

56.7
176

岩石力学的物理基础

〔苏联〕Л. А. 史立涅尔 著

朱德懿 等 译

中国工业出版社

本书叙述了矿物和岩石的机械性质，以及在各种应力状态下，特别是在各个压缩下的性质。书中还专门探讨了钻井时岩石的破碎过程以及各种因素对钻速和切削工具磨损的影响。在翻译过程中，译者曾根据原作者的意见，并参考有关文献，对原书作了一些补充与修改，因此这个译本的内容是包括了近年来岩石力学方面的发展结果和新的成就的。

本书供工矿企业中及石油系统的钻井工程技术人员阅读，也可供地质勘探人员参考。

Л. А. ШРЕЙНЕР

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД
根据苏联国立石油燃料科技书籍出版社(ГОСОПТЕХИЗДАТ)

1950年列宁格勒版翻译

* * *

岩石力学的物理基础

朱德懿 等译

(根据石油工业出版社纸型重印)

*

石油工业部石油科学技术情报研究所图书编辑室编辑(北京北郊六铺炕)

中国工业出版社出版(北京修门内大街10号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $6^{3/16}$ · 字数 165,000

1957年9月北京第一版

1962年7月北京新一版·1965年1月北京第二次印刷

印数 671—1,790 · 定价(科六) 1.00 元

*

统一书号: 15165 · 1553(石油-104)

中 譯 本 序

本書是苏联技术科学博士 Л. А. 史立涅尔教授著的，于 1950 年由苏联国立石油燃料科技書籍出版社出版。此書最早由北京石油学院朱德懿同志翻譯成中文，其中部分譯稿經樊世忠同志校閱过。后来通过石油工業部干志坚同志和史立涅尔教授取得联系，征求他对本書出版成中文的意見。原作者認為在翻譯本書时，应根据近几年来岩石力学方面的發展和新的成就，对原書內容作适当的修改和增刪，并提出了具体意見。以后，在于志坚同志指导下，由北京石油学院黃荣樽（編校第五、六、七、八、十五、十六、十七章）、曹曉声（編校第一、二、三、四、九、十、十一章）、王天佑（編校第十二、十三、十四章）等三位同志按原作者意見对譯稿进行了編校，最后經干志坚同志审閱定稿。

書中內容改动較多的部分有：岩石按机械性質的分类、牙輪鑽头破碎岩石的机理，若干因素对鑽井速度影响的規律性，破碎岩石的能量以及岩石可鑽性等。改动部分基本上采用了原作者本人及其同事們在科学研究上的公开或即將公开发表的資料。

本書在編校时亦參考了材料力学、彈性力学等方面的書籍；在所有改动处都註有見参考文献某条（即註有“[×]”的字样），以便讀者查閱。

由于時間及其他客觀条件的限制，譯稿未經原作者校閱，故改动部分的文責由編譯校审者自負；同时，我們在这門科学方面水平有限，錯誤在所难免，希学术界同志不吝指正。

朱德懿 黃荣樽 曹曉声 王天佑

原 序

“岩石力学問題”(“Вопросы механики горных пород”)一书是1945年苏联国立石油燃料科技书籍出版社出版的。在那篇幅不大的书中，作者很粗略地叙述了钻井时岩石破碎过程的力学，没能完善地和系统地叙述有关破碎过程的力学的全部問題。

作者试图在本书中，阐明岩石在各种应力状态下，特别是钻井时最典型的应力状态下破碎过程的全部問題。然而这些問題叙述的詳尽程度是有差別的，因为有些問題有足够的实验資料，所以討論得詳細些，而另外一些問題，往往也是实际上更为重要的問題，却叙述得特別簡略，特別是第四篇。但是，这一点不应只归咎于作者，而主要是由于缺乏必要的实验資料，使得作者对很多問題不能作深入的考察。

试图把零散的实验結果汇总成比較統一而完整的体系，免不了会有很多的缺点；尽管如此，作者仍希望本书不仅对钻井方面的专家有益，而且对于业务上与岩石及一般脆性体的使用和加工有关的人們也有所帮助。

编写本书时，作者力求尽可能較全面地运用苏联在研究固体机械性质及其破碎过程方面的科学成就。在苏維埃政权的年代里，这一科学領域在苏联已經得到了特別巨大的发展。以苏联科学院院士A.И.約飞、П.А.列宾捷尔和苏联科学院通訊院士B.Д.庫茲涅佐夫为首的科学工作者們，以及苏联其他許多优秀科学家們，曾經成功地研究了和正在研究着这方面的問題。

直接与钻井有关的部分，我們必須要提到M.М.普罗多特雅科諾夫教授和H.C.烏斯賓斯基教授的著作，因为这些著作在当时曾經大大地促进了在这方面的科学发展。在现代钻井研究者的著作中，作者部分地应用了B.C.費德洛夫和E.Φ.埃普施金等人

的著作。

最后要談一談本书书名的問題。对于有些书籍來說，很难选择一个确切的、同时与其内容完全相当的名字。此外，人們通常又把岩石力学理解为比較狹窄的主要是有关矿山作业中岩石坚固性的問題，但本书重点却在于钻井时的岩石破碎过程。

目 录

中 譯 本 序

原 序

第一篇 固体形变时的物理现象

第一章 固体的物理性質	1
1. 固体的結構和固体內的互作用力	1
2. 固体的理論強度	7
3. 多晶体內顆粒間的联結力	11
第二章 彈性力學的基本概念	12
4. 概述	12
5. 外力	13
6. 应力	14
7. 一定点的应力情况	15
8. 主应力和主軸	16
9. 应力橢圓体	17
10. 三維应力状态的圖示法	18
11. 应变	20
12. 虎克定律	21
第三章 固体的机械性質	22
13. 固体的变形	22
14. 塑性	24
15. 流动性	27
第四章 強度理論	29
16. 極限应力状态	29
17. 最大正应力理論和最大应变理論	31
18. 最大剪应力理論和莫尔理論	32
19. 能量理論	34

第二篇 岩石及其机械性質

第五章 岩石	37
--------------	----

20.	岩石的成分	37
21.	最主要的造岩矿物	37
22.	岩石的結構和構造	41
23.	晶質岩石和非晶質岩石	46
24.	碎屑岩	48
第六章	岩石的机械性質	50
25.	岩石的彈性	50
26.	各种应变下岩石的强度	53
27.	岩石强度与顆粒綫性大小的关系	54
28.	岩石体重与其强度的关系	55
29.	几种主要岩石的抗压强度	56
第七章	各向压縮情况下岩石的机械性質	59
30.	各向压縮情况下岩石的性質	59
31.	岩石的压縮性	60
32.	各向压縮情况下岩石的强度	64
33.	矿物的塑性	65
34.	岩石的塑性	67
第八章	介質对岩石机械性質的影响	72
35.	引言	72
36.	潤湿和吸附	73
37.	被吸附層傳播的机理	74
38.	水侵入岩石后岩石强度的減低	76
39.	介質对岩石的彈性常数以及蠕滑的影响	77
	第三篇 压入情况下的基本破碎过程	
第九章	压入情况下的应力状态	80
40.	鑽井时岩石中的应力状态	80
41.	布西尼司克和海尔茨問題	81
42.	球体压入时的应力状态	85
43.	圆柱体沿母綫压入平面时的应力状态	87
44.	压模和截头稜柱体压入平面时的应力状态	89
第十章	压入情况下的破碎机理	92
45.	球体的压入	92

46. 圆柱形刚性压模的压入	95
47. 圆锥体的压入	100
第十一章 硬度及其量测方法	104
48. 硬度的概念	104
49. 用球体压入的硬度测定法	105
50. 用锥体压入的硬度测定法	106
51. 用球体动压入的硬度测定法	110
52. 硬度标	113
53. 用圆柱形压模(冲头)压入的硬度测定法	116
54. 根据岩石的机械性质对岩石的分类	118
第四篇 鑽井时的岩石破碎过程	
第十二章 鑽井时岩石破碎的机理	123
55. 用切削型鑽头鑽井时岩石的破碎情况	123
56. 頓鑽鑽井时岩石破碎的情况	125
57. 牙輪鑽头鑽井时岩石破碎的情况	127
58. 研鋼砂鑽井时岩石破碎的情况	130
59. 鑽井时破碎物的粉碎程度	132
第十三章 鑽井时岩石破碎的速度	136
60. 岩石的表面破碎和体积破碎	136
61. 鑽速、鑽压和岩石硬度的关系	139
62. 鑽速与鑽头轉数的关系	143
第十四章 破碎过程的力能学	149
63. 物理的破碎效率	149
64. 黎金格尔定律和相似定律	151
65. 鑽井时的体积破碎功与鑽压的关系	152
66. 鑽井时体积破碎功的大小	157
67. 与复杂破碎过程有关的硬度量测方法	163
第十五章 鑽头的磨損和鑽头的总进尺	167
68. 摩擦和表面磨損	167
69. 切削工具的磨損与岩石硬度的关系	170
70. 切削工具的研磨性磨損	172
71. 鑽头的总进尺	175

第十六章 介質对岩石破碎过程的影响	178
72. 脆性体破碎过程中被吸附質的作用机理	178
73. 鑽井时加速岩石破碎过程的硬度減低剂的运用	182
74. 硬度減低剂的种类	184
第十七章 实际运用	186
75. 按岩石机械性質作油田剖面的方法	187
76. 可鑽性	188
77. 鑽井效率与鑽压和轉数的关系	191
78. 合理的鑽井時間	192
結束語	196
参考文献	197

第一篇 固体形变时的物理现象

第一章 固体的物理性质

1. 固体的结构和固体内的相互作用力

用 X 射线照相来研究固体，能够准确地确定固体的内部结构。这样的研究，大体上证实了早已有的物质晶态与非晶态的概念。

大家知道，晶态的主要特性是质点——离子、原子或者分子——在空间中作几何上有规律的排列。晶体是按照所谓空间晶格的图形而构成的。所谓空间晶格，就是相同的质点组作周期性的重复排列。这样的一组质点，组成一个晶胞，也就是基本的结构单元。除了质点只排列在平行六面体顶点上的简单晶胞外，还有更复杂的晶胞，其质点同时也排列在平行六面体的体中心或者六面体的面中心上。

单个晶体的大小变化很大。在自然界中，有时会形成庞大的晶体，其线性大小达到一公尺或一公尺以上；而对于某些物质来说，却不曾发现有大于 1μ 的晶体。

晶体的许多物理性质——弹性、强度、导电率和其他性质——具有向量的性质，也就是说，这些物理性质与量度其大小时所沿的晶体内的方向有关，所以晶体属于各向异性物。各向异性是晶格的结构单元(晶胞)在空间依一定次序排列的结果。

非晶体与晶体的区别是：非晶体的结构是没有规律的。然而也不能像过去那样，认为非晶体的结构丝毫没有规律；对非晶体的结构加以详细研究后证明，其质点在空间的排列即使在几何上是沒有规律的，但也还存在着统计规律。根据统计规律，某些排列较其他种排列更有可能。

例如，某些学者認為：玻璃的内部結構也是一种連續的空間晶格，其中質点的排列成規則的幅射狀，而且有方位，但是，这种空間晶格沒有对称性，也沒有週期性。非晶体的物理性質与方向無關，因为在任何方向上，非晶体的物理性質在統計上都是相等的。这样就可把非晶体算作各向同性物。晶体与非晶体的結構是彼此不相同的，它們的机械性質也是不相同的。

在原子概念發展的早期，人們認為物質的固态与鉤形原子彼此鉤接或者鉤形原子間互相交織有关。罗蒙諾索夫第一个成功地發展了近代的固体分子概念，虽然質点間互作用力的性質在不久以前才明确，然而从那时起，人們已把固体的联結归之于質点間的互作用力。

就是根据純粹形狀上的推想，我們也应当假想固体的質点間既有吸引力也有排斥力，結果使整个質点系統平衡。如果質点間沒有排斥力，那末，諸質点就会慢慢靠近以致达到完备的物理接触，我們就不得不認為这种物体是剛体；但是在自然界中，既不存在剛体，也沒有絕對不透体，不管其大小如何。

排斥力随質点間距离改变而發生变化，比起吸引力来应表現得更为劇烈。这样，在質点間距离很近时，排斥力佔优势；反之，則吸引力佔优势。換句話說，拉伸固体时，也就是說增加質点間的距离时，吸引力佔优势；而当固体各向受壓縮时，阻力就由排斥力来决定。

圖 1 是互作用力的合成曲綫。在 r_0 点，質点間的互作用力的合力等于零，同时这个距离相当于互作用力的合力为零时的平衡位置。当距离增加到大于 r_0 时，吸引力会逐渐增大，在 r_m 处吸引力达到最大，以后則开始減小。 $r_m - r_0$ 之值就是質点間距离所能增加的最大值，在这个值內，除去作用力后固体还能回复到稳定的平衡状态。力 P_m 的大小表示質点間的抗断强度極限，例如，当分子內原子間的联結被破坏时，力 P_m 可达到很大的值——大約为 1 000 000 公斤/平方公分。

圖 2 是質点間相互作用能的曲綫。質点間距离等于 r_0 ，且当互

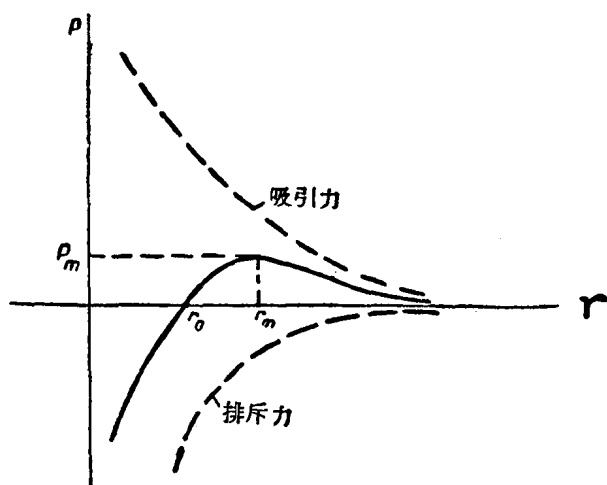


圖 1 二基本質點間相互作用力的合力曲線

作用力的合力等于零的平衡状态时，互作用能是最小。加上拉伸力 P_1 或者压缩力 P_2 后，距离由 r_0 变为 r_1 或者 r_2 时，就必须消耗功 ΔW 。要完全破坏质点间的联结，必须消耗位能最小那点纵坐标所表示的那部分功。

位于物体内部的质点，在力的方面是完全平衡的，而位于物体表面层上的质点是不平衡的。所以，与物体内部的质点相比较，表面层上的质点是具有较大的位能。如果假想有一个晶体被一平面切为两半，同时将这两半分开，则此时所消耗的功，相当于形成两个面积都为 F 的新表面所需的功，等于

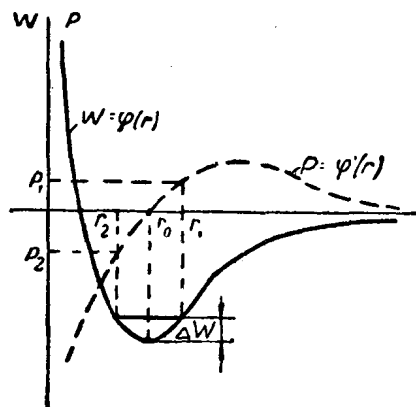


圖 2 互作用能与距离的关系曲线

$2 F \sigma$ ， σ 就是新形成的单位分界面所具有的位能，也称为自由表面能。自由表面能的因次是面积除能量，或者是长度除力，它可

能与固体的抗断强度有关。

在某些情况下，位能可直接由实验求得，而无需借助于有关晶格中作用力的性质的假说；在另外一些情况下，例如对离子晶体来说，就不得不运用间接的方法来求它的位能。

组成固体的基本质点可能是中性质点——原子和分子，或者是带电质点——离子。

对于各种类型的晶格来说，引起相互作用的原因虽然不同，可是就其本性来说，互作用力基本上是具有电的性质的。根据互作用力的特性，可以把所有的晶格分为几类。

在无机化合物中(岩石的矿物颗粒是属于无机化合物)，最大多数的是离子晶体。在这些晶体的晶格结点上，有正的和负的离子相间隔着。质点间的互作用力，主要是由其间的静电吸引力来决定的。这些互作用力的大小与距离平方成反比。

这种晶体的晶格能，可用下列的式子来表示：

$$\varphi(r) = -\frac{e}{r} + \frac{b}{r^n}, \quad (1.1)$$

式中 e ——电荷； r ——质点间的距离。

公式(1.1)的第一项代表吸引能，而第二项是代表由排斥力所产生的那部分位能。

这类晶体的典型代表是岩盐(氯化钠—— NaCl)。在它的晶格结点上，有带正电的钠离子 Na^+ 和带负电的氯离子 Cl^- 。

离子不仅可由单个的原子生成，也可由复杂的复合物生成。例如，方解石 CaCO_3 晶体中的酸根 $[\text{CO}_3]^{--}$ 或者无水石膏 CaSO_4 晶体中的 $[\text{SO}_4]^{--}$ 都可成为离子。

复杂的硅酸盐化合物是离子晶体，而火成岩中绝大部分的矿物又都是硅酸盐。

离子晶体内的联结强度(离子键)决定于静电吸引力。静电吸引力随离子距离的减小而增加，随离子电荷的增加而增大。

表1中列出了离子间距离 r (用 $\text{\AA}$ 表示， $\text{\AA} = 10^{-8}$ 公分)对莫氏硬度 $n[4]$ 的影响。

表 1

原 子	Mg	Ca	Sr	Ba
$O \begin{cases} r \\ n \end{cases}$	2.10 6.5	2.40 4.5	2.57 3.5	2.77 3.3
$S \begin{cases} r \\ n \end{cases}$	2.59 5.0	2.84 4.7	3.0 3.3	3.18 3.0

由表 1 知道：硬度隨离子間距離的增加而減小。

在表 2 中，將离子电荷不等的物質成对地加以比較。

表 2

	LiF	MgO	NaCl	BaO
r	2.02	2.10	2.81	2.77
n	3.3	6.5	2.5	3.3

在表 2 中，虽然所比較的物質中离子間的距離相等，但因离子的电荷不等，硬度也就不等。

原子晶体是为数很少的第二类晶体，在这类晶体的晶格結点上，有中性的原子。这类晶体內的相互作用力具有量子的来源，这类晶体的相互作用力，是由于原子間电子共有的結果。这种联結称为非極性鍵，它使原子間緊靠的程度大于离子鍵。

非極性鍵具有方向性，仅在圍繞原子的一定方向上方能發現它，但此时靜电吸引力与方向却没有显著的关系，而能够傳到所有帶相反电荷的鄰近离子处。

金剛石屬於原子晶体，由于其中碳原子互相离得很近，所以金剛石具有特別高的硬度。

金屬的物理性質与离子和非極性化合物的物理性質差異很大，所以金屬就組成單独的而且是很重要的一类固体。金屬內的全部价电子，不仅屬於鄰近的原子（如在通常的原子晶体情況下

那样)，而且是屬於整个晶体的，这样就造成了电子气，而帶正电的金属离子和原子就处在电子气中。金属中的質点間的相互作用，比在离子晶格和原子晶格中复杂得多。

固体質点接近时，相互極化而产生的那种相互作用是最弱的。質点相互極化时，正負电荷要發生移动，中性原子或者分子就变为具有电力偶的質点，因而吸引力显得非常微弱，它們不管距离大小会很快地減小的。这种互作用力叫范德华尔司力，而与之相当的晶格叫做分子晶格。很多有机化合物都是分子間鍵，所以有机化合物是一种不坚固的晶体。

在离子晶体中，我們應該区分开層狀晶格，層狀晶格的層面內是离子晶格，層間是分子晶格。这种晶体（如粘土質矿物微晶高嶺土）最容易沿着与層面相平行的平面破裂。在其他薄片狀矿物——云母和滑石中，層与層間有金属离子联結时則較坚固。

我們所講的只是不同晶格中的主要互作用力。实际上，在我們所研究的每一类晶体中，都同时存在着不同性質的互作用力。例如离子晶体中的互作用力，不仅是由靜电吸引所产生，而且由于周圍离子的作用，会有很大的極化力。

离子晶体和其他晶体的互作用力，通常随价鍵的增加而增大。圖3是費尔斯曼著作[14]中的圖表，依据原子价而总計出了260种最主要矿物硬度（莫氏标度）的資料。在这个圖表上，用寬度有变化的实綫来表明原子价与硬度的关系。虛綫表示在該原子价下具有表列硬度的矿物是稀少的。綫的寬度表示相应矿物的数量。这个圖表很清楚地說明了原子价对硬度大小的影响。

結晶水对晶体內鍵的强度有很大的影响。若化合物中含有結



圖 3

晶水，則因水分子能分开晶格，鍵的强度就要大大地減弱。晶格中的水分子数愈多，則其强度就愈小。我們举硫酸鈣为例， CaSO_4 是無水石膏， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 是石膏，石膏中有了結晶水会使石膏的强度降低一半多。

比較化学成分相同的晶体与非晶体結構时知道；非晶体原子間的距离較大，因此非晶体的鍵的强度也較小。許多天然的和人工的玻璃都会逐漸地失去玻璃的性質，开始結成纖維狀晶体，然后又結成顆粒狀晶体。这都是因为非晶态在热力上是不穩定的。

2. 固体的理論强度

至目前为止，很多晶格的理論抗断强度已算出来了。表 3 列出了某些晶体的理論抗断强度和脆性断裂时的实际强度。

由表 3 知道，理論强度超过实际强度几百倍，甚至几千倍。應該指出：塑性物（ α 鉄）的理論强度超过实验强度几千倍，而脆性（石英）的理論强度只超过实验强度几十倍。

这种理論强度与实际强度数值間的巨大差別，引起了人們很大的注意。关于实际晶体强度較小的原因，有很多的假說，但是基本上就是把实际晶体与理想晶体加以对比，因为实际晶体的强度很小是与其結構中的某些缺陷有关，例如，結構中有很細的裂縫（表面的和体积的），被減弱的鍵的存在，以及結構的鑲嵌性等

表 3

晶 体	抗 断 强 度		
	理論强度 公斤/公厘 ²	实际强度 公斤/公厘 ²	理論强度与实 际强度之比
α 鉄	1350	0.30	4500
鋅	360	0.18	2000
岩 鹽	200	0.5	400
石 英	1000	11.6	90