

# 岩质地下工程围岩失稳机制 与设计方法研究

丛宇 张黎明 阿比尔的 王在泉 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 岩质地下工程围岩失稳机制 与设计方法研究

丛宇 张黎明 阿比尔的 王在泉 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书系统介绍了岩质地下工程围岩的失稳机制与设计方法，主要包括岩石卸荷破坏试验及分析、能量演化规律、声发射特征，岩石卸荷 PFC 数值试验及分析，岩质地下工程开挖相似模型试验、离散元试验，岩质地下工程围岩分级方法、设计计算方法等方面的内容。

本书可供从事隧道工程相关的专业人员参考，也可作为采矿工程、水利工程等相关专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目（C I P）数据

岩质地下工程围岩失稳机制与设计方法研究 / 丛宇  
等著. — 北京：中国水利水电出版社，2019.12  
ISBN 978-7-5170-8287-3

I. ①岩… II. ①丛… III. ①地下工程—围岩稳定性—研究 IV. ①TU94②TU457

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第288920号

书 名	岩质地下工程围岩失稳机制与设计方法研究 YANZHI DIXIA GONGCHENG WEIYAN SHIWEN JIZHI YU SHEJI FANGFA YANJIU
作 者	丛宇 张黎明 阿比尔的 王在泉 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 298千字
版 次	2019年12月第1版 2019年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	86.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

我国国民经济的持续快速发展对基础工程建设和资源开发显露出前所未有的渴求，隧道工程在其中发挥着举足轻重的作用。在高速铁路方面，如京沪、武广、福厦以及沪汉蓉大通道等；在地铁工程方面，国内已建成超过 600km 的地铁和轻轨，北京、上海、广州等 12 个城市 36 条城市轨道交通线路正在建设。截至 2020 年 4 月，我国已有 43 个城市开通地铁，总轨道交通里程超过 6476km。“十三五”规划纲要更是明确指出继续推进一批重大工程项目的实施，强化基础设施支撑力，进一步增强国家综合实力。但随着深埋隧洞、能源矿山、水利水电、CO<sub>2</sub> 储存与城市地铁等工程的发展，我国进入了地下工程围岩失稳灾害高发期。地下工程围岩失稳灾害是干扰正常施工秩序、威胁人员设备安全的重要因素，制约着经济、社会的高效发展。如何应对围岩失稳灾害，已成为当今地下工程及相关领域的关注热点。

弄清岩质地下工程围岩失稳机制成为工程力学界迫切需要解决的问题。一般而言，工程开挖是复杂的加、卸荷过程，应力场不同、开挖过程不同对应着不同的应力路径，不同的变形、破坏机理。地下工程开挖，岩体可能处于多向受压状态或单向受压、受拉状态，因此破坏形式可能表现为剪切破坏或劈裂破坏、拉伸破坏，不同工程加荷与卸荷方向取决于围岩初始应力场与工程形状、方位。

只有弄清复杂加、卸荷路径下岩石的破坏机制，合理确定围岩参数并进而设计合理的地下工程设计计算方法，才能完善和发展岩石力学，才能对工程岩体的强度和变形特征进行合理的预测，才能为岩体工程施工与支护提供合理的建议。

同时由于地下工程岩体的复杂性，试图采用一种理论，解决不同地下工程围岩稳定分析问题是不现实的，岩体理论需要不断地发展与完善，如围岩分级方法确定合理的围岩参数、适应不同地下工程的设计计算方法等。

本书共分为 10 章：第 1 章介绍目前国内外岩质地下工程围岩失稳机制与设计方法的研究进展，并进行归纳总结；第 2 章介绍复杂卸荷路径下岩石破坏试验，并对变形过程进行详细分析；第 3 章、第 4 章分别从能量以及声发射角度探讨卸荷速率、卸荷应力水平、卸荷初始围压、位移控制方式、应力控制方式等因素对岩石卸荷破坏过程的影响；第 5 章介绍岩石失稳破坏颗粒流数值方法，并给出不同因素对不同卸荷路径条件下岩石失稳破坏的细观机制；第 6 章注重从岩体角度介绍地下工程开挖相似模型试验，探讨卸荷开挖围岩失稳破坏过程；第 7 章则从颗粒流细观角度探讨地下工程围岩破坏机制；第 8 章从工程现

场出发，修正适用于岩质地下工程的围岩分级方法；第9章进一步深化提出岩质地下工程设计计算方法，并应用于青岛地铁和重庆轨道；第10章对全书进行总结，并对未来发展进行展望。

本书的编写过程中得到了青岛地铁集团有限公司、重庆市轨道交通（集团）有限公司、莱钢集团莱芜矿业有限公司等的大力支持，研究过程中得到郑颖人教授、冯夏庭教授、王在泉教授等许多专家的指导，同时编写过程中还得到杨林、王怀嘉、张勇、郭徽、丛怡、贤彬、石磊、任明远、赵曼等的帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者经验水平有限，加之时间仓促，书中难免有不少缺点、错误和疏漏。一些意见和建议只是初步探索与思考，有待今后继续完善。不足之处，敬请读者批评指正。

**编 者**

2019年9月于青岛

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 研究意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.3 岩体卸荷破坏研究存在的问题 .....	13
1.4 研究内容及技术路线 .....	14
<b>第 2 章 岩石卸荷破坏试验及分析</b> .....	16
2.1 试验方案设计 .....	16
2.2 常规三轴加荷破坏试验 .....	22
2.3 不同应力路径卸荷破坏试验 .....	25
2.4 卸荷围压对变形特征的影响 .....	29
2.5 卸荷速率对变形特征的影响 .....	30
2.6 卸荷应力水平对变形特征的影响 .....	32
2.7 小结 .....	33
<b>第 3 章 岩石卸荷破坏过程能量演化规律</b> .....	35
3.1 能量法原理 .....	35
3.2 常规三轴加荷破坏试验 .....	36
3.3 恒轴压、卸围压破坏试验 .....	39
3.4 位移控制加轴压、卸围压破坏试验 .....	43
3.5 应力控制加轴压、卸围压破坏试验 .....	48
3.6 小结 .....	51
<b>第 4 章 岩石卸荷破坏过程声发射特征</b> .....	53
4.1 声发射试验 .....	53
4.2 不同应力路径破坏过程声发射特征演化规律 .....	56
4.3 围压的影响 .....	60
4.4 卸荷速率的影响 .....	66
4.5 卸荷应力水平的影响 .....	71
4.6 小结 .....	73

<b>第 5 章 岩石卸荷 PFC 数值试验及分析</b> .....	75
5.1 数值试验 .....	75
5.2 基于室内试验的宏细观参数分析 .....	78
5.3 卸荷破坏的细观能量分析 .....	87
5.4 卸荷破坏前兆细观分析 .....	91
5.5 卸荷破坏过程细观分析 .....	95
5.6 小结 .....	99
<b>第 6 章 岩质地下工程开挖相似模型试验</b> .....	100
6.1 相似试验设计 .....	100
6.2 石膏隧洞破坏试验 .....	104
6.3 复合材料隧洞破坏试验 .....	110
6.4 不同材料对破坏形式的影响 .....	119
6.5 小结 .....	119
<b>第 7 章 岩质地下工程开挖离散元试验</b> .....	120
7.1 颗粒流计算模型 .....	120
7.2 石膏隧洞颗粒流试验 .....	121
7.3 复合材料隧洞颗粒流试验 .....	131
7.4 不同材料对破坏形式的影响 .....	143
7.5 小结 .....	144
<b>第 8 章 岩质地下工程围岩分级方法</b> .....	146
8.1 现有围岩分级分析 .....	147
8.2 岩质地下工程围岩分级方法研究 .....	149
8.3 重庆地铁 1# 与 6# 围岩实例调查分析 .....	152
8.4 小结 .....	158
<b>第 9 章 岩质地下工程围岩支护设计计算方法研究</b> .....	159
9.1 初衬混凝土抗剪强度 .....	159
9.2 地下工程围岩支护设计计算方法研究 .....	166
9.3 工程应用 .....	170
9.4 小结 .....	176
<b>第 10 章 结论与展望</b> .....	177
10.1 结论 .....	177
10.2 展望 .....	180
<b>参考文献</b> .....	181

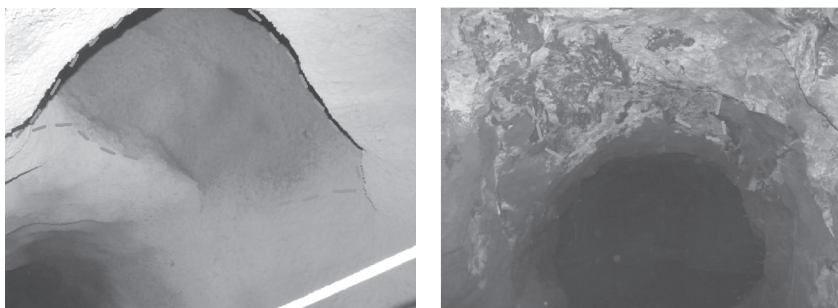
---

# 第 1 章 概述

---

## 1.1 研究意义

20 世纪下半叶,我国大型水利水电工程,如三峡工程等的兴建,提出了大量的岩石力学与岩土工程问题,并通过大量的室内与现场试验,在复杂工程开挖、地应力理论等方面都取得了重大进展<sup>[1]</sup>。进入 21 世纪,国家经济迅猛发展,并带动相关工程进入高速发展阶段。例如:水利工程方面,三峡大坝长 2335m,永久船闸高边坡高达 170m,深圳布吉郁南超高型采石场边坡高达 160m,澜沧江小湾水电站自然边坡高达 1000m,锦屏一级水电站开挖边坡高达 540m,墨脱水电站引水隧洞埋深 4000m 等;隧道工程方面,近几年兴建的高速铁路包括京沪、武广、福厦以及沪汉蓉大通道等有相当高比例的隧洞等;地铁工程方面,国内已建成超过 600km 的地铁和轻轨,北京、上海、广州等 12 个城市 36 条城市轨道交通线路正在建设,多达 15 个城市的地铁规划得到批复,未来 10 年城市轨道交通线路总长将达 1700km;新兴地下空间应用方面,战略能源储备进入实施阶段,具体有每年多达上千吨的核废料地下储存工程,长期规划的二氧化碳在盐岩中的储存工程等。同时经济的发展也增加了对能源的需求,矿山开挖深度逐渐增加,金属矿山方面,如冬瓜山铜矿主采区深达 800~1000m、山东玲珑金矿深达 1000m 等;煤矿方面,如山东巨野煤矿深达 1500m 等。地下工程与矿业工程的发展以及复杂的地质环境,带来大量的地质灾害问题:自然或人工开挖岩质边坡的稳定、地下隧洞冒顶和垮落、地下洞室对地面建筑物的影响、深部岩爆与矿山冲击地压等,如图 1.1 所示。



(a) 坍塌冒顶

(b) 深部岩爆

图 1.1 工程地质灾害图

为解决上述地质灾害，研究岩体的变形破坏特性，弄清工程岩体破坏机制已成为工程力学界迫切需要解决的问题。工程开挖前，围岩处于相对稳定和平衡的应力场；开挖后，围岩在开挖自由面处解除约束，一定范围内应力重分布，围岩在应力作用下出现变形，薄弱处甚至出现局部破坏现象，并可能在此基础上出现工程的整体破坏<sup>[3]</sup>。一般而言，工程开挖是复杂的加、卸荷过程，应力场不同、开挖过程不同对应着不同的应力路径、变形和破坏机理。地下工程开挖，岩体可能处于多向受压状态或单向受压、受拉状态，因此破坏形式可能表现为剪切破坏或劈裂破坏、拉伸破坏，不同工程的加荷与卸荷方向取决于围岩初始应力场与工程的形状、方位。

同时，由于地下工程岩体的复杂性，基于岩块的破坏机理与强度参数研究不能直接应用到工程岩体中，岩体计算方法和计算参数也受到工程地质环境的制约，难以达到理想的结果，比如围岩地质条件、初始地应力、洞室形状和尺寸、施工方法及时间效应、支护结构型式等因素都会影响围岩稳定。因此，试图采用一种理论，分析解决不同地下工程围岩的稳定问题是不现实的，岩体理论还需要不断地发展与完善，如围岩分级方法、合理围岩参数的确定、适应不同地下工程的设计计算方法等。

只有弄清复杂加、卸荷路径下岩石的破坏机制，合理地确定围岩参数并设计合理的地下工程设计计算方法，才能揭示岩体的力学行为，掌握工程岩体的变形破坏特征，才能对工程岩体的强度和变形特征进行合理的预测，为岩体工程施工与支护提供合理的建议，并进一步发展和完善岩石力学。

## 1.2 国内外研究现状

岩体加、卸荷破坏现象广泛存在于岩体工程中，工程施工与使用过程中常发生各种岩体破坏问题，因此迫切需要弄清岩体的破坏机制。当前，关于岩石破坏的理论与室内试验研究是岩石力学研究的热点之一。能量法、声发射法、分形法以及数值模拟等研究手段都可见于岩石力学的机理研究。

### 1.2.1 岩石卸荷破坏试验研究

岩体破坏过程中包含着力学演化机制的重要信息，如应力—应变关系、承载强度以及破坏形式等，通过对破坏过程信息的分析，有利于研究岩体的力学特性。岩石力学起源于采矿工程，直至 20 世纪 70 年代，岩体力学测试技术才得到重大突破，即现场深部岩体应力可用应力解除法得到，同时得益于刚性试验机的出现，室内岩样试验可以测得全应力—应变曲线，从而更深刻地描述岩体的力学特性。

同时，部分学者指出卸荷岩体力学更符合实际工程的力学状态，如哈秋龄、李建林等通过对三峡工程永久船闸高边坡的仿真实验，指出岩体加荷与卸荷的区别；岩体力学参数、受荷应力路径、屈服条件、分析方法等，并提出更符合工程实际力学状态的卸荷岩体力学；Lau Josep S. O. 等也指出加荷试验路径与工程实际不符，采用卸荷路径测定岩石力学参数更为准确。

在卸荷岩体力学的基础上，相关学者对岩石力学参数进行了研究。Shimamoto T. 提

出用卸围压试验方法计算岩石不同围压下的摩擦强度；尤明庆等依据大理岩的三轴卸围压试验，分析强度与岩样弱化破坏间的关系，提出以岩样弱化模量来描述表征岩样的强度弱化；高春玉等对取自锦屏水电站边坡的大理岩进行室内三轴卸荷试验，认为大理岩卸荷时变形模量减小，岩样抗压强度减小，黏聚力大幅度减小，但内摩擦角增加量很小；李宏哲、汪斌等同样对锦屏水电站引水隧洞的大理岩进行卸围压破坏试验，发现卸荷后大理岩岩样侧向变形会显著增加，并且增加速率逐渐增大，同时弹性模量降低；苏承东等对大理岩进行不同应变速率的单轴压缩试验，认为大理岩峰值强度与应变速率呈二次多项式相关，弹性模量和峰值应变受应变速率影响不大，泊松比与应变速率呈指数关系；武尚等依据二叠系灰岩的三轴试验，将 15MPa 围压以下的应力—应变曲线划分为孔隙压密、弹性、屈服、软化以及流塑等变形阶段；王鹏等对砂岩进行不同温度等级下的单轴动态压缩试验，得出砂岩 200℃ 后弹性模量会降低，峰值应变会增大，高于 600℃ 力学特性会发生显著变化；魏伟等认为风化和蚀变会削弱花岗斑岩的力学特性，呈相应的函数关系降低。

在岩体力学发展的初期，部分学者认为应力路径对破坏过程的影响不明显。如 Crouch、Swanson、陈旦熹、吴玉山等通过室内卸围压三轴试验，研究卸围压的应力路径对岩石强度和变形特征的影响，结果表明卸围压路径对岩石强度影响不明显，但对岩石的变形特征影响明显。随着试验设备与试验手段的提高，学者们逐渐发现应力路径对岩样破坏过程也有影响。如许东俊、尹光志等通过不同应力路径的室内真三轴砂岩、灰岩变形和破坏试验，得到岩石的强度、变形和破坏特征均与应力路径有关的结论，同时也认为任意主应力变化都可能引起岩石变形与破坏；刘立鹏、李新平等对锦屏二级水电站的大理岩进行复杂路径的加卸载试验，结果表明应力路径对应力—应变曲线、强度变形破坏特征、破裂机制以及储能规律都有明显的影响；韩铁林等对砂岩进行不同路径的三轴试验，认为初始轴压与围压影响砂岩的强度变形特征，加载速率影响不明显；陈金锋等对石灰岩碎石填料进行三轴试验，认为变形特性与应力路径相关性很强。

实际上，应力—应变关系作为岩石特定力学状态的描述手段，只是热力学状态某一方面的表征。岩体自身结构不均匀，同时外载极为复杂，导致岩体变形破坏过程是不确定的损伤破坏过程，也就是说局部高应力或者高应变可以使岩体产生损伤、强度丧失，但并不一定会导致岩体的整体破坏。因此，单纯依靠应力—应变关系建立强度准则或以其大小作为破坏判据，很难真实反映岩石的破坏规律。从热力学角度可知，能量的变化才是物质物理过程最本质的特征，而物质的破坏不过是能量驱动下的一种状态失稳现象，因此详细分析岩体变形破坏过程中能量的演化规律，就有可能更真实地反映岩体的变形破坏规律。王学滨利用岩石试件直剪试验，推导出基于能量的应变失稳判据，又根据单轴压缩岩样推导出基于能量原理的剪切破坏失稳判据；高红等推导出适合岩土材料的三剪能量准则，并利用岩石真三轴试验进行验证，认为考虑单剪切面的 Mohr - Coulomb 准则要比三剪强度准则更加保守；LI QM 等认为材料黏结强度决定了试样破坏的弹性能密度值，决定了材料的破坏形式，可定义材料的失效准则；苏承东等对损伤试件进行了单轴压缩试验，结果表明三轴压缩过程中试件屈服前能量消耗较少，塑性变形消耗较多能量，塑性变形与耗能具有良好的线性特征；尤明庆等对粉砂岩进行单轴压缩、卸围压试验，并简单分析试验过程中能量的演化规律，认为岩样破裂时实际吸收的能量与破裂所处的围压成线性关系，而

试验应力路径对此影响并不是很明显；张志镇等对红砂岩进行不同加载速率下的单轴压缩试验，得到加载过程中能量的演化规律；姜永东等认为煤与瓦斯突出过程中，煤的单位体积弹性能与体应力之间呈幂函数关系；尹士兵等对砂岩进行温—压耦合的冲击试验，认为冲击载荷不变、轴压为 0MPa 时的能量吸收率最大；赵闯等开展循环加卸载试验，结果表明岩石破坏前循环一次的能耗值与损伤变量之间呈近似线性关系，从能量损耗的角度定量分析了岩石疲劳破坏的门槛；刘天为等进行大理岩加载过程能量演化规律分析，结果表明弹性变形阶段岩石吸收的能量占总能量的比重较小，屈服变形阶段耗散能量最多；柴波等分析了巴东组岩石能量的耗散现象，认为沿弱面剪切破坏的能耗最小而楔形剪—张破坏的平均能耗最大；梁昌玉等则认为随着应变率增长，岩石单位体积吸收的总应变能、弹性应变能的生长；SUJATHAL V 和 STEFELER E D 等给出了岩体单元破坏与岩体单元内可释放应变的关系。

### 1.2.2 岩石卸荷破坏声发射特征

岩石破坏过程中以弹性波形式释放出瞬时应变能的现象即为声发射，利用声发射技术可以连续监测岩石内部的损伤变形。岩石变形破坏的过程实际是内部微裂隙萌生、扩展和断裂的过程。岩石的声发射现象与其受力破坏间存在必然的联系。因此，通过对岩体破坏过程中声发射特性的分析，总结声发射特征与岩体力学参数之间的联系，可以反演判断出岩体内部结构的破坏机制，从而预测预报岩体工程破坏失效的前兆。岩石力学工作者借助声发射技术，已经取得了很多的研究成果。

Tang C. A. 等依据声发射原理以及细观损伤力学原理，提出岩石的声发射与损伤之间具有一致性的假设，并在假设的基础上从数值模拟的角度进行探讨；Pestman B. J. 等采用声发射技术对岩石损伤进行研究，并建立应力空间内损伤面的定义，通过声发射活动来表示损伤面上的点；Mansurov V. A. 根据岩体破坏过程的声发射现象预测岩体的破坏类型，系统研究了不同岩石的声发射特征；Holcomb D. J. 等应用 Kaiser 效应原理来评估岩石的围岩应力状态，并应用声发射技术评估岩石的损伤。

李庶林等分析了花岗岩、辉绿岩、灰岩、矿石、片岩等岩石单轴压缩破坏过程的声发射特征；付小敏进行了砂卡岩、闪长岩、粉砂岩等岩石的单轴压缩变形及声发射特性研究；陈景涛分析了三轴压缩试验中花岗岩的声发射特征与变形特征之间的关系；Chang S. H. 等给出了三轴加载条件下岩石的损伤变量；陈忠辉等认为快速卸围压促使声发射率突增；苏承东等对煤样进行三轴加、卸围压试验，以研究不同路径下声发射特征的区别；吴刚和赵震洋分析了三轴应力状态下岩石三种不同卸荷方式的声发射特征；张晖辉等对片麻岩进行三轴循环载荷试验以寻找其破坏前兆的声发射特征；余贤斌等研究了花岗岩在直接拉伸环境下的声发射特性；张黎明等研究了加轴压、卸围压路径下大理岩的声发射特性。

姚强岭等认为含水砂岩声发射计数峰值与应力峰值相对应，随着含水率增加，声发射计数峰值呈现“延迟”特征；王晓南等对不同煤岩组合试样进行了声发射和微震试验，表明试样冲击破坏时的声发射强度与试样的单轴抗压强度、冲击倾向性以及顶板与煤层的高度比值有关；张泽天等探究了直接拉伸荷载作用下煤岩的声发射特征，认为峰后试件振铃计数率和声发射能率阶段性反复升降；孙强等认为岩石脆性破坏与能量释放及物理场参数

变化有关,破坏时声发射激增,电磁辐射和红外辐射强度增加;尹光志等对含瓦斯煤岩进行了不同路径的声发射特征试验,表明声发射累积振铃计数曲线斜率从卸围压起始点明显增大,并在失稳破坏处出现拐点,以卸围压起始点为界,声发射幅值曲线呈双峰状态。

纪洪广等以华亭矿区砚北煤矿为研究背景,研究了声发射特征与压力前兆之间的关系,表明两者间呈“升压平静—降压活跃”与“升压降压平静”耦合的模式;宫宇新等通过建立分割短数据的时间/频率分辨率的计算公式并根据大数据的优化原则,提出了时频分析的综合优化算法,表明应用多维度瞬时频率前兆可以更好地描述岩石非线性破坏过程的前兆信息;孙强等认为砂岩脆性破坏前的声发射信息存在“准平静期”,平静期的历时与峰值强度历时的比值平均约为8%,应力—应变曲线峰值拐点的声发射信息损伤值大于0.9;吴刚等认为100℃和600℃的声发射振铃累计数会发生剧烈变化,因为高温会导致声发射信号的时间有所推迟,且信号增长率会不断上升;赵伏军等采集了花岗岩动静组合载荷试验的声发射数据,表明动载荷、动静组合载荷和静载荷下破碎单位体积岩石释放的声发射累计能量分别为WD、WS+D、WS且WD;许江等研究了不同饱和度下煤岩细观剪切破坏过程中的声发射特征,表明饱和度为0%时,破坏时的累计声发射事件数最多,而饱和度为50%和100%时,裂纹出现在剪应力峰值前,破坏后累计声发射事件数相对较少;孙强等推导出岩石破裂前声发射信号激增的临界点对应的应力和峰值应力比值的表达式,并结合试验认为单轴压缩时岩石脆性破裂对应的比值近似为74%。

### 1.2.3 岩石卸荷破坏本构理论

破坏面几何形态是体现岩体破坏形态的重要因素,破坏面的形成与岩体力学演化过程密切相关,破坏面形态包含岩体自身结构性质、岩体的破坏路径以及岩体抗剪强度等重要信息。因此,确定合理描述岩样破坏面的方法与手段,就有可能得到破坏面蕴含的隐藏信息,从而有利于分析岩样的破坏过程。面对破坏面这种复杂又不规则的构型,即使用传统数学方法对其简化和抽象,也显得无能为力,此时分形几何学提供了新的解决思路。分形几何学的研究对象为不规则的几何图形,如弯曲的海岸线、起伏的山脉以及材料的断裂裂纹等。分形维数是分形几何学的重要概念,是描述非规则物理现象的有利工具。

高峰等基于分形理论研究岩石的损伤与破碎,表明岩石的初始损伤与破碎之间存在较强的相关性,通过分析初始缺陷的分布,可以预测岩石破碎的块度分布规律;刘京红等证明岩石类材料内部裂纹扩展过程具有分形特征,从而分析岩石破坏失稳与内部微裂纹产生、扩展的关系;何满潮与李德建等通过对一系列岩爆试验的分析,认为岩爆微粒碎屑具有分形特性,并介绍了粗粒、中粒、细粒以及微粒等不同粒组碎屑的分形研究方法。

孙洪泉等提出改进的自仿射分形插值概念,推导出模拟精度的计算公式,给出由研究对象局部模拟整体的方法;易成等基于分形理论提出描述粗糙表面形貌的新的指标;周宏伟等提出粗糙表面分形维数估算的立方体覆盖法,通过对比三角形棱柱表面积法、投影覆盖法和立方体覆盖法的结果,发现立方体覆盖法的分形维数计算结果更加接近实际;张亚衡等提出粗糙表面分形维数估算的改进立方体覆盖法,通过对比立方体覆盖法和改进立方体覆盖法的估算结果,得出通过改进立方体覆盖法得到的分形维数可以更真实地体现岩石断裂表面的形貌特征;孙辅庭等提出新的基于三维均方根抵抗角的节理面粗糙度分形描述

方法,并对天然玄武岩节理和花岗岩张拉型节理进行了分析。

冯增朝、Feranle S 等证明限定区域内岩体裂隙服从分形规律,同时裂隙数量越多,分维值越大,岩体单轴抗压强度的对数值和裂隙分形维数呈负线性关系;李延芥等通过对岩石单轴压缩破坏过程中裂纹分形维数的分析,证明分形维数随岩石裂纹尖端剪应力的增加而增大。黄达、易顺民等通过对单轴、三轴压缩以及卸围压岩样破裂的分形特征分析,认为不同路径下的岩样破裂表现出良好的分形特性:单轴压缩时,分形维数随压力增加而增大;三轴压缩时,不同围压和应变率下的破裂分维值不同;高应力时,卸围压试样碎块仅在小于某一特征尺度范围时才会表现出分形特性,同时卸荷速率增大,分形维数减小;刘京红等建立了声发射参数分形维数计算模型,对单轴压缩下煤岩的声发射特征进行分析,将声发射能量关联维数的持续降低作为煤岩失稳破坏的前兆;曹平等探究不同温度下水岩相互作用对岩石节理表面形貌变化的影响机制。

王其胜等认为静载相同动载不同时,岩石破碎的分维值随应变增大而增大,但在相同冲击动载下,静载荷变化分维值变化不大;单晓云等推导出岩爆块度分布与分形维数的关系式,建立分形维数与爆破参数间的定量关系;刘石等认为岩石分形维数随冲击速度升高呈近似线性正比上升趋势,动态抗压强度随块度分维的增大呈增加趋势。

数值计算技术与方法的发展,为研究处于复杂应力状态和复杂结构形状的工程岩体提供了有效途径,而如何建立描述岩体基本力学行为的模型逐渐成为阻碍岩石力学发展的主要因素。本构模型与强度理论是工程岩体力学状态分析的基础和出发点。岩体本构理论逐渐由弹性理论(Cauchy 弹性模型、Green 模型、次弹性模型、Duncan - Chang 模型、Domaschuk - Valliappan 模型、南京水利科学研究院非线性模型)发展到弹塑性理论(剑桥模型、Lade 模型、Desai 模型、南京水利科学研究院弹塑性模型、后勤工程学院弹塑性模型)、流变理论、损伤理论以及断裂力学等。

受实际工程岩体的不均匀性、非线性以及非连续性影响,岩体在加、卸荷条件下的力学行为有所不同,另外传统力学理论在应用过程中与实际工程存在一定的出入,很难较准确地预测岩体的力学行为,因此卸荷岩体本构理论成为力学研究的热点之一。

周小平依据损伤断裂力学理论建立了卸荷条件下的应力—应变关系,包括线弹性、非线性强化、应力跌落和应变软化四个阶段,并通过理论和试验研究验证出卸荷破坏所需要的应力比连续加荷破坏时小,且卸荷破坏时的变形比连续加荷时大;Cai M 等从统计分析出发,推导出考虑开挖卸荷影响的节理岩体非线性弹性本构模型,并将模型应用于隧洞围岩的力学分析中;刘杰等进行了地质材料模型、石膏模型、砂浆模型的试验,并通过对试验结果进行拟合分析,得出卸荷岩体的增量本构关系。

陈忠辉等基于连续介质损伤力学方法建立了三维各向同性弹脆性本构方程,并探讨卸荷过程中岩样的变形特点、围压效应、强度和脆化特征;G. Wu 等基于扰动状态概念理论建立了能反映岩石卸荷破坏特征的本构模型;刘恩龙等基于二元介质模型对卸荷破坏过程中的岩样进行模拟;颜峰等基于线弹性断裂力学理论建立了裂隙岩体概化模型,并分析裂隙岩体在最小、最大主应力卸荷条件下的应力强度因子与变形特性。

张明等结合统计强度理论和连续损伤理论建立了一种统计损伤本构模型,并通过理论曲线与试验曲线的对比,验证模型的适用性;刘恩龙等引入考虑各向异性影响的破损率和

局部应变系数，建立了二元介质本构模型，并给出模型参数的确定方法；卢兴利等依据三轴卸荷试验，建立了卸荷条件下岩石损伤扩容和破裂演化机制的本构模型，并应用于深部巷道围岩的稳定性分析；杨光华等把传统模型中不可恢复的塑性应变增量分解为具有弹性应变性质的弹性部分和纯塑性部分，建立的塑性本构模型合理且简便；陈亮等基于 Riemann - Liouville 分数阶微积分理论，从经典元件组合的角度建立四元件非线性黏弹塑性流变模型；杨光华等规避传统塑性理论分析中采用的塑性势函数，从广义位势理论出发，建立了一种改进的类剑桥模型；曹瑞琅等认为残余强度逐渐成为影响岩石应力—应变曲线的重要因素，基于 Weibull 随机分布假设，考虑残余强度对损伤变量的修正，建立了能反映峰后软化特性的三维损伤统计本构模型；谢理想等以朱王唐模型为基础，用损伤体代替弹性元件，建立了一种损伤型黏弹性动态本构模型；王东等从室内单轴和三轴试验出发，将环向应变和剪切应变作为控制参数，从而建立了反映本溪灰岩的本构模型；张振南等在微观层面上将材料视为由随机分布的材料颗粒组成，基于 Cauchy - Born 规则从超弹理论角度，建立了由微观到宏观的本构方程。

付金伟等采用改进的弹脆性本构方程以及超细单元划分法来模拟不同倾向裂隙的破裂过程和椭圆形三维单裂隙的扩展过程；袁克阔等在子午面上考虑黏聚力，偏平面考虑罗德角，从而建立了包含黏聚力与拉压不等效应的非相关联修正的剑桥本构模型；袁小平等采用二参数 Weibull 函数模型反映微裂隙分布，并用其来表示含有微裂隙的损伤演化变量，同时用 Voyiadjis 等效塑性应变的硬化函数来反映其对硬化函数的影响；李亚丽等将非线性弹塑性元件与 Burgers 模型串联，建立了新的六元件非线性黏弹塑性 Burgers 蠕变本构模型；宋勇军等将含分数阶微积分的软体元件与弹簧元件串联，同时结合幂函数弹塑性体，提出一种新的四元件非线性黏弹塑性流变模型；曹文贵等假设研究对象抽象为损伤和未损伤两部分组成，从而建立了可以反映岩石破坏后仍具有残余强度特征的新型损伤模型。

#### 1.2.4 岩石卸荷破坏细观模拟

岩体是由天然材料如石头、矿物质与砂砾等组成的非均质复合材料，内部含有丰富的孔洞、裂纹等，物理力学性质差异明显。岩体材料内部非均质的细观结构决定了内部由应力集中引起的微观裂纹的发展，并最终影响材料的破坏形式。目前，研究非均质性对材料力学特性影响的试验设备与试验方法并不成熟，但数值计算理论的发展使力学分析中考虑非均质性的影响成为可能，以数值理论为基础，建立合适的力学模型，从而达到模拟材料力学响应与破坏形式的目的。

颗粒流是颗粒物质在外力作用或者内部作用力影响下形成的类流体运动状态，是研究材料非均质性的重要方法之一。通过模拟一定范围内颗粒多次碰撞，统计分析碰撞过程中颗粒的运动特征量，得到研究对象的应力、速度分布函数以及能量等参量，从而有助于弄清材料的破坏机理。

杜鹃与周喻等将颗粒流程序 PFC2D 与传统的离散元和有限元方法比较，认为 PFC2D 可以用来模拟颗粒间的相互作用、大变形甚至于断裂问题；陈建峰等通过黏性土的双轴模拟试验，表明土颗粒间各项细观参数均会影响黏聚力和内摩擦角，尤其是接触强度和颗粒

摩擦系数；周健等认为砂土宏观力学特性主要受配位数、颗粒间法向和切向接触力等细观力学参数的影响；唐洪祥等认为研究对象的承载能力、破坏区域与颗粒间的切向与法向刚度、粗糙程度、对象的受力水平有关。

朱焕春、徐金明、倪小东等运用 PFC 模拟矿山开采、石灰岩以及岩体渗透等，表明微观力学参数的选取是颗粒流数值模拟的关键；吴顺川等运用颗粒流模拟卸荷岩爆试验，认为 PFC3D 数值模拟可以部分替代室内试验，且颗粒流模拟方法是模拟岩爆的有效手段；Baoquan An 等用离散单元法建立了岩石冲击的动态仿真接触模型；Cai M 采用 PFC2D 模拟节理岩石的峰值和残余强度，定量分析节理岩石在地下工程开挖过程中微震导致的破坏。

刘宁等利用 PFC 模拟大理岩在破裂过程中的时间效应；姚涛等用 PFC2D 模拟不同围压下大理岩三轴试验，通过数值模拟得到的强度参数普遍偏大；孟京京等用颗粒流虚拟实现平台圆盘巴西劈裂，认为平台中心角越大，岩石内损伤破坏程度越高；余华中等模拟节理岩石直剪试验，表明剪切裂纹发育数目在微裂纹总数中所占比例增大；武军等基于颗粒流椭球体理论，提出砂土隧道松动区的计算方法，改进 Terzaghi 松动土压力；刘广等认为颗粒的球度增大，模拟对象的启裂强度、损伤强度和峰值强度均会降低；黄达等利用 PFC2D 开展不同倾角非贯通单裂隙砂岩单轴压缩试验，表明随着应变率增大，裂隙尖端的破裂应力增加，随着裂隙倾角增大，切向剪应力整体增加，法向剪切力明显减小；刘宁等证明颗粒流程序可以从细观角度准确再现试验过程中的裂纹扩展和破裂特征。

### 1.2.5 岩石地下工程围岩分级

岩体是复杂的地质体，地质环境充满差异性和随机性，导致地下工程的设计施工环境远比地面工程复杂，尤其是目前测试的岩块的力学强度，它不能代表岩体的力学强度。因此在地下工程设计中广泛采用以经验为主的工程类比法，需要借助隧洞围岩分级等经验手段来确定岩体的强度参数。当前围岩分级是地下工程设计施工的基本前提，也是确定围岩力学参数的依据。围岩分级是在地质勘查资料和岩石试验数据的统计、分析以及归纳的基础上，确定影响围岩稳定的各种因素并综合评价围岩的稳定性从而确定围岩级别。可见天然条件下围岩的稳定性是围岩分级的基本依据。

#### 1. 围岩分级方法

国内外现有的围岩分级方法包括按基本因素定性分级和通过综合各类因素人为打分定量分级两种。定性分级方法比较灵活，便于有经验的技术人员使用，且经受了长期的实用考验。定量分级方法是对各因素进行打分，经计算获得岩体质量指标，并按此进行分级，如国外巴顿的 Q 分级、比尼阿夫斯基的地质力学 (MRM) 分级等，这种分级方法比较清晰，容易操作，但由于岩体质量指标值难以准确确定，使其应用范围大受限制，实际应用中并不多。

近年来提出了一些新的围岩分级方法，如陈炜滔等用数学统计理论和灰色关联的方法确定围岩分级的相应指标和界限值，但该方法尚难以被实际应用。现在工程中采用的还是上述两种实用分级方法。郑颖人等对定量打分方法提出了改进意见，主要是对围岩基本质量指标 BQ 值进行了修改，使定性分级标准与定量分级标准能较好地统一，并能弥补定性

分级方法难以全面反映实际的缺陷，得出更加符合实际的围岩分级指标。

此外，近年来还提出许多特殊条件下的围岩分级方法。如李苍松等建立了岩溶围岩分级的物理模型和数学模型，并通过计算确定岩溶围岩级别；沈冬冬以扁担垭隧道为例分析总结了围岩分级方法在高地应力隧道中的适用情况；梁庆国等研究了黄土隧洞围岩的水敏感性、小应变破坏特性、各向异性和节理等特殊性质，并对其进行了分级。

以往围岩分级中，有的规范将岩石与土体综合分级；有的规范将岩石单独分类。前者是为了应用方便，但过于笼统，容易造成错误。例如，把老黄土  $Q_1$ 、 $Q_2$  划在Ⅳ级，但老黄土的黏聚力只有 40~70kPa，而Ⅳ级围岩黏聚力规范规定为 200~700kPa，可见两者差别很大，会使计算时出现严重错误。目前，将岩和土分别进行分级有明显的趋势，如王明年等提出建立各自独立的岩质和土质围岩的统一标准，郑颖人等则比较明确地提出岩石单独分级，而土体可以不分级的观点，因为土体的参数可以通过严格的试验较为准确地确定，不像岩体需要通过经验方法确定。

## 2. 影响围岩分级的基本因素与特殊因素

影响围岩分级的基本因素，各种规范基本上都是一致的。一是岩块自身质量的好坏，通常以岩石单轴饱和抗压强度表示；二是考虑岩体的完整程度，即岩体的完整性。由于这些因素没有太大变动，而且观点和做法都比较一致，这里就不再重述。另外郑颖人等认为岩块强度升高，并不会增大围岩稳定性，建议坚硬岩强度由 30~60MPa 改为 30~50MPa。影响围岩分级的特殊因素通常包括地下水、不良结构面和初始地应力的影响。对这些特殊因素的处理，不同的规范有不同的处理结果。《公路隧道设计规范》(JTGD 70—2004)、《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014) 采用了修正围岩基本质量指标的方法。围岩基本质量指标修正值  $[BQ]$  的计算公式为

$$[BQ] = BQ - 100(k_1 + k_2 + k_3) \quad (1.1)$$

式中： $BQ$  为围岩基本质量指标； $k_1$  为地下水影响修正系数； $k_2$  为主要软弱结构面产状影响修正系数； $k_3$  为初始应力状态影响修正系数。

但此种对基本质量指标修正的方法难以操作和控制，反而会影响围岩分级的准确性。规范最终采用在原有围岩分级基础上降级的做法，以便于控制。

## 3. 围岩自稳性判断及其稳定性分级

围岩的自稳能力是指隧洞无衬砌情况下（即毛洞）的自稳能力，围岩级别越高，隧道在无支护条件下稳定性越好，反之亦然。当前各种规范中，都采用隧道开挖后围岩的实际自稳时间作为检验原来围岩定级正确与否的依据，但这种方法主要取决于感觉与经验，无法定量，也难以操作，其可靠性不足。

围岩的自稳不仅取决于岩体质量，而且还与隧道跨度有关。但目前许多规范都没有考虑跨度的影响，围岩的自稳性大致以 10m 跨度隧洞为标准。规范在隧道各级围岩自稳能力判断中，明确提出了围岩稳定性与隧洞跨度有关，对不同跨度提出不同的自稳性，但没有将这种想法直接引入到围岩分级。王明年等通过离散元对岩石块体进行力学分析，提出以围岩自稳跨度建立岩质和土质围岩的统一标准，并设想在围岩分级中设置亚级，即每一分级中细分不同的自稳跨度亚级。郑颖人等也明确提出在隧道各级围岩自稳能力判断中考虑跨度的影响，引入围岩毛洞安全系数，并给出各级围岩自稳性对应的安全系数，具

体如表 1.1 所示。

**表 1.1 隧道各级围岩自稳能力判断**

围岩级别		安全系数	自 稳 能 力
I		$>3.5$	跨度 20m, 长期稳定, 偶有掉块, 无塌方
II		$>2.4$	跨度 5m 以内, 长期稳定, 偶有掉块, 无塌方; 跨度 10~20m, 稳定, 局部可发生掉块, 无塌方
III	III <sub>1</sub>	$>1.5$	跨度 10m 以内, 基本稳定, 可发生局部块体掉落, 偶有小塌方
	III <sub>2</sub>	$>1.25$	跨度 10~20m, 基本稳定~不稳定, 可发生局部块体掉落及小塌方, 偶有中塌方
IV	IV <sub>1</sub>	$>1.0$	跨度 10m 以内, 不稳定, 1 个月至数月内可发生松动变形、小塌方, 进而发展为中~大塌方
	IV <sub>2</sub>	$>0.75$	跨度 10~20m, 不稳定, 可稳定数日至 1 个月, 可发生各类塌方
V		$>0.75$ 或 $<1.0$	无自稳能力, 极不稳定, 可稳定 1 小时至数日; 可发生各类塌方; 跨度 5m 或更小, 当无水时, 可稳定数日至 1 个月

评价各级围岩的稳定性, 不同规范有所不同, 但一般分为五级: 稳定性很好、稳定性好、中等稳定、稳定性差、稳定性很差, 或很稳定、稳定、基本稳定、不稳定、很不稳定以及长期稳定、基本稳定、不稳定、很不稳定等。不同分级方法的可操作性不同, 但均以围岩自稳性为依据。郑颖人等则进一步提出基本稳定~不稳定的亚级。

#### 4. 围岩力学参数确定

围岩力学参数是计算的基本依据, 但难以进行试验确定, 通常用边长 0.5~1.0m 的立方体做现场试验, 依然难以表达岩体的实际力学性质, 因此, 岩体力学参数多是依据专家经验来确定。20 世纪 80 年代一些专家提出的各级围岩的经验数据缺少充分的依据, 但至今仍被国内各种规范所采用, 需要尽量细化和改进, 使其更接近客观实际。郑颖人等依据各级围岩设定的稳定性, 建立了相应的稳定安全系数定量指标并据此反推出各级围岩岩体的强度参数, 从而对现行各级围岩强度参数值进行适当修正, 使其更能反映实际状况(表 1.2), 并避免了由于参数选用不准而使计算出来的围岩稳定性与实际围岩稳定性不符的情况。

**表 1.2 岩体强度参数的规范值与建议值**

围 岩 类 别		规 范 值		建 议 值	
		$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$
I		$>2.1$	$>60$	$>2.1$	$>48$
II		1.5~2.1	50~60	1.3~2.1	37~48
III	III <sub>1</sub>	0.7~1.5	39~50	0.3~1.3	32~37
	III <sub>2</sub>	0.7~1.5	39~50	0.3~1.3	30~35
IV	IV <sub>1</sub>	0.2~0.7	27~39	0.1~0.3	27~32
	IV <sub>2</sub>	0.2~0.7	27~39	0.1~0.3	25~30
V		0.05~0.2	20~27	$<0.1$	$<25$ 或 $<27$