

# 岩石破碎与可钻性文集

第 1 輯

地質部勘探技術研究所編譯

1964年

## 編 者 語

我所在开展岩石破碎研究工作过程中，有关研究人員曾搜集了不少国内外文献資料。这里搜集整理的40篇文章就是其中的一部份。内容包括国外近几年来某些国家对岩石物理力学性质，岩石破碎机理与可钻性等方面的科研成果与实验方法。可供地质勘探，石油钻井以及矿山采掘部門的科研人員，工程技術人員和有关专业院校的师生参考，特此編印成册，以内部方式发行。由于編譯者水平有限，時間短促，錯誤难免，懇請大家指正。

編 者

1964年9月

## 目 录

岩石破碎研究的基本目的, 方法与国内外概况	地质部勘探技术研究所岩石破碎组编写 (1)
1. 关于硬质合金钻进的研究	佐佐木和一郎等 (19)
2. 大气压力下切削破碎机理的研究	K. E. 葛雷等 (30)
3. 迴轉钻进破碎岩石的实验室研究	W. H. 苏尔敦 (38)
4. 脆性体的破碎机理及自由切削时所需的力	Г. И. 索滋洛夫 (47)
5. 論硬质合金钻头破碎岩石問題	Г. И. 德納林—敦吉 (52)
6. 論切削破碎岩石的阻力	Н. И. 謝多連科 (57)
7. 切削具側斜面对切削力的影响	В. Н. 格托帕洛夫 (59)
8. 切削板岩用硬质合金刀具的研究	I. F. 杰克申等 (62)
9. 論钻进时钻头切削具下面产生的应力	В. М. 特罗菲莫夫 (74)
10. 切削阻力与切削参数的关系	М. М. 普洛托吉雅柯諾夫 (78)
11. 实验方法檢驗切削破碎理論	В. С. 美拉基斯拉夫列也夫 (83)
12. 钻进时最有效破碎岩石的原理	帕列斯金 (86)
13. 苏联采用的岩石强度研究方法	М. М. 普洛托吉雅柯夫 (93)
14. 岩石的“可钻性”和坚固性	М. М. 普洛托吉雅柯夫 (104)
15. 評定岩石强度的一些試驗方法	В. J. 格林兰 (116)
16. 确定岩石抗剪强度的新方法	М. М. 瓦納洛維奇等 (120)
17. 钻进过程中岩石硬度的問題	W. B. 梅脫尔 (125)
18. 測定岩石硬度的快速方法	И. С. 菲諾捷也夫 (131)
19. 用迴轉法确定岩石的硬度和研磨性	В. И. 卡尔波夫 (135)
20. 岩石的强度系数和研磨性对切削力的影响	张嘉祿 (138)
21. 岩石研磨性对迴轉钻进的影响	В. С. 費虛等 (144)
22. 岩石研磨性与鋼及硬合金表面硬度之关系	A. И. 斯彼瓦克 (161)
23. 机械钻速与压力和钻头破碎单元磨損的关系	П. М. 罗斯达敏 (165)
24. 用微型磨損钻头破碎岩石的試驗研究	A. Э. 庫尼也夫 (169)
25. 用钻孔法研究岩石的物理力学性质	Н. А. 庫特雅 (172)
26. 机械钻速与钻头軸心压力的关系	П. М. 罗斯达敏 (176)
27. 論球体压入时脆性岩石破碎机理的問題	М. А. 薩拉瑪托洛 (181)
28. 压入时塑性变形区和塑性岩石破碎机理	Л. А. 史立涅尔等 (185)
29. 动压入状态下岩石力学性质的研究方法	П. И. 卡夫托宁科等 (187)
30. 动压入时岩石力学性质的实验研究	Н. Н. 帕夫洛娃等 (192)
31. 論冲击钻进时破碎岩石的規律	Е. Ф. 拉特尼柯夫 (211)
32. 关于高压条件下的岩石破碎区	В. В. 布拉托夫 (213)

33. 各向压缩条件下用柱状压模压入法确定岩石硬度..... B. B. 布拉托夫 (217)
34. 关于井底条件下岩石的硬度..... B. C. 菲多洛夫 (221)
35. 在高压介质条件下的钻头试验台..... И. A. 阿布拉莫夫 (224)
36. 孔底清洁—影响深孔钻进速度的主要因素..... N. H. 汶林恩 (229)
37. 论液体静压力对岩石可钻性的影响..... A. B. 卡尔钦科 (243)
38. 钻孔深度对钻进速度的影响..... A. J. 迦涅尔等 (249)
39. “Gulf”海岸頁岩的实验室钻进..... R. A. 康宁哈姆等 (259)
40. 论高强度钻粒孔底全面钻进岩石破碎问题..... B. M. 嘎古林 (269)

# 岩石破碎研究的基本目的、 方法与国内外簡况

——地质部勘探技术研究所 岩石破碎組編写——

## 一、岩石破碎研究的基本目的

随着地质勘探、石油钻采、矿山资源开发以及铁道水利等建设事业的日益发展，岩石破碎方面的应用技术与科学研究也获得了迅速的发展。到近二十多年来，已逐渐形成一门独立的学科，有人称之为“技术岩石学”。

研究岩石破碎的基本目的，在于通过岩石破碎基础理论的研究，了解岩石本身的各项物理力学性质，以及在不同外力作用下的应力状态与破碎机理。根据岩石物理力学性质与破碎机理的研究，就可以掌握不同条件下的岩石破碎规律，并进一步为完善各种破碎方法、改进操作规范、提高破碎效果，设计新型破碎工具与技术装备以及探求更高效率的岩石破碎新方法提供必要的参数及理论根据。

研究岩石破碎的主要内容，包括岩石破碎基础理论的研究与岩石破碎新方法的研究两大方面。前者包含岩石物理力学性质、可钻性、破碎机理与破碎过程以及在不同载荷作用下应力状态的研究；而后者包括各种不同的破碎岩石新方法的研究试验与探索，在目前主要是研究应用现代物理等科学技术方面的新成就，寻求更有效的新的岩石破碎方法。

研究岩石破碎一直被公认为一项比较复杂而长期的任务。其特点表现在：

1. 岩石本身的复杂性。众所共知，大多数岩石是由多种不同性质、成份、形状、颗粒尺寸之造岩矿物组成，并且在自然界中由于成因不同和受着外力的影响而具有各种不同之组织构造特征，因此其性质亦各异，破碎效果亦各不相同。

2. 岩石破碎在地表与地下各向受压情况下及地下水与地温影响下有很大差别，深部亦与浅部不同。

3. 岩石破碎还与所用破碎工具、技术条件及采用技术规范有密切联系，破碎工具的耐久性很大程度地影响着破碎效果。

4. 对岩石性质的测量技术的不一致性，表现在某些相同性质至今往往还没有公认为统一完善的度量方法。

尽管如此，正因为岩石破碎实际应用的重要性与广泛性，目前世界各国均大力开展此项研究工作。以勘探钻进为例，世界上每年进尺达亿米以上，而爆破孔进尺更达数亿米。勘探矿物原料时钻探工作平均占总工作量的75—80%，开采石油与天然气时是40—70%。这样巨大的工作量，消耗着大量的能量、材料与劳动。因此通过研究工作即使达到某些不大的改进，对整个工作来说甚至就有很大意义。

现代破碎岩石的方法都基于在集中载荷下对岩石的破碎作用，即在岩石的局部地方产生机械应力而引起破碎，从整体上剥离一部分岩石体积。破碎时单位体积所消耗的功，即

表明了所用破碎方法的特征。以钻进为例，破碎岩石所消耗的功还受到许多因素的影响，包括岩石性质，工具的形状与尺寸，破碎时所用规范，洗井介质及孔底岩粉清除程度，以及其它影响孔底破碎过程的种种因素。根据有关文献，钻进中等强度的花岗岩时，用冲击破碎时其体积破碎功变化范围为30—110公斤米/厘米<sup>3</sup>，迴轉钻进时为40—250公斤米/厘米<sup>3</sup>，而用热力钻进时为12—5000公斤米/厘米<sup>3</sup>。这些资料表明，目前所用上述各种钻进方法孔底破碎过程是不够完善的。很多能量并没有完全有效地用于破碎岩石。一般情况下钻进速度  $v$  可以用下式表示：

$$v = \frac{60N}{aF}, \text{ 厘米/秒}$$

式中  $N$  = 消耗于孔底之功率，公斤米/秒； $a$  = 体积破碎功，公斤米/厘米<sup>3</sup>； $F$  = 孔底面积，厘米<sup>2</sup>。

从上式看出，改善孔底破碎过程，即设法降低体积破碎功  $a$ ，就能使钻速增加，从而提高整个工作效率。而这种可能性在目前来说仍然是有潜力的。可以举出一系列实例来说明无论在钻进工艺上还是在破碎工具上以及破碎方法的某些改进，而结果都能使破碎效果获得进一步增长。

总而言之，运用研究试验所推出的原理，来提高和完善岩石破碎过程，提高生产效率，这就是研究岩石破碎亦即“技术岩石学”的最基本任务。至于努力从事于各种新的破碎岩石方法的研究，无论在赶上世界先进科学技术水平方面或者是根本改进岩石破碎方法方面，就具有更加深远的意义。

## 二、岩石破碎的研究方法

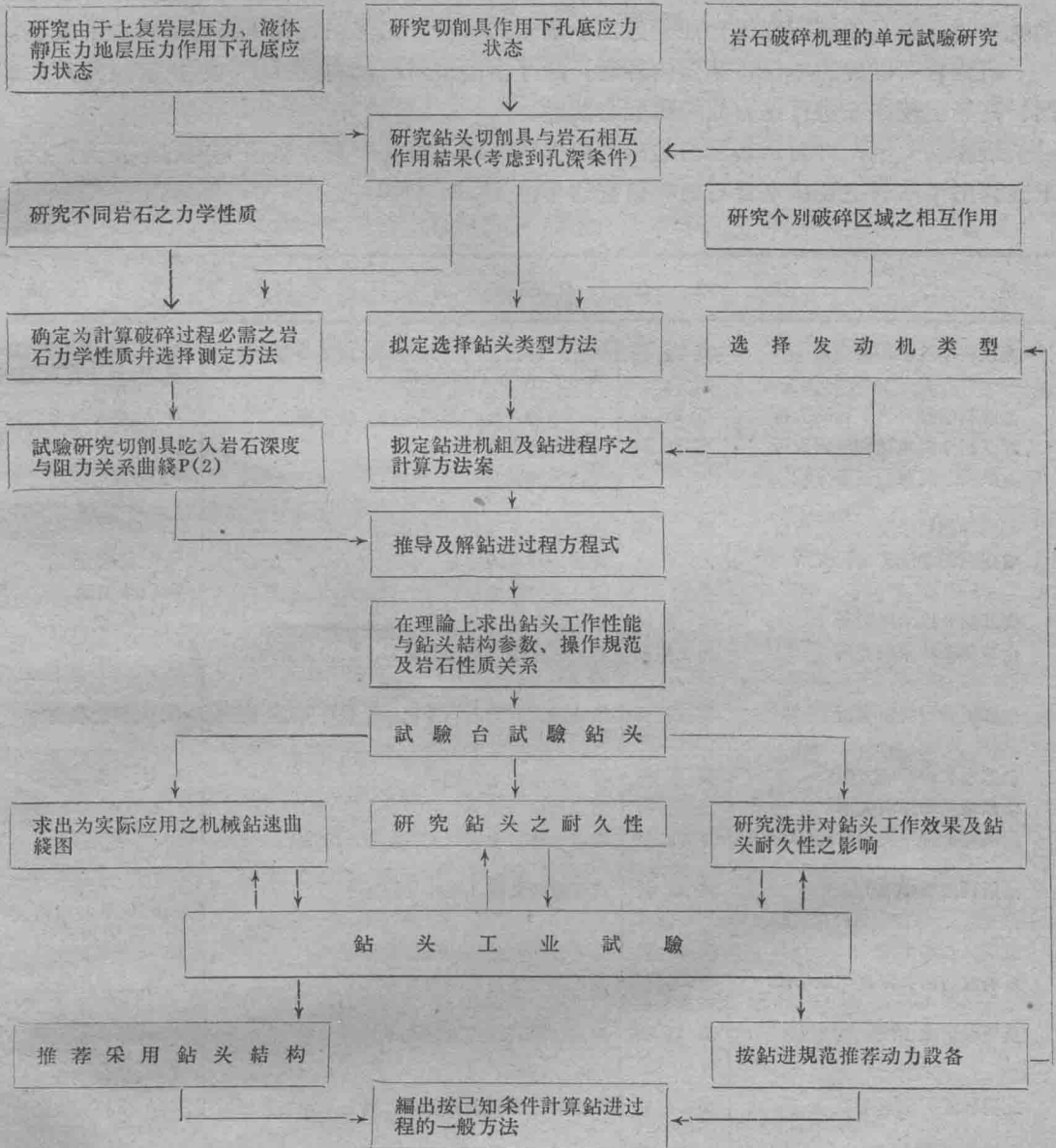
根据以上岩石破碎的研究目的与内容，在研究过程中必须首先注重于基础理论的研究，同时亦注意为发展工作与实际应用相互联系。根据以往国内外经验，如果将岩石物理力学性质与破碎机理和破碎工具及实际应用完全机械地分割开来，其结果都是不经济的。十分明显研究岩石物理力学性质的最终目的是为了阐明破碎机理与破碎过程，并能直接或间接地在生产中获得应用。如果忽略了这一基本点就会使研究工作脱离实际。相反如果只注意破碎方法或破碎工具的研究，而不联系岩石物理力学性质，也无法真正表明其破碎效果与应用价值。

一般说来，研究岩石破碎的方法是：

1. 属于岩石物理力学性质的研究，包括岩石成份与组织构造在内，除了宜在试验室用一定的仪器设备进行外，某些性质的研究亦可在生产单位进行。
2. 属于岩石破碎机理、破碎过程和岩石可钻性的研究，均宜在试验室用模拟方法进行，或采用专门的试验台进行试验。亦可以部分结合生产进行。
3. 属于破碎方法尤其是新方法的研究，则首先宜采用模拟的以及试验台试验，到一定阶段后可以结合生产进行。
4. 对于某些岩石破碎理论与破碎方法的最后评价，则宜与生产条件相结合，以期在实际应用中得到验证。

关于这一方面，苏联全苏钻井技术研究所1961年提出的研究钻进过程的方案有一定参

钻进过程完善图



考价值。在这一方案里，把岩石物理力学性质、可钻性、破碎机理与破碎过程、破碎工具与钻进参数工业试验等有机地结合在一起（附图）。

十分明显，如果从长远计划，要全面地进行岩石破碎的研究，首先要重视建立有一定规模条件的试验室和试验台。包括进行岩石物理力学性质试验、可钻性试验，以及研究的各种破碎方法的试验。

至于旨在解决某一局部问题的研究，亦可以采取分立的办法，或者结合生产条件（包括生产单位的研究试验室或台在内）进行。

### 三、国内外岩石破碎研究簡况

如所众知，虽然地质勘探，矿山采掘与油气开发等工业的发展历史已經很久，但是有系統地进行岩石破碎研究工作还是近二十余年的事情，尤其在近几年获得了較快的发展。

研究岩石破碎的单位，从国内外看，除了由国家科研机构进行外很多有关的产业部門、高等院校亦在进行这方面的研究与試驗。

以苏联为例，目前从事岩石破碎的研究单位即有好几十所。其研究內容亦至为广泛。下表列出了苏联主要从事岩石破碎研究的单位：

单 位	地 点	岩石破碎方面的研究內容	代 表 人 物
苏联科学院矿山研究所	莫 斯 科	冲击、冲击迴轉，热力与机械联合破碎法，爆破等以及其它新方法	Л. И. 巴朗 М. М. 普洛特吉雅柯諾夫
苏联科学院可燃矿物研究所	莫 斯 科	岩石破碎力学，高温高压下破碎等	Л. А. 史立涅尔
苏联科学院地球物理研究所	莫 斯 科	高温高压下岩石性质	
苏联科学院西伯利亚分院		冲击迴轉钻进	Б. В. 索特尼斯尼柯夫
阿塞拜疆科学院石油研究所	巴 庫	高温高压下钻进 (1961)	
哈薩克科学院矿山研究所		冲击、冲击迴轉等	С. С. 姆考金 С. Г. 卡洛欣
全苏钻井技术研究所	莫 斯 科	牙輪钻头破碎机理、冲击迴轉等	Р. М. 爱格力斯 Ф. Ф. 沃斯克列西斯基 В. М. 斯拉夫斯基
全苏勘探技术研究所	列 宁 格 勒	岩石可钻性、金刚石钻头、钻进参数冲击迴轉等	
全苏矿物原料研究所	莫 斯 科	以往研究过岩石物理机械性质与可钻性分类，钻粒及合金钻进	Н. И. 柳比莫夫
全苏煤炭科学研究所	莫 斯 科	冲击、冲击迴轉破碎	В. М. 费道罗夫
全苏地质勘探研究所	莫 斯 科	高温高压下钻进	
地质部中央設計局(ЦКБ)	莫 斯 科	冲击迴轉、硬质合金、钻粒、金刚石钻进等	Л. Э. 格拉夫
莫斯科地质学院	莫 斯 科	岩石破碎机理、破碎过程等	Б. И. 沃兹維維仁斯基 В. С. 美拉吉斯拉夫列夫
莫斯科石油学院	莫 斯 科	钻井方式牙輪钻头破碎原理等	В. В. 西蒙諾夫
第聶彼得洛夫斯克矿业学院	第聶彼得洛夫斯克	硬质合金钻进，冲击迴轉	Е. Ф. 爱普什捷因
莫斯科矿业学院	莫 斯 科	冲击、爆破、热力钻进等	Ф. А. 苏哈諾夫 А. И. 梅德維特克 П. П. 納值洛夫
北高加索矿业学院	奥尔忠尼洛則	钻进时岩石破碎机理，尤其是钻粒钻进原理等	И. А. 奧斯特洛烏什柯
格罗茲内石油学院	格罗茲内	钻进原理、钻进方式及高压下岩石破碎机理等	В. В. 布拉托夫 В. С. 費多洛夫
列宁格勒矿业学院	列 宁 格 勒	冲击迴轉破碎机理等	Ю. М. 巴里斯基
托姆斯克綜合工学院	托 姆 斯 克	冲击迴轉、切削破碎岩石过程等	П. М. 阿拉布謝夫 О. Л. 阿里莫夫
斯維尔德洛夫斯克矿业学院	斯維尔德洛夫斯克	鋼粒钻进破碎岩石原理	Г. И. 涅烏达金 索勒瑪托夫
烏发石油学院	烏 发	牙輪钻头破碎岩石能量等	
列宁格勒工业大学	列 宁 格 勒	牙輪钻头运动学、洗井介质对岩石破碎作用、水电效应等	包良可夫 Л. А. 尤特金
包曼高工	包 曼	爆破等	А. П. 华西列也夫



表列这些单位，广泛地开展了有关岩石物理力学性质、破碎机理、破碎方法、破碎过程、岩石可钻性爆破性分类、破碎工具和技术、工艺参数以及高温高压下的岩石破碎和新的岩石破碎方法的研究。

在英国，采矿与冶金工业发展较早，对岩石破碎研究亦展开较早，只是研究工作不象苏联那样系统。其研究单位如矿业研究所（MRE）以及某些高等院校，如牛津大学、梅尔波大学等。除此以外有某些专业技术协会（学会）如采矿工程协会、石油工程协会、采矿与冶金工程协会等对专题组织研究，论文报告与出版文献。在英国研岩爆破破碎岩石理论，和冲击、冲击迴转、迴转钻进方面的理论研究颇多。其代表人物有R. 謝费尔德，C. 费尔罕斯特，B.G. 费虚，L.H. 鲁滨逊，I.K. 雪尔浮门，D.P. 克拉岫欣等。

在法国，近数年来，随着石油工业的进展对钻井时的岩石破碎研究亦逐步加强，其研究单位如石油研究所以及某些企业单位，例如阿闕特国家石油公司，里格尔石油公司等。此外于1960年曾在“SNPA”研究中心建立一专门试验室以进行岩石物理力学性质（静载压入等）、钻井参数和在高压条件下模拟深井钻进试验等。在法国对金刚石涡轮钻进以及热力与机械联合钻进破碎岩石的研究都取得相当成就。其迴转钻进效率几乎与美国相等。

在德国，也有从事岩石破碎的研究机构，如采矿研究院、钻进与爆破技术研究协会等。在德国很早即进行了有关冲击迴转的研究和岩石可钻性的研究。其著名人物如欣兹、斯区尔兹等。

在日本，每年钻探工作量达一百数十万米（包括工程地质钻探），其主要进行岩石破碎研究的单位是资源技术研究所，还有九州生产所以及高等院校如熊本大学、京都大学（工学部）等；除此以外，日本国内矿山设备与制造及勘探施工企业如“利根”厂1957年即设有三个试验所进行有关方面的研究与试验。日本对切削破碎岩石机理颇有研究，并且对海洋深井钻进时岩石破碎也开始研究。其著名人物如佐佐木和郎、户边雅行、山门宾雄、关键一、盐原善一、伊藤一郎、井上正康和西田正等。

在美国，石油与采掘工业较为发达，因此岩石破碎的研究亦较广泛。但主要都在各单位无系统地进行，并且主要服务于生产企业单位。除美国矿业局、美国钻探技术研究所（亦是由44家公司企业于1954年前组成之）外，大都在各生产企业单位进行。比较著名的如Hughes钻具公司、Gulf石油企业、Gulf勘探与开采公司、Shell石油公司、Jersey勘探与开采公司等。此外在各矿业大学或学院亦开展部分研究工作。如密苏里大学、科罗拉多大学、明尼苏达大学、阿克拉霍马大学、密尔包尼大学等。在美国近几年来深井与超深井钻进技术发展较快，1962年止完成的超过5,000米的超深井已达1,757眼，其中1962年完成254眼。目前止最深井记录已达7,700余米。为了研究在深井时更有效地破碎岩石，在不少单位正进行着高温高压条件下的岩石破碎试验。目前钻进一眼深度为5000米以上的深井最快仅用45天左右。在美国从事有关钻进时岩石破碎方面的研究者值得提出的有R.H. 高特列虚、E.P. 帕甫兰特尔、B.L. 勃雷克、J.H. 葛列费虚、J.R. 爱克尔、J.R. 诺尔雷、N.H. 汶林恩、R.A. 康宁哈姆、A.S. 缪尔雷、H.L. 哈脱门、P.L. 摩里等。在美国与研究岩石破碎有关的技术协会有美国石油工程师协会（SPE）、美国机械工程师协会（ASME）、美国石油协会（API）、美国采矿与冶金工程师协会（AIME）、美国金刚石钻机制造协会（AA DDM）、美国油井钻进工作者协会（AAODC）等。

在我国，矿山采掘工业在解放前是微不足道的。地质勘探与石油钻采事业也是新中国

成立后才逐渐发展壮大起来。因此有关的岩石破碎研究工作的基础是很薄弱的。解放以来从萌芽开始，逐渐发展壮大起来。到目前为止，在国内先后进行过有关岩石破碎研究与试验的单位据了解有下列各单位：

- 中国科学院——曾进行过某些岩石破碎方法的研究与试验
- 石油科学研究院——牙轮钻头破碎机理、岩石性质分类等研究
- 勘探技术研究所——岩石物理力学性质、可钻性及某些钻进方法的研究
- 北京煤炭科学研究院——曾对研岩、爆破及硬质合金钻进进行了研究与试验
- 北京地质学院——岩石破碎机理与破碎过程、冲击迴轉钻进等
- 北京石油学院——牙轮钻头破碎原理等
- 北京矿业学院——曾进行某些钻进破碎方法的研究与试验
- 北京钢铁学院——曾进行某些破碎方法的研究与试验
- 东北工学院——曾进行冲击式研岩及岩石分级的研究
- 冶金部地质研究所——曾进行冲击迴轉钻粒钻进等研究
- 长沙矿山研究所——研岩爆破等研究
- 长沙矿冶研究所——研岩理论的研究
- 西南地质研究所——拟进行某些破碎方法及钻粒钻进的研究
- 内蒙古地质局——某些岩石破碎方法的研究
- 四川省水利厅——某些岩石破碎方法的研究

所有国内各单位，曾分别先后进行了有关岩石物理力学性质、岩石可钻性、破碎机理与破碎过程、新型切削研磨材料以及某些新的岩石破碎方法的研究与试验。但比较起来仍然是比较薄弱的一环，有些急待研究的項目现在尚处在萌芽阶段或者尚未开始。因此，关于这方面的研究工作必须努力加强。

根据文献调查和从有关方面了解，对当前岩石破碎研究的国内外动态，存在问题以及发展趋势，大致可以归纳为如下几个方面：

### (一) 关于岩石物理力学性质的研究

目前应用的破碎岩石方法，如前所述主要是利用集中载荷作用对岩石进行机械破碎。在新的破碎方法中开始应用物理的（以及化学的）能量对岩石进行破碎。因此对于主要工作对象的岩石的物理力学性质首先要有足够的了解，才能进一步研究其破碎机理，探寻更有效的破碎方法，包括破碎工具、技术措施和新方法等。所以研究岩石物理力学性质是岩石破碎的最重要基础。

岩石的物理力学性质有很多种，而与岩石破碎有关的通常认为有硬度、强度、研磨性、弹性与塑性、比重、渗透性、松散性等。所有这些性质都必须联系岩石成份与组织结构进行研究，同时它们在采用不同破碎方法时的影响亦不同。例如迴轉钻进时硬度和研磨性被认为是主要的；而冲击钻进时强度和塑性被认为是主要的；在浅部钻进时弹塑性及渗透性虽然亦有影响，但在深部钻进时影响就更大些；爆破时对于坚硬而性脆的岩石则效果很好，但在软的泥灰岩之类的岩石中则效果甚差；应用热力破碎时岩石的导热与膨胀系数、热容量等即有重要影响；而利用电物理破碎时岩石之电磁特性则甚重要，……。也有一些性质不论在何种破碎方法时其作用是相似的。例如关系着破碎空间（或工作面）的稳固性与采样完整性的岩石松散性，影响破碎体离开工作面的速度的岩石比重等。

到目前止，根据岩石成份结构来研究岩石物理力学性质的工作还很不够，亦缺少有关的系統文献资料。而如前所述在确定各项岩石的性质时，虽然已有各式各样的方法与学说，但都不能认为是十分完善的。除了有些性质之外，象硬度、研磨性、强度、弹塑性等，对已有的方法都还需要作批判性的评价。

**岩石的硬度：**硬度一向被认为影响破碎的（尤其对钻进来）最重要因素。岩石的硬度象其它固体一样，通常被认为某一物体对另一物体压入的反抗特性、矿物的莫氏硬度即基于这一原理。但对于成份不同之岩石来说，这一定义显然是不适合的。因此有人认为硬度是固体对破碎的抵抗力，此力以功来计算，亦即物体在破碎过程中构成物体新表面单位面积所需的功。

为了寻求测量硬度的合理方法，目前被各方面采用的已有静力的、动力的、研磨的和刻划的以及钻眼的共五类十多种之多。静力法主要采用压模压入的方法来测定岩石在局部地方的单位面积抗破碎应力，可以史氏法及海尔次法为代表。（即  $P = \frac{p}{S}$  及  $H_g = \frac{6P}{\pi D^2}$ ），动力法主要采用某种形状之锥头（角锥或圆球）打击岩石，使岩石局部体积受打击时一方面吸收能量同时亦产生不同程度的变形，可以摆球仪及肖氏仪为代表。（即  $A = 100 \frac{\epsilon}{\cos \theta}$  及  $n = K^2 h_1$ ），研磨法则采用标准断面之岩样作体积磨损试验，可以苏联ВИМС法为代表。（即  $H = \frac{1}{A} = \frac{\delta S_0}{q_1 - q_2} \cdot \frac{1}{CM}$ ）。刻划法是利用某种形状之锥头（钢针或金刚石）在岩石表面进行划破坏（擦破）岩石，可以ВИМС摆式仪为代表。（即利用摆次  $N$  比较岩石之硬度）。

所有上述这些岩石硬度的测量方法都很难进行互相比较，在认识上与应用上目前极不一致。即使在苏联应用颇广之史氏法至今仍有人加以反对。在日本、德国、英国与美国的有关文献上较多地采用了肖氏弹性硬度，这和我們研究的摆球仪所测定的弹性硬度有类似的地方。很值得重视的就是为什么弹性硬度适用于测定岩石硬度，这方面以往已详细阐述过。根据试验，弹性硬度可以用来比较岩石破碎的难易程度，例如  $G \cdot$  勒多尔夫吾克尔即通过试验确定出了弹性硬度与抗压强度之关系。即

$$S_c = 300h \left( 1 \pm \frac{1}{10} \right)$$

式中  $S_c$  为抗压强度； $h$  为弹性硬度；说明岩石抗压强度可看为其弹性硬度之函数。至于所有岩石是否都符合这一关系式，试验表明只是  $h$  的系数值有变化，例如亦有人写成  $S_c = 330h$ 。我们亦曾用摆球仪作过相当数量的试验，同样发现了类似的两种性质间的可寻的关系。在美国还有人利用弹性硬度与道雷氏研磨硬度值互相比较，结果也说明了一般硬度大的岩石其研磨性亦较高。

鉴于破碎方法的不同，某些学者提出了不必在方法上强求一致的论点。同时不管怎样岩石的硬度目前都还是比较值。例如在硬岩石冲击破碎时可用弹性硬度测量法，钻粒钻进宜用球状压入法（海尔次法）。而硬质合金钻进时宜可史氏压入法。总之，有关岩石硬度问题，包括影响硬度的因素，测定方法以及硬度对其它岩石物理力学性质与可钻性等的关系，都是没有定论或不完善的。有待进一步研究加以完善。[3.4.13.14.15.23.50.]

**岩石的机械强度：**岩石之机械强度反映着固体岩石较大体积内的破碎强度。它与应变形式有很大关系。在压缩情况下才表现出最大的强度，其次是抗剪强度及抗张强度。这主要是岩石晶粒间的分子结聚力和岩石杨氏系数在不同应力情况下增大或减小的缘故。

岩石的强度很久以来即被证明为岩石破碎的主要参数之一。尤其在掘进工程中应用很广。普氏系数 $(f = \frac{100}{R})$ 发表已五十年左右，至今仍被采用着。

冲击钻进时与爆破法破碎岩石时岩石之抗压强度影响甚大，而迴轉钻进切削破碎岩石时岩石之抗剪强度作用较为明显。苏联ВИМС曾提出了利用抗剪强度与研磨硬度之综合值来说明可钻性。但是也有人认为抗压强度对于切削破碎来说是主要的。例如英国之B.G. 費盧就认为只要知道了抗压强度之后，即可推算钻进某种岩石时所需之压力。近几年来不少学者又提出了岩石张力破碎方面的理论学说，究竟那一种是较为完善的，尚待继续研究。

岩石机械强度之测定主要有单轴压缩法、剪切法和拉断方法等。目前在测量技术上主要存在的争端是岩样之几何形状、綫型尺寸、加载方式等。长久以来人们希望采用尺寸较小同时加工较为简便的试样进行强度试验，例如除了最广泛采用 $5 \times 5 \times 5$ 厘米的试样外，亦有采用 $3 \times 3 \times 3$ 厘米的立方体，并采用 $\phi 25 \times 25$ 毫米或其它尺寸的圆柱体。有人曾研究过由于岩样尺寸的不同而采取的校正系数， $(即 f = \frac{\sigma}{100} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}})$ 但经过实践认为很难采用。抗剪强度亦是相似的问题，按照M.П. 沃拉罗維奇的试验对比，认为在已有近千种的剪切试样中以圆锥形为最佳，但其缺点是试样难以加工。至于张力试验亦存有相似的问题。此外不管抗压、抗剪、抗张试验，试验时的加载速度都还存在不同的论点。所有这些，包括岩石强度的影响因素，测量技术、以及强度与其它物理力学性质、可钻性、爆破性的关系，都是当前值得重视与进一步研究的问题。[10.21.33.53.68.73.]

**岩石的研磨性：**机械法破碎岩石时，岩石的研磨性是确定破碎工具结构与使用寿命之重要因素。根据阿孟頓—庫仑定律的一般公式(即 $F = \mu \cdot P$ )可以知道，任何两物体互接触产生位移时就要产生摩擦，同时亦就要产生磨损。钻进过程实质是由两个相互作用的过程所构成，即钻头破碎岩石与岩石磨损钻头的过程；一次钻程中的机械钻速不断下降，就是由于钻头工作面随着时间的增长不断受到磨损的结果。钻进过程中孔底消耗的功除了一部份消耗于破碎岩石及弹性变形以外，还有相当大的一部份功而用于钻头与岩石之摩擦，以致使钻头遭到磨损。实践证明，采用的破碎工具与技术规范不同时，对于磨损的程度亦不一样，切削型钻进岩石对钻头之磨损就甚于冲击迴轉与冲击钻进。

影响岩石研磨性的自然因素通常认为主要有造岩矿物的硬度、颗粒度、颗粒形状、密度、胶结状况、胶结物与岩石颗粒之硬度差以及所含石英及其它坚硬矿物百分比。这方面研究工作曾进行得较多，但对于研磨性的测定方法则很不一致。例如美国采用过道雷氏磨耗法，英国和德国采用过标准杆磨耗法与钻眼法，苏联亦采用过标准杆磨耗法、岩样磨耗法及钻眼法。其结果都不相同，各有各的研磨性指标。某些学者早就想对岩石按研磨性进行分类，但结果都还是粗略的。此外对于高研磨性岩石的钻进方法问题至今一直是个难题。

关于钻进时与岩石研磨性密切相关的硬质合金磨损问题，至今仍是广泛研究对象。有

人認為硬質合金的磨損首先是較軟的膠結物鈷先行磨損之後，突出了碳化鎢顆粒，繼而造成顆粒之破碎與磨耗；基於這一觀點提出在可能範圍內為減低被磨損速度應盡量減少硬質合金的含鈷量。此外，也有人認為磨損與刃部產生的磨擦溫度有關，就象某些學者提出的金剛石鈷進時由於局部溫度過高而氧化或石墨化一樣。這些論點，也都是有爭論的問題，值得結合岩石研磨性進行研究。〔19.32.37.66.67.68.69.〕

**岩石的彈性與塑性：**已有的研究工作表明，所有主要造岩礦物都是彈性脆性體並且服從於虎克定律。但由若干種礦物組成之岩石雖然也是彈性脆性體，但大多數情況下不服從於虎克定律，其應力應變關係比較複雜，這是一切多晶體的特點。

岩石破碎過程中究竟如何衡量岩石之彈塑性變形及其所消耗的能量至今仍然是沒有得到圓滿解決的問題。從岩石破碎表面能量看，實際所用能量恒大於組成自由表面之功，多餘的能量應該是消耗於彈塑性變形及摩擦方面。近年來某些國外學者認為在鈷孔超過一定深度後（例如塑性係數 $K > 2.1$ 的岩石在孔底壓力達到150—200個大氣壓時）即由脆性破碎過渡到塑性破碎。而另一些學者也還提出了不同的論點。Л. А. 史立涅爾的岩石破碎理論闡述了很多關於按硬度及塑性係數“ $K$ ”對岩石進行分類的問題，認為根據壓入試驗時接觸面上之單位功可決定於 $E \cdot K \cdot P_m \cdot \sigma$ （分別表示楊氏係數、塑性係數史氏硬度及極限強度）等力學特性。但是其理論也還沒有完全能解決實際應用的問題。尤其在鈷進過程中岩石在各向受壓狀況下以及洗井介質和溫度等影響下，更增加了這一問題的複雜性。目前為了研究深井鈷進時的岩石破碎過程，對於岩石彈、塑性的研究就顯得更加重要。

除了上述的硬度、強度、研磨性、彈、塑性而外，岩石的比重、滲透性、松散性等都對岩石破碎有不同程度的影響（尤其是比重問題與其它性質間的關係近來也引起了注意）。總而言之，對岩石物理力學性質研究與認識程度的深淺，將對完善已有方法之破碎過程及研究新的破碎方法起着很基本的的作用。

## （二）關於岩石破碎機理與可鈷性的研究：

如前所述，研究岩石破碎機理、破碎過程與岩石可鈷性，在於闡明在某種破碎方法時所施不同載荷作用下的破碎現象與實質；包括岩石性質與破碎的關係、岩石與破碎工具（切削研磨材料）的作用過程、所用技術規範（載荷方式與大小）的關係，以及破碎結果的現象與規律等。因此除了對已有方法作必要研究外，並從此推出更加完善的破碎過程，為新的破碎方法尋找理論根據。

**切削型破碎機理：**鑲有各種磨銳切削具的取心的或不取心的鈷頭用迴轉方式進行鈷進的均屬於切削型破碎。這方面的研究開展甚早，正因為它與金屬切削時在某些地方有相似之處。已有論著較多。但由於岩石是多種不同礦物的組合體，其破碎機理在不同切削具與技術規範下其破碎現象亦有很大區別。根據文獻，目前各國仍在致力於這方面的研究與試驗。並且採用各種不同的方法進行模擬。例如日本曾在車床上進行切削試驗，英國曾在鈷床上進行切削試驗，美國曾在鉋床上作過試驗，蘇聯曾用專門設計的切削岩石設備進行了試驗，我們亦曾設計了一種進行切削破碎的專門裝置。通過已有試驗結果和理論的分析都對改進切削型破碎提供了很多根據。但是在理論上卻不是很完善的，而且很多互相矛盾。

例如有的主張切削過程是兩個不同階段的循環過程，即壓入與剪切交替進行。有的則主張是壓纏（或向前壓碎）與剪切的循環過程，而且壓纏與剪切的體積是相等的。還有的則主張是連續剪切破碎，切屑體不斷崩離現象是岩石脆性和切削力傳遞系統及岩石彈性恢

复的结果，而在具明显塑性的泥岩可视为典型的切削破碎。关于切削具实际切入岩石深度与切屑的厚度关系问题，有的主张是相等的，有的认为实际切屑厚度要比切削具切入深度大好几倍。根据我们所作的试验，用 MP-2 型钻头在大理岩与石灰岩钻进试验结果，亦曾发现类似的问题，较大的岩屑颗粒直径达 3—5 毫米，厚达 1—2 毫米。而实际切削具切入深度约 0.15 毫米左右。这一现象似乎与集中载荷下进行破碎试验时某些理论相吻合，即破裂能向脆性体延深并且到一定程度又折向自由表面。

至于切削破碎时作用力的分析问题同样亦是说法不一。所以存在以上的理论分歧现象，很重要的是必须根据岩石性质与结构特征以及作用力方式与破碎工具特点等结合起来研究，同时不能不考虑磨损作用，因为到现在为止绝对锋利的纯切削破碎是不存在的。此外对于在深部各向压缩条件下的切削过程与切屑分离情况对破碎效果的影响，各种洗井介质与技术参数的影响，都还是国内外正在深究的问题。关于作为切削具的材料——目前主要指硬质合金的质量与性能改进问题，自然是有关制造及科研部门的研究对象，而切削具性能的提高将直接影响切削破碎效果〔5, 11, 19, 28, 32, 41, 42, 47, 66, 67, 70, 71, 74,〕。

**钻粒钻进：**钻粒钻进被用于钻进坚硬岩石，在某些国家仅在特大口径的钻孔钻进时用之。钻粒分铁砂、钢砂与切制钢粒三种。关于钻粒钻进之破碎机理很久以来是有争论的。在国内某些刊物上亦作过公开争辩。根据开始有铁砂的时候的论点，如 B. H. 库兹明 (1933)、E. B. 鲍洛夫斯基 (1934)，一般认为主要靠破了的钻粒尖稜在钻头下部翻滚，从而研磨擦破岩石，（自然，没有破碎的钻粒对岩石也有破碎作用，但不是主要的），这样自然的概念是要求钻粒首先是脆性的，并且在钻头压力下破裂成若干碎块，为了不使钻粒很快粉碎和被冲洗液冲走，钻进时只允许采用不大的压力，转速与冲洗液量。后来 Л. А. 史立涅尔 (1947) 提出了与库、鲍二氏相反的看法，即主张压入与压裂的说法。И. А. 奥斯特洛乌什柯 (1945—1952) 在北高加索矿冶学院进行了大量试验研究后，也提出了压裂、压碎的论点。除此之外，也还有人提出了除了压入压碎作用外还有钻进时之脉冲作用。以后，出现了钢粒很自然地大家又认为钢粒在不破碎的情况下钻进，主要是在钻头下面碾转以压裂压碎的方式破碎岩石，为此形成的概念是要采用坚固的、完整的（为了能滚动的）钻粒，同时改进钻头质量，采用较铁砂钻进时大的多的压力，转速与冲洗液量，其结果即能大大提高效率。根据国外实验室试验在Ⅱ级坚硬岩石中甚至能达到 6 米/小时的钻速。

目前，对以往争论过的问题不能说已经有了完善的结论。此外，在钻粒钻进方面目前亦还存在着合理钻进规范问题、钻粒合理直径与钻头壁厚的合理配合以及探求更坚硬钻粒等问题。〔20, 22, 34, 35, 38, 40, 43, 46〕

**金刚石钻进：**金刚石钻进技术比其它切削研磨材料发展得都较早（最初于 1864 年开始用于爆破孔钻进）但对金刚石钻进的破碎机理，可以说到现在为止仍旧是研究得不够完善的。只要从某些阐述金刚石钻进时破碎岩石的作用时所用的术语即可看出。例如有切削、剪切、研磨、磨碎、切碎、擦破、压裂—压碎……等等不同的说法。有人认为金刚石可以与具有很大负前角的切削具相仿，因此以切削—剪切为主；还有人主张可如钻粒一样以压裂—压碎为主；还有人则认为是在压力与旋转力作用下首先产生破裂而后产生剪切及张力破碎。根据对金刚石钻进后的切屑与孔底情况的观察，是判明金刚石钻进破碎机理的最可靠的方法。可以发现，在石英与燧石中钻进时岩屑均呈贝壳状断口；在砂岩中钻进则从其颗粒间分开；而在大理岩中则呈不规则碎屑状。采用之金刚石钻头排列愈密与颗粒愈细，则

切屑亦愈細。金剛石鑽進之優點在於具有很多切削刃在孔底同時形成很多溝槽，因此增加了破碎自由面。再加上其硬度超過一般造岩礦物很多，更有利於破壞岩石。所以根據岩石性質不同與所用鑽頭金剛石顆粒度大小及形狀的不同，才能更確切地判明其破碎機理，如果一般地說，對於具稜角狀的金剛石來說，似乎剪切與擦破是主要的。而對於較大顆粒的渾圓狀金剛石來說，似乎壓裂與壓碎是主要的。近兩年來，有關文獻表明了除了採用金剛石定向鑲焊法之優點以外，採用渾圓狀金剛石鑲焊之鑽頭更有很大優點。很明顯是與其破碎岩石時的機理有關。此外為了進一步研究利用細粒的廉價金剛石製作長壽命鑽頭，近來也取得一定效果，對於這種金剛石鑽頭，似乎以研磨擦破的方式破碎岩石是主要的了。所有這些關於金剛石鑽進破碎機理（並包括其磨損問題）都值得通過更多的工作加以証實。

金剛石鑽進時的壓力與轉速問題亦是有爭論的，一般地認為金剛石宜用高轉速鑽進，目前爆破孔直徑不大的鑽頭甚至採用了2,500以至4,000轉/分的速度，但是在很深的石油鑽井時當前甚至採用了50轉/分的速度。這種情況下必須根據岩石性質、孔深、沖洗液條件以及鑽頭型式綜合研究。〔54,55,61,65〕

**牙輪鑽頭鑽進：**牙輪鑽頭破碎岩石的理論研究國內外進行得很多，文獻極為豐富。已經根據不同岩石性質設計了不同齒形的鑽頭，對於軟質岩石採用了既滾動而又帶切割作用的鑽頭，而對於硬質岩石則採用純滾動的同時齒形較小而密的鑽頭。牙輪鑽頭之牙齒與孔底岩石接觸壓力較大，同時在滾動時給予齒部岩石以附加動力載荷，從而更能有效地破碎岩石。

牙輪鑽頭技術操作方面曾經在“大壓力低轉速”與“高轉速低壓力”方面有過爭端具體表現在渦輪鑽與轉盤鑽所用技術指標有很大差別，有人認為這與採用的鑽井方式及鑽柱強度有關，但從岩石破碎機理方面來評定仍然是有意義的。舉例說對於深度大的鑽井（超過5,000米）目前僅用30—50—80轉/分的轉速取得了良好效果，即使能增加轉速時其效果亦不大的事實是很值得研究的。

目前在牙輪鑽頭鑽進方面存在的主要問題是進一步研究其鑽進時破碎岩石機理與運動學；研究正確的P、Q、N參數配合關係，以探求最優規程；提高牙齒與軸承的耐用度；以及更合理的新型結構（包括牙齒的幾何形狀及尺寸與水眼等）鑽頭等。〔20,39,44〕

**沖擊與沖擊—迴轉鑽進：**沖擊鑽進是最早被採用的鑽井方式，目前仍廣泛應用於水井鑽研及某些工程鑽孔和石油鑽井，最大深度亦達到3,000米左右，沖擊鑽進的優點在於能降低岩石單位體積破碎功，減低鑽頭磨損，保持鑽孔垂直。其缺點是在小直徑鑽孔或孔深以後由於沖擊速度，排除岩屑，控制井內壓力等存在困難，故應用上受到一定限制。沖擊—迴轉近20—30年以來不僅在研岩方面研究試驗極為廣泛，在地质勘探與石油鑽井亦已大力展開研究與試驗，並取得一定成果，其優點是破碎岩石時既借助於沖擊負荷，亦具有旋轉鑽進作用，故能更有效地利用破碎能量，擴大硬質合金使用範圍，提高硬質岩層破碎效果，增加鑽頭進尺，同時亦能保持鑽孔方向。根據某些計算資料的對比，噴氣熱力鑽進破碎井底單位體積所須之功為1500—3000公斤-米/厘米<sup>3</sup>，硬合金、鑽粒、金剛石迴轉鑽進時為400—2000公斤-米/厘米<sup>3</sup>，沖擊速度為1.0—1.5米/秒的鋼絲繩沖擊鑽為30—120公斤-米/厘米<sup>3</sup>，中速氣錘沖擊鑽進為15—80公斤-米/厘米<sup>3</sup>，而高速沖擊旋轉與沖擊—迴轉鑽進時為7—30公斤-米/厘米<sup>3</sup>。由此顯然能夠看出沖擊迴轉鑽進的優點。這方面的破碎理論已有文獻已詳細闡述過而不再贅述。沖擊—迴轉鑽進的缺點是用于研岩時其機組較重，在勘探孔和石油井採用時如果用液動沖擊器則配備泵及動力較大，有時由於沖洗液壓力較大而增

加了不稳定地层之塌坍与漏失的机会，因此，宜在完整的硬岩层中用之。此外在采用空气洗井时利用气动冲击器是很值得注意的。国外曾在5000米深井中結合空气洗井試用并取得了效果。

目前在冲击、冲击-迴轉破碎岩石方面存有問題是冲击頻率与迴轉速度之間的关系，冲击速度对破碎有无影响問題（有的主张冲击功是主要的与速度无关），不同性质岩石需要能量問題，以及洗井介质的影响問題等；在斫岩时鈷头的直径与合理孔深也存在問題。  
[7, 17, 24, 25, 26, 27, 45, 48, 56, 57, 58, 59, 75]

**岩石可鈷性：**岩石可鈷性通常認為不是岩石的一种固定不变的性能，而是采用一定技术条件下鈷进时难易程度的一种概念。目前在实际工程中往往仍用它作为衡量生产效率的基本因数。研究岩石可鈷性在目前采用的方法主要有以下几种：

1. 模拟的可鈷性試驗，利用微形鈷头进行可鈷性試驗，找出它在某种岩石中与大直径鈷进可鈷性之关系（在国外已用之）或相对可鈷性規律。

2. 固定技术条件（包括鈷机、鈷头、规范、孔深、孔径、鈷孔角度与洗井介质等），然后根据实际鈷进試驗，即鈷速录井的办法，根据鈷进难易将岩石按可鈷性进行分类。此法恒用于岩心鈷进。

3. 除了根据上述实际鈷速外，还根据了鈷头进尺值，把所得的鈷速与鈷头进尺的乘积，作为可鈷性衡量标准。此法在石油鈷井中有时用之。

4. 基于对可鈷性产生影响的某些岩石的物理力学性质的研究（如硬度、强度、研磨性、塑性系数以及密度、孔隙度等），通过試驗寻求它們与可鈷性之間的关系，然后按計算方法列出可鈷性計算式。进行这方面研究的国内外可以举出很多代表性例子。如 Л. А. 史立涅尔、В. С. 費多洛夫、Е. Ф. 爱普什捷因、А. П. 杜赫宁、А. И. 密特維特科、Н. И. 柳比莫夫、Б. А. 巴达洛夫、П. М. 拉斯特揚、С. Б. 果特札也夫、В. П. 克里捷列夫、А. А. 米宁、W. C. 茂尔、R. 謝費尔德等很多学者都先后提出过不同的根据不同岩石性质及鈷进参数而推出的可鈷性方程式，可是从所有他們的方程式看，都列有这样或那样的系数（条件的甚至假定的），而且在实际工作中只要条件稍微不同，可鈷性就完全不同。因此可以認為，凡是根据方程計算的可鈷性在目前來說都只是近似的。仅須举一个例子：岩石的可鈷性尺为：

$$R = \frac{1}{K} \times \frac{NW^2}{D^2S^2}$$

式中  $N$  = 轉速，轉/分， $W$  = 鈷头压力，公斤， $D$  = 鈷头直径， $S$  = 岩石抗鈷进强度，公斤/单位面积， $K$  = 視岩石、洗井介质、鈷头設計与鋒利程度与压力而定之常数。

不难看出，类似这样的理論方程式，用来对实际可鈷性进行比較是存在問題的， $K$  值的确定首先是个問題。尽管如此，所有这些研究的結果，在应用中仍有一定参考价值，即用来比較岩石的鈷进难易程度，将岩石按某一方法进行分类。因为只要試驗的方法与实际应用的方法基本相似，（例如都是迴轉取心鈷进）則可鈷性規律亦大致能以相似。即使具体可鈷性指标有出入，但鈷进的难易程度是相同的。因此对于岩石可鈷性分类可經過一定的研究試驗并有了充分依据之后而用某些参数加以确定。基于这一原理，某些学者还研究了測定岩石可鈷性仪器与方法，这些仪器与方法亦对岩石采取了某种破碎作用，然后通过度量或仪器的反映来表达岩石的相应可鈷性等級属性。应该指明，用这类方法所測的結果目前也还



只限于用来对岩石进行分級，而不是用来确定可钻性指标。如前所述，可钻性指标包括了許多技术条件因数、变化甚多、而不是某些仪器测定值能够准确表达的，但对于岩石等級的分类，則可以采用某种仪器与方法进行比较准确地区分。当然在采用仪器进行分类时，亦必須根据已有可钻性分类作基础，从中找寻相应的关系与規律性，苏联 ВИМС 采用之摆式仪和我国研究的摆球仪即是为对岩石按可钻性，进行分类而研究的。

5. 根据岩石单位体积破碎功来表达岩石的可钻性，即根据破碎岩石所消耗之能量多少来衡量岩石可钻性的大小、即

$$\text{岩石可钻性 } B = \frac{A}{V}, \text{ 公斤-米/CM}^3$$

式中  $V$  = 被破碎之体积、 $A$  = 破碎  $V$  体积岩石所需之功。

如果将岩石破碎条件固定，則岩石破碎单位能量的消耗是岩石性能綜合反映的結果，代表了岩石的硬度、强度、弹塑性等特性，也代表了钻进时的力矩与钻进速度的綜合关系。所以这一方法（由 M. M. 普罗托吉雅可諾夫及 B. И. 塔拉謝維奇）一般認為比較合理、在实际应用中的困难是孔底破碎功的衡量問題，以及采用不同的钻进方式（冲击、冲击迴轉、磨料不同的迴轉钻进等）岩石单位体积破碎需要能量亦不同。

除上述而外，不論采取任何方法来研究岩石可钻性，其目的都必須是为了闡明实际钻进时的钻进效果与合理钻进技术与方法。为此，如前所述，所有从事可钻性研究的单位，除其它設備外都設立有比較完备的可钻性試驗室或試驗台，以从事实际钻进試驗对比。〔1, 12, 13, 14, 15, 16, 21〕

**深井条件下的岩石破碎：**随着深井钻进技术的发展，为岩石破碎研究工作开辟了新的領域。为了研究某些地质构造理論、矿物在地壳分布問題、深部含油气情况及油气生存理論、地下水生成与变化問題、地下热能的利用等一系列科学問題，某些国家都准备在几年以內或十几年內，采用深钻手段，钻穿地壳所謂“Moho”层。钻孔深度預期从7,000米以至达到10,000—15,000米。在数千米以上的钻孔內，岩石处于高温与高压状态之下，其破碎情况与浅部或地表有很大区别。

为了研究深部岩石破碎过程，目前很多国家內采用了各式各样的密封容器钻进装置，（如法、美、苏联等），在压力容器中，分別用相当于地层压力、上复岩层压力。孔內冲洗液柱压力的模拟方法对岩石进行钻进試驗。除此以外，还在高压容器中进行压入和机械强度等試驗。

根据已有文献表明，深部岩石在压力达到某一限度以后，即由脆性破碎过渡到塑性破碎。例如塑性系数为1.3—2.1的岩石，当压力达到500—600大气压时即无脆性突变現象，这是深部岩石破碎之主要特征；此外冲洗液液柱压力对岩屑的抑制作用（在渗透性岩石中地层压力小于冲洗液柱压力时）亦很大程度地影响了钻进速度。目前国外在超深井钻进时采用了很慢的迴轉速度与此有密切关系。至于温度除了对洗井介质性能有影响外，对岩石破碎作用的影响目前国内外正大力研究中。〔2, 9, 60, 62, 63, 64, 76〕

### （三）岩石破碎新方法的研究

現行机械破碎岩石方法的主要缺点在于：（一）机械能量不能充分利用。以钻进为例，即使深度不大的500米以內的孔深，迴轉钻进功率利用仅为40%，渦輪钻亦在40%左右，而电钻在50%左右，井深愈大，利用率愈低。（二）破碎工具的硬度与强度的限制，