

机械-水射流联合破岩及 在矿山机械中应用

刘送永 杜长龙 江红祥 著



科学出版社

机械-水射流联合破岩 及在矿山机械中应用

刘送永 杜长龙 江红祥 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

机械-水射流联合破岩是近年来将高压水射流应用到机械刀具以提高破岩效率和减少刀具磨损的新技术。本书系统地介绍了机械刀具与水射流联合破岩机理、最佳射流参数、自控水射流刀具、高压旋转密封装置及其在矿山机械中的应用。全书共七章,分别介绍了机械岩石破碎理论、机械-水射流联合破岩理论、机械-水射流联合破岩试验台、机械刀具-水射流联合破岩、自控水力机械刀具破岩、截割机构-水射流联合破岩及水射流技术在矿山机械中的应用等内容。

本书体系完整、层次清楚、内容丰富,适合从事矿山工程研究的科技人员、高等院校相关专业的研究生和本科生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械-水射流联合破岩及在矿山机械中应用/刘送永,杜长龙,江红祥著.
—北京:科学出版社,2017.2
ISBN 978-7-03-051788-3

I. ①机… II. ①刘… ②杜… ③江… III. ①水射流破碎-应用-矿山机械 IV. ①TD231.6②TD4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 028837 号

责任编辑:惠 雪 王 希/责任校对:郑金红
责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年2月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:408 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

煤炭是我国主体能源,在一次性能源结构中占 70%左右,在未来相当长时期内,煤炭作为主体能源的地位不会改变。根据国家能源战略行动计划和相关研究,到 2020 年、2030 年、2050 年,煤炭在我国一次性能源结构中的比重将保持在 62%、55%和 50%左右,煤炭消费总量将达到 45 亿~48 亿吨。但由于地质构造的原因,在煤炭开采过程中经常遇到赋有夹矸、硬包裹体、小断层等半煤岩体,导致综采、综掘机械化程度降低,特别是半煤岩巷道,大多采用炮掘,机械化程度较低,如何提高该煤层巷道的掘进效率和机械化程度已成为亟待解决的关键技术问题。

高压水射流具有高速低温特性,在与煤岩冲击碰撞时不会因为速度过高而产生火花,是一项利用高能“水箭”的冲击破碎、侵蚀以及水楔作用的新截割技术,已开始应用于石油钻探、矿山开采以及岩石截割等工程中,被证实可以降低刀具温度和受力、提高刀具破岩能力、延长刀具的使用寿命等。但将高压水射流直接引入到采掘装备截割机构破岩上仍然存在以下主要问题:

(1) 水射流直接破岩的同时往往使采掘工作面产生大量积水,例如水力采煤导致巷道采掘工作难以继续,使得此种方法较难推广应用。

(2) 目前高压水射流辅助机械刀具破岩的结合形式有多种,究竟何种形式更加适合巷道硬岩的截割有待研究。

(3) 采掘装备工作机构均为旋转机构且安装多个刀具,每个工作机构上水射流喷嘴的数量、位置尚无法确定,以及水射流辅助整个截割系统破岩的方法也未知。

针对上述问题,作者在国家“863”计划课题“薄煤层半煤岩掘进机关键技术研究(编号:2012AA062104)”、国家自然科学基金项目“高压水射流与多刀具耦合破岩系统的动力学特性研究(编号:51375478)”、江苏省自然科学基金项目(编号:BK20131116)和江苏省产学研前瞻性联合研究项目(编号:BY2014036)等项目的资助下,开展了机械-水射流联合破岩及在矿山机械中的应用方面的研究,旨在提高半煤岩巷道的机械化掘进效率和扩大水射流技术的应用范围。

先后参加该研究工作的有十几位博士和硕士,包括曾锐博士、刘晓辉博士、陈俊峰硕士、蔡卫民硕士、郑加强硕士、常欢欢硕士、许瑞硕士、李烈硕士、陈源源硕士、董恰硕士等,还有多位研究人员也参与了有关研究和试验工作。研究成果先后在 *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*、*Powder Technology*、*Chinese Journal of Mechanical Engineering*、*Tunneling and Underground Space Technology*、*Shock and Vibration*、*Journal of Central South University*、中国

机械工程、中南大学学报(自然科学版)等刊物上发表,研究成果具有很好的学术价值以及工程应用价值。

本书重点介绍机械-水射流联合破岩理论、截齿-水射流联合破岩、自控水力截齿破岩、截割机构-水射流联合破岩以及水射流在掘进机、液压凿岩台车和采掘机械清洗等矿山机械中的应用。本书可供从事机械工程、采矿工程和岩土工程等领域的研究学者和工程技术人员参考。

本书撰写过程中引用和参考了大量文献资料,在此特向作者致以谢意。

由于作者水平有限,书中内容难免存在疏漏及不当之处,敬请读者批评指正。

刘送永

2016年8月

目 录

前言

第 1 章 机械岩石破碎理论	1
1.1 岩石的组成与分类	1
1.1.1 岩石的结构与构造	1
1.1.2 岩石的分类	2
1.2 岩石力学性质	3
1.2.1 岩石力学特性的基本概念	3
1.2.2 岩石强度理论	8
1.3 机械破岩机理	14
1.3.1 冲击破岩机理	15
1.3.2 切削破岩机理	18
1.3.3 冲击-切削破岩机理	27
1.4 机械岩石破碎的应力分布	29
1.4.1 岩石在球齿作用下的应力分布	30
1.4.2 岩石在楔形刀具作用下的应力分布	33
1.5 机械刀具直线与旋转破岩一致性分析	35
1.5.1 截齿与煤岩互作用数值模型	35
1.5.2 一致性分析	37
参考文献	42
第 2 章 机械-水射流联合破岩理论	45
2.1 水射流基础知识	45
2.1.1 小孔出流基本理论	45
2.1.2 水射流流动压分布	48
2.1.3 水射流打击力	51
2.1.4 水射流劈裂特性	54
2.1.5 水射流冲击波	58
2.2 水射流破岩理论研究	61
2.2.1 高压水射流破岩理论	61
2.2.2 水射流冲击破岩力学分析	62
2.2.3 水射流致裂破岩力学分析	69

2.3	高压水射流破岩仿真研究	71
2.3.1	光滑粒子流法理论	72
2.3.2	水射流冲击破岩数值模拟	74
2.4	机械-水射流联合破岩理论研究	86
2.4.1	机械刀具-水射流联合破岩机理	86
2.4.2	机械刀具-水射流联合破岩力学分析	87
	参考文献	90
第 3 章	机械-水射流联合破岩试验台	93
3.1	截齿-水射流联合破岩试验台	93
3.1.1	机械系统	94
3.1.2	液压系统	95
3.1.3	高压水系统	95
3.1.4	测试系统	96
3.1.5	不同配置方式截齿-水射流系统的研制	96
3.2	截割机构-水射流联合破岩试验台	102
3.2.1	传动系统	103
3.2.2	高压水发生系统	104
3.2.3	高压水旋转密封装置	106
3.3	模拟煤岩制备	111
3.3.1	模拟煤岩相似条件	112
3.3.2	模拟煤岩配比研究	113
	参考文献	118
第 4 章	机械刀具-水射流联合破岩	119
4.1	机械刀具-水射流联合破岩概述	119
4.2	无水射流截齿工作角度对截割性能的影响	121
4.2.1	仿真模型结构参数	121
4.2.2	截齿直线破岩的仿真模型建立	121
4.2.3	截齿工作角度对截割性能影响的数值分析	122
4.2.4	截齿工作角度对截割性能影响的试验分析	127
4.3	截齿-高压水射流联合破岩仿真研究	133
4.3.1	仿真模型建立及基本参数	133
4.3.2	截齿-中心射流联合破岩数值模拟	135
4.3.3	截齿-前置式射流联合破岩数值模拟	139
4.3.4	截齿-侧置式射流联合破岩数值模拟	147
4.3.5	截齿-后置式射流联合破岩数值模拟	153

4.3.6	不同配置方式对比分析	155
4.4	截齿-高压水射流不同配置方式联合破岩试验研究	158
4.4.1	试验目的及内容	158
4.4.2	截齿-中心射流联合破岩试验方案及分析	158
4.4.3	截齿-前置式射流联合破岩试验方案及分析	162
4.4.4	截齿-侧置式射流联合破岩试验方案及分析	167
4.4.5	截齿-后置式射流联合破岩试验方案及分析	171
4.4.6	不同配置方式对比分析	173
4.5	水射流预裂隙对截齿载荷和磨损的影响	174
4.5.1	不同配置方式预裂隙截齿破岩有限元模型	174
4.5.2	截齿受载与磨损的关系	176
4.5.3	预裂隙对截齿受载和磨损的影响	176
	参考文献	184
第 5 章	自控水力机械刀具破岩	186
5.1	自控水力截齿结构设计和流场分析	186
5.1.1	自控水力截齿结构设计	186
5.1.2	空载状态流场分析	187
5.1.3	喷嘴自由喷射流场分析	190
5.1.4	水射流冲击岩石流场分析	192
5.2	自控水力截齿动态响应特性仿真研究	195
5.2.1	动态响应模型建立	195
5.2.2	动态响应特性影响因素分析	198
5.3	自控水力截齿破岩特性仿真研究	202
5.3.1	自控水力截齿破岩过程分析	203
5.3.2	自控水力截齿力学特性分析	207
5.4	自控水力截齿试验研究	210
5.4.1	关闭过程摩擦阻力试验	210
5.4.2	开启特性试验	215
5.4.3	动态响应特性试验	219
5.4.4	流量特性试验	223
5.4.5	破岩特性试验	226
	参考文献	230
第 6 章	截割机构-水射流联合破岩	232
6.1	水射流截割机构	232
6.1.1	水射流截割机构设计方案	232

6.1.2	喷嘴位置与数量	234
6.1.3	水射流截割机构研制	238
6.2	截割机构破岩性能评价指标建立	240
6.2.1	截割扭矩和推进阻力变化规律	241
6.2.2	载荷评价特征系数建立	243
6.3	截割机构破岩性能分析	245
6.3.1	煤岩强度对无水射流截割机构破岩性能影响	245
6.3.2	煤岩强度对水射流截割机构 I 破岩性能影响	250
6.3.3	煤岩强度对水射流截割机构 II 和 III 破岩性能影响	259
6.3.4	水压对水射流截割机构 III 破岩性能影响	264
6.4	水射流作用对粉尘浓度和截齿磨损影响	270
6.4.1	水射流辅助作用对粉尘浓度的影响	271
6.4.2	水射流作用的降尘机制	274
6.4.3	水射流辅助作用对截齿磨损的影响	275
	参考文献	277
第 7 章	水射流技术在矿山机械中的应用	278
7.1	水射流在巷道掘进机中的应用	278
7.1.1	高压水射流半煤岩掘进机	278
7.1.2	高压水射流掘进机截割部设计	279
7.1.3	高压旋转密封设计	283
7.2	水射流在液压凿岩机中的应用	290
7.2.1	水射流辅助液压凿岩机钻孔机理	291
7.2.2	水射流辅助液压凿岩机钻孔机构设计	291
7.2.3	水射流辅助液压凿岩机钻孔试验	296
7.3	水射流在采煤机摇臂再制造清洗中的应用	302
7.3.1	摇臂再制造清洗特征	302
7.3.2	水射流清洗流场结构	304
7.3.3	水射流清洗采煤机摇臂试验研究	306
7.3.4	提高水射流清洗能力措施	310
	参考文献	313
	索引	315

第1章 机械岩石破碎理论

岩石破碎工程广泛存在于矿山开采、油气井钻进、地质勘探、石材加工、隧道掘进、桥涵施工和国防建设等领域中。近年来,国内外研究人员对岩体破碎与岩层移动过程规律的研究有了很大进展,但仍然缺乏从力学高度上的完整认识,研究人员希望通过各种试验来取得更高效的岩石破碎方法^[1]。随着科学技术与国民经济的发展,岩石破碎技术日益成熟^[2-11],并与许多重要科学领域密切联系,如深部资源开发利用、海洋矿床地质钻探及开采、南极极地钻探、地壳科考深钻、月球和火星表层钻探等,这些富有深远意义的破岩工作将岩石破碎学理论推向了一个新高峰,很有可能对整个岩石力学理论提出新的挑战认识^[12-17]。

1.1 岩石的组成与分类

1.1.1 岩石的结构与构造

岩石为矿物的集合体,是组成地壳的主要物质。岩石是由固体矿物颗粒组成的骨架和孔隙、孔隙填充物构成,具有典型的跨尺度、非均质、多组元且多相的复杂结构^[18]。岩石可以由一种矿物组成,如石灰岩仅由方解石一种矿物组成;也可由多种矿物组成,如花岗岩则由石英、长石、云母等多种矿物集合而成。岩石的结构、构造、密度、湿度、硬度、强度、弹性、塑性、脆性、孔隙性、非均质性、各向异性等都与其破碎效果密切相关。本节仅对其中的结构与构造进行简单介绍,而弹性、塑性、脆性、强度以及各向异性等特性将在第2节专门介绍。

岩石的结构是组成岩石的矿物结晶程度、颗粒大小、形态特征和胶结状况的综合。颗粒越细,接触越紧,胶结越牢,强度和硬度越高,越难使用机械刀具破碎。例如,由硅质胶结的石英微粒组成的石英岩,抗碎能力高于许多粗粒岩浆岩。

按照组成岩石的矿物颗粒结晶程度,可将岩石分为晶质岩、非晶质岩和碎屑岩三大岩。晶质岩包括岩浆岩、变质岩和一部分沉积岩,按其晶粒大小又可细分为粗晶岩(晶粒大于1mm)、中晶岩(晶粒为0.1~1mm)、隐晶岩(晶粒为0.01~0.1mm)和微晶粒(晶粒为0.002~0.01mm);非晶质岩的矿物颗粒皆在0.002mm以下,碎屑岩则是各种岩石碎屑的胶结或机械组合,颗粒大小相差甚大。其中,砾岩颗粒大于1~2mm,砂岩为0.1~1mm,细砂岩为0.01~0.1mm,泥岩为小于0.01mm。胶结物多均布于颗粒之间,胶结强度则依胶结物性质而异。按照胶结强度的大小,胶结物

依次排列为：硅质、铁质、石灰质、泥质、泥灰质和石膏质等。岩石破碎时，其破裂面可能沿着颗（晶）粒界面，也可能横穿晶粒，依晶粒和胶结物的相对强度及应力性质而异。

岩石的构造是指岩石在生成时或生成后，由于地质或动力作用产生的某些宏观现象，主要有岩浆岩的块状和流纹构造、沉积岩的层理和变质岩的片理等。块状构造对机械破碎无明显影响，流纹构造层理和片理常给岩石造成各向异性。

1.1.2 岩石的分类

岩石是地质勘探的主要对象，是固态矿物或矿物的混合物，是一种或多种造岩矿物（主要造岩矿物见表 1-1）颗粒的集合体。颗粒之间或者由直接接触面上的联系力联结，或者由外来的胶结物胶结。海面下的岩石成为礁、暗礁及暗沙，是由一种或多种矿物组成的，具有一定结构构造的集合体，也有少数包含有生物的遗骸或遗迹（即化石）。岩石按成因分为岩浆岩、沉积岩和变质岩。其中，岩浆岩是由高温熔融的岩浆在地表或地下冷凝所形成的岩石，也称火成岩，喷出地表的岩浆岩称喷出岩或火山岩，在地下冷凝的则称为侵入岩。沉积岩是在地表条件下由风化作用、生物作用和火山作用的产物经水、空气和冰川等外力的搬运、沉积和成岩固结而形成的岩石。变质岩是先成的岩浆岩、沉积岩或变质岩，由于其所处地质环境的改变经变质作用而形成的岩石。

表 1-1 主要造岩矿物

分类	名称	化学成分	密度/(g/cm ³)	莫氏硬度	解理	晶形
硅酸盐类	正长石	KAlSi ₃ O ₈	2.57	6	两组中等解理	柱状、板状
	斜长石	NaAlSi ₃ O ₈	2.62	6	两组完全解理	板状或板柱状
	石英	SiO ₂	2.65	7	极不完全解理	六方体状
	白云母	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	2.7~3.1	2~2.5	一组完全解理	片状
	黑云母	K(Mg, Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	2.8~3.2	2.5~3	一组完全解理	假六方板状和短柱状
	角闪石	Ca ₂ (Mg, Fe, Al) ₅ (Al, Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₂	3.2	5~6	两组完全解理	柱状
碳酸盐类	辉石	Ca(Mg, Fe, Al)(Al, Si) ₂ O ₆	3.2~3.4	5~6	两组中等解理	短柱状、板状
	橄榄石	(MgFe) ₂ SiO ₄	3.2~4.1	6.5	极不完全解理	粒状、板状
	方解石	CaCO ₃	2.72	3.0	三组完全解理	菱面体
硫酸盐类	白云石	CaMg(CO ₃) ₂	2.85	3.5~4	三组完全解理	菱面体
硫酸盐类	石膏	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2.32	2	一组完全解理	板状
	硬石膏	CaSO ₄	2.9	3~3.5	三组完全解理	长方体
氧化物	赤铁矿	Fe ₂ O ₃	5.18	6	一组完全解理	板、片状或菱面体
黏土类	高岭土	Al ₄ (Si ₄ O ₄)(OH) ₈	2.65	2~2.5	一组完全解理	晶体微小
其他	岩盐	NaCl	2.16	2.5	三组完全解理	立方体

在地球地表,有 70%的岩石是沉积岩,是利用机械刀具破碎的主要对象。沉积岩主要包括石灰岩、砂岩、页岩等,沉积岩中所含有的矿产占世界全部矿产蕴藏量的 80%。

1.2 岩石力学性质

1.2.1 岩石力学特性的基本概念

岩石具有变形特性、强度特性等力学性质。岩石的变形是指岩石在任何物理因素作用下形状和大小的变化,工程最常研究的是由于力的影响所产生的变形。岩石的变形特性包括:弹性变形、塑性变形、断裂变形、脆性变形以及韧性变形,本书中主要介绍弹性、塑性和脆性变形。岩石的强度是指岩石抵抗破坏的能力,岩石在外力的作用下,当应力达到某一极限值时便发生破坏,这个极限值就是岩石的强度。岩石的强度特性包括:抗压强度、抗拉强度、抗剪强度以及抗弯强度等。除此之外,岩石还具有非均质性、各向异性以及原始缺陷等力学性质。

1. 岩石的非均质性和各向异性

岩石的非均质性和各向异性是它区别于金属材料的一种属性。

非均质性表现为岩石的物理、化学和力学性质处处不同,以及试验数据波动很大^[19-21]。例如,同一矿山,相同岩石的抗压强度偏差系数达 15%~40%,抗压强度达 20%~60%;而金属材料只有 4%~7%。因此,在处理岩石的试验数据时,必须采用数理统计的方法。非均质性也给机械岩石破碎带来有利或不利影响,当盘形滚刀在软硬不一的岩石表面滚压时,软的地方先破碎,硬的地方后破碎,使滚刀出现冲击,有利于提高破碎效率;相反,在软硬交错的岩石界面钻进时,容易导致钻孔偏斜,造成钻孔质量低劣。

各向异性普遍表现为岩石的物理-力学性能随方向变化,但从宏观上观察,只有层理、片理发育或者具有流纹构造的岩石才有明显的各向异性,块状岩体则可视为各向同性。各向异性不但给钻孔速度带来一定影响,更给钻孔偏斜带来重大影响,因为有各向异性的岩石往往在垂直或平行于构造面的方向,有不同的力学性能和抗破碎能力。

2. 岩石的原始缺陷

天然岩土体由于成岩作用和成岩环境的差异,其内部往往含有大量随机的大空隙、裂隙等微缺陷^[22]。它们都在一定程度上破坏了岩石的完整性和连续性,成为机械破碎中的应力集中源,控制应力裂纹的发生与扩展方向,或者成为引导裂纹定向发展的自由面。特别是裂隙,往往成为岩体与岩块性质差异的主要原因。在载

荷作用下,这些微缺陷会聚集和扩展,最终导致材料的破坏。岩土体表现出来的非连续性、非均质性、各向异性和非弹性^[23,24]就是其内部大量随机缺陷聚集和扩展这一复杂过程的体现。

地质和采掘工作者常用裂隙平均间距、岩石质量指标 RQD(rock quality designation) 和裂隙系数表示岩体内的裂隙数量与分布状况。

欧洲国家常沿钻井岩心或巷道壁面的纵向测量裂隙平均间距,并将岩石划分为裂隙平均间距小于 3~5cm 的极破碎岩石、5~30cm 的破碎岩石、30~100cm 的块状岩石和 100~300cm 的整体岩石。

岩石质量指标:用直径为 75mm 的金刚石钻头和双层芯管在岩石中钻进,连续取芯,回次钻进所取岩芯中,长度大于 10cm 的岩芯段长度之和与该回次进尺的比值即为岩石质量指标,以百分比表示。

岩石质量指标以下式表示:

$$\text{RQD}(\%) = \text{长度不短于 } 10\text{cm 的岩芯累计长度} \times 100 / \text{钻孔总长度}$$

实践表明,岩石质量指标不仅取决于岩体中的裂隙数量,也与岩石抗压强度、弹性模量、纵波速度有关,故美国常用它作为岩体分类指标。即 RQD>90% 为优质岩体;RQD 75%~90% 为良好岩体;RQD 50%~75% 为一般岩体;RQD 25%~50% 为差的岩体;RQD<25% 为很差的岩体。

裂隙系数表示为

$$K = \left(\frac{C}{C'} \right)^2 \quad (1-1)$$

式中, C ——在裂隙性岩体中实测的声波传播速度, m/s;

C' ——在岩石试件内测定的声波传播速度, m/s;

K ——岩石的裂隙系数。 $K > 0.75$, 裂隙很少, 间距大于 80cm, 属于整体结构; $K = 0.45 \sim 0.75$, 裂隙较多, 间距 20~80cm, 属块体结构; $K < 0.45$, 裂隙很多, 间距小于 20cm, 为碎体结构。

3. 岩石的弹、塑、脆性

岩石在受载过程中,会随应力的增加产生相应的应变。岩石所具有的弹、塑、脆性力学性质使岩石在受到应力时表现出不同的变形现象。弹性是指物体在外力作用下发生变形,当外力撤出后变形能够恢复的性质;塑性是指物体在外力作用下发生变形,当外力撤出后变形不能恢复的性质;脆性是指只有不大的应变就发生破碎的性质。除以上三种与岩石变形有关的力学性质之外,岩石还具有延性和黏性(流变性)。延性是指物体能够承受较大的塑性变形而不丧失其承载能力的性质;黏性是指物体受力后变形不能在瞬间完成,且应变速度随应力大小而变化的性质。

在刚性伺服压力机上,用长径比为 2.5~3.0 的圆柱形或 5cm×5cm×5cm 的石

灰岩试样进行单轴压缩试验时,可以获得图 1-1 所示的典型应力(σ)—应变(ε)曲线。图中,斜率较小的上弯形初始段为原始微裂缝闭合所致,称压实阶段;应变随应力呈比例上升的近似直线段 AB ,称线弹性阶段; OA 及 AB 合称弹性变形阶段; B 点为弹性极限,斜率逐渐变小,下弯;裂缝和变形迅速发展的 BC 段称弹、塑性变形阶段; C 点为极限抗压强度标志点;在 BC 段内任一点 P 卸载时,卸载曲线按 PQ 变化,重新加载,加载曲线按 QR 变化, PQR 称塑性滞环; QS 为弹性变形,卸载后即可消除; OQ 为塑性(或永久)变形,卸载后也不能恢复;应力随应变下降,破坏继续发展,直至最终断裂的 CD 段,称为破裂卸载阶段。在 CD 段内任一点 T 卸载时,卸载曲线按 TU 变化;重新加载,曲线按 UV 变化。类似的曲线,也可以在圆柱形或球形等压头的压入试验中获得,此时常用载荷—侵深(或压入深度)曲线代替应力—应变曲线。

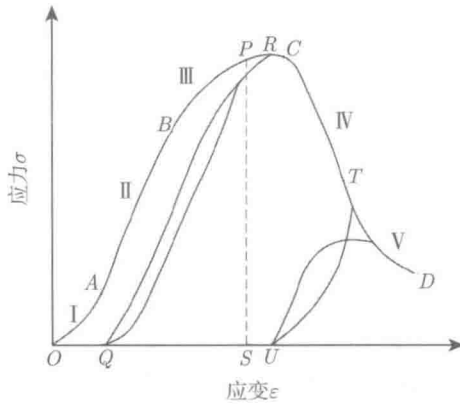


图 1-1 岩石在单轴压缩试验中的典型应力—应变曲线

岩石受载后,应变随应力呈比例增加,应力消除后又恢复原来的体积和形状而不保留任何残余变形的性质,称为弹性;只有不大的应变就发生破碎的性质,称为脆性;相反,则称为塑性。超过弹性极限后立即破碎,无明显永久变形或全变形小于 3% 的称为脆性或弹脆性破碎,具有脆性或弹脆性破碎特征的岩石称脆性或弹脆性岩石;永久变形或全变形大于 5% 的称为塑性破碎,具有塑性破碎特征的岩石称为塑性岩石;永久变形或全变形为 3%~5% 的称为塑脆性破碎,具有塑脆性破碎特征的岩石称为塑脆性岩石。然而,岩石的脆性和塑性是可以相互转化的,在一定的条件下,脆性岩石可能转变为塑性岩石,塑性岩石也可能表现出脆性。例如,同一种岩石在单轴压缩和拉伸时脆性大,多轴压缩时塑性大;高速冲击或动载时脆性大,准静载时塑性大;低温时脆性大,高温时塑性大。

脆性破碎和塑性破碎是本质不同的两种破碎形态,破碎脆性岩石和塑性岩石所采用的方式和工具也不应相同,前者惯用冲击,后者宜用旋转切削。

岩石在弹性变形阶段内的弹性, 对于研究它们在破碎以前的应力状态非常重要。在应力分析中, 岩石的弹性特征常用弹性模量 E 、剪切模量 G 、泊松比 μ 或体积弹性模量 K 表示, 联系这些弹性特征系数的纽带是式 (1-2) 和式 (1-3)。

$$G = E/2(1 + \mu) \quad (1-2)$$

$$K = E/3(1 - 2\mu) \quad (1-3)$$

常见岩石的弹性模量及泊松比见表 1-2。

表 1-2 常见岩石的弹性模量 E 及泊松比 μ

岩石	E/MPa	μ	岩石	E/MPa	μ
黏土	294.2	0.38~0.45	花岗岩	25 497~58 840	0.26~0.29
致密泥岩	—	0.25~0.35	玄武岩	58 840~98 066	—
页岩	14 710~24 517	0.10~0.20	石英岩	73 550~98 066	—
砂岩	32 362~76 492	0.30~0.35	王长岩	66 685	0.25
石灰岩	12 749~83 356	0.28~0.33	闪长岩	68 646~98 066	0.25
大理岩	38 246~90 221	—	辉绿岩	68 646~107 873	0.25
白云岩	20 594~161 809	0.26~0.29	岩盐	—	0.44

4. 岩石的强度

岩石强度理论是岩石本构关系的一部分, 是岩石力学的基本问题之一。因此, 岩石强度理论在岩石力学的研究中一直占有相当重要的地位^[25]。岩石在外力作用下, 当应力达到某一极限值时便发生破坏, 岩石的破坏形式包括脆性破坏、塑性破坏和弱面剪切破坏。大多数坚硬岩石在一定的条件下都表现出脆性破坏的性质, 产生这种破坏的原因是岩石中裂隙的发生和发展的结果。例如, 在地下洞室开挖后, 由于洞室周围的应力显著增大, 洞室围岩可能产生许多裂隙, 尤其是洞室顶部的张裂隙, 这些都是脆性破坏的结果。在两向或三向受力情况下, 岩石在破坏之前的变形较大, 没有明显的破坏载荷, 表现出显著的塑性变形、流动或挤出, 这种破坏即为塑性破坏。在一些软弱岩石中这种破坏较为明显, 有些洞室的底部岩石隆起、两侧围岩向洞内鼓胀都是塑性破坏的例子。弱面剪切破坏是指, 由于岩层中存在节理、裂隙、层理、软弱夹层等软弱结构面, 岩层的整体性受到破坏。在荷载作用下, 这些软弱结构面上的剪应力大于该面上的强度时, 岩体就产生沿着弱面的剪切破坏, 从而使整个岩体滑动。图 1-2 为几种破坏形式的简图。

在单轴试验条件下, 岩石的抗压强度 (σ_c) 最大, 其次为抗剪强度 (σ_s)、抗弯强度 (σ_b) 和抗拉强度 (σ_t), 它们的比率见表 1-3。因此, 在选择破岩方式和设计钻头时, 应充分利用岩石强度的这一特点, 以期获得最低的破碎比功和最高的破碎效率。

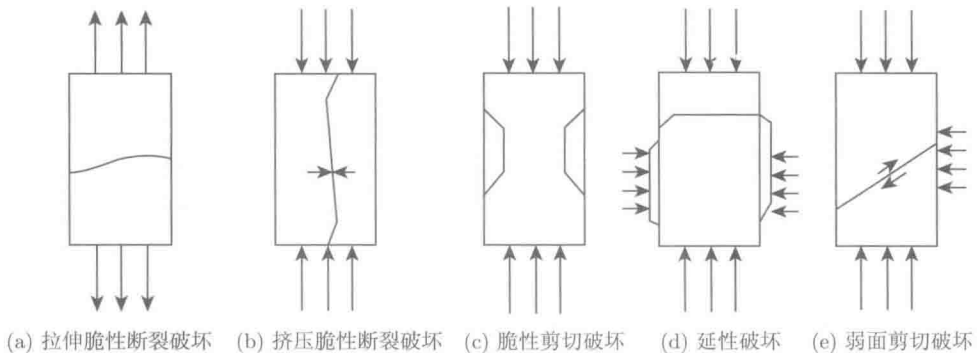


图 1-2 岩石破坏形式简图

表 1-3 岩石的单轴抗压强度与其他强度的比值

典型岩石	抗压强度	抗剪强度	抗弯强度	抗拉强度
花岗岩	1	0.09	0.03	0.02~0.04
砂岩	1	0.10~0.12	0.06~0.20	0.02~0.05
石灰岩	1	0.15	0.06~0.10	0.04~0.10

岩石的最低破碎应力依有关强度理论确定, 最优应力由试验确定, 典型岩石强度见表 1-4。

表 1-4 岩石的单轴抗压强度、抗剪强度和抗弯强度

岩石	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa	抗剪强度/MPa
粗砂岩	139.0	5.0	—
中粒砂岩	148.0	5.1	—
细砂岩	181.4	7.8	—
页岩	13.7~59.8	1.7~7.8	—
泥岩	17.6	3.1	—
石膏	16.7	1.9	—
安山岩	96.7	5.7	9.4
白云岩	159	6.8	11.6
石灰岩	135	8.9	14.2
花岗岩	162.8	11.8	19.4
正长岩	211	14.0	21.7

在三轴压缩下, 岩石的塑性普遍增大, 且能出现从脆性到塑性的全转变。确定塑-脆性转变的临界围压值, 对于深部岩石掘进、开采有着十分重要的意义。随着围压的增加, 强度、弹性模量、剪切模量、泊松比、破碎总能耗和破碎前的变形量均相应增加 (表 1-5)。

表 1-5 岩石在围压下的塑性变形

岩石	破碎前的变形量/%	
	围压 =100MPa	围压 =200MPa
石英砂岩	2.9	3.8
白云岩	7.3	13.0
硬石岩	7.0	22.3
大理岩	22.0	28.8
砂岩	25.8	28.9
石灰岩	29.1	27.2
页岩	15.0	25.0
岩盐	28.8	27.5

1.2.2 岩石强度理论

固体的破碎理论,常称作强度理论,对机械岩石破碎理论的研究有一定的指导意义。研究强度理论还可以进一步认识岩石破碎理论的特点。强度理论一般又分为物理和力学两个方面,前者研究破碎的物理实质,后者研究破碎的力学特征。

1. 力学强度理论问题的提出

当研究岩石破碎问题的时候,力学可以用来分析任何指定部位的受力状况。但是多大力或多大的各种力组合才会导致破碎的问题,仅靠分析力的状况是解决不了的,必须借助于实际的测量。不过实际测量总是有限的,在最简单的情况下,我们常用单位断裂面上受力的极限——极限强度来表示断裂的条件。岩石的极限强度是通过实际测量的途径来取得的,但测量用的试块大小和实际破碎条件并不相同。我们一般认为单位面积上允许承受的力是不变的,这样把强度当作岩石材料常量的观点可以探讨,也是一种解决工程问题的办法。

在多向受力的复杂情况下,这样的办法就行不通了。在断裂部位,一般地说,受到三个正应力和三个剪应力的综合作用,我们不可能把岩石的各种可能的应力组合(有无穷多种)统统事先测量一遍,得出对应于各种情况的岩石强度数值。在这种情况下,就要借助于理论思维,需要用一种统一的理论来回答在无限多种导致破碎的应力组合之中,到底是哪一种应力、应变的极限状态或其组合导致破碎的发生。实际测量的作用,在于用来检验理论答案是否正确;另一方面是在有限的简单测量数据中提供岩石破碎的材料常量,以备用来计算各种不同的具体情况。如果理论是正确的,那么就可以用它来解释各种情况下岩石破碎能否发生,以及破碎的范围和效率等问题,这就是所谓力学强度理论的实质。对破碎的认识不同和观察研究的角度不同,就有多种强度理论。从大体上分,物体破坏时有两种不同的现象,一