

动静组合加载下的 岩石破坏特性

*Failure and Fragmentation Characteristics of
Rock under Static-Dynamic Coupling Loading*

左宇军 李夕兵 张义平 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

动静组合加载下的 岩石破坏特性

**Failure and Fragmentation Characteristics
of Rock under Static – Dynamic
Coupling Loading**

左宇军 李夕兵 张义平 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 简 介

本书围绕动静组合加载下岩石的破坏特性,就动静组合加载试验与理论进行了深入系统的研究。介绍了动静组合加载对岩石力学特性影响的试验、动静组合加载下岩石的损伤破坏机理、突变失稳机理、本构模型、应变能密度破坏准则等。最后以深部开采的动力灾害岩爆为例,建立了硐室层裂屈曲岩爆的突变模型,并对岩爆岩块弹射速度进行了理论分析。

本书可供从事水利建设、采矿工程、土木工程、铁道施工、人防、国防建设等工作的科技人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

动静组合加载下的岩石破坏特性/左宇军,李夕兵,
张义平著. —北京:冶金工业出版社,2008.7

ISBN 978-7-5024-4631-4

I. 动… II. ①左… ②李… ③张… III. 岩石
破坏机理—研究 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 101185 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李 雪 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4631-4

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 7 月第 1 版, 2008 年 7 月第 1 次印刷

140mm×203mm; 6.125 印张; 161 千字; 183 页; 1—1500 册

22.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

目前深部开挖岩体力学问题已引起岩土工程界的广泛重视,这是因为目前煤炭、石油、核废料储存以及国防等大型工程已提出了深部开挖的要求。在深部开挖中,岩体所处力学环境具有“三高”和“时间效应”特点,这里“三高”是指高地应力、高温、高渗透压力。伴随着深部岩体工程响应发生了一系列新的科学特征现象,这些科学特征现象与浅部岩体工程响应相比具有迥异的特点。深部开挖岩体力学问题已不再是我们熟悉的各因素叠加的线性科学体系,而是非线性科学体系,已引起国内外岩石力学工程领域专家学者的极大关注,成为近几年该领域研究的热点。

深部采矿的实质是对处于高应力岩石进行的卸载和动力扰动的过程,如爆破震动、开挖卸载等都是动载荷。评价矿柱承载强度或发生岩爆的可能性必须研究工程岩体所受的动静组合载荷。深部矿床开采过程中,岩爆是处于高静应力岩石在扰动过程中能量突然释放,控制岩爆可从动静组合力学问题中寻找答案。动静组合加载下岩石的力学特性与破坏机理是一新的研究方向,为探索深部开采岩爆、评价深部岩体工程稳定和破碎提供了一种新的思维方式。

本书介绍了动静组合加载对岩石力学特性的影响,为深部岩爆和矿柱等稳定性分析提供了理论依据;应用损伤力学和突变理论知识研究动静组合加载下岩石的破坏机理,建立动静组合加载下岩石的本构模型、应变能密度破坏准则等;并结合深部开采的动力灾害岩爆进行了应用分析。

本书第1章主要介绍了深部岩体挖掘的重要意义和国内外研究现状。第2章主要介绍了动静组合加载对岩石力学特

性的影响。第3章和第4章分析了动静组合加载下岩石的损伤破坏机理和突变失稳机理。第5章、第6章和第7章主要介绍动静组合加载下岩石的本构模型和强度破坏准则。第8章和第9章则主要介绍了前面几章所提出的研究成果和分析计算模型在深部开采岩爆中的应用分析。

本书的研究内容是在国家自然科学基金项目(No. 50490274, 10472134)、973计划(No. 2007CB209407)和中国博士后科学基金项目(No. 2005038250)的资助下完成并出版的,特表示衷心的感谢!

在研究过程中,马春德博士提供的一维动静组合加载试验结果,为本书的进一步分析和研究奠定了基础,在此表示深深的谢意!此外,研究过程中还得到了唐春安教授、赖海辉教授、王卫华博士、李江腾博士、刘志祥博士等的帮助,特此一并致谢!

由于该课题是开创性研究,有些观点和结论尚不成熟,但愿能起到抛砖引玉的作用。由于水平有限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

2008年1月

目 录

1 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 研究现状	4
1.2.1 岩石动静组合加载试验的设备与技术	4
1.2.2 岩石破坏机理	5
1.2.3 岩石动态本构模型	10
1.2.4 岩石破坏准则	15
1.2.5 岩爆机理的研究	16
2 动静组合加载对岩石力学特性的影响试验	19
2.1 技术方法	21
2.2 一维动静组合加载下岩石的破坏特性	30
2.2.1 一维组合加载条件下的岩石强度变化	30
2.2.2 一维组合加载条件下应变率的影响因素	32
2.2.3 一维预静载对初始断裂载荷的影响	32
2.2.4 一维组合加载对试样的弹性模量与泊松比 的影响	32
2.2.5 一维组合加载条件下应力-应变特征曲线 分析	33
2.3 二维动静组合加载下岩石的破坏特性	34
2.3.1 红砂岩在动静组合加载下的破坏随水平静 载荷的变化规律	34
2.3.2 红砂岩在动静组合加载下的破坏随竖向静 载荷的变化规律	44

2.3.3	红砂岩在动静组合加载下的破坏随动载荷 频率的变化规律	51
2.3.4	红砂岩在动静组合加载下的破坏随动载荷 幅值的变化规律	58
3	动静组合加载下岩石的损伤破坏机理	71
3.1	概述	71
3.2	受一维静加载岩石在动载下的破坏试验数据分析 ..	71
3.3	受一维静加载岩石在动载作用下的损伤断裂机理 ..	73
3.3.1	一维静加载岩石的损伤度分析	73
3.3.2	一维静加载岩石在动载作用下的损伤断裂 过程与判据	74
3.3.3	受一维静载岩石在动载作用下的损伤本构 模型研究	75
4	动静组合加载下岩石的突变失稳机理	85
4.1	概述	85
4.2	受一维静载岩石系统稳定性突变理论分析	86
4.3	一维动静组合加载岩石系统(动力扰动为谐波) 的演化分析	88
4.3.1	一维动静组合加载岩石系统的非线性动力 学模型	88
4.3.2	一维动静组合加载岩石系统自振频率变化 规律	90
4.3.3	一维动静组合加载岩石系统的失稳条件	91
4.3.4	一维动静组合加载岩石系统的非线性演化 规律	92
4.3.5	受一维静载荷作用的岩石在动载作用下的 破坏试验分析	93

4.4 受一维静载岩石系统在冲击载荷作用下的突变失稳机理	94
4.4.1 受静载岩石系统冲击失稳破坏的突变模型	94
4.4.2 受一维静载岩石系统冲击失稳破坏的突变理论分析	95
5 动静组合加载下岩石的本构模型	101
5.1 概述	101
5.2 动静组合加载下岩石的本构模型	101
5.2.1 基本假设	101
5.2.2 一维动静组合加载下岩石的本构模型	102
5.2.3 三维动静组合加载下岩石的本构模型	105
5.3 试验验证	111
5.3.1 一维动静组合加载下岩石的理论与试验本构关系比较	111
5.3.2 二维动静组合加载下岩石的理论与试验本构关系比较	113
5.3.3 三维动静组合加载下岩石的理论与试验本构关系比较	119
6 动静组合加载下岩石应变能密度破坏准则	122
6.1 概述	122
6.2 受一维静载荷作用的岩石在动载作用下的破坏机制	124
6.3 一维动静组合加载下岩石破坏的应变能密度破坏准则	125
6.3.1 一维动静组合加载下岩石破坏的应变能密度极限值的确定	125
6.3.2 一维动静组合加载下岩石的应变能密度	

破坏准则	129
6.4 试验验证	129
7 动静组合加载下岩石的断裂与判据的突变理论研究	132
7.1 概述	132
7.2 动静组合加载下岩石断裂的突变模型	133
7.2.1 分析模型	133
7.2.2 动静组合加载下岩石断裂的突变理论分析	135
7.2.3 动静组合加载下岩石断裂的突变理论判据	140
8 动静组合加载下硐室层裂屈曲岩爆的突变模型	142
8.1 概述	142
8.2 硐室层裂屈曲岩爆机理的突变理论分析	143
8.2.1 力学模型	143
8.2.2 系统的突变理论模型	146
8.2.3 硐室层裂屈曲岩爆的条件	146
8.2.4 岩爆的能量释放	147
8.3 动力扰动下的硐室层裂屈曲岩爆非线性 动力学分析	149
8.3.1 动力扰动下硐室层裂屈曲岩爆非线性 动力学模型	149
8.3.2 动力扰动下硐室层裂屈曲岩爆的突变 理论分析	152
9 动静组合加载下岩石的破坏能量与岩爆岩块弹射 速度	156
9.1 概述	156
9.2 岩爆破裂模式及岩块弹射速度	156
9.3 岩爆能量转移分析	158

9.3.1 岩爆能量组成	158
9.3.2 考虑损伤的岩爆动能比例系数	160
9.4 岩爆岩块弹射平均速度的理论计算	164
9.5 实例计算	165
9.5.1 静载荷作用产生的岩爆	165
9.5.2 动静组合载荷作用产生的岩爆	166
参考文献	168

1 绪 论

1.1 引言

岩石是地球上最普通、最常见的一种脆性地质材料，它不仅是矿、岩采掘作业的重要对象，而且还被广泛应用于国民经济建设的多种行业中，尤其是被更多地应用于各种岩体工程中。研究岩石在各种复杂载荷作用下的力学性质和脆断强度是采矿、水利水电、土木建筑、隧道和地下建筑中岩石工程设计与开挖的主要依据，也是岩石工程失效预警、防护和岩性边坡稳定分析的重要参数。而岩石力学作为地学的基础学科之一，它的主要内容就是研究岩石的稳定与破坏，其研究目的在于不断深入地、正确地认识岩石的本构关系、破坏机理及其他物理力学性质。近几十年来，由于大规模工业及国防建设的需要，各类岩体工程（尤其是地下岩体工程）日渐增多，这就要求我们必须更加深入地了解在各种复杂加载情况下岩石的本构关系和破坏机理，这样才能为岩体工程的设计和开发做出更科学、准确的指导。

自1962年“国际岩石力学学会”在奥地利成立以来，岩石力学得到了很大发展。目前在岩石力学领域中，对岩石在静载作用下破坏的研究已经比较透彻，对动载作用下的岩石本构特征及应力波在岩体中传输的研究也取得了很大的进展^[1~10]，其理论和科研成果被广泛地应用于地质勘探、矿业开采、水利水电、建筑施工、交通运输与国防建设等领域，为经济和国防建设的发展作出了重要贡献。理论和试验都表明，岩石在承受动、静载荷时，其本构关系和力学特性有很大差异^[11~16]。但是到目前为止，对于动静组合载荷共同作用下的岩石破坏情况的研究还不多，国内外有些学者曾利用动力三轴试验机进行过加围压

的三向岩石抗压试验^[17~20]，得到了一些与三向静压缩不同的结论。但对于同一方向（一维）的动静组合加载的研究，是近些年的事情^[21~25]。事实上，在工程实践及自然界中，如矿岩开挖、岩爆、滑坡，有相当一部分岩石在承受动载荷作用之前，已经处于一定的静应力或地应力状态之中。尽管对具有初始应力的岩土力学特性进行研究已有很长的历史，其基本理论也由Cauchy在1827年提出，随后许多研究者还相继提出了多种有关理论^[26]；然而，这些研究基本限于只承受静载荷或动载荷作用的岩石力学响应问题。所以，人们对静应力与动载荷联合作用下的岩石变形及破坏特性展开研究，对岩体工程的安全评价及矿岩的高效采掘具有更大的现实意义。例如，在地下岩体工程中，地应力是不可忽略的，一般随着深度的增加而增加，在一定高的地应力下的矿产开采过程中，不同阶段的爆破作业是否对上一阶段或下一阶段采场中的矿柱的承载强度有影响，自然地震或崩矿过程产生的人工地震是否会使矿柱突然失稳，如何诱发巷道或采场的岩爆，这些情况对采场人员的工作安全具有十分重要的意义。矿柱的这种受力状态就可以用同一方向上的动静组合加载来模拟，这比单考虑动载作用或只考虑静载作用更有实际意义；同样，矿岩的采掘，就可以受二维和三维静载荷的岩石在动载作用下的动静组合加载来模拟，这也比单考虑动载作用或只考虑静载作用更有实际意义。这样的例子还有很多，比如在设计大型桥梁的承载能力时，不但要考虑桥梁及过往车辆等大型设备的自重，还要考虑各种交通工具行驶时产生的低频振动对桥梁结构的影响；房屋的地基不仅要考虑承载房屋自重，还要考虑人工地震和天然地震对其稳定性的影响等，这些都是动静组合加载问题。此外，受高地应力的深部岩体在开采过程中，不仅要受到动载荷的影响，在某一方向卸载的条件下，还要受卸载的影响，这些也是动静组合加载问题。

本书介绍的所谓动静组合加载就是在岩石试件上先加一维、二维或三维静载荷，然后在某一静载荷方向加一个中等应变速

率的动载荷，在静载荷和动载荷的共同作用下使岩石试件破坏，研究其在这种加载方式下的本构关系及破坏特性。推广到一般情况，也就是研究岩石在不同静应力状态下受到动载荷作用的动、静载荷耦合问题。

研究动静组合加载下的岩石力学与破坏特性，对重新寻求评价岩体工程稳定与岩石破碎的新理论和新方法具有很高的研究价值。因为传统的岩体工程安全评判准则一般是采用岩石的静载强度作为依据，近十几年来有些学者主张以在冲击、爆破作用下的岩体工程采用动载强度作为依据，但实际岩体工程多是在动载和静载组合作用下破坏的，用上述两种评判准则都不能最真实地反映客观情况，所以本书建议对于在动静组合作用下的岩体工程应以动静载的组合强度为依据，重新建立更加适合实际岩体工程安全稳定性评价的理论和方法。

深部开采已成为我国乃至世界矿业界特别关注的问题。如前所述，深部岩体开采，受一定的高地应力和开采扰动的影响，是典型的动静组合加载问题。此时的岩石与岩石工程系统的非线性特性比浅部开采岩体的非线性特性明显，各因子之间、各层次之间往往通过相互作用实现非线性动态耦合，通过相互影响和反馈，形成系统的强非线性特性。将整个系统的非线性过程掌握住，才能作出正确的理解和描述；同时，只有在动力学水平上掌握它的动态规律，才能对它的过程作出可靠的预测和有效的控制^[27]。目前，建立在经验和经典线性力学基础上的现行设计规范只适合于浅部小荷载的巷道支护设计，即目前浅层开采及地表的工程项目运用现有的力学体系尚可以达到设计标准和安全要求，然而对于深部岩体工程，现行的力学体系已不能或只能部分应用于设计中，因为此时深部问题已不再是我们熟悉的各因素叠加的线性科学体系，而是非线性科学体系。当然，此时也不能用传统的应力叠加原理进行岩体工程设计，包括深部岩体在动静组合载荷作用下的工程稳定性和岩石破碎设计。这就要求我们寻求评价深部岩体工程稳定和破碎的新理论

和新方法。研究动静组合加载下的岩石力学与破坏特性,将有助于系统开展深部岩体力学问题的研究,从而解决深部岩体工程稳定和破碎设计中存在的难题。

为此,本书围绕就动静组合加载下岩石的破坏特性进行的岩石的一维和二维动静组合加载试验,深入地探讨了动静组合加载下岩石的破坏机理,建立了动静组合加载下岩石的本构模型。研究了动静组合加载下岩石的强度理论,还结合工程实践从理论角度分析了动静组合加载问题的典型例子——岩爆,从而进一步奠定了系统开展深部岩体力学特性研究的理论和实验基础。

1.2 研究现状

1.2.1 岩石动静组合加载试验的设备与技术

关于动静加载的含义至今尚无统一和严格的规定,但根据一般的倾向性看法,可按应变速率 $\dot{\epsilon}$ (即 $d\epsilon/dt$)大小分为以下几类^[1]:

(1) 低应变速率。当 $\dot{\epsilon} < 10^{-4}/s$ 时,称为静态。应用一般的液压试验机系统即可获得此范围内的岩石力学特性。

(2) 中等应变速率。当 $10^{-4}/s < \dot{\epsilon} < 10^2/s$ 时,统称为中等应变速率,在此范围内,尤其是当 $10^{-2}/s < \dot{\epsilon} < 10^2/s$ 时,称为准动态(有些资料上也称之为准静态)。一般的液压机不能快速地加载到足以产生此范围的变形速率,现代电液伺服试验机MTS 尽管加载速度已达 $5mm/s$,其应变率也在 $10^{-2}/s$ 以下^[28];一般的动态试验方法又不能慢速加载到足以产生此范围的应变速率。当 $\dot{\epsilon} < 10^{-1}/s$ 时,惯性力可忽略^[1]。

(3) 高应变速率。当 $\dot{\epsilon} > 10^2/s$ 时,称为动态。一般采用轻气炮、SHPB 装置或炸药平面波发生器来研究岩石的本构关系和状态方程。

要深入研究上述动力作用引起的应力波对各种岩体工程的影响,也必须获取工程材料在此应变率范围内的应力-应变-时间和破坏特性的资料。近 10 多年来,对岩石在低应变率($\dot{\epsilon} <$

$10^{-4}/\text{s}$) 和高应变率 ($\dot{\epsilon} > 10^2/\text{s}$) 下的力学特性的试验和理论研究均较为广泛, 但对介于这两者之间的中应变率下的岩石力学特性的研究, 却因试验条件和技术的限制而相对较少^[19,28], 其中主要是美国 Los Alamos 和 Lawrence Livermore 两个国家实验室对中应变率试验技术及材料在中应变率下的力学行为的研究^[29~31]。其次, 我国武汉岩土力学研究所研制了快速加载试验机, 并进行了中应变率下的岩石准动态破坏试验研究^[19,37~39]; 中国科学技术大学冲击拉伸及动态响应实验室在对国内外中应变率试验技术进行广泛调研的基础上, 研制了中应变率拉压试验机, 此试验装置可在 $0.1/\text{s} \sim 50/\text{s}$ 应变率范围内对哑铃状圆柱试件和哑铃状扁平试件进行拉伸及加卸载试验, 对圆柱状试件进行压缩及加卸载试验^[28]。

对动静组合加载问题展开专门研究, 主要利用 INSTRON 电液伺服材料试验机^[21~24] 和大直径霍布金生压杆实验装置^[25] 研究了一维动静组合加载下岩石破坏与失稳的一些规律, 还研究了受压试件在爆炸波作用下^[32~35] 和刀具作用下^[36] 的裂纹扩展和破碎规律。然而工程实践中较常遇到的情况是处于双向或三向静应力下的岩石因动载作用而破坏, 如地下深部开采中承受高地应力的巷道围岩及采场矿柱常因爆震失稳而破坏, 所以在单轴动静组合加载试验基础上考虑不同围压影响的研究, 即二维动静组合问题和三维动静组合问题, 更具现实意义。

1.2.2 岩石破坏机理

1.2.2.1 连续介质损伤力学在研究岩石破坏机理中的应用

损伤力学或连续介质损伤力学 (Continuum Damage Mechanics, CDM), 主要研究材料内部微观缺陷的产生和发展所引起的宏观力学效应及最终导致材料破坏的过程和规律^[40~42]。Kachanov^[43] 于 1958 年首次提出“连续性因子”和“有效应力”的概念, Abotnov^[44] 在 1963 年进一步引进了“损伤因子”的概念。直到 1976 年 Dougill^[45] 才将损伤力学引入岩石力学领域, 稍后

Drogen^[46]和Krajcinovic^[47]等人在20世纪80年代初就岩石连续损伤和脆性材料损伤本构关系等作了大量的研究。

根据损伤力学理论,损伤是泛指材料内部的一种劣化因素,这种劣化的力学效应是材料应力-应变曲线出现“应变软化”,即内部微细观结构的局部应力场重新分布,同时弹性模量减小、泊松比下降、体积应变改变。根据Lemaitre等效应变假设^[48](假设将应力 σ 换成有效应力 σ_{ef} 所获得的无损材料的应变与损伤材料的应变等效),材料的一维线弹性定律可表示为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{ef}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (1-1)$$

引入等效弹性模量 $E_e = E(1-D)$,则一维线弹性定律可表示为

$$\sigma = E_e \varepsilon \quad (1-2)$$

对于一般情况,若不含损伤材料的体积模量为 K ,泊松比为 ν ,则含损伤材料或称损伤后材料的相应参量变为

$$K_e = (1-D)K \quad (1-3)$$

$$\nu_e = (1-D)\nu \quad (1-4)$$

式中, K_e 、 ν_e 分别表示损伤材料的有效体积模量、有效泊松比, D 为损伤参量, E 为与损伤参量 D 和有效泊松比 ν_e 有关的参量。

为了分析脆性-弹性材料的各向异性损伤,Sidoroff等人提出了能量等效假设^[49~51],即受损材料的弹性应变能与无损材料的弹性应变能有相同的形式,只要将无损材料的应力 σ 和应变 ε 分别用有效应力 $\tilde{\sigma}$ 和有效应变 $\tilde{\varepsilon}$ 代替即可。

目前,利用连续介质损伤力学研究岩石等材料的破坏,就是要引入损伤参量 D ,找出材料在不同应力状态下的损伤演化规律,建立损伤模型,导出损伤本构关系,为提供相应的设计准则服务^[40,50]。因此,人们针对不同材料和结构^[52~58],考虑材料的初始缺陷和损伤各向异性^[59~62]如微裂纹、节理和层理,在不同应力状态^[63~68]如压、拉、剪等,采用不同的试验方法如

扫描或显微镜观测^[69,70]、声波检测^[63,64,71]、力学试验^[72~74]、计算机模拟^[75~81]等,应用不同的理论分析如断裂损伤^[82~84]、弹塑性损伤^[52,85~87]、统计损伤^[52,67,80,88,89]、分形损伤^[70,90~92]、考虑损伤的智能分析^[93]、考虑复杂加载史的内时损伤分析^[94]、考虑能量平衡的分析^[53,54,95]等,来研究材料的损伤演化与破坏,以期达到理论研究和为工程实践服务^[96~100]的目的。综观以上研究,基本上是基于材料受单纯的静应力或单纯的动应力时的损伤破坏,虽然也有一些研究者考虑了不同围压下材料的动态损伤破坏^[101~103],或考虑了材料先在动态载荷作用下的损伤以及随后在静载荷作用下的破坏^[104,105],或考虑了爆炸应力波对岩体产生了预损伤后再受后续爆生气体的准静态作用导致裂纹的扩展与破坏^[106],但都没有进行同方向动静组合加载条件下的损伤破坏研究。根据前面的分析,自然界或工程实践中的较多材料,特别是深部开采岩体,是处于动静载荷耦合作用下的损伤破坏的,所以,有必要开展对岩石类材料在动静组合加载下损伤破坏的研究。

1.2.2.2 突变理论在分析岩石失稳破坏机理中的应用

突变理论首先由 Thom (1972) 提出,其主要用来阐述系统中某些变量如何从连续逐渐变化导致系统状态的突然变化。在我们所处的四维时空中, Thom 的分别性定理指出其最多只有 7 种基本突变形式^[107],而日常应用较多的是尖点 (CUSP) 突变、折叠突变和燕尾突变。初等突变理论的应用方式可粗分为两大类^[108],一类是定量描述,主要适用于数理化等“硬”科学,其方法是寻找一个势、与势相类似的函数或某一突变流形或与分叉集有相同数学描述的系统,应用适当的数学手段或技巧,将其归结为 Thom 分类表中的某一种类型;另一类是定性分析,主要适用于生物、社会等“软”科学。现以尖点突变为例,说明突变理论分析岩石力学理论与工程问题的一般方法,其步骤如下:

(1) 建立相应的岩石力学模型;