

林彭梅 等著

岩石分级的

理论与实践



冶金工业出版社

## 前 言

岩石是人类赖以生存与发展的基本物质条件。人们的衣食住行离不开岩石与土，现代化生产的原料、能源与材料取诸于岩石。岩石甚至是人类从动物界分化出来的决定性因素，因为正如恩格斯所说的那样：“劳动创造了人本身”，而人类为劳动所制造的第一件工具就是石器。

时至今日，人类利用岩体、改造岩体的规模越来越大，每年开挖岩石的总量大到以天文数字计算。同时，人类也在与岩石打交道的过程中对岩体有了更深刻的认识，知道岩体被各种构造形迹，如断层、层理、节理、破碎带等切割成既连续又不连续的裂隙体，因切割程度的不同，形成由松散体—弱面体—连续体的一个序列。这一岩体序列要比迄今为止人类所熟知的任何工程材料都复杂，它几乎是到处都在变化着的。因此，要充分有效地利用岩石，必须用综合指标或单一指标将岩体序列划分为若干级别，这一研究工作称谓“岩石分级”。

众所周知，人们认识世界的重要方法之一就是分类，而分级则是一种有序的分类。可以不无夸张地说，任何学科的前进都有赖于正确的分类，同时分类的成熟程度往往是学科发达程度的重要标志。例如动、植物中新品种的归属是该学科的重要问题，医学本身就是反复地诊断各种病的属类；地质学中若未完成地层的划类，则进一步的研究将是很困难的……。分级的研究对于发展“岩土力学与岩土工程”这一学科自然也具有现实与长远的意义。它不仅是所有岩土工程建设投资的重要依据之一，也是有关厂矿进行科学管理与正确评价经济效益的有力工具。有鉴于此，东北大学从解放后便注意到了这个课题，并于80、90年代相继成立了四个课题组，分别从事岩石可钻性、岩石爆破性、岩石稳定性与

岩石三性综合分级的研究工作，均取得了可喜的研究成果，并因而获得国家级三等奖一项与省部级一等二等奖四项。在此基础上，东北大学作为主要参加单位与兄弟部门共同编制了中华人民共和国国家标准 GB 50218—94《工程岩体分级标准》并为该标准建立了岩体基本质量公式（简称 BQ 公式）。该标准为强制性国家标准，自一九九五年七月一日起施行。它的颁布标志着我国工程界从此摆脱从 50 年代使用至今的苏联普氏分级法。为配合标准的发行与推广，特著《岩石分级的理论与实践》一书，以飧读者。

全书共七章。第一章全面介绍了国内外岩石分级的历史与现状，第二、三、四、五章分别介绍了四个课题组用了将近二十年时间完成的成果，第六章着重介绍 BQ 公式的论证过程及其来龙去脉，第七章岩石分级的若干发展方向则是人工智能、神经网络、专家系统等最新前沿课题与岩石分级相结合的产物，此章在东北大学若干博士论文材料的基础上完成。

本书感谢国家工程岩体分级标准编制组组长董学晟同志同意发表与编制文件有关材料。

各作者所写章节如下：林韵梅，第五、六、七章；费寿林，第一章、第二章第四节；王明林，第三章；单守智，第二章第一、二、三节，第五章第十节；王维纲，第四章；钮强，第三章。全书由林韵梅统稿。

岩石分级课题与其他科研项目一样，尚有待于在历史的长河中不断完善与发展，因此热诚欢迎读者对本书批评与提出建议，并共同探讨。

作 者

1995 年 10 月于沈阳

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第一章 岩石分级的历史与现状</b> ..... | 1   |
| 第一节 岩石分级 .....              | 3   |
| 第二节 国内外岩石分级发展简史及现状 .....    | 5   |
| 第三节 岩石分级的观点、方法和要素 .....     | 24  |
| <b>第二章 岩石可钻性分级</b> .....    | 35  |
| 第一节 岩石可钻性概述 .....           | 35  |
| 第二节 可钻性分级的目的、意义与方法 .....    | 36  |
| 第三节 凿碎法岩石可钻性分级 .....        | 38  |
| 第四节 金刚石钻进岩石可钻性分级 .....      | 71  |
| <b>第三章 岩石爆破性分级</b> .....    | 105 |
| 第一节 岩石爆破性分级的目的与意义 .....     | 105 |
| 第二节 岩石爆破性分级的影响因素 .....      | 106 |
| 第三节 岩石爆破动态物理力学性质 .....      | 113 |
| 第四节 岩石爆破性分级准则评述 .....       | 118 |
| 第五节 岩石爆破性分级判据的选择 .....      | 122 |
| 第六节 岩石爆破性分级测定条件与方法 .....    | 131 |
| 第七节 岩石爆破性分级 .....           | 133 |
| 第八节 岩石爆破性分级的预测 .....        | 146 |
| <b>第四章 岩石稳定性分级</b> .....    | 152 |
| 第一节 稳定性分级的目的与意义 .....       | 153 |
| 第二节 对稳定性分级的若干认识 .....       | 154 |
| 第三节 稳定性分级判据及其选择原则 .....     | 157 |
| 第四节 动态分级法 .....             | 174 |
| <b>第五章 岩石三性综合分级</b> .....   | 189 |
| 第一节 三性分级的目的与意义 .....        | 189 |
| 第二节 三个单项分级的简介 .....         | 189 |
| 第三节 三性综合分级的特点 .....         | 190 |

|            |                                  |            |
|------------|----------------------------------|------------|
| 第四节        | 岩石综合分类表及其必须论证的问题 .....           | 193        |
| 第五节        | 抽样总体的确定 .....                    | 195        |
| 第六节        | 变量的相关分析 .....                    | 198        |
| 第七节        | 变量的分类 .....                      | 200        |
| 第八节        | 变量组合的可靠性分析及分类判据的确定 .....         | 201        |
| 第九节        | 分级档数 .....                       | 204        |
| 第十节        | 分级模式的建立与应用实例 .....               | 204        |
| 第十一节       | 岩石三性综合分级定额标准的研究 .....            | 206        |
| 第十二节       | 结语 .....                         | 219        |
| <b>第六章</b> | <b>中华人民共和国国家标准工程岩体分级标准 .....</b> | <b>221</b> |
| 第一节        | 编制工程岩体分级标准的原则与基本方法 .....         | 221        |
| 第二节        | 工程岩体分级标准的基本结构 .....              | 225        |
| 第三节        | 工程岩体分级标准的章节划分 .....              | 225        |
| 第四节        | 岩体基本质量的定量分级及 BQ 公式的研究 .....      | 227        |
| <b>第七章</b> | <b>岩石分级的若干发展方向 .....</b>         | <b>252</b> |
| 第一节        | 论系统识别的闭环解法 .....                 | 252        |
| 第二节        | 专家系统在岩石分级中的应用 .....              | 256        |
| 第三节        | 人工神经网络在岩石分级中的应用 .....            | 267        |
| 第四节        | 神经网络专家系统 .....                   | 280        |
| <b>附录</b>  | <b>中华人民共和国国家标准工程岩体分级标准 .....</b> | <b>287</b> |

## 第一章 岩石分级的历史与现状

岩石是人类赖以生存、发展的基本物质条件。人们的衣食住行依赖于岩石（包括土壤），现代化生产的原料、能源、材料取诸于岩石，岩石甚至是人类从狭义的动物分化出来的决定性因素。恩格斯说“劳动创造了人本身”<sup>[1-1]</sup>，而“劳动是从创造工具开始的”<sup>[1-2]</sup>。人类所制造的第一件工具就是石器，石器是人类的出身证。人类与岩石远在数百万年前就结下不解之缘。我们祖先在加工和使用石器的漫长过程中，逐步懂得了岩石在坚硬程度上是有差别的。所选择作为石器的材料大都是脉石英、石英岩、燧石、砾石、硬砂岩等硬质脆性岩石；他们逐渐懂得利用岩石坚硬程度的差别来相互砸、砍、磨、钻以形成各种用途的石器与饰物。人类的文化是从石器开始的。公元前5世纪的古籍《山海经》中有一篇《五藏山经》，记录了从石器时代到铁器时代对矿物和岩石的使用总结，共记录了89种岩种，并提到可根据硬度、颜色、光泽、透明度、敲击声等性能来识别矿岩。

为了有效地利用岩石，人类不仅要研究岩石在物质成分上的区别，也还要研究其加工性能上的区别，这就涉及到岩石坚固（硬）程度问题。中国古代哲学家早在战国时期（公元前3世纪）就已经抽象出岩石“坚固性”的概念，并且发生过一场有名的争论，叫《坚白石论》<sup>[1-3]</sup>。诡辩论者公孙龙提出，“坚性”和“白色”这两种属性并不是内涵于“石”，而是可以离“石”而独立存在。理由是：眼睛能见到“白”而见不到“坚”，用手能摸到“坚”而摸不到“白”，所以说，只有“坚石”和“白石”，而没有“坚白石”。他认为“坚性”和“白色”是可以离具体的“物”而存在的。哲学家墨子则认为“坚性”和“白色”都是岩石的属性，

不能离石而存在。不能因感观的局限就说未感知的事物不存在。认为知与不知和事物本身存在不存在是有区别的。这是古代一场有名的唯物主义驳斥唯心主义诡辩论之争。说明当时哲学家已经抽象出“坚固性”的概念，并肯定它是岩石固有的属性。

当今世界，人类对于岩石的依赖程度越来越强。岩石不仅成为人类创造物质文明的重要基础条件，也为人类精神文明的发展作出了重要贡献。作为世界文化宝贵遗产的埃及金字塔，狮身人面像，伊朗帕赛里斯的宫殿，中国的赵州石拱桥，云南、敦煌、龙门石窟、乐山大佛以及巧夺天工的精美玉雕……都是人类利用岩石创造出来的辉煌成就。

时至今日，人类利用自然，改造自然的规模越来越大。每年开挖岩石的总量大到以天文数字计算。以岩石作为工作对象的产业有地质、采矿、石油、水利水电、交通、国防等许多产业部门，范围很广。人们将此类工程统称为岩石（体）工程，并发展为一个独立的学科分支。科学研究的区分源于某一现象领域所特有的矛盾。岩石（体）工程所特有的基本的矛盾是“岩石的破碎和维护”。即一方面按照工程的需要对岩体进行破碎，取出岩（矿）石；另一方面又要维护被破碎岩体所形成的空间以保持其稳定。破碎与维护的矛盾贯彻于岩石（体）工程的始终。

岩石破碎和维护的难易程度成为工程可行性与有效性的前提。学者们在总结实践的基础上概括出一个新的概念，称之为“坚固性”。见诸于文献最早提出“坚固性”作为一个科学概念的是俄国的普洛托吉雅柯诺夫教授（1909年）<sup>[1-4]</sup>。他指出，“一般而言，平常所指的‘坚固性’一词，意味着多种的、按实质来说是一个综合性的概念”，是反映“各种采掘作业的难易程度，即在凿岩、爆破工作时或用这种那种工具直接进行挖掘时的难易程度。坚固性也可以在观察岩石在各方面稳定性的表现中得到……”。他把坚固性定义为“岩石对外力的抵抗”。

本文建议将坚固性定义为岩石对破碎和维护所表现的难易程度。

## 第一节 岩石分级

岩石分级是由“岩石”和“分级”两个词组合而成的，看似简明，实际应用中概念还较含糊。

“岩石”在不同的场合有不同的含义。当岩石与大气、水、森林等自然资源相比而言时，它指的是在不同地质时期中所形成的地质体，是一个广义的概念。当作为岩石工程学科中的术语时，“岩石”与“岩体”又成为有区别的两种概念。前者常指体积相对较小的岩块，是岩体中的一部分，强调其作为材料的一面；后者则是指较大范围的作为工程对象的地质体。因此，“岩石”一词的概念时大时小。习惯上提“岩石分级”、“岩石工程”等名词时，这里的“岩石”是广义的概念，而提到“岩石坚硬程度”（与“岩体完整”程度的概念相对应）、“岩石抗压强度”时，这里的“岩石”又是指的“岩块”，是狭义的概念。约定俗成，既无必要也难于重新命名。

“分级”和“分类”两个词在研究岩石坚固性的问题上常常混用，我们认为还是用“分级”较为科学。分类一词通常用来划分有“质”的区别的事物，如根据岩石的成因、矿物的种类等进行分类。分级主要是用于对“质”相同而“量”有差异的事物进行“量”的划分。当然质和量是有联系的，量的积累也可以引起质的变化。“质”本身也有层次的区别，有大过程的质变和小过程的质变，前者在高等级的分类中起作用，后者在低等级的分类以及分级中起作用。总体来说，本命题所研究的是对一个坚固程度连续有序的岩石系列，按工程的需求在数量上划分出不同的等级的问题，当然这种划分也可能涉及到小过程的质的区别，但这不是主旨。

如上所述，岩石工程既包括破碎又包括维护两大方面，此二者显然是有别的。破碎岩石的方法又是多种多样的。当今最主要的破岩方法还是钻眼爆破。因此，在工程实践中从更实用的角度出发，确定岩石坚固性时又分成可钻性、爆破性和稳定性三类岩



石分级。

将钻具钻进岩石时所表现的难易程度称之为岩石可钻性，它是岩石坚固性在钻进方面的表现，按岩石钻进难易程度划分等级，称岩石可钻性分级。

同样，按岩石爆破的难易程度划分等级称岩石爆破性分级。

按岩体维护的难易程度划分等级称岩石稳定性分级。

岩石坚固性受多种因素的影响。从工程实践的角度看，最主要的影响因素是两个：一是岩石（块）的坚硬程度，二是岩体的完整程度。二者既有联系又有区别。岩石的坚硬程度在相当大程度上与岩石形成过程中的先天因素（成分、成因、结构、形成环境等）有关；而岩体的完整程度受岩石形成后的后天影响（地质变动等）更大一些。

进行岩石坚固性分级的实际意义在于确定工程的可行性和提高工程的有效性。

以巷道掘进为例，岩石坚固性是确定施工方法、支护方式、设备选取、炮孔布置等一系列技术措施的主要依据，也是影响经济效益和安全程度的重要因素。以露天开采为例，露天边坡角的确定是意义重大的问题。不言而喻，减缓边坡角必然提高边坡的稳定性，但同时又必然要增大剥离量，降低经济效益。如何做到在保证安全的前提下使剥离量达到最少，这有赖于科学地确定矿区内各地段的岩石稳定性级别，并有与各该等级相适应的计算边坡角的方法。露天开采中钻机和钻头类型的选择、钻孔效果（钻孔速度、钻头寿命）的预估、钻孔定额的确定都依靠正确确定岩石可钻性等级。同样，单位炸药消耗量、炮孔布置、爆破参数确定、爆破质量（大块率、根底情况）的预估也都与岩石爆破性等级的正确确定密切相关。生产技术发展的趋势是设备的大型化和多样化。地下工程与露天开采的施工规模越来越大，情况也愈益复杂多样，无论是破碎还是维护越来越呼唤着要更准确地确定岩石坚固性等级，以便提高经济效益和保证工程安全。这是世界各技术先进国家越来越关注岩石坚固性等级研究的动力所在。

## 第二节 国内外岩石分级发展简史及现状

18 世纪是近代科学技术形成的世纪,其标志是古典力学的建立和蒸汽机的发明。蒸汽机的发明是工程技术发展的一次大突破,为采矿、冶炼、机械制造、交通运输等大发展奠定了动力基础。工业革命方兴未艾。生产技术的真正跃进是 19 世纪,继英国之后,法、德、美等国工业革命的发生和完成。在这不到一百年的时间里所创造的生产力,比过去一切世纪所创造的全部生产力还要多,还要大。在 1800~1900 年的百年间,煤产量增长了 52 倍,生铁 179 倍,钢 98 倍,铁路里程增加了 61 倍。19 世纪下半叶电力的应用,是近代工程技术发展的第二次大突破,推动了本世纪生产力的大发展。第二次世界大战造成了钢铁、石油需求量的激增。二战之后的恢复和建设也推动了基础工业的进一步发展。所有这些都刺激着原料、材料和能源的激增,极大地促进了以地壳岩石为对象的工业部门(地质、采矿、铁路、水利水电、土建)的迅速发展。工程的规模越来越大,工艺越来越复杂多样,使开挖及维护工作的难度甚至发生质的变化。生产的发展呼唤着科学技术的加快发展,那种对工程对象——岩石只能作出“软”或“硬”,“松散”或“完整”等模糊判断的办法已远远不能适应工程的需求了,这是促进近两个世纪来岩石分级研究不断发展演变的历史背景。

在这种背景下于 18 世纪后期便开始出现早期的分级,尽管当时“坚固性”这一术语尚未提出。

18 世纪末,维尔涅尔(Вернер)<sup>[1-5]</sup>提出定性分类法,分为松散的、软的、破碎的、次坚石和坚石五类。并相应地提出哪些岩石属于哪一级别。

1822 年法国的莫氏(Moh's)<sup>[1-6]</sup>根据矿物的硬度不同,用互相刻划的办法定出从滑石到金刚石的十级硬度,称划痕硬度标。由于岩石是矿物的集合体,其后有些学者试图根据岩石中各类矿物所占比例,用加权平均的办法求出平均硬度  $H$  作为该岩石的硬

度。如雷蒙德 (R. H. Raymend) 提出如下公式:

$$H = \frac{\sum S_i M_i}{100} \quad (1-1)$$

式中  $H$ ——岩石的平均硬度;

$S_i$ ——岩石中某种矿物所占百分数, %;

$M_i$ ——岩石中某种矿物的莫氏硬度。

实践证明这种确定岩石莫氏硬度的方法不成功。它只看到软、硬矿物组成岩石时有量的差别, 而未考虑到即便由相同矿物成分所组成的岩石, 因结构、构造以及胶结方式的不同将引起质的不同, 就像物质是由分子构成的, 但它是本质上不同于分子的东西。

1906 年美国的肖氏 (A. E. Shore)<sup>[1-6]</sup>研制了一种仪器——肖氏硬度计 (图 1-1) 用以测定金属材料的硬度。其原理是用一带金

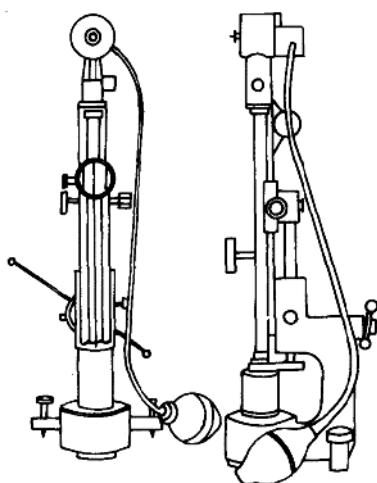


图 1-1 肖氏硬度计

刚石尖重约 4g 的撞针, 从 25cm 高处自由落下, 撞击材料表面, 以撞针的回跳高度来表征硬度。硬度值由 0~140。这种方法后被引

用来测量磨光的岩石表面。与此法相类似的，用于测定水泥硬度的仪器叫施密特锤（Schmidt Hammer）（图 1-2）。

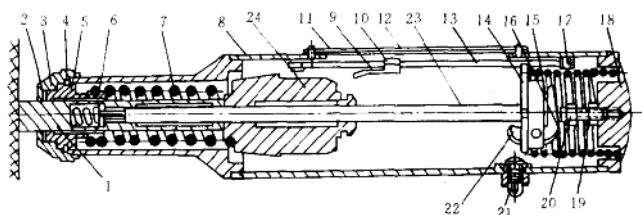


图 1-2 施密特锤构造

- 1—冲杆；2—毡圈；3—螺丝盖帽；4—卡环；5—弹簧座；6—弹簧；  
7—拉力弹簧；8—套筒；9—指针弹簧片；10—指针；11—刻度尺；  
12—护尺透明片；13—指针异杆；14—导向板；15—弹簧；16—压力弹簧；  
17—固定块；18—盖；19—固紧螺丝；20—调整螺丝；  
21—按钮；22—钩子；23—导杆；24—锤

1978 年国际岩石力学委员会曾推荐用 C-2 型肖氏硬度计和 L 型施密特锤作为测定岩石硬度的标准方法。

应该看到，此类方法所测得的是岩石某一小点的弹性，而不是钻进、爆破和维护的难易程度。另外岩石中含有多种矿物，弹性值有相当出入，因而硬度分级与坚固性分级具有不同概念。硬度分级主要用于岩块加工，而坚固性分级则主要应用于岩土工程。

1909 年，俄国的普洛托吉雅柯诺夫教授（A. A. Прогдьяконов）<sup>[1-4]</sup>首先提出了岩石“坚固性”的概念，并进行了系统的研究。如前所述，他指出：“一般而言，平常所指的坚固性一词，意味着多种的，按实质来说是一个综合性的概念”，即既包括破碎也包括维护。他认为：岩石坚固性在各方面的表现是趋于一致的”，意即某一岩石易凿则易爆，维护则难，其难易程度甚至具有相同的比例。因此可以采用一种抽象的系数来表示岩石之间的相对坚固性，这就是惯称的普氏坚固性系数“ $f$ ”。1926 年他提出  $f$  值可用下列七项指标来综合确定——抗压强度、手工凿  $1\text{cm}^3$  岩石所消耗的功、手工打眼每班的生产率、爆破每  $1\text{m}^3$  岩石的炸药

(黑火药)消耗量、掘进工生产率以及巷道掘进速度。每项指标各得出一个  $f$  值, 然后求其平均  $f$  值。由于测定过程过于繁琐, 且随生产技术的发展手工打眼、黑火药等已被淘汰了, 原定标准已不适用。最后只剩下一个与工艺无关的物理量抗压强度  $R$ , 可用来代表坚固性系数  $f$ , 即:

$$f = \frac{100}{R} \quad (1-2)$$

式中  $R$ ——岩石的极限抗压强度,  $\text{kg/cm}^2$ 。

普氏分级将岩石划分为十级, 20 个等 (表 1-1)。

按上式计算, 最硬岩石的抗压强度也只能有  $2000\text{kg/cm}^2$ , 实际上  $R$  值超过  $3000 \sim 4000\text{kg/cm}^2$  的也不鲜见。超过  $2000\text{kg/cm}^2$  的岩石全都定为  $f=20$ , 不再区分, 显然不合理。后来, 1955 年巴龙 (Л. И. Барон) 将公式改为:

$$f = \frac{R}{300} + \sqrt{\frac{R}{30}} \quad (1-3)$$

实际是将最硬岩石 ( $f=20$ ) 的抗压强度上推至  $3000\text{kg/cm}^2$ 。普氏系数在我国采矿界应用很广。

表 1-1 普氏岩石分级表

| 等级   | 坚固性程度 | 岩 石                                                      | $f$ |
|------|-------|----------------------------------------------------------|-----|
| I    | 最坚固   | 最坚固、细致和有韧性的石英岩和玄武岩, 其它各种特别坚固的岩石                          | 20  |
| II   | 很坚固   | 很坚固的花岗质岩石, 石英斑岩, 很坚固的花岗岩, 砂质片岩, 比上一级较不坚固的石英岩, 最坚固的砂岩和石灰岩 | 15  |
| III  | 坚固    | 花岗岩 (致密的) 和花岗质岩石, 很坚固的砂岩和石灰岩, 石英质矿脉, 坚固的砾岩, 极坚固的铁矿       | 10  |
| IIIa | 坚固    | 石灰岩 (坚固的), 不坚固的花岗岩, 坚固的砂岩, 坚固的大理石和白云岩, 黄铁矿               | 8   |
| IV   | 较坚固   | 一般的砂岩、铁矿                                                 | 6   |
| IVa  | 较坚固   | 砂质页岩, 页岩质砂岩                                              | 5   |
| V    | 中等    | 坚固的粘土质岩石, 不坚固的砂岩和石灰岩                                     | 4   |

续表 1-1

| 等级           | 坚固性程度 | 岩 石                                                 | $f$ |
|--------------|-------|-----------------------------------------------------|-----|
| V $\alpha$   | 中等    | 各种页岩（不坚固的），致密的泥灰岩                                   | 3   |
| VI           | 较软弱   | 较软弱的页岩，很软的石灰岩、白垩、岩盐、石膏、冻土、无烟煤、普通泥灰岩、破碎的砂岩、胶结砾石、石质土壤 | 2   |
| VI $\alpha$  | 较软弱   | 碎石质土壤、破碎的页岩、凝结成块的砾石和碎石、坚固的煤、硬化的粘土                   | 1.5 |
| VII          | 软弱    | 粘土（致密的）、软弱的烟煤、坚固的冲积层、粘土质土壤                          | 1.0 |
| VII $\alpha$ | 软弱    | 轻砂质粘土、黄土、砾石                                         | 0.8 |
| VIII         | 土质岩石  | 腐植土、泥煤、轻砂质土壤、湿砂                                     | 0.6 |
| IX           | 松散性岩石 | 砂、山麓堆积、细砾石、松土、采下的煤                                  | 0.5 |
| X            | 流砂性岩石 | 流砂、沼泽土壤、含水黄土及其它含水土壤                                 | 0.3 |

1911 年比尔鲍美(Bierbaumer)提出了根据岩石天然破碎状态以确定岩石荷载的五级分级法，用以估计岩石压力。

1940 年苏联的苏哈诺夫 (А. Ф. Суханов)<sup>[1-9]</sup>提出了与普氏截然不同的观点。他认为用抽象的系数进行分级是没有实际意义的；提出要用实际被应用着的具体采掘方法来确定凿岩和爆破时的岩石坚固性；认为生产中所用的设备就是确定岩石坚固性的理想仪器。他提出用凿岩速度和钎头消耗等实际生产指标表示可钻性；用炸药单耗等表示爆破性。并规定了一套标准测试条件，当与标准条件不一致时则用一系列系数加以校正。

1946 年太沙基 (Terzaghi)<sup>[1-5]</sup>提出一个新的以岩石种类描述和岩石载荷相结合的分级方法，他将岩石分为十级，从坚硬与原状岩石到膨胀岩石。其后又作了补充，把裂隙间距和 RQD 指标也联系到一起。

1950 年苏联的什列依涅尔 (Л. А. Шлейнер)<sup>[1-10]</sup>提出用底面

积为  $1 \sim 2 \text{ mm}^2$  的截锥形圆柱压模在光滑岩块表面加载, 用产生第一次跃进破碎时的载荷  $P$  与压模底面积  $S$  之比  $p (=P/S) \text{ kg/mm}^2$  作为史氏压入硬度标。据此将岩石分为脆性、塑脆性和塑性三大类。建议用“硬度”和“塑性系数”两项指标作为岩石分级标准。塑性系数  $K$  是岩石破碎前所消耗的总能量与弹性变形能量之比, 这可从记录的应力—应变曲线中求算出。

史氏方法和重要特点是以岩石发生首次完全破碎的参数作指标, 与钻进破岩的实质比较切近。

1950 年洗凡施 (H. Sievers)<sup>[1-11]</sup>设计了一种硬质合金钻具在实验室内作实钻试验, 以确定岩石可钻性的装置, 开创了模拟试验确定岩石坚固性的途径。1951 年英国的 R. 谢费尔 (Shepherd) 在《岩石的物理性质和可钻性》一书中也介绍了他所采用的微型钻机测定可钻性的方法。1969 年美国的 C. G 怀特 (White)<sup>[1-8]</sup>又研制了一种能进行回转、冲击和回转—冲击三种钻进方式的微型试验钻机, 提出一套确定岩石可钻性的指数。他们的基本观点如莫利斯所说的: 确定岩石可钻性的唯一途径就是对它钻眼。表 1-2 列出了此类微钻法的试验参数。

表 1-2 微型钻试验参数

| 研 究 者 | 钻眼方式                                                      | 钻头直径<br>(mm) | 推 力<br>(N)                                                    | 转 速<br>(r/min)                                            |
|-------|-----------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 洗凡施   | 回转                                                        | 10           | 200                                                           | 160                                                       |
| 怀 特   | <div> <div>回转</div> <div>冲击</div> <div>冲击-回转</div> </div> | 19           | <div> <div>680~4540</div> <div>—</div> <div>1140</div> </div> | <div> <div>500</div> <div>150</div> <div>250</div> </div> |
| 罗 洛   | 牙轮 (片)                                                    | 31.8         | 900                                                           | 55                                                        |
| 谢费尔   | 回转                                                        | 12.7~31.8    | 560~1810                                                      |                                                           |
| 高德里奇  | 回转                                                        | 9.5          | 230                                                           | 140                                                       |

1950 年苏联的老普氏之子小普洛托吉雅柯诺夫 (M. M.

Прото́дьяко́в)<sup>[1-12]</sup>提出了一种测定岩石坚固性系数  $f$  值的简易方法，称捣碎法。

捣碎法用 20~40mm 粒径的小岩粒，重 40~50g，置于图 1-3 所示的捣碎筒中，以重 2.4kg 的锤夯捣 5 份试样，将全部岩屑并在一起，用 0.5mm 筛孔的标准筛筛之。取筛下的细粉置于特制的量筒中，轻放量杆，视杆上的刻度便知筒中岩粉的高度  $l$ ，则坚固性系数

$$f = \frac{20n}{l} \quad (1-4)$$

式中  $n$ ——每份试样的夯捣次数。

此法的优点是简便，缺点是放在不同地基上夯捣所得  $f$  值不一样。另外，夯捣较软岩石时粉末被重复破碎， $l$  与  $n$  不成正比。

此法在苏联“协作研究关于破碎岩石问题”会上被推荐作为测定普氏系数的暂行统一方法。

1956 年美国李温斯顿 (C. W. Livingston)<sup>[1-13]</sup>建立变形能爆破漏斗理论，提出一个变形能系数的概念。利用此系数可以对比岩石的爆破性，计算炸药的单耗量和确定爆破参数。其表达式为

$$E_b = \frac{L_c}{\sqrt[3]{Q}} \quad (1-5)$$

式中  $E_b$ ——岩石的变形能系数；

$L_c$ ——炸药埋置的极限深度（最小抵抗线）；

$Q$ ——装药量。

当  $Q$  既定时， $L_c$  越大， $E_b$  亦越大，说明该种岩石愈易爆破。表 1-3 列出加拿大矿山公司按爆破漏斗理论实测的  $E_b$  值，可以决定爆破性和确定最佳炸药消耗量。

1958 年我国地质部根据大量现场实际钻进效果，参考苏联的定级方法，提出了“岩心钻探岩石可钻性 12 级分级表”。当时采用的钻进技术条件是：XB-300 型和 XB-500 型钻机、软岩用硬质合金钻头、硬岩用铁砂钻进，钻头直径 91mm。此 12 级分级的模式一直沿用至今。



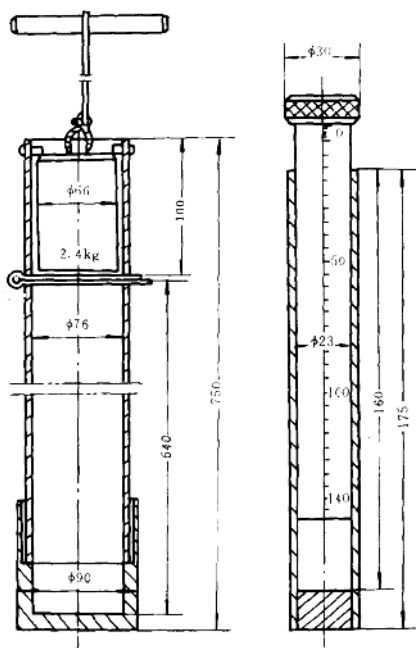


图 1-3 捣碎筒和量筒

表 1-3 岩石弹性变形能系数  $E_b$

| 矿 岩     | $E_b$ | 炸 药         | 矿 岩     | $E_b$ | 炸 药  |
|---------|-------|-------------|---------|-------|------|
| 磁铁矿 (1) | 4.6   | 60%胶质硝化甘油炸药 | 铁矿岩     | 3.4   | 铵油炸药 |
| 磁铁矿 (2) | 4.4   | 60%胶质硝化甘油炸药 | 石英岩 (2) | 3.4   | 铵油炸药 |
| 磁铁矿 (3) | 4.3   | 浆状炸药        | 盐 岩     | 3.2   | 铵油炸药 |
| 花岗岩     | 4.2   | 60%胶质硝化甘油炸药 | 冻表土     | 2     | 铵油炸药 |
| 石英岩 (1) | 3.7   | 浆状炸药        | 冻结岩石    | 1.8   | 浆状炸药 |