
第四节 江苏徐州矿区庞庄煤矿张小楼井软岩黏土矿物特征	(189)
一、矿井概况	(189)
二、工程地质条件	(192)

三、软岩黏土矿物成分及其微观结构特征	(195)
四、主要结论	(213)
第五章 不同地质年代煤矿软岩黏土矿物特征	(214)
第一节 软岩中的膨胀性黏土矿物及其特征	(214)
一、软岩膨胀性黏土矿物的物理化学特征	(214)
二、软岩膨胀性黏土矿物的水理特征	(214)
三、软岩膨胀性黏土矿物的力学特征	(216)
四、软岩膨胀性黏土矿物的微观结构特征	(216)
第二节 我国煤矿膨胀性软岩的赋存规律	(222)
一、沉积型泥质膨胀软岩	(222)
二、蒙脱石化中基性岩浆岩类膨胀软岩	(224)
三、蒙脱石化凝灰岩类膨胀软岩	(224)
四、断层泥类膨胀岩	(224)
参考文献	(226)

Contents

1 Soft rock and clay mineral	(1)
1.1 Concept and classification of soft rock	(1)
1.1.1 Concept of soft rock	(1)
1.1.2 Engineering classification system of soft rock	(3)
1.2 Ingredient and structure of soft rock	(8)
1.2.1 Ingredient of soft rock	(8)
1.2.2 Structure of soft rock	(10)
1.3 Mechanical characteristics of soft rock	(13)
1.3.1 Uniaxial compressive characteristics of soft rock	(13)
1.3.2 Tensile strength characteristics of soft rock	(15)
1.3.3 Triaxial compressive characteristics of soft rock	(16)
1.4 Engineering mechanical characteristics of soft rock	(17)
1.4.1 Plasticity	(17)
1.4.2 Expandability	(18)
1.4.3 Disintegrative	(19)
1.4.4 Rheology	(20)
1.4.5 Distanbance characteristics	(22)
1.5 Clay mineral and its basic structure	(22)
1.5.1 Instruction of clay mineral	(22)
1.5.2 Basic structure of clay mineral	(23)
1.6 Research method of clay mineral	(28)
1.6.1 X-ray diffraction analysis	(28)
1.6.2 Electron microscopic analysis	(33)
2 Clay mineral character of soft rock in the Cenozoic Era	(36)
2.1 Clay mineral character of soft rock in Nalong mining area of Guangxi	(36)
2.1.1 Introduction of the mine area	(36)
2.1.2 Background of engineering geology	(37)
2.1.3 Clay mineral character of soft rock	(39)
2.2 Clay mineral character of soft rock in Laohuling mining area of Guangxi	(45)
2.2.1 Background of the engineering study	(45)
2.2.2 Clay mineral character of soft rock	(45)
2.3 Clay mineral character of soft rock in Mengyang mining area	
Xishuangbanna of Yunnan	(53)

2. 3. 1 Introduction of the mining area	(53)
2. 3. 2 Background of engineering geology	(53)
2. 3. 3 Clay mineral character of soft rock	(55)
2.4 Clay mineral character of soft rock in Liuhai, Longkou mining area of Shandong	(59)
2. 4. 1 Introduction of the mining area	(59)
2. 4. 2 Background of engineering geology	(59)
2. 4. 3 Clay mineral ingredient and microstructure of soft rock	(60)
2. 4. 4 Conclusion	(86)
3 Clay mineral character of soft rock in the Mesozoic Era	(87)
3.1 Clay mineral character of soft rock in Gushan, Pingzhuang mining area of Inter Mongolia	(87)
3. 1. 1 Introduction of the mining area	(87)
3. 1. 2 Background of engineering geology	(88)
3. 1. 3 Clay mineral character of soft rock	(91)
3.2 Clay mineral character of soft rock at Sankuang, Dayan mining area of Inter Mongolia	(94)
3. 2. 1 Introduction of the mining area	(94)
3. 2. 2 Background of engineering geology	(95)
3. 2. 3 Clay mineral character of soft rock	(96)
3.3 Clay mineral character of soft rock in Xiaokang, Tiefa mining area of Liaoning	(100)
3. 3. 1 Introduction of the mining area	(100)
3. 3. 2 Clay mineral character of soft rock	(101)
3.4 Clay mineral character of soft rock in Xing'an, Hegang mining area of Heilongjiang	(108)
3. 4. 1 Introduction of the mining area	(108)
3. 4. 2 Background of engineering geology	(109)
3. 4. 3 Clay mineral character of soft rock	(110)
3. 4. 4 Summary	(166)
4 Character of clay minerals in soft rock in the Palaeozoic Era	(167)
4.1 Character of clay minerals in soft rock in Tong'er, Fengfeng mining area of Hebei	(167)
4. 1. 1 Introduction of the engineering project	(167)
4. 1. 2 Background of engineering geology	(168)
4. 1. 3 Clay mineral character of soft rock	(170)
4.2 Clay mineral Character of soft rock in Guhanshan, Jiaozuo mining area of Henan	(180)
4. 2. 1 Introduction of the mining area	(180)

4.2.2 Background of engineering geology	(180)
4.2.3 Clay mineral character of soft rock	(181)
4.3 Clay minerals character of soft rock at Donghuantuo, Kailuan mining area, Hebei	(183)
4.3.1 Introduction of the mining area	(183)
4.3.2 Background of engineering geology	(185)
4.4 Clay mineral character of soft rock at Zhangxiaolou, Xuezhou mining area, Jiangsu	(189)
4.4.1 Introduction of the mining area	(189)
4.4.2 Background of engineering geology	(192)
4.4.3 Clay mineral ingredient of soft rock and its microstructure	(195)
4.4.4 Summary	(213)
5 clay mineral character of soft rock in various geological periods	(214)
5.1 Expansive clay mineral in soft rock and its characteristics	(214)
5.1.1 Physico-chemical characteristics of expansive clay mineral	(214)
5.1.2 Hydrological characteristics of expansive clay mineral	(214)
5.1.3 Mechanical characteristics of expansive clay mineral	(216)
5.1.4 Microstructural characteristics of expansive clay mineral	(216)
5.2 Deposition character of expansive soft rock in mines of China	(222)
5.2.1 Depositing expansive soft rock	(222)
5.2.2 Expansive soft rocks of smectite igneous rock	(224)
5.2.3 Expansive soft rock of smectite tuff	(224)
5.2.4 Expansive rock with fault mud	(224)
References	(226)

第一章 软岩与黏土矿物

第一节 软岩的概念及分类

一、软岩的概念

从 20 世纪 60 年代到 90 年代初,关于软岩的概念在国内外一直争论不休,产生的软岩定义多达几十种。1981 年 9 月,国际岩石力学学会委托日本力学协会召开了国际软岩学术讨论会,软岩的概念问题被作为重要的议题进行讨论。1984 年 12 月,我国煤炭工业部矿山压力情报中心站、《煤炭学报》编辑部、中国煤炭学会岩石力学专业委员会联合发起煤矿矿山压力名词讨论会,这次会议云集了国内矿山岩石力学方面的专家和学者,在昆明会议上专门讨论了松软岩层的定义。但是,在近几年的文献中,关于软岩的概念仍然名目繁多、定义各异,各有其优缺点。总括起来,大体上可分为描述性定义、指标化定义和工程定义 3 类。

1. 软岩的定义

1) 描述性定义

(1) 原煤炭工业部矿山压力情报中心站副站长、软岩分站站长、长春煤炭研究所总工程师陆家梁提出,松软岩层系指松散、软弱的岩层,它是相对于坚硬岩层而言的。松软岩层由于成岩的时间短、结构疏松、胶结程度差,故自身强度很低。

(2) 原煤炭工业部软岩分站副站长郑雨天、王明恕、何修仁教授等认为,软岩是软弱、破碎、松散、膨胀、流变、强风化蚀变及高应力的岩体之总称。

(3) 原淮南矿业学院朱效嘉教授提出,松软、破碎、膨胀及风化等岩层称为松软岩层,简称软岩。

(4) 原东蒙煤炭公司的曾小泉高级工程师认为,松软岩层系松散破碎、软弱、强风化和膨胀性岩层的总称。

(5) 1984 年 12 月,在昆明市举行的煤矿矿山压力名词讨论会上提出的定义是,松软岩层是指强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著,或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层。

(6) 松软岩层是低强度的岩体。

2) 指标化定义

(1) ISRM(国际岩石力学学会,1990,1993)定义:软岩是指单轴抗压强度在 0.5 MPa~25 MPa 的一类岩石。

(2) G. Russo(1994)定义:软岩指单轴抗压强度小于 17 MPa 的岩石。

(3) 抗压强度小于 20 MPa 的岩层称为软岩。

(4) $\sigma_c/(\gamma H) < 2$ 的岩层称为软岩(式中, σ_c 为单轴抗压强度; γ 为岩石密度; H 为深度)。

3) 工程定义

(1) 中国矿业大学董方庭教授提出,松动圈厚度大于 1.5 m 的围岩,称为软岩。

(2) 中国矿业大学鹿守敏教授指出,围岩松动圈大于 1.5 m,并且用常规支护不能适应的围岩称为软岩。

(3) 松软岩层是指“难支护的围岩”,或“多次支护,需要重复翻修的围岩”。

此外,对于软岩的概念进行过研究的国外学者还有:Coates(1964),Deer 和 Miller(1966),Brock 和 Franklin(1972),Jennings(1973),Bieniawski(1973),Eigenbrod(1974),Morgenston(1974),Barla(1990),Sciotti(1990),Cerici(1992),E. Hoelk(1993)。

由此可见,国内外对于软岩的定义尚不能统一,这严重阻碍了软岩的学术交流和研究的深入。作为软岩的定义,应抽象出前述各家定义的共性规律,抽象出软岩的本质特征,力求简明扼要并反映软岩的实质性规律。本书作者在充分研究前人关于软岩概念的基础上,提出了新的软岩概念及其分类体系。

2. 地质软岩的概念

为了便于理论研究和工程应用,将软岩分为地质软岩和工程软岩。

目前,人们普遍采用的软岩定义基本上可归于地质软岩的范畴。按地质学的岩性划分,地质软岩是指强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著,或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层(煤矿矿山压力名词讨论会,昆明,1984,12),该类岩石多为泥岩、页岩、粉砂岩和泥质砂岩,是天然形成的复杂的地质介质。

国际岩石力学学会将软岩定义为单轴抗压强度(σ_c)在 0.5 MPa~25 MPa 之间的一类岩石,属于地质软岩的范畴,其分类依据是岩石的强度指标。该定义用于工程实践中会出现一些矛盾,如巷道所处深度足够浅,地应力水平足够低,则单轴抗压强度小于 25 MPa 的岩石也不会产生软岩的特征,工程实践中,采用比较经济的一般支护技术即可奏效;相反,大于 25 MPa 的岩石,如其工程部位所处的深度足够深,地应力水平足够高,也可以产生软岩的大变形、大地压和难支护的现象。因此,地质软岩的定义不能用于工程实践,故提出了工程软岩的概念。

3. 工程软岩的概念

工程软岩是指在工程力作用下,能产生显著塑性变形的工程岩体。

如果说目前流行的软岩定义强调了软岩的软、弱、松、散等低强度的特点,那么工程软岩的定义不仅重视软岩的强度特性,而且强调软岩所承受的工程力荷载的大小,强调从软岩的强度和工程力荷载的对立统一关系中分析,把握软岩的相对性实质,即工程软岩要满足的条件是:

$$\begin{cases} \sigma > [\sigma] \\ U > [U] \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 σ ——工程荷载,MPa;

$[\sigma]$ ——工程岩体强度,MPa;

U ——巷道变形,mm;

$[U]$ ——巷道允许变形,mm。

该定义的主题词是工程岩体、工程力和显著塑性变形。

工程岩体是软岩工程研究的主要对象,是巷道开挖扰动影响范围之内的岩体,包含岩块、结构面及其空间组合特征。

工程力是指作用在工程岩体上的力的总和,它可以是重力、构造残余应力、水的作用力和工程扰动力以及膨胀应力等。

显著塑性变形是指以塑性变形为主体的变形量超过了工程设计的允许变形值,并影响了工程的正常使用。显著塑性变形包含显著的弹塑性变形、黏弹塑性变形,以及连续性变形和非连续性变形等。

此定义揭示了软岩的相对性实质,即取决于工程力与岩体强度的相互关系。当工程力一定时,不同岩体,强度高于工程力水平的大多表现为硬岩的力学特性,强度低于工程力水平的则可能表现为软岩的力学特性;而对同种岩石,在较低工程力的作用下,则表现为硬岩的小变形特性,在较高工程力的作用下则可能表现为软岩的大变形特性。

4. 工程软岩和地质软岩的关系

工程软岩和地质软岩的关系是,当工程荷载相对于地质软岩(如泥页岩等)的强度足够小时,地质软岩不产生软岩显著塑性变形力学特征,即不作为工程软岩;只有在工程力作用下发生了显著变形的地质软岩,才作为工程软岩;在大深度、高应力作用下,部分地质硬岩(如泥质胶结砂岩等)也呈现了显著变形特征,则应视其为工程软岩。

二、软岩的工程分类体系

1. 软岩矿井分类

在煤矿开发之前,科学地判定其是否属于软岩矿井,对于准确地实施合理设计极为重要。根据实践摸索和理论研究,提出根据软化临界深度(H_{cs})指标判别软岩矿井的方案。根据软化临界深度,将矿井分为三类:一般矿井、准软岩矿井和软岩矿井。各种矿井的力学工作状态是不同的,因而其设计对策也有所不同,见表1-1。

表 1-1 软岩矿井的界定及设计对策

软岩分类	分类指标	工程力学状态	支护设计
一般矿井	$H < 0.8H_{cs}$	弹性	常规设计
准软岩矿井	$0.8H_{cs} \leq H \leq 1.2H_{cs}$	局部塑性	(1)常规设计和返修1~2次; (2)常规设计和局部塑性区加固处理
软岩矿井	$H > 1.2H_{cs}$	塑性、流变性	全断面实施软岩支护设计

注: H_{cs} 软化临界深度,m; H 为巷道所处的埋深,m。

一般矿井的巷道围岩是弹性工作状态,常规设计即可奏效。进入软岩工作状态的矿井,并不表征所有岩层都进入软岩状态,而是局部某些岩层首先进入了软岩状态,其余岩层尚属于硬岩状态,故优选岩层十分重要。对进入了软岩状态的矿井,要区分准软岩和软岩两种状态。准软岩状态是指巷道围岩局部(如曲率变化最大处)进入塑性状态;软岩状态则是指整个巷道围岩全部进入塑性或流变状态。

对于准软岩矿井,其工作状态是弹塑性(局部塑性)工作状态,其设计对策可采取两种:

(1) 仍采用常规设计,但要经过,1~2次返修才可达到稳定。

(2) 在常规设计的基础上,对局部塑性区(两底角或底部处理)予以加固,即可一次成巷,不用返修。

对于软岩矿井,常规设计绝不能奏效,返修多次也不会稳定,越返修其稳定状态越不好,

必须严格按照软岩工程力学的理论 and 支护对策进行设计,才能收到事半功倍的效果。

2. 软岩分类与分级

进入软岩状态的矿井,其软岩种类是不同的,其强度特性、泥质含量、结构面特点及其塑性变形力学特点差异很大。根据上述特性的差异及产生显著塑性变形的机理,软岩可分为 4 大类,即膨胀性软岩(也称低应力软岩)、高应力软岩、节理化软岩和复合型软岩,见表 1-2。

表 1-2 软岩分类

软岩名称	泥质含量	σ_c/MPa	塑性变形特点
膨胀性软岩 (低应力软岩)	>25%	<25	在工程力作用下,沿片架状硅酸盐黏土矿物产生滑移,遇水显著膨胀等
高应力软岩	$\leq 25\%$	≥ 25	遇水发生少许膨胀,在高应力状态下,沿片架状黏土矿物发生滑移
节理化软岩	低—少含	中等	沿节理等结构面产生滑移、扩容等塑性变形
复合型软岩	低—含	高	具有上述某种组合的复合型机理

注: σ_c 为岩石单轴抗压强度,MPa。

1) 膨胀性软岩的分级

膨胀性软岩(Swelling Soft Rock,简称 S 型),系指含有高膨胀性黏土矿物、在较低应力水平(<25 MPa)条件下即发生显著变形的低强度工程岩体。例如,通常软岩定义中所列举的软弱、松散的岩体,膨胀、流变、强风化的岩体以及指标化定义中所述的抗压强度小于 25 MPa 的岩体,均属低应力软岩的范畴。

产生塑性变形的机理是片架状黏土矿物发生滑移和膨胀。在实际工程中,一般的地质特点是泥质岩类为主体的低强度工程岩体。由于低应力软岩的显著特征是含有大量黏土矿物而具有膨胀性,因此,根据低应力软岩的膨胀性大小可以分为强膨胀性软岩(自由膨胀变形>15%)、中膨胀性软岩(自由膨胀变形为 10%~15%)和弱膨胀性软岩(自由膨胀变形<10%)。其矿物组合特征和饱和吸水率两个指标可分为 3 级,详见表 1-3。

表 1-3 膨胀性软岩分级

膨胀性软岩	蒙脱石含量/%	干燥饱和吸水率 ω_0 /%	自由膨胀变形量/%
弱膨胀性软岩	<10	<1	<10
中膨胀性软岩	10~30	10~50	10~15
强膨胀性软岩	>30	>50	>15

2) 高应力软岩的分级

高应力软岩(High Stressed Soft Rock,简称 H 型),是指在较高应力水平(>25 MPa)条件下才发生显著变形的中高强度的工程岩体。这种软岩的强度一般高于 25 MPa,其地质特征是泥质成分较少,但有一定含量,砂质成分较多,如泥质粉砂岩、泥质砂岩等。它们的工程特点是:在深度不大时,表现为硬岩的变形特征;当深度加大至一定深度时,就表现为软岩的变形特性了。其塑性变形机理是处于高应力水平时,岩石骨架中的基质(黏土矿物)发生滑移和扩容,此后再接着发生缺陷或裂纹的扩容和滑移塑性变形。

根据高应力类型不同,高应力软岩可细分为自重高应力软岩和构造高应力软岩。前者的特点是与深度有关,与方向无关;后者的特点是与深度无关,而与方向有关。高应力软岩根据应力水平分为3级,即高应力软岩、超高应力软岩和极高应力软岩,详见表1-4。

表 1-4 膨胀性软岩分级

高应力软岩类型	应力水平/MPa
高应力软岩	25~50
超高应力软岩	50~75
极高应力软岩	>75

高应力的界线值根据国际岩石力学学会定义的软岩概念($\sigma_c = 0.5 \text{ MPa} \sim 25 \text{ MPa}$)而确定,即能够使 $\sigma_c > 25 \text{ MPa}$ 的岩石进入塑性状态的应力水平称为高应力水平。

3) 节理化软岩的分级

节理化软岩(Jointed Soft Rock, 简称J型),系指含泥质成分很少或几乎不含的岩体。这种软岩发育了多组节理,其岩块的强度颇高,呈硬岩力学特性,但整个工程岩体在巷道工程力的作用下则发生显著的变形,呈现出软岩的特性,其塑性变形机理是在工程力作用下,结构面发生滑移和扩容变形。例如,我国许多煤矿的煤层巷道,煤块强度很高,节理发育,岩体强度较低,常发生显著变形,特别是发生非线性、非光滑的变形。此类软岩可根据节理化程度不同,细分为镶嵌节理化软岩、碎裂节理化软岩和散体节理化软岩。根据结构面组数和结构面间距两个指标将其细分为3级,即较破碎软岩、破碎软岩和极破碎软岩,详见表1-5。

表 1-5 节理化软岩的分级

节理化软岩类型	节理组数	单位面积节理数/(条·m ⁻²)	完整系数 K_v
较破碎软岩	1~3	8~15	0.55~0.35
破碎软岩	≥ 3	15~30	0.35~0.15
极破碎软岩	无序 ≥ 3	>30	<0.15

注: $K_v = (v_{pm}/v_{pr})^2$, v_{pm} 为节理岩体弹性波纵波速度, km/s; v_{pr} 为完整岩块弹性波纵波速度, km/s。

4) 复合型软岩

复合型软岩是指上述3种软岩类型的组合,即高应力-膨胀性复合型软岩,简称HS型软岩;高应力-节理化复合型软岩,简称HJ型软岩;高应力-节理化-膨胀性复合型软岩,简称HJS型软岩。

5) 软岩工程分类和分级

软岩的工程分类和分级见表1-6。

表 1-6 软岩的工程分类和分级

软岩分类	分类指标			软岩分级	分级指标		
	抗压强度/MPa	泥质含量	结构面		$\omega_0/\%$	σ_c/MPa	膨胀性黏土矿物组合
膨胀性软岩	<25	>25%	少	弱膨胀性软岩	<10	15~30	C、I
				中膨胀性软岩	10~50	5~15	I、K
				强膨胀性软岩	>50	<5	M、I/M