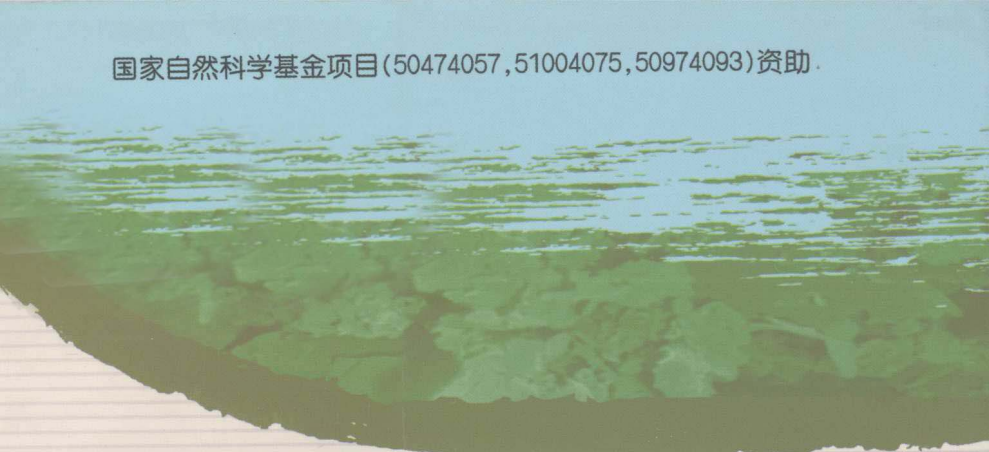


国家自然科学基金项目(50474057, 51004075, 50974093)资助.



物化型软岩包覆改性 理论及应用

Foundational Theory and Its Application of
Coated Modification of Physicochemical Soft Rock

柴肇云 著

煤炭工业出版社

0474057,51004075,50974093)资助

物化型软岩包覆改性 理论及应用

柴肇云 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

物化型软岩包覆改性理论及应用/柴肇云著. --北京:
煤炭工业出版社, 2011

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3842 - 7

I. ①物… II. ①柴… III. ①矿山 - 软岩巷道 - 巷道
支护 - 研究 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 060164 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 850mm × 1168mm¹/₃₂ 印张 7¹/₂ 插页 1

字数 184 千字 印数 1—1 000

2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷

社内编号 6652 定价 20.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

序

随着矿产资源开发和岩土工程建设向深度和广度发展，软岩问题越来越突出。由于软岩独特的物理化学性质，其对温度、湿度、应力和地下水等环境因素极为敏感，特别是湿度条件变化时，软岩的性质和状态会发生很大的变化，如体积膨胀、碎胀扩容、强度降低等，使得处于这类岩层中的巷道和硐室很难维护。

近 20 年来，软岩巷道围岩控制理论与技术一直是采矿工程学科的重大研究方向，并已取得了长足进展，但随着采深的加大和开采条件的日益复杂和恶化，巷道围岩控制技术始终面临新的挑战。尽管目前的软岩巷道支护加固方法已经较好解决了结构型软岩和应力型软岩的支护加固问题，但由于目前软岩巷道支护加固方法只考虑力的平衡，并未涉及软岩的物理化学特性的改变，物化型软岩和复合型软岩巷道的稳定性问题仍未得到很好的解决，而此类巷道的比例在逐年增加，因此客观上要求进一步深入研究软岩巷道围岩控制理论，并发展新的支护技术。

该书作者深入系统地研讨了我国煤系地层软岩的分布、成因，矿物学特征和表面特征及性质，提出了采用表面包覆改性的方法改变软岩的表面物性，防止、减弱或减缓软岩物理力学性能的易变性，从而实现软岩工程长期稳定性的构想；基于软岩物质组成、矿物结构及其失水-吸水过程的物理力学机制的研究，提出了软岩由硬质砂粒-黏土矿物叠层构成的四面体微结构单元的胀缩几何模型，建立了软岩的胀缩几何方程；基于包覆改性材料应具备性能及相近领域常用改性材料的性能特征分析，采用自由基溶液共聚和溶胶-凝胶法合成了室温固化的新型改性材料，同时基于硅烷偶联剂的优异性能选择其做改性材料，并对两种改性

材料进行了性能和改性效果的试验研究；基于硅烷偶联剂改性材料与水泥和萘系减水剂相容性、结合性能的理论分析，以及不同配比条件下浆液流动性、固化强度特征的对比试验，研究了硅烷偶联剂改性材料与水泥和萘系减水剂的化学结合原理、结合特性及其稳定性，并将其应用于软岩巷道支护加固的工程实践，软岩包覆改性加固方法无疑为软岩工程力学研究另辟蹊径。

综观全书，作者的研究成果丰富和完善了软岩工程稳定性控制技术的理论体系和实践内涵，对软岩及其工程稳定性控制理论的研究和控制实践的发展具有积极的推动作用。因此，我乐意为之作序，并愿意将此书推荐给软岩研究领域的同仁及现场的技术工作者。

中国岩石力学与工程学会
软岩工程与深部灾害控制分会理事长

何满潮

2011年3月28日

前 言

物化型软岩是指含有大量黏土的矿物，在工程扰动下易于失水—吸水，产生胀缩性和工程特性持续降低的软弱岩体。物化型软岩的工程稳定性是矿业工程、岩土工程、水电工程、地下储库等领域经常涉及的重大岩石力学问题之一。由于物化型软岩具有水化膨胀、强度降低和软化崩解等物理力学特性，对许多重大工程的稳定性产生了极大的影响，如法国马尔帕塞坝、意大利瓦杨坝溃坝，我国煤矿软岩巷道失稳等，并造成巨大的经济损失。

在工程中对软岩巷道加固支护处理的方法有锚喷加固、棚式支护、砌碛或封闭混凝土拱，以及与这几种方式相结合的各类支护方式，通常根据具体条件合理采用各类支护方式，以确保巷道围岩稳定与安全，但这些方法的研究重点多放在对已破碎或软化崩解的软岩加固上，只是从力的平衡角度进行加固。由于地下水、应力及其他恶劣环境的作用，支护系统不能承受巨大的膨胀和碎胀应力，而锚固系统又没有足够着力点，往往只能维持一段时间，加固的工程需要经常返修，返修量和费用都很大，而且对正常生产也会造成较大影响。因此，寻找一种能够使软岩的物理力学特性及软岩工程长期稳定的方法是十分迫切和必要的。

本书以物化型软岩包覆改性理论及应用作为研究课题，通过实验研究、理论分析和现场试验的方法，对围绕该课题的煤系地层物化型软岩分布与成因、软岩矿物学特性、软岩表面特性、软岩微结构单元特征及其胀缩性，软岩包覆改性材料、改性材料与萘系水泥的相容性、软岩包覆改性效果及其评价、软岩包覆改性加固技术及应用进行了较系统的研究。具体内容如下：

第1章，绪论。对软岩的概念及其分类，软岩的工程特性，

软岩工程稳定性, 软岩工程稳定性控制理论、途径与方法及物化型软岩包覆改性的现状进行了综合分析, 进而提出亟待研究解决的问题。

第2章, 物化型软岩的分布成因及矿物学特征。基于对我国煤系地层物化型软岩的分布特征、地质成因的调查研究, 选择8个典型软岩矿区的15种软岩样品, 对其矿物学特征和微细观结构进行了定量和定性研究。

第3章, 物化型软岩的表面特征。基于对15种软岩样品的矿物学特征的定量和定性研究, 选取黏土矿物含量以高岭石为主和以蒙脱石为主的两种软岩, 对其进行了软岩表面特性和表面性质的定量和定性研究。

第4章, 物化型软岩微结构单元特征及胀缩模型。在对物化型软岩的物质组成、矿物结构及其失水-吸水过程的物理力学机制研究的基础上, 提出了物化型软岩由硬质砂粒-黏土矿物叠层构成的四面体微结构单元的胀缩几何模型, 建立了相应的胀缩几何方程。

第5章, 物化型软岩包覆改性的改性材料。分析了包覆改性材料应具备的性能及相近领域常用改性材料的性能特征。对实验室合成的新型改性材料和硅烷偶联剂改性材料进行了性能特征研究。

第6章, 物化型软岩包覆改性效果及其评价。在室内进行了改性前后软岩颗粒自由膨胀性和块体崩解性的对比试验, 研究改性材料对软岩颗粒及其块体的改性效果, 并对软岩块体吸水尺度效应和崩解差异性进行了研究分析。

第7章, 改性材料与萘系水泥的相容性。基于硅烷偶联剂改性材料与水泥和萘系减水剂相容性、结合性能的理论分析, 以及不同配比条件下浆液流动性、固化强度特征的对比试验, 研究了硅烷偶联剂改性材料与水泥和萘系减水剂的化学结合原理、结合特性及其稳定性。

第8章，物化型软岩包覆改性加固技术及应用。以屯兰煤矿12206工作面瓦斯尾巷支护加固为例，对软岩表面包覆改性加固技术的参数确定、施工工艺、应用效果及社会效益进行了分析。

本书凝聚了太原理工大学采矿工艺研究所巷道支护课题组许多研究者的辛勤劳动，更多地凝结了课题组组长康天合教授在此领域创新的学术思想，作者对他们的默默付出表示衷心的感谢！

非常感谢中国矿业大学何满潮教授在百忙之中审阅了本书稿，并为本书欣然作序！

本项研究得到国家自然科学基金项目（项目编号：50474057，51004075，50974093）的资助。作者对长期关心和支持本项研究的领导、专家、学者和工程技术人员表示由衷的感谢。由于作者水平所限，错误及不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2011年3月

目 次

1 绪论	1
1.1 软岩的概念及其分类	1
1.2 软岩的工程特性	7
1.3 软岩工程稳定性	16
1.4 软岩工程稳定性控制理论、途径与方法	18
1.5 物化型软岩包覆改性的现状	26
2 物化型软岩的分布成因及矿物学特征	28
2.1 物化型软岩的分布特征	28
2.2 物化型软岩的成因	31
2.3 软岩矿物研究方法	34
2.4 物化型软岩的矿物学特征	46
2.5 物化型软岩的微细观结构	57
3 物化型软岩的表面特征	74
3.1 表面凹凸形貌特征	74
3.2 孔隙—裂隙特征	80
3.3 物化型软岩的表面性质	85
4 物化型软岩微结构单元特征及胀缩模型	96
4.1 软岩黏土矿物的晶体结构	96
4.2 黏土矿物的胀缩机理与微结构单元	102
4.3 物化型软岩微结构单元胀缩几何模型	107
4.4 物化型软岩微结构单元的胀缩几何方程	108
5 物化型软岩包覆改性的改性材料	110
5.1 改性材料应具备的性能特征	110
5.2 改性材料选择	111

5.3	新型改性材料及其物理化学特征	113
5.4	硅烷偶联剂改性材料及其物理力学特征	126
6	物化型软岩包覆改性效果及其评价	141
6.1	软岩颗粒自由膨胀性	141
6.2	软岩块体崩解性	149
6.3	软岩块体吸水尺度效应	172
6.4	软岩块体崩解差异性	176
7	改性材料与萘系水泥的相容性	179
7.1	水泥与萘系减水剂的结合原理	179
7.2	硅烷偶联剂与萘系水泥的结合原理	182
7.3	改性材料与萘系水泥的相容性试验	183
8	物化型软岩包覆改性加固技术及应用	192
8.1	试验巷道的基本情况	192
8.2	巷道变形破坏特征及机理分析	195
8.3	巷道支护方法	197
8.4	包覆改性加固参数的确定与施工工艺	198
8.5	包覆改性效果与经济效益分析	207
	参考文献	213

1 绪 论

1.1 软岩的概念及其分类

1.1.1 软岩的概念

软岩是软弱、破碎、膨胀、流变、强风化及高应力岩体的总称。在《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994)及《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)等规范中,按坚硬程度划分,软岩包括软岩、较软岩和极软岩,与软岩相对的是硬岩。在《公路工程地质勘察规范》(JTJ 064—1998)中,按饱和抗压极限强度来划分岩石,软岩包括软岩和极软岩。在《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—1999)中,软岩包括软岩和较软岩。在其他国内文献中,与软岩有关的术语有软弱岩石、软弱夹层、泥化岩和风化岩等,除软弱夹层外,一般仅注出代表性岩石或某些强度指标,缺乏确切概念^[1]。

在国外文献中经常出现的软岩类术语有 soft ground, soft formation, soft rock, incompetent rock/bed/formation, weak rock 等。soft ground 一般译为软土、软地基、弱底板,它具有湿度大、不能自撑、易屈服等特点;soft formation 一般译为软地层、软层,侧重于其地层学意义;soft rock 可译为软岩石,相对常见,在岩石学中仅用于沉积岩,是一类与侵蚀作用关系密切的岩石;incompetent rock 一般译为弱岩石、不坚固岩石、弱胶结岩、劣质岩石,指在额定的时间和条件下,不能承受构造力的有一定体积的岩石,岩芯采取率低(25%~40%),节理密度较高(≥ 8 条/ m^2);weak rock 则是一种意义更为广泛的具不良工程性质岩石的总称,可译为软弱岩石、弱岩,它包括 soft rock, fractured rock (破坏

岩或构造岩), cracked and jointed rock (破裂和节理发育的岩石), discontinuous rock (不连续岩石), weathered soft rock (风化软岩) 以及 dilant rock (扩容岩)^[2]。

对于如何定义软岩, 国内外学者专门进行了多次探讨。1981年9月, 国际岩石力学学会 (ISRM) 在东京召开了国际软岩学术讨论会, 讨论了软岩的概念^[3]; 1984年12月, 我国煤炭系统专家学者在昆明会议上也就软岩定义问题进行了专门讨论; 1990年9月, 在英国利兹大学召开了软岩工程地质学术讨论会; 1996年8月, 煤炭工业部在龙口召开全国煤炭软岩工程学术讨论会, 出版了《中国煤矿软岩巷道支护理论与实践》论文集, 总结了10余年的软岩及软岩工程经验^[4]。

在已有的软岩定义方法中, 存在以下两种标准:

1) 单一指标定义

在国内外众多的技术规范中, 常采用单轴抗压强度来区分软硬岩, 但划分标准不尽相同。在日本坝基岩石分级标准中, 将单轴抗压强度低于20 MPa的岩石划分为软岩。西方各国则采用25 MPa作为分级标准。国内关于岩石坚硬程度分级种类标准较多, 见表1-1。也有学者提出按照其他指标来划分, 如抗压强度与上覆岩层荷重之比小于或等于2的岩层为软岩^[5], 松动圈厚度大于或等于1.5 m的围岩为软岩^[6]。

表1-1 国内岩石坚硬程度的分级种类标准

名 称	硬质岩 R_c /MPa			软质岩 R_c /MPa		
	极硬岩	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
建筑地基基础设计规范 (GB 50007—2002)	> 60		60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	≤ 5
岩土工程勘察规范 (GB 50021—2001)	> 60	60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	≤ 5	

表 1-1 (续)

名 称	硬质岩 R_c /MPa			软质岩 R_c /MPa		
	极硬岩	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
工程岩体分级标准 (GB 50218—1994)	> 60	60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	< 5	
工程地质手册 (1992)	> 60	60 ~ 30		30 ~ 5	< 5	
水工隧洞设计规范 (SD 134—1984)	> 120	120 ~ 60	60 ~ 30	30 ~ 15	< 15	
水电站大型地下洞室围岩稳定 和支护的研究和实践成果汇编 (1986)	> 100	100 ~ 60	60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	< 5
铁道工程地质技术规范 (TBJ 12—1985)	> 60	60 ~ 30		30 ~ 5	< 5	
隧道工程岩体分级探讨 (1987)	> 100	100 ~ 60	60 ~ 30	30 ~ 10	< 10	
公路与桥涵地基基础设计规范 (JTJ 024—1985)	> 30			30 ~ 5	< 5	
国防工程锚喷支护技术暂行规定 (1984)	> 60	60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	< 5	

2) 地质和工程特性描述性定义

1981 年, 在东京召开的国际软岩学术讨论会上规定软弱、破碎和风化岩石为软岩; 1984 年, 我国煤炭系统专家学者在昆明会议上将软岩定义为“强度低, 孔隙大, 胶结程度差, 受构造切割面及风化影响显著或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩体”。文献 [2] 从组成软岩的矿物方面考虑, 认为“软岩主要由矿物或黏粒组成, 是泥状结构 (泥质或钙质)、碎屑结构或胶结结构为主, 不连续结构面发育, 力学强度低, 变形模量小、亲水变形大, 流变效应明显的多成因地质作用形成的自然岩石”; 文献 [7] 从外部应力对岩体的影响方面考虑, 认为

“软岩是在高地应力、地下水和强风化作用下，具有显著渗流、膨胀或崩解特性的软弱、破碎、风化和节理化围岩”；而文献[8]则从软岩的工程特性方面考虑，将软岩定义为“在工程力作用下能产生显著变形的工程岩体”。

1.1.2 软岩的类型

国内外已提出的软岩分类方法有几十甚至上百种，相对成熟和较为完善的有以下几种。

1) 按成因分类

按成因可将软岩分为原生软岩和次生软岩，其中次生软岩包括风化软岩与断裂破碎软岩^[9]。

原生软岩主要指沉积岩。它是由松散堆积物在低温和高应力条件下形成的，是地壳表面分布最为广泛的一种层状岩石，黏土基质含量高，胶结程度差，如黏土岩、泥质粉砂岩、页岩、泥灰岩、云母片岩、盐岩、石膏等。

风化软岩是由天然岩体受日照、风、重力、降雨、流水、冰川等自然营力作用风化形成的软岩，主要包括不同风化程度的原生软岩和全风化或强风化的硬质岩。

断裂破碎软岩是由构造应力作用形成的软岩，主要包括断裂带中的软弱糜棱岩、火成岩侵入过程中的触变破碎软岩、层间错动的软弱层。

2) 按生成年代和黏土矿物特性分类

按生成年代和黏土矿物特性可将软岩分为古生代软岩、中生代软岩和新生代软岩^[10]。

古生代软岩主要包括石炭纪及二叠纪软岩，黏土矿物含量以高岭石为主，其次是伊利石和伊/蒙混层，基本不含蒙脱石。

中生代软岩主要包括侏罗纪、白垩纪和部分三叠纪软岩，黏土矿物含量以伊/蒙混层为主，其次是高岭石、伊利石，蒙脱石含量较低。

新生代软岩主要是第三纪软岩，黏土矿物含量以蒙脱石为

主, 其次是伊/蒙混层和高岭石。

3) 按岩石单轴饱和抗压强度分类

《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994) 中根据岩石单轴饱和抗压强度不同, 将软岩分为较软岩、软岩和极软岩三种。

较软岩主要包括强风化的坚硬岩, 弱风化的较坚硬岩, 未风化至微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩和页岩等。其主要特征是锤击声不清脆, 无回弹, 较易击碎, 浸水后指甲可刻出印痕。

软岩主要包括强风化的极坚硬岩, 弱风化到强风化的较坚硬岩, 弱风化的较软岩, 未风化的泥岩等。其主要的特征是锤击声哑, 无回弹, 有凹痕, 易击碎, 浸水后手可掰开。

极软岩主要包括全风化的各种岩石及各种半成岩。其主要特征是锤击声哑, 无回弹, 有较深凹痕, 手可捏碎, 浸水后手可捏成团。

4) 按软弱岩体中起主要作用的因素分类

按软弱岩体中起主要作用的因素不同, 可将软岩分为软弱型软岩、破碎型软岩、高应力型软岩、软弱破碎型软岩和膨胀型软岩, 见表 1-2^[11]。

表 1-2 按主要影响因素划分的软岩分类

类别	软岩类型	形成软岩的主要因素	分类指标	岩体基本质量指标 (BQ)
I	软弱型	岩体完整性较好、岩块强度低	$R_c < 30 \text{ MPa},$ $0.15 < K_v < 0.55$	< 250
II	破碎型	岩体完整性差、岩块强度较高	$30 \text{ MPa} < R_c < 60 \text{ MPa},$ $K_v < 0.15$	< 250
III	高应力型	岩体完整性差、岩块强度较高、高地应力或采动应力	$160 \text{ MPa} < 3R_c + 250 K_v < 260 \text{ MPa},$ $R_c/\sigma_1 < 5$	< 250

表 1-2 (续)

类别	软岩 类型	形成软岩的主要因素	分类指标	岩体基本 质量指标 (BQ)
IV	软弱 破碎型	岩块强度低、完整 性差	$R_c < 5 \text{ MPa}$, $K_v < 0.15$	< 150
V	膨胀型	膨胀性矿物、地下 水		

5) 按软岩强度特征、泥质含量、结构面特点、塑性变形力学特点及其产生显著塑性变形机理分类

按软岩强度特征、泥质含量、结构面特点、塑性变形力学特点及其产生显著塑性变形机理不同, 可将软岩分为膨胀性软岩、高应力软岩、节理化软岩和复合型软岩四大类, 见表 1-3^[8]。

表 1-3 按强度特征、泥质含量划分的软岩分类

软岩名称	泥质含量	单轴抗压 强度/MPa	塑性变形特点
膨胀性软岩	>25%	<25	在工程力作用下, 沿片架状铝硅酸盐黏土矿物产生滑移, 遇水显著膨胀等
高应力软岩	≤25%	≥25	遇水发生少许膨胀, 在高应力状态下, 沿片架状铝硅酸盐黏土矿物产生滑移
节理化软岩	少含	低—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	含	低—高	具有上述某种组合的复合型机理

6) 按软岩工程稳定性的主导因素分类

按软岩工程稳定性的主导因素可将工程软岩分为物化型软岩

(成分型软岩)、结构型软岩、应力型软岩和复合型软岩四类。物化型软岩是指含有大量黏土矿物,在工程扰动下易于发生失水-吸水产生胀缩性和工程特性持续降低的软弱岩体。结构型软岩是指受层理、节理、裂隙和软弱夹层等结构面切割,完整性差,但岩块强度较高的岩体。应力型软岩是指在较高应力水平($>25\text{ MPa}$)条件下才发生显著变形的中高强度工程岩体。应力型软岩的工程特点是,在工程力不大时,表现为硬岩的变形特性。在工程力大于一定值时,就表现为软岩的变形特性。其塑性变形机理是处于高水平应力时,岩石骨架中的基质(黏土矿物)发生滑移和扩容,此后再接着产生缺陷或裂纹的扩容和滑移等塑性变形。复合型软岩是指同时具备以上两种或两种以上特性的软弱岩体。本书采用该分类方法,仅研究物化型软岩。

此外,还有按照诸如软岩的膨胀程度^[12-18]、围岩松动圈范围^[6]等标准进行的分类,将软岩划分为不膨胀或弱膨胀软岩、中等膨胀软岩及强烈膨胀软岩等。

1.2 软岩的工程特性

1.2.1 软岩的强度特性

强度是岩石在各种荷载作用下达到破坏时所能承受的最大应力,是衡量岩石性质的一个重要指标值。朱珍德等^[19]采用MTS815.02型岩石刚性伺服试验系统和岩石膨胀测量仪,对南京红山窑水利枢纽工程膨胀红砂岩进行了力学特性试验研究,探讨了膨胀红砂岩膨胀力与吸水率的相关性以及膨胀力与膨胀变形的规律,认为膨胀红砂岩的初始吸水率对其膨胀力有着强烈的影响。

封志军^[20]、周应华^[21]通过对川东地区一红层边坡中砂岩、粉砂岩和泥岩三种岩石的三轴应力应变全过程进行试验研究,将 $0\sim3\text{ MPa}$ 的低围压下,红层软岩的全应力应变曲线概化成压密阶段、弹性阶段、屈服阶段、应变软化阶段和塑性流动阶段共五