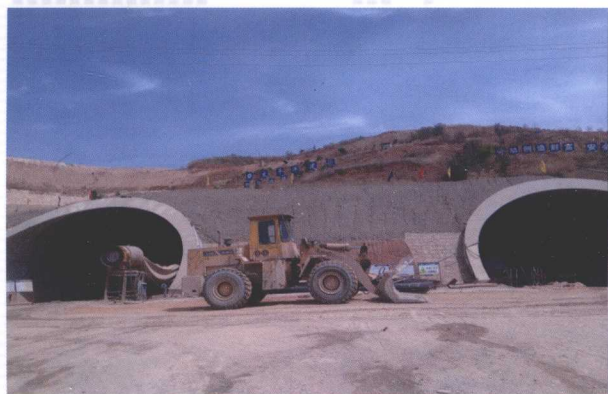


GAODENG YANSHI LIXUE JI GONGCHENG YINGYONG



# 高等岩石力学及工程应用

张成良 刘磊 王超 编著



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

# 高等岩石力学及工程应用

张成良 刘磊 王超 编著

参与编著人员： 陈 娱 王海强  
孙 宇 廖疆平



中南大学出版社

[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

---

图书在版编目(CIP)数据

高等岩石力学及工程应用/张成良,刘磊,王超编著.

—长沙:中南大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5487-2440-7

I. 高... II. ①张... ②刘... ③王... III. 岩石力学-研究  
IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 189812 号

---

高等岩石力学及工程应用

GAODENG YANSHI LIXUE JI GONGCHENG YINGYONG

张成良 刘磊 王超 编著

---

责任编辑 刘小沛 胡业民

责任印制 易红卫

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙市宏发印刷有限公司

---

开 本 787×1092 1/16 印张 25.5 字数 635 千字

版 次 2016年8月第1版 印次 2016年8月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-2440-7

定 价 58.00 元

---

图书出现印装问题,请与经销商调换

## 内容简介

本书是根据昆明理工大学国土资源工程学院高等岩石力学课程的内容并在作者的工程实践经验的基础上写成的。全书共分14章,前4章主要介绍岩石的基本物理力学性质,第5章至第8章主要介绍岩体的本构关系、岩体的工程分级、岩体的地应力测量和岩体的数值分析,建立起岩石和岩体之间的关系,为解决岩体力学的工程问题奠定基础,第9章至第14章主要介绍高等岩石力学在工程领域中的应用。其中第9章主要介绍岩石力学在矿山大型采空区稳定性的应用,第10章主要介绍岩石力学在矿山破碎岩体巷道支护中的应用,第11章主要介绍高陡边坡的稳定性及边坡在正常和降雨条件下的稳定性研究,第12章主要介绍公路隧道工程,包括大断面软岩隧道开挖引起岩体的移动变形特性、开挖预留变形量、二次衬砌支护时机和开挖方案优化的研究,第13章主要介绍岩体变形监测的技术方法及手段,第14章主要介绍地下厂房开挖卸荷岩体的稳定性研究。

本书适合相关专业的本科生、研究生作为高等岩石力学教程和岩石力学引论,也可供岩土工程界及相近领域的科研、技术人员参考。

## 作者简介

张成良，男，1978年2月出生，云南曲靖人，2007年毕业于武汉理工大学土木工程与建筑学院岩土工程专业，并获得博士学位，现为昆明理工大学国土资源工程学院副教授、硕士生导师。长期从事公路隧道、边坡及与采矿有关的岩土工程稳定性研究的科研和教学工作。在岩土工程灾害体的探测与治理、地下工程和边坡工程的稳定性及爆破工程方面有较为丰富的科研实践经验。在核心期刊和国际国内学术会议上发表论文50余篇，被EI收录21篇。出版专著1本、授权发明专利5项，主持和参与纵向项目10余项，横向项目60余项。先后参与百色水利枢纽工程、周宁水电站、大岗山水电站、溪洛渡水电站等大型地下工程项目的建设以及功待高速、普宣高速、上鹤高速、大永高速及临沧4条二级公路的隧道和边坡稳定性的研究工作以及云锡、云铜等矿山开采稳定性的科研技术服务工作。

## 前 言

近 20 年来,随着我国许多举世瞩目的工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到了广泛的发展,科研技术水平与工程技术能力得到了大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、施工控制与信息化、测试与监测、灾害防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域取得了辉煌的成绩。特别是解决岩石工程建设中复杂技术疑难问题的理论方法及重大课题的研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中不断检验、完善和发展。本书主要取材于昆明理工大学国土资源工程学院高等岩石力学课程授课讲义,并结合作者在工程中的实践经验编著完成。主要内容包括岩石力学的基本物理力学性质、岩体的本构关系、岩体的工程分级、岩体的地应力测量和岩体的数值分析,在此基础上建立起岩石和岩体之间的关系,为解决岩体力学的工程问题奠定基础。以此建立岩石力学数值分析模型对矿山工程、公路工程和水电站地下厂房工程的稳定性进行数值分析,其研究成果在工程中得到了较好的应用。其研究成果包括:大型采空区下持续开采的工程稳定性的技术和方法、破碎巷道的支护技术措施、矿山高陡边坡的稳定性控制技术、正常和降雨条件下边坡稳定性的控制技术、在苛刻条件下保证边坡稳定的技术对策,软岩大断面公路隧道开挖引起岩体的移动变形和特性、软岩大断面公路隧道的大变形特性的预留变形量、二次衬砌支护时机和控制岩体变形的优化技术和方案,地下厂房开挖卸荷的岩体稳定性的时空效应及空间应力场的优化机制、岩体工程实时监测技术及与应用实例等。

岩石力学工程涉及的内容和亟待解决的重大岩石力学问题很多,本书对其中的部分进行了探讨,涉及的内容有限,加之作者水平有限,许多问题还有待进一步研究;同时书中的一

些观点及理论也有待进一步完善,期待与同行切磋和交流,以促进学科的持续发展和更深层次的探索研究。

本书在编著过程中,得到了领导、朋友、同事及相关技术人员的支持和帮助,在此表示感谢。

作者参考了大量相关文献资料,在此谨向文献资料的作者致以真诚的谢意!

由于作者水平有限,书中不妥之处,恳请读者批评、指正。

作者于昆明

2016.5.17

## 目 录

第一章 绪 论 .....	(1)
第一节 岩石力学与工程实践 .....	(1)
第二节 岩石力学的研究方法 .....	(2)
第三节 岩石力学工程的主要研究问题 .....	(3)
第四节 岩石力学发展简况和前景展望 .....	(4)
第二章 岩石的物理性质 .....	(7)
第一节 岩石的基本构成 .....	(7)
一、岩石的主要物质成分 .....	(7)
二、岩石的结构构造 .....	(8)
第二节 岩石的物理性质指标 .....	(10)
一、岩石的密度 .....	(10)
二、岩石的容重 .....	(11)
三、岩石的孔隙性 .....	(11)
四、岩石的水理性质 .....	(11)
第三章 岩石力学特性 .....	(14)
第一节 室内岩石力学性质试验 .....	(14)
一、岩石的单轴抗压强度试验 .....	(14)
二、岩石的单轴压缩变形试验 .....	(17)
三、岩石三轴压缩试验 .....	(23)
四、岩石的抗拉强度和拉伸试验 .....	(27)
五、岩石抗剪强度试验 .....	(29)
六、岩石点荷载强度试验 .....	(32)
第二节 岩石力学性质的相关性 .....	(33)
一、理论上的相关性 .....	(33)
二、统计上的相关性 .....	(33)
第三节 岩石的破坏类型及微观破坏机制 .....	(34)
第四节 岩石的蠕变特性 .....	(35)
一、岩石蠕变概念和蠕变曲线 .....	(35)
二、岩石的蠕变模型 .....	(36)
第五节 影响岩石力学性质的因素 .....	(44)



一、各向异性对岩石力学性质的影响 .....	(44)
二、围压对岩石力学性质的影响 .....	(44)
三、温度对岩石力学性质的影响 .....	(46)
四、孔隙流对岩石力学性质的影响 .....	(46)
五、影响岩石力学性质的时间因素 .....	(47)
六、风化作用对岩石力学性质的影响 .....	(48)
第六节 岩石的强度准则 .....	(49)
一、Coulomb - Navier 准则 .....	(49)
二、Mohr 准则 .....	(51)
三、格里菲斯准则 .....	(52)
<b>第四章 岩体的结构及其力学性质的影响 .....</b>	<b>(55)</b>
第一节 岩体结构分类 .....	(55)
一、岩体结构 .....	(55)
二、岩体结构分类 .....	(56)
第二节 岩体结构面分析 .....	(58)
一、结构面的分类 .....	(58)
二、结构面表观性质 .....	(59)
三、岩体破碎程度分类 .....	(61)
第三节 结构面的力学性质 .....	(62)
一、结构面的法向变形 .....	(62)
二、结构面的剪切变形 .....	(64)
三、结构面的抗剪强度 .....	(64)
四、影响结构面力学性质的因素 .....	(66)
第四节 现场岩体强度试验 .....	(67)
一、现场岩体抗压强度试验 .....	(67)
二、岩体抗剪强度的测定 .....	(69)
三、岩体三轴压缩强度试验 .....	(70)
四、现场岩体弹性波测试 .....	(70)
第五节 裂隙岩体的力学特性 .....	(71)
一、单一结构面岩体的强度效应 .....	(71)
二、多裂隙岩体的力学特性 .....	(74)
第六节 软岩与膨胀岩 .....	(75)
一、软岩 .....	(75)
二、膨胀岩 .....	(78)
<b>第五章 岩石的弹塑性本构理论 .....</b>	<b>(80)</b>
第一节 岩石本构关系的基本概念 .....	(80)
一、基本概念 .....	(80)

二、弹塑性力学基本假设 .....	(81)
三、材料典型的本构关系 .....	(82)
第二节 应力 .....	(84)
一、力和应力 .....	(84)
二、应力坐标变换公式 .....	(84)
三、柯西公式 .....	(85)
第三节 应力状态和应变状态简述 .....	(86)
一、应力状态 .....	(86)
二、应变状态 .....	(92)
第四节 岩石弹性本构关系 .....	(94)
一、平面应力问题与平面应变问题 .....	(94)
二、平面弹性本构模型 .....	(94)
三、广义虎克定律的分解 .....	(95)
第五节 塑性本构关系 .....	(96)
一、屈服条件的函数形式和几何图形 .....	(97)
二、加载条件 .....	(102)
三、塑性本构方程 .....	(105)
四、塑性势理论 .....	(110)
第六节 简单弹塑性问题 .....	(112)
一、薄壁圆筒受拉伸与扭转的增量理论解 .....	(112)
二、厚壁圆筒受内外压力问题的弹性解答 .....	(116)
第六章 工程岩体分级 .....	(119)
第一节 工程岩体分级的几个基本问题 .....	(119)
一、工程岩体分级原则 .....	(119)
二、工程岩体分级的基本内容 .....	(119)
三、岩体分级因素的选择 .....	(120)
四、分级因素的评价方法 .....	(121)
五、分级因素权重的分配 .....	(122)
六、数学方法在岩体分级上的应用 .....	(122)
第二节 岩块的工程分类 .....	(122)
一、完整岩块的工程分类(单因素法) .....	(123)
二、完整岩石工程分类(双因素法) .....	(123)
第三节 工程岩体的稳定性分级 .....	(125)
一、国际上的两个分级系统 .....	(125)
二、国家标准《工程岩体分级标准》 .....	(132)
三、国标《工程岩体分级标准》与 $Q$ 系统分类法、 $RMR$ 分类法之间的关系 .....	(137)
第四节 数值分类学在工程岩体分级中的应用 .....	(138)
一、聚类分析法应用 .....	(138)

二、模糊分类法原理与应用	(139)
<b>第七章 岩体的赋存条件</b>	(141)
第一节 地应力研究的必要性	(141)
一、地应力概述	(141)
二、地应力对岩体工程的影响	(142)
第二节 地应力的构成和影响因素	(143)
一、地应力的构成	(143)
二、地应力的影响因素	(144)
第三节 地应力分布的基本规律及理论	(146)
一、地应力分布的基本规律	(146)
二、关于岩体初始应力场的理论分析	(149)
第四节 高地应力与低地应力地区的若干特征	(151)
一、高地应力地区的地质标志	(151)
二、低地应力地区的地质标志	(153)
第五节 地应力的测量方法	(153)
一、应力恢复法	(153)
二、应力解除法	(154)
三、水压致裂法	(158)
四、声发射法	(160)
第六节 地下水的概述及类型	(162)
一、地下水的概述	(162)
二、地下水的类型	(162)
第七节 岩土体中地下水运动规律	(164)
一、土体中地下水运动规律	(164)
二、岩体中地下水运动规律	(164)
第八节 地下水赋存条件与特征	(165)
一、地下水的赋存条件	(165)
二、地下水的赋存特征	(166)
<b>第八章 岩石力学数值分析方法</b>	(168)
第一节 概述	(168)
第二节 有限差分法	(169)
一、有限差分基本方程	(169)
二、平面问题有限差分方程	(170)
三、显式有限差分算法——时间递步法	(172)
第三节 有限元法	(174)
一、有限元法基本方程	(175)
二、有限元法分析过程	(179)

第四节	边界元法	(180)
一、	直接边界元法基本方程	(180)
二、	间接边界元基本方程	(183)
三、	边界元法求解平面问题的步骤	(186)
第五节	离散单元法	(186)
一、	离散单元法的基本方程	(186)
二、	离散单元法的计算机实施	(188)
第九章	大型采空区处理技术措施	(192)
第一节	概述	(192)
一、	矿山压力	(192)
二、	地压管理的方法	(192)
三、	大型采空区的现场工程概况及问题的提出	(193)
四、	拟采取的研究方法及内容	(193)
第二节	矿体下部开采采空区稳定性分析	(193)
一、	计算模型	(194)
二、	三维有限元计算结果分析	(195)
三、	开采全过程采空区稳定性分析	(197)
第三节	基于时间效应采空区稳定性分析	(198)
一、	采空区失稳过程的划分	(198)
二、	岩体的时间损伤蠕变效应	(199)
三、	物理模型	(201)
四、	基于时间效应的采空区围岩稳定性评判	(201)
五、	基于时间效应和扰动荷载作用下的采空区稳定性分析	(202)
第四节	采空区顶板冒落危害预测	(203)
一、	冒落气流的形成模型	(204)
二、	绕流模型的冲击气浪估算	(204)
三、	避免冲击危害的安全距离	(206)
四、	采场冒落危害的防治	(206)
第五节	采空区地压监测及稳定性分析	(207)
一、	监测内容	(207)
二、	测点布置和仪器埋设	(207)
三、	采空区地压监测数据分析	(209)
四、	现场监测体会及建议	(212)
第六节	崩落法处理采空区	(212)
一、	崩落法	(212)
二、	强制崩落围岩处理采空区	(213)
三、	强制崩落围岩处理采空区厚度计算	(213)
四、	强制崩落围岩采空区顶板稳定性分析	(216)

第十章 松散、破碎岩体巷道的支护的技术措施	(218)
第一节 概述	(218)
第二节 花岗岩膨胀特性和湿化特性	(220)
一、花岗岩矿物组成及微观结构研究	(221)
二、花岗岩膨胀特性研究	(221)
三、花岗岩湿化特性研究	(222)
四、花岗岩巷道变形原因初步总结	(225)
第三节 花岗岩地段巷道变形失稳机理研究	(225)
一、花岗岩巷道变形机理分析	(225)
二、影响巷道围岩变形破坏的因素	(226)
三、花岗岩巷道变形失稳破坏过程	(226)
第四节 软岩巷道支护参数的数值模拟	(228)
一、研究的思路	(228)
二、3D- $\sigma$ 三维有限元分析	(228)
三、FLAC 数值模拟	(232)
四、三维模拟总结	(235)
第五节 基于光面爆破巷道开挖加固分析	(235)
一、断面形状的确	(235)
二、光面爆破	(239)
第六节 花岗岩巷道综合处理对策	(240)
一、处理之前巷道施工所存在问题	(240)
二、巷道综合治理措施	(241)
第十一章 岩石边坡工程	(243)
第一节 概述	(243)
一、边坡工程中的岩石力学问题	(243)
二、边坡稳定性影响因素	(243)
三、边坡稳定性研究及其特点	(244)
四、边坡稳定性评价	(244)
第二节 在正常和降雨作用下公路边坡稳定性分析及治理措施	(245)
一、区域工程地质特征	(245)
二、边坡滑动面的确定	(246)
三、边坡失稳综合分析	(250)
四、正常和降雨条件下边坡的稳定性研究	(250)
五、边坡加固措施	(255)
第三节 露天开采形成的高边坡稳定性分析及加固措施	(261)
一、边坡岩体地质和水文条件	(262)
二、边坡工程地质分区	(262)

三、岩石物理力学参数	(262)
四、高陡边坡稳定性研究	(263)
五、防治措施	(266)
第四节 边坡工程治理方案比选研究	(270)
一、工程概况	(270)
二、滑坡特征分析	(271)
三、滑坡加固方案的优选	(272)
四、多属性系统模糊决策模型	(275)
五、多属性系统模糊决策在加固方案优选中的应用	(277)
六、钢管管注浆型抗滑挡墙现场布置	(279)
第五节 边坡的稳定性监测	(283)
一、岩坡监测的目的	(283)
二、岩坡稳定性监测内容和方法	(284)
三、岩坡监测设计	(285)
第十二章 公路隧道工程	(287)
第一节 概述	(287)
一、隧道工程围岩的变形破坏和稳定性问题	(287)
二、隧道工程建设中岩石力学研究课题	(288)
三、隧道工程概况	(288)
第二节 浅埋隧道开挖引起的上覆岩体移动变形研究	(290)
一、浅埋、小间距、大断面隧道分类	(290)
二、单元开挖引起上覆岩体移动机理	(290)
三、隧道开挖引起上覆岩层移动影响因素	(291)
四、隧道开挖引起上覆岩层的移动规律	(292)
五、隧道开挖引起上覆岩体移动的数值模拟研究	(293)
六、现场监控量测	(297)
第三节 浅埋大断面隧道围岩变形特性与施工参数优化研究	(300)
一、大断面隧道的基本力学特征	(300)
二、隧道施工因素对围岩变形的影响	(301)
三、开挖引起的隧道围岩变形特征分析	(301)
四、基于监控量测围岩变形特征分析	(302)
五、施工参数优化及验证	(305)
六、工程验证	(309)
第四节 软岩大断面隧道二次衬砌支护时机研究	(310)
一、隧道二次衬砌支护时机理论研究	(310)
二、最佳支护时机在实际工程中的定义	(311)
三、软岩大变形隧道二次衬砌支护时机	(311)
四、确定二次衬砌支护时机的原则	(311)

五、	监控量测数据反分析确定二衬支护时机	(312)
六、	二次衬砌支护时机数值模拟	(315)
第五节	隧道软岩大变形预留变形量研究	(321)
一、	软岩的定义与工程分类	(322)
二、	软岩隧道围岩的地质力学特征	(322)
三、	预留变形量的含义及方法	(323)
四、	软弱围岩隧道开挖围岩变形数值模拟研究	(326)
五、	中和村隧道监控量测与预留变形量研究	(333)
六、	中和村预留变形量工程应用与验证	(338)
第十三章	隧道施工监控量测	(339)
第一节	概述	(339)
一、	隧道施工监控量测的必要性	(339)
二、	隧道施工监控量测的目的	(339)
三、	隧道监控量测的基本原则	(340)
四、	监控量测的主要内容	(340)
五、	隧道施工监控量测流程	(342)
第二节	隧道监控量测必测项目	(342)
一、	地质、支护状态观察	(343)
二、	地表沉降	(343)
三、	隧道周边收敛和拱顶下沉量测	(345)
第三节	隧道施工监控量测选测项目	(348)
一、	锚杆拉拔力测量	(348)
二、	锚杆轴力监测	(349)
三、	围岩内位移监测	(350)
四、	围岩与支护间接触压力监测	(351)
五、	钢支撑内力测量	(352)
六、	二衬砼应力量测	(353)
七、	围岩声波测试	(353)
第四节	监控量测数据处理及应用	(354)
一、	监控量测数据处理的目的	(354)
二、	地质、支护状态观察结果分析	(354)
三、	地表沉降监测数据处理分析	(354)
四、	周边收敛、拱顶下沉量测数据处理分析	(356)
五、	围岩内部位移及松动区分析	(359)
六、	锚杆轴力量测分析	(360)
七、	围岩压力量测分析	(360)

第十四章 地下厂房开挖卸荷模拟及工程应用 .....	(362)
第一节 开挖卸荷模拟数值分析 .....	(362)
一、卸荷模拟方法 .....	(362)
二、开挖卸荷的力学模型 .....	(363)
三、开挖卸荷模拟的基本步骤 .....	(363)
第二节 工程简介 .....	(364)
一、概述 .....	(364)
二、地质条件 .....	(365)
第三节 模拟目的和模型的计算 .....	(365)
一、模拟的目的 .....	(365)
二、岩体开挖卸荷模拟的参数选取 .....	(365)
三、初始应力场及初始边界条件 .....	(365)
四、模型的建立和求解计算 .....	(366)
五、计算结果分析 .....	(378)
六、典型部位模拟计算和实测数据对比分析 .....	(380)
第四节 模拟计算和实测数据对比分析 .....	(384)
一、时空分析 .....	(384)
二、施工活动影响分析 .....	(385)
参考文献 .....	(389)



# 第一章 绪 论

## 第一节 岩石力学与工程实践

岩石力学是近代发展起来的一门新兴学科，是一门应用性和实践性很强的基础学科。它的理论基础相当广泛，涉及固体力学、流体力学、计算数学、结构力学、弹塑性理论、工程地质和地球物理学等学科。它的应用范围涉及土木工程、水利水电工程、矿山、铁路、公路、地质、地震、石油等众多和岩石力学与工程有关的领域。正是多学科的协同合作以及众多相关领域的实践活动促使岩石力学不断完善与发展。

过去，工程中遇到的岩石工程问题，多凭经验解决。但工程实践表明，单凭经验越来越难以适应工程规模的发展及工程的复杂性。如开采深度近 400 m 的大型露天矿，边坡角每增减  $1^\circ$  将影响投资变化达数千万元乃至上亿元，而且一旦边坡出现失稳将造成难以估量的经济和资源损失。在水电建设中，大型电站的坝高可达 300 m，地下厂房边墙高达 50 m，跨度达 35 m，常遇到复杂的地基、软弱夹层、地下水发育、大的喀斯特溶洞和高地应力等问题，这些都对岩石力学提出了许多新的课题。此外，各类地下工程的设计和施工中，要求对群硐围岩稳定性进行深入分析研究：在能源建设中如天然气和石油的开发、核电站和核工业建设中的核废料处理等，也都是难度极大的科研问题。对这些工程的设计和施工都要求系统地研究岩石的变形性状、破坏机制以及力学模型，从而在工程设计中预测岩石工程的可靠性和稳定性，并使工程具有尽可能好的经济性。这些重大的工程建设问题，对岩石力学提出了日益繁重复杂的任务，从而大大促进了岩石力学的发展。

岩石力学是研究岩石的力学性能理论和应用的科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场的反应的力学分支学科，这个定义指出了岩石作为一种天然材料与其赋存的地质环境、形成历史、地壳运动以及工程因素之间的联系。

1959 年 12 月法国 Malpassat 坝的破坏以及 1960 年 10 月意大利 Vajont 坝的大滑坡造成水库失效，都使生命财产遭受到巨大损失。这两处大坝的失事，都不是坝本身出现了问题，而是坝基及水库山体滑动的岩石力学问题。这些事故使人们认识到高坝坝基强度和稳定问题十分重要。岩石力学与工程专业的国际组织开始出现，1966 年在里斯本召开了第一届国际岩石力学会议，使岩石力学作为一个独立的学科进入了新的阶段。50 年来，随着人类活动领域的扩大、试验手段的提高、数学方法的发展，使得岩石力学自身又迅速分化为许多分支学科：岩土塑性力学、岩石断裂力学、岩石损伤力学、分形岩石力学、节理岩石力学、岩石流体力学、岩石流变学、岩石破碎学、矿山岩石力学、软岩力学等。这些学科从不同角度探索了岩体本构关系，并取得新的进展，同时又与工程实际紧密结合，大大丰富和发展了岩石力学理论知识，为各类岩石工程的实施奠定了理论基础。