

普通高等教育  
岩土工程类教材

# 碎岩工程学

SUIYAN GONGCHENGXUE

张祖培 刘宝昌 编



地质出版社

普通高等教育岩土工程类教材

# 碎 岩 工 程 学

张祖培 刘宝昌 编

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

《碎岩工程学》共包括三篇内容。第一篇为岩石破碎学——岩石力学性质、岩石强度理论及破碎理论、各种钻进方法的碎岩原理及碎岩新方法；第二篇为超硬材料——金刚石、立方氮化硼、复合超硬材料等的性能、制备工艺及金刚石质量的检验方法；第三篇为各类钻头设计——金刚石钻头、大直径螺旋钻头、大直径柱齿钻头、大直径牙轮组合钻头、大直径翼状钻头设计。

本教材内容丰富、图文字简练，理论联系实际，是勘察工程专业学生的专业教材。也可供地质、冶金、煤炭、有色、建工、核工业、化工、水电、铁道等部门从事钻探工程及基础工程施工的技术人员作为参考书使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

碎岩工程学/张祖培, 刘宝昌编. —北京: 地质出版社, 2004. 11

普通高等教育岩土工程类教材

ISBN 7-116-04254-7

I. 碎... II. ①张... ②刘... III. 岩石钻进-高等学校-教材 IV. P634.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 113444 号

---

责任编辑: 李源明 陈 磊

责任校对: 田建茹

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324565 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京市朝阳区小红门印刷厂

开 本: 787 mm × 1092 mm<sup>1/16</sup>

印 张: 11

字 数: 268 千字

印 数: 1—2000 册

版 次: 2004 年 11 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 13.50 元

ISBN 7-116-04254-7/P · 2526

---

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

# 前 言

《碎岩工程学》教材共包括三篇内容，即岩石破碎学、超硬材料及钻头设计。由于教学计划的变动，把原来的《岩石破碎学》和《超硬材料及钻头》两门课程综合而成为一门课。这样既加强了上述三篇内容前后有机的联系，也体现了理论联系实际的原则。这便是从钻头（钻凿工具）碎岩的基本理论出发，根据不同的地质、岩性条件，选择目前生产中广泛使用的高效超硬材料，并设计和制造出具有理想结构的钻头，以满足各类钻探生产的需要。这样做就是把钻头与碎岩作为一个系统工程，所以本教材取名为《碎岩工程学》便是顺理成章的了。

无可否认，岩石破碎机理的研究难度较大，观点亦较多，编者在归纳整理了一些常用的理论和观点的基础上，还增加了一些新的看法；目前超硬材料品种层出不穷，教材介绍了在钻探工程中推广使用的金刚石、立方氮化硼、多种超硬复合体等材料；生产现场基本上凭经验来设计钻头，本教材则在搜集大量资料的基础上，总结归纳出一些设计原则，供读者和用户设计时参考。

教材共分十七章，其中第七、八、九章由刘宝昌博士编写，其余由张祖培教授执笔。徐会文教授对本教材进行了审校。在编写教材过程中也得到了教研室有关老师和研究生的支持，在此向他们一并致谢。

因为教材的前身为讲稿，经过了近四年的教学实践，内容上不断地给予补充和更新，从而获得了较好的教学效果。但此次本教材毕竟是按新体系编写而成的，故在前后内容联结上如何更好地做到理论联系实际，编排上如何更便于学生学习和掌握等，还有待今后在教学实践中不断地完善和提高并接受检验。因此，可以肯定，本教材内容上恐难免有不妥和错漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

吉林大学建设工程学院

2004 年 3 月

# 目 录

## 第一篇 岩石破碎学

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 第一章 岩石力学性质 .....          | (1)  |
| 第一节 岩石的强度 .....           | (1)  |
| 第二节 岩石的硬度 .....           | (5)  |
| 第三节 岩石的弹性、塑性和脆性 .....     | (8)  |
| 第四节 岩石的研磨性 .....          | (12) |
| 第五节 岩石的可钻性及其分级 .....      | (18) |
| 第二章 岩石强度理论和破碎理论 .....     | (24) |
| 第一节 晶体破碎理论 .....          | (24) |
| 第二节 力学强度理论问题 .....        | (25) |
| 第三节 剪切破坏的强度理论 .....       | (25) |
| 第四节 脆性破坏的强度理论 .....       | (28) |
| 第五节 布希涅斯克问题 .....         | (32) |
| 第六节 赫兹理论 .....            | (34) |
| 第七节 岩石在外载作用下的破碎发展过程 ..... | (36) |
| 第三章 岩石切削 .....            | (42) |
| 第一节 切削原理及应力分布 .....       | (42) |
| 第二节 轴向力与水平力的计算 .....      | (44) |
| 第三节 切削具的磨损 .....          | (45) |
| 第四节 影响岩石切削效率的因素 .....     | (46) |
| 第四章 金刚石钻进碎岩原理 .....       | (50) |
| 第一节 碎岩原理 .....            | (50) |
| 第二节 钻进时金刚石破碎岩石的表现 .....   | (51) |
| 第三节 金刚石钻头钻进的温度规程 .....    | (53) |
| 第四节 影响金刚石钻进效率的因素 .....    | (54) |
| 第五章 动载破碎岩石 .....          | (56) |
| 第一节 冲击载荷的特点 .....         | (56) |
| 第二节 冲击碎岩原理 .....          | (59) |
| 第三节 影响冲击碎岩效果的因素 .....     | (59) |
| 第四节 冲击回转钻进破碎岩石 .....      | (63) |
| 第五节 牙轮钻头碎岩原理 .....        | (65) |
| 第六章 破碎岩石新方法 .....         | (67) |

|     |                  |      |
|-----|------------------|------|
| 第一节 | 高压水射流破碎岩石 .....  | (67) |
| 第二节 | 热能破碎岩石 .....     | (71) |
| 第三节 | 热熔钻 .....        | (78) |
| 第四节 | 热能-机械能碎岩 .....   | (84) |
| 第五节 | 其他破碎岩石的新方法 ..... | (88) |

## 第二篇 超硬材料

|      |                      |       |
|------|----------------------|-------|
| 第七章  | 超硬材料的发展与应用 .....     | (91)  |
| 第一节  | 超硬材料及其工业化的发展历程 ..... | (91)  |
| 第二节  | 超硬材料的工业应用 .....      | (93)  |
| 第八章  | 金刚石 .....            | (95)  |
| 第一节  | 金刚石的性质 .....         | (95)  |
| 第二节  | 人造金刚石合成机理 .....      | (99)  |
| 第三节  | 人造金刚石合成方法 .....      | (103) |
| 第四节  | 六面顶合成设备 .....        | (106) |
| 第五节  | 金刚石合成用原材料 .....      | (107) |
| 第六节  | 六面顶合成技术 .....        | (111) |
| 第七节  | 两面顶合成技术 .....        | (113) |
| 第八节  | 金刚石聚晶的合成技术 .....     | (115) |
| 第九章  | 金刚石的预处理方法 .....      | (120) |
| 第十章  | 立方氮化硼 .....          | (123) |
| 第一节  | 晶体结构 .....           | (123) |
| 第二节  | 立方氮化硼的性能与应用范围 .....  | (124) |
| 第三节  | 立方氮化硼的合成 .....       | (124) |
| 第十一章 | 复合超硬材料 .....         | (127) |
| 第一节  | 金刚石复合体 .....         | (127) |
| 第二节  | 金刚石薄膜 .....          | (132) |
| 第十二章 | 金刚石质量检验 .....        | (135) |
| 第一节  | 单晶金刚石质量检验 .....      | (135) |
| 第二节  | 复合片质量检验 .....        | (138) |

## 第三篇 钻头设计

|      |                 |       |
|------|-----------------|-------|
| 第十三章 | 金刚石钻头设计 .....   | (141) |
| 第一节  | 表镶金刚石钻头设计 ..... | (141) |
| 第二节  | 孕镶金刚石钻头设计 ..... | (144) |
| 第三节  | 复合片钻头设计 .....   | (146) |

|        |                   |       |
|--------|-------------------|-------|
| 第四节    | 不取心金刚石钻头设计 .....  | (147) |
| 第十四章   | 大直径螺旋钻头设计 .....   | (150) |
| 第一节    | 螺旋钻杆设计 .....      | (150) |
| 第二节    | 螺旋钻钻头设计 .....     | (152) |
| 第三节    | 几种特殊螺旋钻头设计 .....  | (153) |
| 第十五章   | 大直径柱齿钻头设计 .....   | (156) |
| 第一节    | 钻头体 .....         | (156) |
| 第二节    | 吸渣口 .....         | (157) |
| 第三节    | 钻头体的形状 .....      | (158) |
| 第四节    | 钻头体和硬质合金材料 .....  | (158) |
| 第五节    | 硬质合金柱齿参数 .....    | (159) |
| 第十六章   | 大直径牙轮组合钻头设计 ..... | (161) |
| 第一节    | 钻头唇面设计 .....      | (161) |
| 第二节    | 牙轮的选择及分布 .....    | (161) |
| 第三节    | 钻头水力学设计 .....     | (163) |
| 第四节    | 钻头体设计 .....       | (163) |
| 第十七章   | 大直径翼状钻头设计 .....   | (165) |
| 第一节    | 前导钻头设计 .....      | (165) |
| 第二节    | 主翼板设计 .....       | (165) |
| 第三节    | 钻头心管直径设计 .....    | (166) |
| 第四节    | 吸渣口和导流盘设计 .....   | (166) |
| 第五节    | 带导向笼钻头设计 .....    | (166) |
| 主要参考文献 | .....             | (168) |

# 第一篇 岩石破碎学

## 第一章 岩石力学性质

钻凿工作的对象是岩石。在生产过程中，不论是钻进、采取岩心、防止或利用孔斜，还是保护孔壁、维持冲洗液正常循环等，各种工序无不与岩石的性质紧密相关。

由于目前钻凿生产中采用的机械法破碎岩石（例如回转钻进、冲击钻进、振动钻进等）是利用不同的外加机械力，使岩石的一部分从整体上分离下来，因此，本章将着重讨论与钻凿工作密切相关的岩石力学性质（如强度、硬度、弹性、塑性与脆性、研磨性和可钻性），并扼要地论述它们的基本概念、影响因素以及测定的方法。

### 第一节 岩石的强度

#### 一、岩石强度的概念

岩石在载荷不断作用下，变形到一定程度就发生破坏。岩石破坏前所能承受的最大载荷，称为极限载荷；单位面积上的极限载荷，称为极限强度。研究岩石的强度特性就是研究其极限强度特性。岩石强度的单位是帕（Pa）或兆帕（MPa）。

根据受力条件不同，岩石的极限强度可分为：抗压强度、抗拉强度、抗剪强度和抗弯强度等；根据岩石的受力状态，可分为单向、双向和三向应力状态下的强度；根据外加载荷速度，又有静载强度和动载强度之分。

#### 二、影响岩石强度的因素

##### 1. 岩石的物质成分

不同矿物组成的岩石具有不同的强度。例如，石英是强度较大的造岩矿物，因此，若岩石中石英含量高，则岩石强度高。而方解石和白云石等强度较小，因此，碳酸盐类岩石中随方解石含量增加，岩石强度降低。

对于沉积碎屑岩，胶结物的成分对岩石强度也有较大的影响。例如，硅质胶结的砂岩，其抗压强度高达 200 MPa 以上；而钙质胶结的砂岩，强度则为 20 ~ 100 MPa；泥质胶结的砂岩，强度往往在 20 MPa 以下。

##### 2. 岩石的结构及构造

矿物颗粒大小对岩石强度有一定的影响。一般说来，细颗粒岩石的强度高于粗颗粒岩石的强度，并且颗粒越细，这种影响越大。例如，粗粒花岗岩的抗压强度是 80 ~ 120 MPa，而细粒花岗岩的抗压强度则高达 200 ~ 250 MPa。

矿物的结晶程度对岩石强度也有影响。在岩浆岩结构中若非结晶物质多，则其强度将

大大降低。例如，细粒橄榄玄武岩的强度达 500 MPa，而玄武质熔岩的强度却降低到 30 ~ 150 MPa。

影响岩石强度的另一个因素是层理。层理发育的岩石的强度，具有明显的各向异性。垂直于层理方向的抗压强度最大，平行于层理方向的抗压强度最小，与层理方向呈某种角度时的抗压强度介于两者之间。

表 1-1-1 列出了几种岩石垂直于层理和平行于层理方向上的抗压强度。

表 1-1-1 不同层理方向上的抗压强度

| 岩石名称   | 抗压强度/MPa              |                           | $\sigma_c^\perp / \sigma_c^\parallel$ |
|--------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|
|        | 垂直层理 $\sigma_c^\perp$ | 平行层理 $\sigma_c^\parallel$ |                                       |
| 石灰岩    | 180                   | 151                       | 1.10                                  |
| 粗粒砂岩   | 142.3                 | 118.5                     | 1.20                                  |
| 细粒砂岩   | 156.8                 | 153.7                     | 1.02                                  |
| 砂质页岩   | 78.9                  | 51.8                      | 1.52                                  |
| 页岩     | 51.7                  | 36.7                      | 1.41                                  |
| 泥板岩    | 114.2                 | 65                        | 1.76                                  |
| 碳酸盐泥板岩 | 103.2                 | 59.7                      | 1.73                                  |

3. 岩石的容重和孔隙度

同一种岩石，其孔隙度增加，容重降低，从而岩石强度也降低；反之亦然。例如，石灰岩容重由  $1.5 \times 10^4 \text{ N/m}^3$  增加到  $2.7 \times 10^4 \text{ N/m}^3$  时，其抗压强度就由 5MPa 增至 180MPa。又如砂岩的容重由  $1.87 \times 10^4 \text{ N/m}^3$  增加到  $2.57 \times 10^4 \text{ N/m}^3$  时，其抗压强度也由 15MPa 增加到 90MPa。一般来说，岩石的孔隙度随埋藏深度的增加而减小。例如，埋藏在深部的粘土强度比靠近地表处的粘土强度大。

4. 受力条件

岩石的抗压、抗剪和抗弯强度有很大的差别。在单向应力状态下，岩石的抗压强度最大，而抗拉强度最小，抗剪和抗弯强度介于抗压和抗拉强度之间。这是因为岩石受压缩时颗粒之间的距离缩小，颗粒间相互作用力增加，所以强度增加；而受拉伸时颗粒之间的距离增大，颗粒间相互作用力减弱，所以强度下降。

表 1-1-2 列出了三种有代表性的岩石各种强度之间的大致比例关系。

表 1-1-2 不同受力条件下的抗压强度

| 岩石名称 | 抗压强度 | 抗剪强度        | 抗弯强度        | 抗拉强度        |
|------|------|-------------|-------------|-------------|
| 花岗岩  | 1    | 0.09        | 0.06        | 0.02 ~ 0.04 |
| 砂岩   | 1    | 0.10 ~ 0.12 | 0.02 ~ 0.12 | 0.02 ~ 0.05 |
| 石灰岩  | 1    | 0.15        | 0.08 ~ 0.10 | 0.04 ~ 0.10 |

由表 1-1-2 可知，岩石的抗剪强度约为其抗压强度的 1/5 ~ 1/11；岩石的抗弯强度约为抗压强度的 1/5 ~ 1/12；岩石的抗拉强度仅为岩石抗压强度的 1/10 ~ 1/15。利用岩石抗剪、抗弯和抗拉强度小的弱点，寻求相应的破碎方法对于提高碎岩效率是非常有利的。

5. 应力状态

对抗压强度，三向应力状态下的抗压强度大于双向应力状态；双向应力下的抗压强度大于单向应力状态。长沙矿冶研究院对砂岩和大理岩试验得到的三向应力状态下抗压强度 ( $\sigma_c$ ) 的经验公式是：

$$\sigma_c = \sigma_p + k\sigma_o$$

式中:  $\sigma_p$  为单向抗压强度;  $\sigma_o$  为侧向应力;  $k$  为系数, 对砂岩  $k=4.40$ ; 对大理岩  $k=3.45$ 。

岩石强度随围压增加而增大的原因是: 岩石的围压增大, 各向压缩增强, 使岩石颗粒间的距离缩短, 颗粒间的相互作用力增强, 从而表现为对外载的抗力增大。

## 6. 载荷速度

实践证明: 岩石的强度与外载作用的速度有关, 载荷速度越快, 则岩石强度越高。

在动载条件下岩石强度增大主要原因是由于外力作用的短暂性。当外载作用速度快时, 岩石的变形和破坏难以得到充分的发展, 因而表现出较大的抗力。

表 1-1-3 列出一些岩石的动载和静载抗压强度的比较数据。在不同应变速率下岩石抗压强度的变化情况, 如图 1-1-1 所示。

表 1-1-3 动、静载抗压强度及其比较数据

| 岩石名称 | 抗压强度/MPa     |              | $\sigma_{动}/\sigma_{静}$ |
|------|--------------|--------------|-------------------------|
|      | $\sigma_{动}$ | $\sigma_{静}$ |                         |
| 花岗岩  | 39           | 7            | 5.57                    |
| 铁隧岩  | 90           | 7            | 12.86                   |
| 石灰岩  | 28           | 4            | 7.00                    |
| 大理岩  | 48           | 6            | 8.00                    |

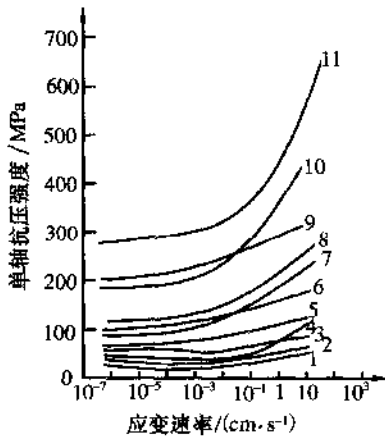


图 1-1-1 不同应变速率下岩石抗压强度的变化情况

1、2、4、9—砂岩; 3—水泥石; 5—凝灰岩;  
6、11—安山岩; 7、8—大理岩; 10—花岗岩

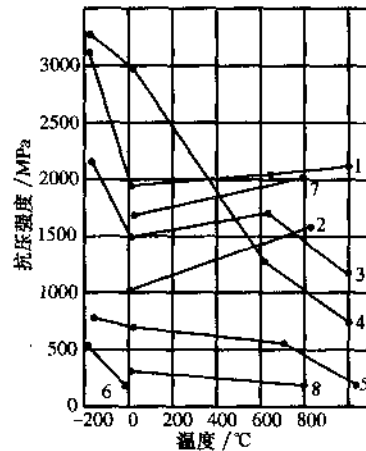


图 1-1-2 岩石抗压强度与温度关系

1—细粒砂岩; 2—灰色砂岩; 3—辉长岩; 4—花岗岩;  
5—大理岩; 6—蛇纹岩; 7—无烟煤; 8—石灰岩

## 7. 岩样的线性尺寸

随着岩样线性尺寸的增加, 岩石的强度降低。这主要是由于岩石的组成和结构的不均一性, 以及裂隙和孔洞存在几率增加的缘故。因此, 测定和对比岩石强度时, 必须有线性尺寸的规定, 否则就不能进行比较。通常在做岩石的抗压强度试验时, 要求采用  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$  的立方体试样, 或者采用长度等于直径的圆柱体岩样 (岩心)。

## 8. 温度

温度对各种岩石的强度影响不一：花岗岩、石灰岩类结晶质岩石随加载温度升高其抗压强度下降；砂质类非结晶质岩石随着温度升高其抗压强度无明显变化；而安山岩类非结晶质岩石随温度的升高其抗压强度提高（图 1-1-2）。

岩石强度下降的原因与组成岩石的矿物的热膨胀率不同、岩石内部含有的裂纹和某些易熔、易分解、易蒸发的矿物质等有关。例如石灰岩在加热到  $800^{\circ}\text{C}$  以后，强度急剧下降，原因就是石灰岩的主要成分  $\text{CaCO}_3$ ，超过  $800^{\circ}\text{C}$  时产生分解，分解出的  $\text{CaO}$  呈粉末状；至于花岗岩，由于它含有很多石英，当温度超过  $573^{\circ}\text{C}$  时，石英发生相变，由  $\alpha$ -石英变成  $\beta$ -石英，体积增加，部分区域产生裂隙，导致其强度下降。

岩石加热后强度增加或变化不大的原因可能与烧结作用有关。砂岩、安山岩、凝灰岩等岩石含有较多的粘土质物质和胶结物，经烧结后这些物质的颗粒结合更加紧密，或者脱水作用使岩石的孔隙率较大，随着温度的升高，组成岩石的矿物产生膨胀，空隙减少，岩石变得更加致密，也可能使岩石强度增加。

## 9. 湿度

水对岩石的强度有显著的影响。当水侵入岩石时，水就顺着裂隙进入岩石全部自由面上的每个矿物颗粒，削弱了颗粒间的联系，使岩石强度降低。其降低程度决定于岩石内部孔隙和裂隙的状况、组成矿物的亲水性和水的物理化学性质。

表 1-1-4 列出几种岩石在干燥状态下和被水饱和时的抗压强度。

表 1-1-4 水对岩石强度影响表

| 岩石名称 | 抗压强度/MPa     |              | 岩石名称 | 抗压强度/MPa      |               |
|------|--------------|--------------|------|---------------|---------------|
|      | 干燥状态         | 水饱和状态        |      | 干燥状态          | 水饱和状态         |
| 凝灰岩  | 61.7 ~ 178.5 | 32.5 ~ 153.7 | 玄武岩  | 102.7 ~ 290.5 | 102.2 ~ 192.4 |
| 页岩   | 50.7 ~ 136.0 | 13.7 ~ 75.1  | 辉绿岩  | 118.1 ~ 272.5 | 58.0 ~ 245.8  |
| 砂岩   | 17.5 ~ 250.8 | 5.7 ~ 245.5  | 闪长岩  | 97.7 ~ 232.0  | 68.8 ~ 159.7  |
| 石灰岩  | 13.4 ~ 206.7 | 7.8 ~ 189.2  | 石英岩  | 145.1 ~ 200.0 | 50.0 ~ 176.8  |
| 花岗岩  | 40.0 ~ 220.0 | 25.0 ~ 205.0 | 大理岩  | 30.0 ~ 190.0  | 28.8 ~ 182.4  |

## 三、测定岩石强度的方法

岩石强度的测定，一般是在材料试验机上进行。在简单应力状态下，通常采用单向拉伸、压缩、剪切等试验以确定岩石的强度。在复杂应力状态下，可采用三轴试验装置确定岩石的强度。

有关材料强度的具体测定方法，在材料力学课程中已经详述，故不再重复。这里仅介绍岩石点载荷强度的测定方法。

由于强度的测定需在大型高吨位的材料试验机上进行，比较麻烦。近年来，在工程勘察上推广一种称为“点载荷强度”的试验，它是利用一台类似测压入硬度的仪器来测定的。所测岩样为不规则岩样，不需要加工，一般取段岩心即可，在岩心上通

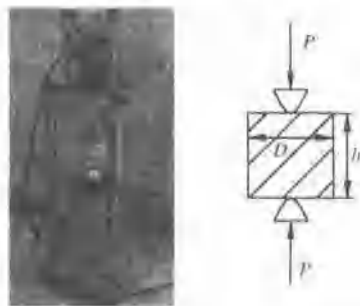


图 1-1-3 点载荷强度的测定示意图

过压头施加载荷  $P$  直至把岩样压裂 (图 1-1-3)。通过下式计算出点载荷强度:

$$I_{S(50)} = \frac{P}{D^2}$$

式中:  $I_{S(50)}$  为点载荷强度, MPa;  $P$  为岩样破坏时最大载荷, N;  $D$  为岩样直径 (常等于它的高度  $h$ ), 50mm。

利用求得的点载荷强度, 即可估算出单轴抗压强度, 其计算式如下:

$$\sigma_{\text{压}} = k I_{S(50)}$$

式中:  $k$  为换算系数, 与岩性有关, 一般取  $k = 12 \sim 29$ 。用不同的  $k$  值, 有待进一步研究。

## 第二节 岩石的硬度

### 一、岩石硬度的概念

岩石的硬度通常被认为是某一物体表面对另一物体压入时的阻力或反抗特性, 所以也可称为岩石的抗压入硬度。硬度的衡量单位是千克/平方毫米。岩石的硬度与岩石的单轴抗压强度不同, 据理论分析, 岩石的压入硬度  $P$  与单轴抗压强度  $\sigma$  有如下关系:  $P = (1 + 2\pi) \sigma$ , 即硬度与抗压强度之间差 7 倍左右; 实际证明, 其比在 5 ~ 20 之间。造成两者之间差别的原因是: 测定压入硬度是使岩石局部破碎, 近乎多向受压的复杂状态下进行的。对于钻进破碎岩石来讲, 硬度指标更能反映孔底钻进碎岩的实质和难易程度。

应该区分开组成岩石的矿物颗粒的硬度和岩石的组合硬度, 前者主要对钻具在钻进过程中的磨损起影响; 而后者对钻进时岩石的破碎速度起重大影响。

### 二、影响岩石硬度的因素

#### 1. 岩石的成分、结构及构造的影响

粘土、泥灰岩和灰岩, 随其所含碳酸质成分的增加, 硬度增加, 而随其孔隙度的增加, 其硬度和弹性模量  $E$  均降低。对砂岩及粉砂岩, 在结构相同时, 其硬度与胶结矿物成分有关: 胶结物由泥质过渡至碳酸质时, 硬度迅速增加。例如, 由碳酸质胶结的岩石硬度是水云母胶结的 1.4 ~ 1.8 倍, 是泥质岩的 2 ~ 3 倍; 胶结物成分相同时, 砂岩及粉砂岩的硬度则取决于胶结物的结构, 基底胶结者最硬, 接触胶结者次之, 空隙胶结者为最低。

#### 2. 硬度的各向异性

层理对硬度的影响正好与强度相反, 即垂直层理方向的硬度值 ( $P_{k\perp}$ ) 最小, 面平行层理的硬度值 ( $P_{k\parallel}$ ) 最大; 实验表明:  $P_{k\parallel} : P_{k\perp}$  之比为 1.1 ~ 1.8。亦即沿垂直于层理方向钻进岩石比较容易破碎, 这对设计钻孔方向和了解有层理地层中孔斜原因和孔斜规律有重要意义。

#### 3. 尺寸因素的影响

作压入硬度试验时, 压头直径要适当选择。应考虑到压头能压进 20 ~ 30 个岩石颗粒。按此计算, 压头底面积为  $1\text{mm}^2$  者, 可测粒径小于 0.2 ~ 0.25mm 的岩石 (压头面积为  $5\text{mm}^2$  者, 达 0.5 ~ 0.7mm)。试验证明, 矿物的显微硬度高于岩石的显微硬度, 后者又高于岩石的压入硬度, 这说明了尺寸因素的影响: 尺寸愈小则岩体的代表性愈差, 包含缺陷

的可能性愈小，岩石硬度提高。

#### 4. 压头形状的影响

压头形状对硬度的影响比较复杂，规律性也不明显。试验表明，压头锥顶角由  $30^\circ$  增至  $125^\circ$  时，硬度增大。如细粒砂岩，锥顶角为  $0^\circ$ （圆柱）、 $60^\circ$ 、 $95^\circ$  和  $125^\circ$  时， $P_k$  相应地为 1462、1717、2201 和 3208 MPa。一般说，锥顶角小于  $45^\circ$  前，影响并不大（偏差不超过  $\pm 5\%$ ）。巴朗曾用不同形状、不同尺寸的压头在大理岩上做试验，发现不同形状的压头所得硬度不同，差别还是相当大的（图 1-1-4）。

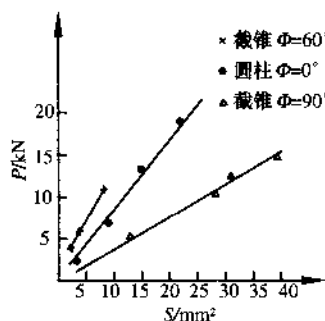


图 1-1-4 压头形状和岩石接触面积与跃进载荷关系

#### 5. 岩样表面形态的影响

有时为了省略岩样的切磨工序，采用岩样的天然表面，则更为符合孔底情况。由于应力集中的影响，磨光样比不磨光样的硬度大，如对  $\sigma_b = 128 \sim 351$  MPa 的岩石，两者的比值最大能超过两倍。

#### 6. 加载速度的影响

测岩石硬度时，对岩石施加的外载同样有静载和动载之分，相应地岩石的硬度也分为静硬度和动硬度。一般认为：与静载相比，动载破碎岩石时，破碎单位体积岩石所消耗的能量要增加，这是由于加载速度快，岩石中的破碎变形不能充分扩展到较大的体积所致。但加载速度较小时，其硬度变化不大。对大理岩，当加载速度达  $21.4\text{m/s}$  时，硬度增加 28%；而对石英岩，加载速度达  $21.4\text{m/s}$  时，硬度实际不变。现有的冲击钻进，其冲击速度不超过  $2 \sim 3\text{m/s}$  时，完全可用压入硬度来衡量动载时的岩样。

#### 7. 各向压缩的影响

对大理岩、泥灰岩、白云岩三种岩石作了各向均匀压缩试验，各向压力逐步加至 100 MPa，其硬度的改变见表 1-1-5 所示：硬度增长倍数为  $1.1 \sim 3.6$  倍；硬度愈低者，提高愈快，即硬度小的岩石其加固过程快。

表 1-1-5 各向压缩时的压入硬度

| 指 标         | 各向压力/MPa | 0.1  | 35   | 65   | 85   | 100  |
|-------------|----------|------|------|------|------|------|
| 压入硬度<br>MPa | 大理岩      | 7.9  | 9.6  | 10.6 | 11.6 | 14.6 |
|             | 泥灰岩      | 4.9  | 6.2  | 7.6  | 12.8 | 15.0 |
|             | 白云岩      | 36.0 | 40.7 | 42.1 | 44.8 | 48.5 |

#### 8. 温度的影响

试验表明：加温之初，随温度增加，某些岩石的屈服极限和硬度有所增加，这可能是由于晶体膨胀把原有的裂隙挤死；再继续加热，则由于颗粒之间膨胀系数不同，导致相互之间的联系削弱，使硬度下降之故。此外，由于温度的改变导致矿物晶态的转变（相变）或引起化学上的分解，导致改变颗粒间的结合力，从而改变岩石抵抗工具压入的性能。如  $\alpha$ -石英在  $573^\circ\text{C}$  时转变为  $\beta$ -石英，其强度就下降。

#### 9. 介质的影响

冲洗介质含有不同的电解质和表面活性剂，其物理化学作用机理十分复杂。介质对有

表面和内部缺陷的岩石，作用更快、更大。若用底面积为  $1\text{mm}^2$  的压头试验卵石，在试验前岩样在各种介质中浸泡 1h，其结果见表 1-1-6。

表 1-1-6 冲洗介质对压入硬度的影响

| 不同介质<br>指标 | 蒸馏水     | 同下样比较降低的百分率，/% |             |       |             |         |       |
|------------|---------|----------------|-------------|-------|-------------|---------|-------|
|            |         | 1% 油酸钠         | 0.25% 环烷磺酸钠 | 非极性煤油 | 含 1% 脂肪酸的煤油 | 含氧化物地下水 | 碱性地下水 |
| $P_k$      | 15 ~ 17 | 26             | 19          | 6     | 8           | 15      | 5     |
| $P_0$      | 7 ~ 11  | 9              | 15          | 0     | 1           | 11      | 18    |
| $K_a$      | 48 ~ 55 | 62             | 58          | 11    | 29          | 49      | 47    |
| $A_s$      | 64 ~ 70 | 80             | 73          | 14    | 30          | 65      | 63    |

上表说明：介质对硬度  $P_k$  的降低，要比对屈服强度极限  $P_0$  强烈；对塑性系数  $K_a$  和单位面积接触功  $A_s$  降低也很大。介质也能降低岩石显微硬度，但应有通道。故介质对石英、燧石等坚硬岩石，几乎无影响。

### 三、测定岩石硬度的方法

岩石硬度的测量方法很多，分静载法和动载法两大类，现将常用的方法简述如下。

#### (一) 静载法测量岩石（矿物）的硬度

##### 1. 矿物的摩氏硬度

用十余种矿物为代表，顺序为：滑石、岩盐、石膏、方解石、硬石膏、白云石、萤石、磷灰石、长石、燧石、石英、黄玉、刚玉、金刚石，后一个可在前一个矿物面上擦痕，依次硬度增高，故该硬度分十级。在钻探现场，常采用更简单的方法：用指甲（2.5 度），铁刀（3.5 度），普通钢刀（5 度），玻璃（5.5 度），锯条（6 度），锉刀（7 度），硬合金（9 度）等刻划矿物来鉴别其硬度。

##### 2. 显微硬度

其测量方法也有多种。一般都依外载和压痕的面积和深度测定，广泛用于测定金属材料 and 矿物的硬度。由于测量时所得压痕很小（以微米计），因此测定岩石硬度时，只有岩石颗粒小于  $0.01\text{mm}$  时，显微硬度才可以反映岩石的组合硬度。当颗粒大于  $0.01\text{mm}$  时，显微硬度便不能反映造岩矿物的硬度。显微硬度依所用压头和加载数值不同，有如下数种分类：

正角锥（顶角  $136^\circ$ ），加载  $2 \sim 2000\text{g}$ ，是维氏硬度；

棱角锥（锥顶角为  $130^\circ$  和  $172^\circ 30'$ ），加载  $25 \sim 3500\text{g}$ ，是努普硬度；

金刚石角锥（锥角  $120^\circ$ ）加载  $150\text{ kg}$  是洛氏硬度。

##### 3. 压入硬度

因史立涅尔氏对这种硬度研究得比较系统故称史氏硬度。这种硬度以压头压入岩石发生第一次跃进式破碎的压强作为硬度指标。为了测出这种硬度，要先做出载荷-侵深曲线。可在压力机上读出载荷，在千分表上读出侵深，并逐点绘出曲线，以发生跃进时的载荷  $P_1$  除以压头端面积  $S$ ，便得到压入硬度（图 1-1-5）。

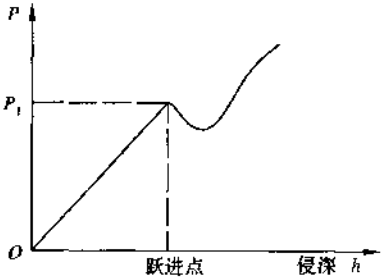


图 1-1-5 载荷-侵深曲线

史氏规定压头端面积  $S = 1 \sim 3 \text{ mm}^2$ ，只对多孔性的岩石采用  $5 \text{ mm}^2$  的压头。岩石表面事先要磨平。常用符号  $P_m$  表示史氏硬度，单位为  $\text{kg/mm}^2$ ，即  $P_m = P_1/S$ 。

载荷-侵深曲线均采用自动绘制，方法是在压头上贴应变片，将压力转换成电量，经动态应变仪放大后，通到 X-Y 记录仪的 Y 轴上；同时，用位移传感器将侵深也转换成电量，通到 X-Y 记录仪的 X 轴，逐渐增加压头上的载荷，曲线便自动绘制出。

我国自行设计的 WYY-1 型硬度计，就是用于测量压入硬度的。

#### 4. 研磨硬度

通过岩样与金刚砂圆盘表面的研磨，便获得研磨硬度，并可通过下式计算：

$$H = \frac{100S\gamma}{P_1 - P_2} \text{ cm}^{-1}$$

式中： $S$  为磨损面积， $\text{cm}^2$ ； $\gamma$  为岩石容重， $\text{g/cm}^3$ ； $P_1$ 、 $P_2$  为磨损前后相应的岩样重量， $\text{g}$ 。

#### (二) 动载法测量岩石（矿物）的硬度

动载法测量硬度的方法有很多种，现简述几种常用的。

##### 1. 肖氏硬度

这是国内外流行的动载测量硬度的方法，一般多用于测试金属材料。它是以小钢球或带球形金刚石的顶头的冲锤，向磨光样品面上落下，以回跳高度（mm）作为硬度的指标。若用钢球，一般取球重  $2.5 \text{ g}$ ，下落高度为  $254 \text{ mm}$ 。

##### 2. 摆球硬度

我国地质部勘探技术研究所设计了摆球式硬度计，它是以摆动的钢球冲击岩石，在此过程中，由于能量的转化与消耗，钢球要回跳一定的角度。每次回跳的角度随着能量的消耗逐渐减少直至停止。用测量的回跳角度和回跳次数  $N$  来表示岩石的硬度（表 1-1-7）。

表 1-1-7 回跳次数

| 岩样等级     | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10       | 11        | 12    |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-------|
| 回跳次数 $N$ | 15 ~ 29 | 33 ~ 44 | 45 ~ 54 | 55 ~ 64 | 65 ~ 74 | 75 ~ 84 | 85 ~ 94 | 95 ~ 104 | 105 ~ 124 | > 125 |

试验用的岩样一般是圆柱形，直径为  $58 \sim 90 \text{ mm}$ ，长度  $\leq 65 \text{ mm}$ （或  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的立方体），两端平面应平行，受试的一面需磨光。

##### 3. 动硬度

它是利用冲击架或摆架形成自由落体，给岩样面加以冲击载荷，使岩样表面形成局部破碎穴，从而确定岩石的力学性质。

冲击能量可以通过改变冲击高度或冲锤的重量来调节。冲锤可直接作用于岩石面上，也可以通过放置在岩样面上的中间“冲模”作用于岩石面。冲模的形状一般多采用平底圆柱形。

动硬度的指标可以是冲锤的回跳高度、冲击时形成破碎穴的极限载荷等。

### 第三节 岩石的弹性、塑性和脆性

岩石受外力作用产生变形，外力撤除后变形也随之消失，这种性质称为弹性。如外力

撤除变形不能消失的，称为塑性变形。脆性则是指岩石受应力破坏而无明显塑性变形者。

对于岩石来说，由于矿物组成、结构方面的特点等，它们在静载荷作用下所发生的变形，都遵守虎克定律。

岩石在静载荷压头压入时的形变曲线，如图 1-1-6 所示。图 a 为脆性岩石的形变曲线（石英岩）；b 为塑脆性岩石的形变曲线（大理岩）；c 为高塑性和多孔隙岩石的形变曲线。

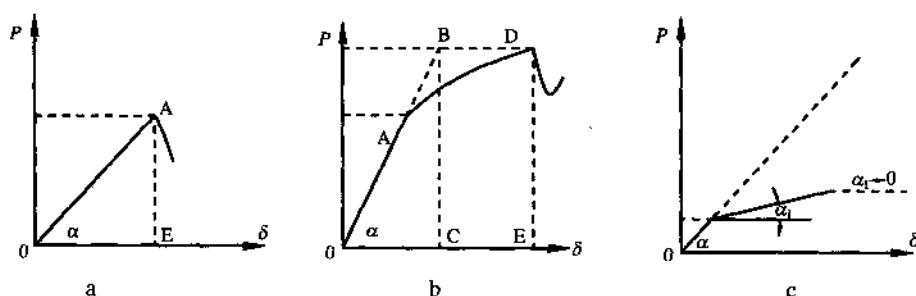


图 1-1-6 岩石的形变曲线

岩石的弹性指标有：弹性模数  $E$ ，泊松系数（泊松比） $\mu$  和剪切弹性模数  $G$ 。岩石的塑性则经常用塑性系数  $K$  来表示。

## 一、影响岩石弹性的因素

影响岩石弹性指标的自然因素主要有：矿物成分，颗粒尺寸，岩石的结构及构造，岩石的孔隙度等。

造岩矿物的弹性模数，在本质上影响着岩石的弹性模数，如果造岩矿物具有高的  $E$  值，则岩石也具有高的  $E$  值。但岩石的弹性模数不会超过造岩矿物的弹性模数，这是因为弹性模数的大小主要取决于相互作用的分子力；而岩石中沿矿物颗粒接触界面的相互作用的分子力，通常小于矿物颗粒内部相互作用的分子力。对于沉积岩，弹性模数决定于岩石的碎屑和胶结物以及胶结状况，在胶结物和胶结状况相同的情况下，碎屑颗粒的弹性模数大，则岩石的弹性模数也大；在碎屑颗粒成分相同情况下，胶结物为硅质者，岩石的弹性模数最大，胶结物为钙质者次之，胶结物为泥质者最小。

同样，造岩矿物的颗粒度，对弹性模数也有很大影响：细粒岩石的弹性模数大于粗粒的，如细粒砂岩  $E = 3000 \text{ kg/mm}^2$ ；而粗砂岩  $E = 2770 \text{ kg/mm}^2$ 。

层状岩石的弹性模数，主要取决于作用力相对于层理的方向，一般平行岩石层理方向的弹性模数  $E_{\parallel}$  大于垂直岩石层理方向的弹性模数  $E_{\perp}$ ，如泥质页岩  $E_{\parallel}/E_{\perp} \approx 2$ ；砂岩或粉砂岩  $E_{\parallel}/E_{\perp} \approx 1.2 \sim 1.4$ 。这是由于颗粒定向排列的缘故。沿平行层理方向加载，虽然强度不大，但弹性限度内加载时形变较小，故  $E_{\parallel} > E_{\perp}$ 。

岩石在被水（或石油）浸湿后，其弹性模数均显著下降。如把泥岩的湿度从 3% 提高到 14%，则弹性模数从  $7300 \text{ kg/mm}^2$  下降到  $3200 \text{ kg/mm}^2$ 。

岩石的孔隙度增加，则岩石的弹性模数降低。

影响岩石弹性模数的技术因素，主要是变形的种类和施加载荷的性质。

岩石受压缩时颗粒被压缩，故压缩时的弹性模数是拉伸时弹性模数的 1.5 ~ 4 倍。同理，弯曲时的弹性模数是拉伸时弹性模数的 1.1 ~ 1.3 倍。

弹性模数与载荷性质（静载还是动载）有关，动载下的弹性模数（ $E_d$ ）大于静载下的弹性模数（ $E_j$ ），其比值约为1.2~1.5。表1-1-8列出几种岩石的 $E_d$ 和 $E_j$ 的比值。

泊松系数 $\mu$ 是纵向形变和横向形变之比值，是一个无量纲数值。岩石的泊松系数在很大范围内变化（0.1~0.45）；但大多数岩石的泊松系数的平均值接近于0.26。

表 1-1-8  $E_d$  与  $E_j$  的比值

| 岩石名称   | $E_d/E_j$ | 岩石名称    | $E_d/E_j$ |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 石英质页岩  | 1.33      | 粉砂岩     | 2.05      |
| 石灰岩    | 1.7~1.86  | 黑云母片岩   | 1.48      |
| 绢云片岩   | 2.36      | 阳起片岩    | 1.90      |
| 微风化花岗岩 | 2.75      | 粗面岩     | 1.16      |
| 亚砂岩    | 2.90      | 假象纤闪玄武岩 | 1.33      |
| 钙质页岩   | 2.56      | 角闪片岩    | 1.06      |

## 二、影响岩石塑性的因素

影响岩石塑性变形的因素，也分为自然因素和技术因素两大类。

岩石的塑性不仅与组成岩石的矿物的塑性有关，而且更重要的是取决于岩石内部的结构，晶粒的大小和形状，晶粒间相互作用力的性质，胶结物的组成等。

由于造岩矿物的塑性不很明显，所以岩石的塑性形变主要取决于晶粒间的滑移。多晶体岩石具有较大的塑性，这是由于晶粒间滑移能力较强的缘故。

水侵入岩石或岩石的湿度增加，岩石的塑性也增加。这是因为水实际上不仅能顺岩石颗粒接触处侵入，而且也可以顺解理面而侵入，这就增大了沿解理面滑移的可能性。如粘土之所以塑性高，主要是由于水顺着解理面和泥质矿物间接触处侵入粘土的结果。

影响岩石塑性、脆性的技术因素，主要有载荷性质和应力状态。同一种岩石，例如大理岩，低速加载时，表现为塑性体；而在高速载荷（冲击）作用下，则表现为脆性体。

根据固体力学理论，岩石形变时的性质可表示为：

$$\sigma = E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt}$$

式中： $\sigma$ 为应力； $E$ 为弹性模数； $\epsilon$ 为形变； $\eta$ 为粘滞系数； $t$ 为载荷作用的时间。

当载荷速度增大，则作用时间减小，式中第二部分增大，岩石的应力很快接近或超过强度极限，发生脆性形变；当缓慢加载时，应力增长较慢，便产生塑性形变。因此，岩石随加载速度增大，塑性降低，岩石由塑性体转为脆性体。图1-1-7是冲击速度对岩石塑性系数 $K_p$ 的影响，由图可以看出，随着冲击速度的增加，岩石的塑性系数降低。

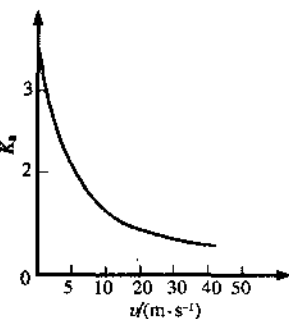


图 1-1-7 冲击速度对岩石塑性系数  $K_p$  的影响

## 三、岩石弹性、塑性的测量

### （一）岩石弹性指标的测定

#### 1. 利用压头压入法

试验装置和用压头法测定岩石压入硬度时相同。利用所得的形变曲线，可以大致得出