

第四届全国岩石破碎学术讨论会

论 文 集

中国岩石力学与工程学会
中国金属学会采矿学会
中国土木工程学会隧道及地下工程学会

一九八九年十一月 成都

第四届全国岩石破碎学术讨论会

论 文 集

中国岩石力学与工程学会
中国金属学会采矿学会
中国土木工程学会隧道及地下工程学会

一九八九年十一月 成都

前 言

自1985年在鞍山市召开第三届岩石破碎学术讨论年会以来，国内各部门又取得了新的显著成就，使发起这次学术讨论会的学会增至八个，他们是中国岩石力学与工程学会、中国金属学会采矿学会、中国土木工程学会隧道及地下工程学会、四川省硅酸盐学会、四川省金属学会、四川省有色金属学会、四川省公路学会和四川省地质学会。

提供给本届年会的论文、报告及摘要共131篇。这些都是广大科技工作者结合工程实践，进行了长期的、认真的调查、试验、研究、分析而取得的成果。其中有些具有较高的实用价值，有些达到较高的理论水平。

为了更好地扩大学术交流，加深影响，促进四化建设，经第四届岩石破碎学术讨论年会筹备会决定，选编出版论文集，以飨广大读者。

由于论文集篇幅有限，不得不将一些与会议内容联系不密切或重复的论文割爱，希谅解。本论文集包括有以下部分的内容：

- 一、破岩机理与测试实验 21篇
- 二、岩石可钻性分级及其应用 14篇
- 三、岩石钻进工具及破碎设备 22篇
- 四、爆破拆除、切割及采掘工程 36篇

本论文集承蒙各论文作者的支持，铁道部科学研究院西南研究所、地质矿产部工艺研究所和铁道部第二工程局的通力协助出版印刷，在此一并表示感谢！

第四届全国岩石破碎学术讨论会

论文集编辑委员会

KAC 28 58

目 次

一 破岩机理与测试实验

- | | |
|-----------------------------|--------------|
| 1. 岩石破碎过程中的灾变问题 | 唐春安等 (1) |
| 2. 高速冲击下岩石的力——凿深特性 | 阳 宁等 (5) |
| 3. 岩石动力学的研究内容和动载荷的分类 | 于亚伦 (10) |
| 4. 金刚石钻进碎岩机理模拟试验研究 | 陈政伟 (13) |
| 5. 金刚石钻进的切削作用 | 罗伟棠 (19) |
| 6. 楔形刀具截割破碎矿岩的基本规律研究 | 陈 渠等 (27) |
| 7. 脆性多晶体石材切削过程中裂纹的形成与扩展 | 滕 霖等 (34) |
| 8. 模拟钻进试验研究 | 白继胜 (39) |
| 9. 磨粘冲击破碎能测试系统的研制 | 张祖培等 (46) |
| 10. 岩石磨料的性质对磨料磨损的影响 | 屠晓利等 (52) |
| 11. 高速摄影模拟钻进试验装置的研制 | 陈玉田等 (56) |
| 12. 井底淹没射流冲蚀破碎岩石的实验研究 | 初迎利等 (59) |
| 13. 液动射流式冲击器应用于超深井的模拟试验 | 庞友同等 (67) |
| 14. 孕镶金刚石钻头切削刃在碎岩过程中显微面积的研究 | 薛 军 (76) |
| 15. 测定岩石研磨能力的新方法 | 赵尔信等 (82) |
| 16. 圆形炮孔切槽后对岩石破坏方向控制作用的力学分析 | 杜云贵等 (87) |
| 17. 切槽炮孔开裂载荷的确定 | 陈益蔚 (93) |
| 18. 裸露药包爆破破碎大块机理初探 | 武 伟 (101) |
| 19. 石材加工表面形成实验研究 | 贺文生等 (106) |
| 20. 矿岩料层辊压粉碎的试验研究 | 黄士芳等 (113) |
| 21. 关于矿岩爆破破碎机理的研究 | 龙凌霄 (120) |

二 岩石可钻性分级及其应用

- | | |
|-----------------------------|--------------|
| 1. 岩石可钻性分级及应用研究 | 唐 谦等 (126) |
| 2. PDC钻头岩石可钻性研究 | 朱春启等 (136) |
| 3. 岩石的主要物理力学性质与岩石可钻性的关系探讨 | 李 斌等 (148) |
| 4. 应用岩石可钻性的试验结果来研究钻井的合理参数选择 | 张先普等 (154) |
| 5. 岩石可钻性指标及钻进速度的预估 | 李悦堃 (159) |
| 6. 牙轮穿孔岩石可钻性的试验研究 | 朱绍桐 (167) |

- | | |
|-----------------------|------------|
| 7. 岩石断裂性分级的理论基础和方法 | 张天锡等 (173) |
| 8. 冲击凿岩可钻性分级及检测方法 | 刘宗平等 (178) |
| 9. 用岩石可钻性指标预估凿岩机钻眼效果 | 单守智 (184) |
| 10. 矿岩压碎功指数的研究 | 王淑鑫等 (189) |
| 11. 岩石点载荷强度和凿碎比功的相关性 | 王维纲等 (194) |
| 12. 岩石和岩体声波速度的概率分布 | 单守智等 (201) |
| 13. 岩样的声波与可钻性分级 | 胡和祥 (207) |
| 14. 石油钻井岩石破碎标准岩样选择与确定 | 李祖奎 (215) |

三 岩石钻进工具及破碎设备

- | | |
|-------------------------------|------------|
| 1. 锥面扩孔式钻进碎岩工具及其破碎岩石的特点 | 薛万成 (221) |
| 2. 关于国产T—TSP岩心钻头可行性研究 | 郑成银等 (227) |
| 3. 复合片破碎不同岩石的分析 | 赵永明 (232) |
| 4. 钻头选择方法探讨 | 屠晓利等 (238) |
| 5. 不同钎刃形式的凿入力和破碎效果的实验研究 | 潘祖龙等 (245) |
| 6. 硬质合金钎头钢体材质的选择 | 符夷雄 (251) |
| 7. 小直径硬质合金整体钎的研制与应用 | 张国樺等 (258) |
| 8. 柱齿钻头试验总结 | 高峰 (264) |
| 9. 以冲击功测定硬质合金韧性 | 张超等 (271) |
| 10. 损伤力学及其在钎钢损伤检测中的应用 | 刘寿康等 (275) |
| 11. 焊齿滚刀材料及工艺研究 | 李石林 (282) |
| 12. 矿用牙轮钻头轴承受力的试验研究 | 丁振堃等 (286) |
| 13. 浅谈高水压破岩 | 金国栋 (292) |
| 14. 冲击—扭切综合破岩与液压凿岩机的发展 | 李大治等 (297) |
| 15. 液压凿岩机冲击能量的测试——光电位移测量系统的应用 | 王维华 (303) |
| 16. 微机电液集成块凿岩控制系统的研究试验 | 黄柏龄等 (309) |
| 17. 煤矿液压凿岩机质量指标及其研究目标 | 郭孝先 (314) |
| 18. 试论煤利用的新工艺及新超碎设备 | 汪一佛 (323) |
| 19. 湿粘土质原料的粘结及破碎机 | 汪一佛 (330) |
| 20. 关于特大直径潜孔锤钻头结构的探讨 | 程温鸣 (336) |
| 21. 压气活塞式电动凿岩机连杆和气室动力过程的测试研究 | 甘海仁等 (343) |
| 22. PDC钢体钻头剖析与探讨 | 赵长有 (347) |

四 爆破拆除、切削及采掘工程

- | | |
|--------------------------|------------|
| 1. 岩体强度、地质构造对预裂爆破参数优化的影响 | 高金石等 (352) |
|--------------------------|------------|

- | | |
|----------------------------|------------|
| 2. 水压爆破的动力学分析及实践 | 李守巨等 (360) |
| 3. 易燃易爆厂区建筑物控制爆破技术研究 | 王明林等 (366) |
| 4. 都匀桥梁厂矿山揭顶爆破 | 罗崇崧 (375) |
| 5. 条形药包爆炸时的高速冲击效应 | 宋守志 (383) |
| 6. 波力电站岩坎爆破及其振动效应分析 | 黄承贤等 (387) |
| 7. 控制爆破在市政工程建设中的意义 | 卿光全 (396) |
| 8. 闹市中岩石破碎时的爆破震动测试问题 | 苏正春 (403) |
| 9. 用控制爆破方法拆除危楼房房顶 | 董永安 (406) |
| 10. 兖州矿区南屯煤矿旧生活楼的拆除爆破 | 王文龙 (410) |
| 11. 采用水压爆破法拆除铁路箱涵 | 李志勇 (417) |
| 12. 微振动爆破技术在枫林1*隧道中的试验与应用 | 刘正雄 (421) |
| 13. 爆破振动速度计算数据处理的计算机程序 | 刘正雄 (426) |
| 14. 隧道等差爆破及控制超挖试验研究 | 刘招伟等 (434) |
| 15. 对改进铅铸扩孔法检测炸药爆力的试验研究 | 张克武等 (442) |
| 16. 立井深孔掏槽和光面爆破模拟试验研究 | 刘积铭等 (448) |
| 17. 控制爆破技术与施工 | 刘忠臣 (454) |
| 18. 对微差爆破减震的研究 | 刘杰英等 (461) |
| 19. 爆扩桩基法在基础工程中应用的研究 | 吴其芬 (464) |
| 20. 石材荒料无声切割开采法 | 江云安等 (469) |
| 21. 石材荒料开采的几个技术问题 | 高金石等 (475) |
| 22. 露天铁矿垂直深孔底部间隔装药爆破应用研究 | 范文忠等 (483) |
| 23. 关于槽孔控制爆破法开采石材的几个问题 | 吴立等 (488) |
| 24. 分析柱状药包对矿岩各向作用的一种方法 | 王泽模 (493) |
| 25. 误爆、拒爆事故的剖析与预防 | 林学圣等 (503) |
| 26. 深孔底部空气垫层装药结构在歪头山铁矿试验应用 | 陈广春等 (507) |
| 27. 降低块体状矿体露采大块率合理爆破参数的确定 | 高晓初 (516) |
| 28. 关于露天转地下开采衔接区段矿岩爆破的几个问题 | 张兴 (522) |
| 29. 台阶底部空场爆破实践与顶部空心爆破的初步探讨 | 韩克幸 (527) |
| 30. 底部空气垫层装药结构对爆破效果影响的研究 | 王承刚等 (531) |
| 31. DG—1型液体炸药的研制及其应用 | 李智信 (537) |
| 32. 低爆速炸药在控制爆破中的应用 | 张铁山 (541) |
| 33. 凿岩钻车微机控制的试验研究 | 胡时友 (545) |
| 34. 厚淤泥层下的岩塞爆破 | 龙凌霄等 (550) |
| 35. 新型静态破碎剂试验研究 | 许宁 (555) |
| 36. 间接能爆破 | 许宁等 (567) |

岩石破裂过程中的灾变问题

唐春安 徐小荷

(东北工学院)

摘 要: 研究岩石的破裂, 必须研究岩石的破裂过程。本文扼要阐述了岩石的破裂过程研究的内容和意义, 指出岩石的失稳破裂过程是一种具有灾变性质的过程, 可用灾变理论加以描述。文中还阐述了这一研究的广泛应用前景。

据统计, 全世界每年有100多亿吨固体物料需破裂粉碎加工。为此所消耗的电能占总电能的3.6%。在水泥生产中, 仅破碎作业的能耗就占整个成本的30%以上, 而在选矿厂则超过40%甚至更多¹⁾。因此, 不管是从岩石力学以及相关学科理论发展的角度, 还是从工程应用的角度, 研究岩石破裂过程的意义都是不言而喻的。

由于岩石材料的特殊性, 它的力学性能与金属材料的力学性能相比, 存在明显的差异。这些差异构成了岩石力学有别于其它力学的特殊内容。人们研究金属材料力学性质的目的, 主要是为了更好地利用金属材料来作承受荷载的构件, 而不致发生结构的失效和破坏。

岩石则不然。它除了在工程结构中象金属材料一样充当防护体(如隧道、矿井等地下工程), 在采矿、铁道、水利、核能等大量地下工程中, 更多地则是将岩石(岩体)当作破碎工作的对象。可以说, 就采矿作业而言, 经常遇到的、最简单、最基本的过程, 便是从岩体中破碎出岩块来。用锹镐挖掘、钎子打眼、炸药爆破、滚刀碾压、水流冲射, 以及用火焰喷烧、激光照射、电子束切割等破碎方法, 都是为了解决变岩石为岩块(岩粉)的问题。新的破岩方法之所以不断出现, 就是因为人们希望不断寻找出更好的能耗更小的破岩方法。这些企图最后都归结到需要对岩石破裂这个最基本的过程进行研究。因此, 岩石破裂过程的研究是岩石力学的重要组成部分之一¹⁾。

过去岩石破碎的研究方法多以破碎指标的测定为主, 这些指标综合地反映了岩石的坚固性。从某种意义上说, 反映了岩石破碎的难易程度。正象所常见的那样²⁾, 当某一现象(或某一过程)还不知道它的内在原因的时候, 在现象的被动方面往往就赐以一种内部的“性”, 岩石坚固性也就是不了解破碎岩石的物理过程以前的一个代名词而已。然而, 由于这些方法只能反映岩石的因果关系, 而不能反映岩石破碎的物理过程, 因而难以搞清其破碎的机理和本质。尽管这些研究的结果在某种程度上说更能满足于工程的实际需要, 但要把这些结果与岩石本身的性质联系起来, 并从理论的高度对岩石破碎的过程进行更深入的探讨, 显然还缺

乏某种沟通。为了说明岩石为什么有统一的坚固性，为了阐明影响坚固性的因素，为了采矿过程的机械化，为了把采矿工作安排在科学的基础上，就必须揭露破碎岩石过程的实质。

因此，岩石破碎效果和破裂过程的研究，就构成了岩石破碎学的中心内容。前者研究岩石破碎的范围和破碎后块度分布的规律性，以破碎岩石的功能转换，包括能耗和岩块数量、粒度间的关系；而后者更侧重于各种破碎方法的外载荷特点，以揭露破裂进行的过程。由于将岩石破坏前后的状态和过程联合加以考查，它不仅能帮助我们根据岩石破坏的特点（而不是构件的破坏特点），来研究恰当的破坏判据，而且通过对岩石破裂全过程的研究，使我们能掌握荷载变化的特点，更精确地计算用于破碎岩石的能耗（而不是总能耗），以便对于在各种工具下破碎岩石的效率进行深入的研究，从而最终为研制高效能的采掘机械、工具和器材，提供合理的、指导性的破碎工作参数。

二

岩石破裂过程的研究，也给岩体工程的稳定性分析提供了有价值的理论和实验依据。许多工程实践证明³：地下巷道或采场周围的岩体即便出现了大量裂隙，但巷道和采场作为结构，却仍然具有承载能力而不出现失稳破坏。传统的试图保持围岩整体性的支护方式往往是不经济也是不现实的。本世纪六十年代提出的岩石应力—应变全过程曲线的概念⁴，使人们认识到岩石破裂的开始并不意味着它承载能力的完全丧失。刚性试验的出现⁵，又使人们认识到了试样破坏之后的稳定性与荷载作用系统及试样的共同作用有关。因此，有必要在支护设计和围岩稳定性分析中充分考虑这些因素。

而在另一些情况下，矿井生产，特别是在深部开采的矿井生产中，又经常会遇到“岩爆”、“煤爆”等冲击地压现象。这种现象不仅严重地破坏了地下工程结构，而且威胁着生产人员的安全。但恰恰在这里，传统的破坏判据是失效的。因此，判断此类工程结构的稳定性，有待于一种新的理论。

三

目前，岩石力学正进入一个全新的发展阶段。它的一个明显目标是改进力学的理论基础，使它更能接近现场实际，而摆脱理想简单化的作法。其发展的一个重要标志之一，就是将研究的领域从岩石破裂前的性态延伸到更加关注破裂之后的性态，或者说从传统破坏判据的左侧跨到了右侧。人们不只简单地寻求象Mohr—Coulomb那种以岩石在实验室条件下出现整体破坏为根据的强度准则。因为它不适用于受载变形过程的研究。目前的注重点是 如何建立描述岩石损伤的演化方程。破坏不再被看成是一种状态，而是一种过程。人们把这个过程称作材料劣化。讨论包括破坏全过程的岩石应力—应变全过程曲线，是一个时期以来的热点之一。

但是，由于人们的注意力仅集中在对岩石破裂性质的研究，追求的是试验机刚度的提高，以获得接近于恒变形速率的稳定加载过程，而忽视了作为一种机制，当将试验机—试样作为一个系统来讨论的稳定性时，它的意义可能远远超过了对岩石破裂过程本身研究的意义。因为不仅许多现实中结构失稳的例子与这种试验机—试样系统的失稳有着惊人的相似之处。而且更重要的是，诸如岩爆之类的自然现象，不仅与岩石介质的强度有关，而且与介质

系统的失稳更加密切相联。因此，在许多情况下，诸如岩爆、采空区的冒落、地表沉陷，乃至地震、压力容器爆炸等等，我们不仅关心“破坏本身，而且更为关心破坏所经历的过程以及强烈程度。在这些情况下，破坏过程的研究就常常显得比研究是否破坏的判据本身更为重要。

现以机械工程和岩石工程对破坏判据理论提出基本要求列下表对比：

	机 械 工 程	岩 石 工 程
1. 对象	金属	岩石
2. 关心的范围	弹性阶段	破裂(弱化)阶段
3. 介质材料强度	已知	未知
4. 按强度判据预见破坏	可预见(因为强度已知)	不可预见(因为强度未知)
5. 所关心的问题	失效	失稳
6. 衡量失效或破坏性的标准	达到弹性极限	岩石介质变形速率的突然增大
7. 破坏的对象	本身	岩石之上的构筑物
8. 目的	防止破坏	预报破坏

由此可见，两者在如此之多的方面表现出差异，能够适应于两者的破坏判据，自然也应该具有各自的特殊性。与金属材料的破坏准则不同，岩石的破坏准则具有双重意义。作为不破坏的判据和破坏的判据，它是同等重要的。一方面，它象金属材料的破坏判据一样，指导人们如何进行岩体工程的防护；另一方面，它又告诉人们在什么样的荷载情况下进行岩石的有效破碎。

与其他力学的基本量一样，荷载、变形同样是研究岩石的破裂过程的两个基本量，只有建立了荷载与位移(变形)之间的关系，力学分析的方法才是可能的。因此，研究岩石材料的本构关系具有重要的意义。但是，由于破碎岩石的荷载往往是局部的、动态的，理论分析十分困难。在较好的情况下也只能给出近似解。而更重要的实质性困难还在于，在复杂应力状态下，岩石达到破坏之前，已经不符合弹性条件了，即使在弹性状态下，亦是属于非线性问题；而且岩石经常有裂纹、弱面等缺陷，从连续介质力学角度分析破碎物理过程的根基就不牢。对于许多岩石，尤其是软的或高度渗水的沙岩、凝灰岩、页岩等等，它们在相当狭窄的应用范围内发生的是弹性的行为，而在岩石工程中却往往超过这一狭窄的应用范围。这就需要发展非弹性变形的本构理论，包括破坏和破坏后的响应。

近年来，损伤力学的发展，为岩石材料的非弹性质和破坏机理给出了一种可资借鉴的解释模式。人们已经逐渐习惯地称岩石为有初始损伤的材料，并开始采用某些特征参数来合理地描述岩石内部缺陷的分布状态。在变形的过程中，岩石内部的缺陷会进一步劣化，这个过程是用损伤演化来描述的。

具有弱化性质的本构关系，是岩石力学性质的一个显著特点。岩石破裂变形的稳定性与岩石介质的弱化性有着有着密切的联系。如冲击地压^①就是由具有应变弱化性质的介质和其余的未处于应变弱化阶段的介质组成的变形系统的平衡进入一种非稳定状态。这种非稳定状态的发生，就是人们从数学上称之为的灾变。

四

七十年代初期由法国数学家Thom创立的灾变理论(Catastrophe Theory)⁷⁾,是研究不连续现象的一个新兴数学分支,其主要数学渊源是根据势函数把临界点分类,将各种领域的灾变现象归纳到不同类别的拓扑结构中去,进而研究各种临界点附近非连续性态的特征,即为有限个数的若干个初等灾变。把这样得到的知识与对不连续现象的理论分析和观察资料相结合,就可以建立数学模型,更深刻地认识不连续现象的机理并作预测。

灾变理论作为一种旨在应用的理论,虽然出现还不久,但已取得了许多应用成果,不仅渗透到力学、物理学、生物学等领域,而且已被用于研究地学中的非稳定性问题,如火山爆发、相变、浊流、断层运动和地震等。将它用于岩石破裂过程失稳(包括加载机构)的研究,还未曾有过报道。

作者认为:岩石在加载系统作用下的破裂过程,除了在特殊控制的条件下进行,通常都不是一个稳态的过程,更多的情况的由稳态发展到失稳的过程,是包括试验机 and 试样的岩石力学系统的一种失稳现象。这正是一种具有灾变性质的过程。因此,用灾变理论来研究这一过程是恰当的。

作者曾运用灾变理论,对岩石在加载系统作用下破裂的这种非稳定性进行了初步探讨,研究了对非稳定性起重要作用的系统刚度性质。结果表明,灾变前后岩样的变形突跳量和能量释放量仅与系统的刚度性质有关,而与扰动特性无关。加载系统的非稳定性问题是由岩样介质软化特性引起的,是一种物理非稳定现象。这进一步表明,研究具有弱化性质的岩石的本构关系,对于岩石变形的非稳定性有着十分重要的意义。

五

岩石破裂过程的研究已经引起国内外岩石力学研究者的广泛重视。美国机械工程师协会应用力学分会最近提出固体力学研究趋势的调查报告,列出了地质材料力学的十一项研究课题,其中涉及到岩石破裂研究的就有五项,主要包括:(1)反映变形、破裂和破裂后行为的本构理论;(2)非弹性变形性质;(3)确定能描述材料组构的微结构参数、组构演化的微观力学分析及其与变形和破裂性质的关系;(4)从理论上、数值上和实验上进一步研究断裂力学的有关问题,其中包括加载速率影响;(5)不同的破坏模式,静态的和动态的,微结构对破坏的影响,在钻井和破碎的岩石—工具的相互作用,以及发展那些研究破坏模式所需的实验技术等等。

然而,尽管人们注意到了岩石破裂过程研究的许多方面,但作为一种机制,有关试验机—试样共同作用系统的失稳或灾变性,还未引起普遍的注意,必须给以强调。为了更加深入、真实地研究岩石的破裂过程,必须同时研究与此相关的试验系统。而清楚地了解试验机与试样系统相互作用的内在规律,不仅对于岩石破裂过程本身的研究是十分有意义的,更重要的是它为诸如地下峒室稳定、矿柱设计、顶板控制、岩爆机制及地震孕育模式的探讨等,具有更加重要的实际意义。

参考文献

- [1] 唐春安,岩石破裂过程试验的研究,东北工学院博士学位论文,1988.

高速冲击下岩石的力—凿深特性

阳 宁 赵绕武

(冶金部长沙矿冶研究院)

摘 要: 本文采用Hopkinson杆,研究了活塞冲击速度高于10m/s时,丁字湾花岗岩的力—凿深特性,试验发现,在高速冲击的情况下,岩石的凿入过程可分为五段:①加载;②局部崩碎;③再加载;④第二次崩碎;⑤回弹。岩石的力—凿深特性和凿入系统是相关的。在试验中发现硬岩中可明显地观察到二次凿入的现象,这是由于二次加载时并不沿卸载曲线上升,并且二次凿入的凿深都较第一次凿入时小。

一 绪 言

衡量岩石的破碎特性现在所使用的是两个指标,岩石的力—凿深特性和破碎比能。其中力—凿深特性较好地揭示了岩石的破碎的力学过程,反映了岩石的破碎特性。

在对凿入过程的研究中,不少研究者对建立力与凿深之间的关系 $F = F(u)$ 作过尝试。高岗三郎^[1]等用摆锤冲击测定煤系岩石的凿入系数及其规律。佐佐木和郎等用电容位移转换器直接测定凿深和凿入力的关系。清水浩^[2]亦对金属和岩石的凿入系数作了测定。Hartman^[3]用静力压入和射击凿入测定了单位刃长凿入系数和刃长的关系。

七十年代初,Hustrulid和Fairhurst^[4]根据实测的力—凿深曲线和凿入后将产生永久变形(位移)这一事实提出了简单的三角形的力—凿深关系的理论模型。

Dutta^[1]根据Paul和Sikarskie的楔形钻头钻入脆性金属的理论,提出了一个连续几次跃进式破碎的峰值力在同一条直线上冲击凿入理论模型。徐小荷,唐春安^[5]提出了二段式凿入模型。Lundberg^[6]在计算中亦考虑了钻头和岩石之间存在初始间隙,采用了二段式

[2] 徐小荷等著,论我国岩石分级,煤炭工业出版社,1959.

[3] 朱之芳,刚性实验机,煤炭工业出版社,1985.

[4] Cook, N. G. W., The failure of Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.2, 389—403, 1965.

[5] 周思孟,刚性实验机及其在岩石力学中的应用,岩石力学与工程学报, Vol.6, No. 2, 125—138, 1987.

[6] 章梦涛,冲击地压失稳理论与数值模拟计算,岩石力学与工程力学报, Vol.6, No. 3, 197—204, 1987.

[7] P.T.桑德斯著,灾变理论入门,上海技术文献出版社,1985.

模型。最近，徐小荷，唐春安又指出了破碎点分布在一抛物线上的理论模型。

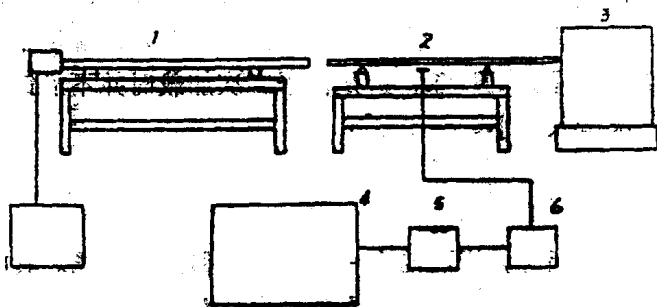
由于实测的力—凿深曲线和理论模型的差异，速水博秀，张庙康⁽⁷⁾等引入了凿入速度的影响，研究表明岩石在钻头作用F的破碎问题与钻头的凿入速度有关。

目前大部分冲击凿入的研究工作受试验设备的限制，都局限于活塞的冲击速度小于10m/s，对于大冲击速度范围的凿入系统特性的研究还十分不足。同时由于凿岩机具的发展，特别是液压凿岩机趋于采用更大的活塞冲击速度，以及材料工业的发展，使得提高活塞的冲击速度成为可能。因而对于高冲击速度下的凿入系统特性的研究很有必要。

本文利用建立的高速冲击系统，应用波动理论对丁字湾花岗岩的力—凿深特性进行了研究。

二 试验原理和装置

所采用的试验装置如图1所示。由下列几部分组成：加速活塞的压气枪；压缩机和控制回路；钻杆钻头，岩石及岩石移动架；以及机架构成的压气，高速冲击凿入试验系统以及相应的测试仪器包括RSM—08记录仪，直流放大器以及应变片等。压气枪、钻杆钻头安装于同一水平，并且位于同一直线上。钻杆钻头垂直于岩石表面，仪器和机架放在相邻位置。



1. 压气枪 2. 钻杆及支承架 3. 岩石
4. RSM—08记录仪 5. 直流放大器 6. 电桥及直流电源

图1 凿入系统略图

该系统实验原理如下：在一定压力的压气的作用下，活塞作加速运动，以一定的速度与钻杆发生对心碰撞，在钻杆中产生的应力波以一定的波速C在钻杆中依纵波形式传播。到达钻头岩石界面时，应力波的一部分能量进入到岩石之中，对岩石进行破碎，一部分反射回钻杆之中，形成反射波，反射波在到达钻杆活塞界面时，经界面反映形成二次入射波，重新到达钻头岩石界面，作二次凿入和反射。只要钻杆足够长，在钻杆中部测出的应力波就可清晰地区分出入射波和反射波。即是应力波通过钻杆的时间T要大于应力波的持续时间T₀。

在满足一维应力波传播的条件下⁸，可根据波动理论分析测出的入射波、反射波，利用计算机对凿入系统的力—凿深曲线，凿深—时间曲线，力—时间曲线，凿入瞬时速度及能量传递效率进行分析。根据是否有二次凿入而进行二次凿入分析。

在该装置上可将活塞的速度加速到20m/s，故冲击速度提高后凿入系统的凿入特性可方便地进行研究。

冲击速度和应变均用摆锤标定。

凿入系统的参数依一维应力波理论按如下计算：

凿入力

$$F_R = A (\sigma_i + \sigma_R) \dots \dots \dots (1)$$

凿深

$$u = \frac{C}{E} \int (\sigma_i - \sigma_R) dt \quad (2)$$

依(1)式和(2)式可导出:

$$F_R = F_R(u) \quad (3)$$

入射能量:

$$W_i = AC/E \int \sigma_i^2 dt \quad (4)$$

岩石吸收能量

$$W_R = \int F_R du \quad (5)$$

能量利用率

$$Z = W_R / W_i \quad (6)$$

二次凿入计算类推, 其中 σ_i 为入射应力, σ_R 为反射应力, C 为弹性波速, E 为弹性模量, A 为钻杆截面积。

为了保证迅速准确地对数据进行采集处理, 程序的编制是十分重要的。在RSM—08记录仪上装有LASER310计算机, 可自行编制程序, 同时仪器附带的软件亦可利用, 程序采用BASIC语言和汇编语言编制, 这样可实现快速采样, 处理得出结果, 程序具有以下功能:

- ①采集: 对应力波信号进行采集, 存贮容量为8K字节。
- ②存盘: 将采集得到的数据存入磁盘中。
- ③屏幕显示: 将采集到的应力波在屏幕上显示出来。
- ④打印: 用打印机绘出采得的应力波形。
- ⑤处理数据, 输出结果。
- ⑥标定系数计算。
- ⑦消除电磁阀的干扰。

三 实验结果

进行多次实验, 从中列出六组实验结果, 其中三组为新表面上的凿入, 三组为旧凿痕上的凿入, 试验得出的应力波和相应的力—凿深曲线如图2、图3所示。

活塞的质量为3.7kg, 长320mm。气压 $2.5 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$ Pa的活塞的行程为1~1.5m。钻杆为2.7m长的B25六角钻杆。钻头为 $\phi 38$ 一字型钻头, 刃角 110° 。活塞的打击速度在9~15m/s之间。

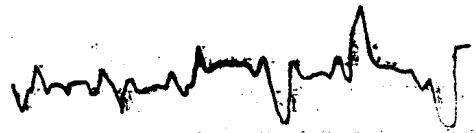


图2 实测应力波

四 分析与讨论

根据实验的应力波形和相应的力—凿深曲线可以看出, 活塞打击在钻杆中产生入射波, 沿钻杆传播, 到达钻头岩石界面处, 在此处形成一个由自由端向固定端过渡的边界条件, 形成一个前拉后压的反射波。反射波在活塞钻杆界面处再次反射形成前压后拉的二次入射波, 在一定条件下再形成二次凿入。

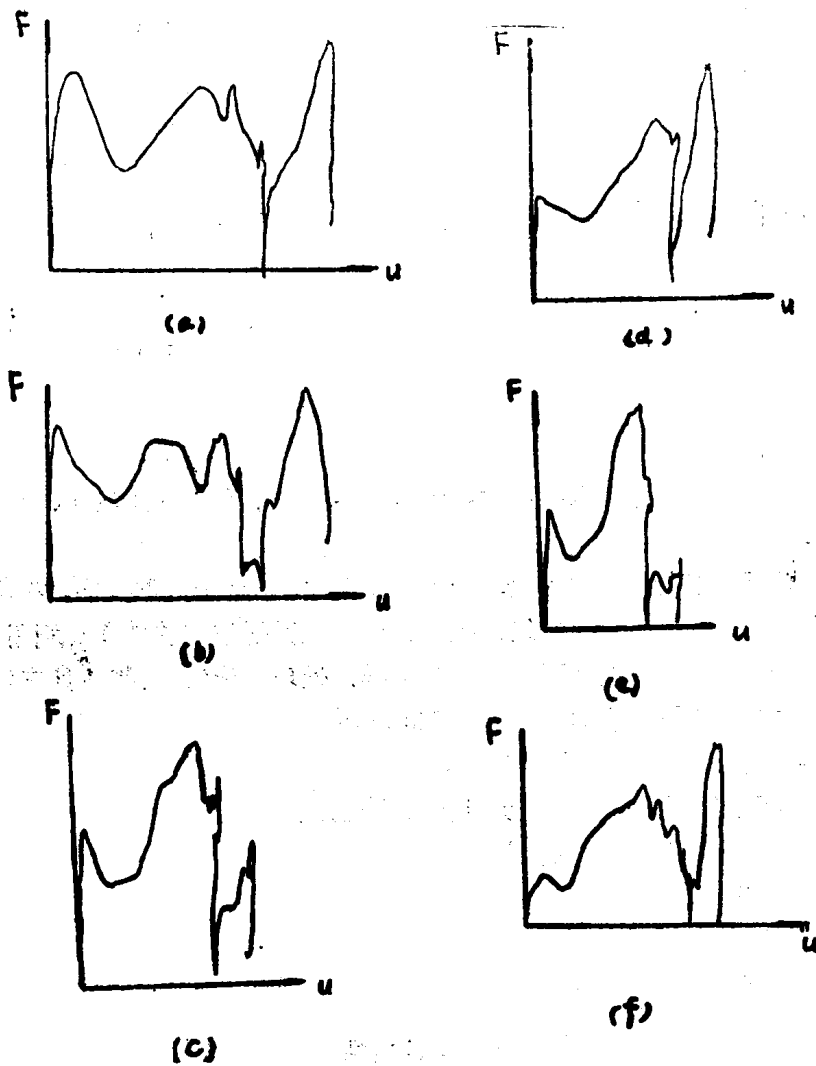


图3 实测力——凿深曲线

岩石的力——凿深特性

由试验结果，我们可以综合得到岩石的力——凿深典型模权，如图4所示。在得到的力——凿深曲线上存在有两个破碎点A和C，相应于钻刃凿入岩石分为两个阶段，如图5所示，首先，钻刃进入岩石形成一较小局部破碎区，对应于第I破碎带。然后钻刃侧面与岩石接触，形成第II破碎带，完成一次凿入。

凿入过程可分几段

- ①OA段， $F > 0$ ， $\frac{du}{dt} > 0$ ， F 和 $\frac{du}{dt}$ 都呈上升趋势，从实验绘出的 $F-U$ 曲线来看，此段产生的 u 很小，到达A点后产生破碎。
- ②AB段，凿深加大，刃下岩石产生局部崩碎，到达B点，钻头质点速度达到最大，局部破碎完成。
- ③BC段，钻头进入第II破裂带，钻刃接触面增大，凿入阻力增加，钻刃的质点速度下降，

随凿深加大，凿入力达到峰值， $\frac{du}{dt}$ 趋于零。

④CD段，在凿入力达到峰值后，钻刃下岩石产生第二次崩碎，钻头继续前进，这时岩石虽已破坏，但仍有一定的支承力，其支承力逐渐变小，从而形成破碎坑FOG。

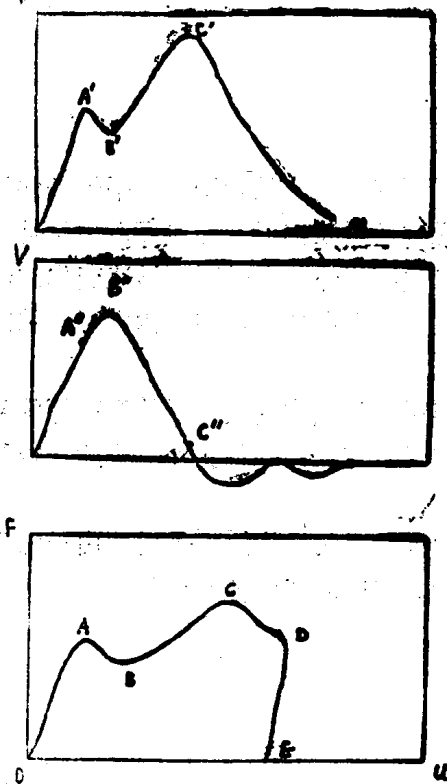


图4 凿入的典例模式

但实测的力——凿深曲线表明二次加载也并不沿一次卸载曲线上升，并且一次卸载出现斜，说明岩石具有一崩碎过程，而且破碎的岩石有一定的支承力，这样，有时〔图3(e)〕二次凿入力超过岩石的支承力，而未达到一次凿入的峰值时，也发生了破碎即二次凿入。

从实验观察的数据来看，二次凿入的凿深都较第一次凿入时小，这说明破碎区较小。再者，二次凿入时回弹较明显并且线性较好，说明二次凿入时崩碎较少，卸载以变形能释放为主。

五 结 语

本工作建立了适用于岩石凿入过程研究的压气枪式高速冲击试验系统，和相应的数据采集处理系统。活塞冲击速度可达20m/s，高于其它冲击钻进试验设备。

岩石的力——凿深特性的研究表明：岩石的破碎具有对应于峰值的两个破碎点，这是由于岩石表面的不平整和脆性断裂的特性所决定的。

过去的一些工作基于理想的力——凿深模型得出产生二次凿入的条件是二次凿入力峰值超过一次凿入力峰值，仅在软岩而且活塞短的情况下才可发生。但在本文进行的硬岩凿入试

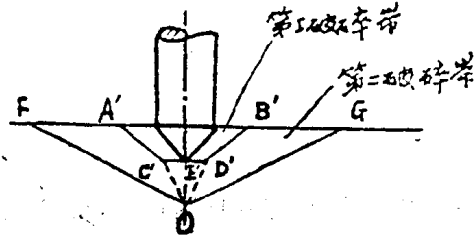


图5 凿入的破碎区

⑤DE段，岩石有回弹，岩石贮存的能量一部分以应变波的形式向围岩扩散，一部分反射回钻头，钻头后退， $\frac{du}{dt} < 0$

根据以上分析，在高速冲击的情况下，岩石的凿入过程可分为五段：①加载；②局部崩碎；③再加载；④第二次崩碎；⑤回弹。

二次凿入

在我们的试验中明显地观察到二次凿入，过去的一些工作如Hustrulid, Lunberg 的分析认为在硬岩石中一般不会产生二次凿入。主要根据这样一种假设：第二次凿入力的上升按第一次卸载曲线正斜率上升，只有当二次入射波到达钻头—岩石界面时，一旦力超过第一次凿入力的峰值，可产生再次凿入作用。

岩石动力学的研究内容和动载荷的分类

于亚伦

(北京科技大学)

一、岩石动力学是相对静力学而言的。岩石静力学所研究的对象是处于静力平衡条件下的岩石对周围物理环境中的力场反应，它忽略了介质单元体的惯性作用。而岩石动力学是研究冲击载荷对岩石的作用及其在岩石中引起的效应。冲击载荷指外载随时间而迅速变化的爆炸和高速碰撞载荷，在矿山工程上主要表现为凿岩、爆破、振动和粉碎。在岩体中引起的效应是振动、开裂和抛掷。

岩石在承受诸如：凿岩、爆破、粉碎这样冲击载荷作用时，从承受载荷开始至破坏的载荷周期仅有 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ s，即使在这样短暂的时间内，载荷仍然随时间而变化。因此，岩石单元体实际上是处于随时间而变化的动态变化过程中。

岩石在承受急剧变化的冲击载荷作用时，所观察到的各种现象就像波的传播和由于急剧的应力变化而产生的破坏一样，其力学基础是应力波运动方程所表征的各种现象。

岩石力学所研究的内容，应该包括：

传播应力、应变变化的应力波和应力场；

岩石动力学的试验方法；

岩石动力学的数值解析法；

岩石的动态物理性质；

岩石的动态变形特性、强度特性和破碎特性；

验中明显地观察到二次凿入现象，二次凿入的凿深都较小，并且回弹较一次凿入明显。这是由于在实际岩石凿入特性不同于理想模型。

参考文献

1. 赵统武，国外凿岩机械与风动工具，p1—37，1976，4。
2. 清水浩等，《九州铍山学会志》p.219—216，Vol. 36，No.6。
3. Hartman H.C.，〈Mining Engineering〉，p.68—75 Vol.11(1)，1949。
4. Hustmid, Fairhusst, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. p.313—336, 335—456, Vol.8, 1971.p.417—429, 431—449 Vol.9, 1972。
5. 徐小荷，《岩石破碎学》，煤炭工业出版社，1984。
6. Lundberg B., Int. J. Rock Mech. Min Sci. p.237—249, Vol.22, 1985。
7. Zhang Miaokang, Tech. Rep. Univ. f Lulea, 1983。
8. Fairsthnst C., Mine Quarry Engineering, p.122—130 (3), p.160—178(4), Vol.27, 1961。

岩石的动态断裂准则；

岩石在高速度冲击载荷作用下的本构方程；

岩石动力学在工程上的应用。

岩石动力学与冲击动力学、爆炸动力学、断裂动力学在相互影响、相互渗透中发展起来的。它的发展不仅对生产实际，而且对岩石破碎机理的研究都有着重大的现实和理论意义。

岩石在冲击载荷作用下，与准静载作用下的力学响应是完全不同的，一是在冲击载荷作用下，岩石具有明显的惯性作用。二是岩石的力学性能与应变率有密切关系，即岩石的本构关系对应变率的相关性。岩石在冲击载荷作用下的动态响应包括：岩石质点的惯性响应和材料本构关系的应变率响应。

因此，在研究岩石冲击载荷作用下的岩石动力学问题时，必须要触及两方面的问题，即已知材料的动态力学性质，在给定的外载条件下研究介质运动，称为应力波传播规律的研究；利用应力波传播来研究岩石本身在高应变率下的动态力学性质，称为材料的力学性能及本构关系的研究。

二、岩体受到不同载荷作用时，其内部产生的应变率变化很大，从 $10^{-14} \sim 10^{-6} / s$ 的地壳变化直到 $10^4 / s$ 的高速变形，为研究方便，按应变率的大小分为四类，如表1所示？

表1 应变率类型

类型	$\dot{\epsilon}$ (1/s)	载荷作用方式
极低应变率	$< 10^{-10}$	地壳变动产生的应变率
低应变率	$10^{-8} \sim 10^{-3}$	油压式试验机
中应变率	$10^{-3} \sim 10^0$	落锤冲击，气体活塞冲击，水中冲击压驱动活塞冲击，大容量油压活塞冲击
应变率	$10^1 \sim 10^3$ $10^3 \sim 10^4$	S.H.P.B.* 炸药冲击

* S.H.P.B.—Split Hopkinson Pressure Bar 之略

有关应变率与载荷形式的关系列于表2。

表2 不同载荷类型的应变率

三、岩石动力学的最新发展

1. 在不同条件下进行应变率效应的研究。

以往多是在常温、大气压下进行研究。1972年以后Christensen, R.J.和日本川北稔等人分别制作了三轴S.H.P.B.装置进行了围压条件下的试验。1974年Lindholm, U.S. 还进行了围压、温度、应变率的试验。

而且岩石试件除一般的石灰岩、砂岩、页岩以外，开始对磁铁矿等矿石进行研究。

2. 除继续进行应变率 $< 10^3 / s$ 量级条件下岩石力学行为的研究，也开始研究应变率 $>$

