

高等学校教学用书

岩石力学和矿井支护

(講義)

北京礦業學院井巷工程教研組譯校

燃料工業出版社

25224
15
高等學校教學用書

岩石力学和礦井支護

(講義)

北京礦業學院井巷工程教研組譯校

燃料工業出版社

081170

本書是北京礦業學院蘇聯專家列·尼·納索諾夫同志爲該院礦井建設系教師和研究生講授「岩石力學和礦井支護」課程的講義。作者在講義中列舉並分析了蘇聯學者和采礦工作者在本課程方面的理論成就和現場的實際經驗，因此本書對於我們今後採礦科學研究方向和生產技術革新具有很大的指導意義。

本書分爲兩部分：第一部分論述岩石力學，闡明了岩石的物理機械性、岩石露出面的穩定性、地壓和巷道的維護方法；第二部分論述礦井支護，主要內容爲討論支架材料、支架種類、支架計算、支架結構以及支架應用範圍和現場施工等問題。

本書可作大、專學校的教材，並適於煤礦工程技術人員和設計人員參考。

本書是由北京礦業學院井巷工程教研組鄒翊微、周文安和王其邁等同志共同譯校的。

岩石力學和礦井支護（講義）

北京礦業學院井巷工程教研組譯校

燃料工業出版社出版（北京前門外大街26號）

北京市書刊出版業營業登記證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：盧冠斌 校對：劉露漢 徐小芝

書號607·煤245

850×1092 $\frac{1}{2}$ 開本*64頁*15千字*定價(8)一元零九分

一九五五年十二月北京第一版第一次印刷(1—2,100冊)

目 錄

緒 言

第一部分 岩 石 力 学

第一篇 岩石力学基礎知識

第 一 章	岩石力学概論	8
第 二 章	岩石的物理机械性	8
第 1 節	岩石——力学研究的对象	8
第 2 節	岩石的密度	10
第 3 節	岩石的彈性、塑性和其他性質	13
第 4 節	岩石的碎脹性	17
第 5 節	鬆散性岩石	19
第 6 節	有內聚力的岩石	21
第 7 節	流砂性岩石	23
第 8 節	岩石的强度	24
第 三 章	岩石露出面的穩定性	25
第 1 節	未經開採的整体岩層的应力狀態	25
第 2 節	斜坡的穩定性	32
第 3 節	塌落底的形狀	32
第 4 節	斜坡幾何要素間的關係	33
第 5 節	地下巷道露出面的穩定性	34
第 四 章	地压	39
第 1 節	概述	39
第 2 節	水平巷道(不包括回採巷道)的地压	42
第 3 節	垂直巷道的地压	52
第 4 節	傾斜巷道的地压	60
第 5 節	巷道較深時岩石压力所產生的動力現象	60
第 6 節	地压的測量法	63

第二篇 巷 道 的 維 護

第 五 章	巷道維護 概論	64
第 六 章	巷道斷面及其穩定性	64
第 七 章	礦柱及保安礦層	66

第二部分 礦井支護

第三篇 支架材料

第八章	支架材料概論	70
第九章	木材	72
第1節	對木材支架的要求	72
第2節	木材的分類	73
第3節	礦場上的木材場	74
第4節	木材(支架)在礦井裏的使用期	75
第5節	木材的防腐	76
第十章	膠結材和灰漿	78
第十一章	混凝土	81
第十二章	石材	81

第四篇 水平巷道的支護

第十三章	水平巷道支護概論	82
第十四章	木材支架	84
第1節	概述	84
第2節	棚子	86
第3節	其他型式的支架	87
第4節	加強木材支架	88
第5節	形狀不規則的棚子	92
第6節	可縮性的形成	95
第7節	木支架各構件的接合法和支護工作的施工	96
第十五章	金屬支架	103
第十六章	石材支架和混凝土支架	110
第1節	概述	110
第2節	拱	112
第3節	牆	117
第4節	基礎	119
第5節	拱、牆和基礎的疊砌工作	120
第6節	噴射混凝土(水泥漿抹面)	124
第十七章	鋼筋混凝土支架	125
第十八章	混合支架	131
第十九章	可縮性支架	134
第1節	木材支架和金屬支架	134
第2節	石材支架	135

第 3 節	絞接支架	137
第 20 章	水平巷道連接處和交叉處的支護	141
第 1 節	兩個水平巷道的連接法和交叉法	141
第 2 節	兩個平頂巷道連接處和交叉處的支護	143
第 3 節	兩個拱形頂板巷道連接處和交叉處的支護	145
第 4 節	十字形拱的砌築法	147
	第五篇 垂直巷道（豎井）的支護	
第二十一章	垂直巷道支護概論	148
第二十二章	豎井掘進和支護方案	150
第二十三章	木材支架	152
第二十四章	金屬支架	160
第 1 節	概述	160
第 2 節	井框支架	161
第 3 節	金屬圈懸掛支架（臨時支架）	163
第 4 節	支架計算	163
第 5 節	金屬節片支架	165
第二十五章	石材支架和混凝土支架	170
第 1 節	井壁	170
第 2 節	壁基	171
第 3 節	施工	175
第 4 節	進行支護工作的設備	177
第 5 節	豎井井頸的支護	180
第 6 節	豎井井筒與井底車場連接處的支護	183
	第六篇 傾斜巷道的支護	
第二十六章	傾斜巷道支護概論	185
第二十七章	平頂支護	186
第二十八章	拱頂支護	188
	第七篇 回採巷道的支護	
第二十九章	回採巷道支護概論	190
第三十章	木材支架	191
第三十一章	金屬支架	195
第三十二章	可移動的成套金屬支架和可移動的機械化金屬掩護支架	197
	岩石力學和礦井支護習題	200

緒 言

我們大家開始研究一門最重要的課程——[岩石力學和礦井支護]，這門課程對於我們的事業有直接的關係。

礦井支護就是爲了進行生產而保持井巷安全的各種措施的總稱。在這些措施中，居於主要地位的就是礦山支架，它是一種特殊的結構物，可以防止井巷遭受圍岩變形的危險。

必須指出：很難遇到不用這種結構物的井巷，即很難遇到不用支架的井巷。

礦井支架的主要作用，在於造成井巷中工作人員的安全條件。它有着很大的經濟意義，比如說，支架的成本常常佔主要巷道成本的25—30%或更多，佔採礦成本的10—25%。

礦山支架應當滿足一系列的要求，其中最主要的是技術方面的要求：如強度、穩定性、剛性或可縮性等。假如恰如其分地進行支架的計算，那麼支架就能夠滿足這些要求。進行支架的計算，首先應該考慮到支架所處的條件。在很多情況下，這些條件都是由圍岩的變動來決定的。

在開掘巷道時，原來未經採動過的岩石整體的平衡狀態就要遭到破壞。在巷道中的岩體露出面就要發生變形。在這種情況下，常與變形相伴而發生岩石塊墜落或塌陷現象。爲了防止這種危險現象，就要安設礦山支架。它可以阻止上述變形的出現，因爲它承受着從圍岩方面來的壓力。這種壓力叫做作用於礦山支架的岩石壓力，或簡稱地壓。在這樣條件下，我們要計算礦山支架應當用在地壓的方向、大小和分佈。

開採有用礦物礦體時，研究岩體中力學方面現象的學問叫做岩石力學。

在岩石力學中所研究的對象是：岩石的物理機械性、井巷穩固的條件與地壓。

〔岩石力学〕及〔礦井支護〕是彼此密切联系着的科目。應該先研究〔岩石力学〕，然後再研究〔礦井支護〕。

在現代的採礦方法中，地壓的控制問題具有特別重要的意義。這些問題是非常繁多的，在很多方面也是非常複雜的；從總的方面來看，這些問題構成了所謂地壓控制問題的內容。在現在以前，人們對這些問題已經作過很多研究，然而在很多方面還需要作更廣泛的研討。

大約在四五十年前，上面所指出的問題還不像今天那麼現實，甚至可以說，當時這個問題還不存在。採礦工作主要是利用體力勞動；工作面的寬度很小，特別是採煤工作面；因此，圍岩露出面不大，總的說來地壓也就不太大。

現在採煤工作機械化了，自然需要有長的工作面。所謂長壁工作面的長度，實際上可達百公尺。頂板露出很大面積。因此就有大量岩石發生移動。在作計劃時，地壓的大小有很大的意義，為了不讓地壓發展到很大的數值，所以要調節它。因此，就產生了控制地壓的問題。

〔岩石力学〕一課將提供給我們控制地壓的科學論據。至於控制地壓的技術問題，將在〔採礦方法〕一課中加以充分的闡述。

很多的生產上的因素，在控制地壓方面，都有很大的意義。其中礦井支架起了很大的作用。

因此在這種情況下〔岩石力学〕的問題和〔礦井支護〕的問題是緊密地联系在一起的。

〔岩石力学〕和〔礦井支護〕的發展是和採礦科學的發展息息相關的。岩石力学的發展，在十九世紀的中葉已經開端了。當時的俄羅斯時代採礦科學和以後的蘇維埃時代的採礦科學都起了特別顯著的作用。

採礦科學是作為一門實用的知識而發展起來的，在這裏，我們可以看到很多十九世紀中葉以後的學者如 И. А. 基米，Г. А. 基米，Г. Д. 羅曼諾夫斯基，Г. Я. 朵羅申科，А. Д. 闊斯托夫斯基等，

都在將採礦工程納入真正科學的正軌方面做了許多工作。他們工作的結果給本世紀初葉出現的俄羅斯的後一代採礦學者們，在研究採礦科學的各方面，打下了成功的基礎。這些後一代的採礦學者是：B. M. 博基，M. M. 普羅托吉雅可諾夫，A. M. 捷爾比戈列夫，П. M. 秦巴列維奇，和B. Д. 斯列薩廖夫等。

在上世紀，礦井支護的問題還未達到系統化而成爲一門統一的課程。A. И. 烏乍提斯在他所編的一冊俄文採礦工程課本中，在敘述採礦方法時，對這些支護問題已經有了初步的研討，而該書係出版於一百年前(1843年)。然而，在1880年，Г. Я. 朶羅申科在他所著的「採礦工程師與技師在採礦工作方面的參考書」中，對礦井支護的有關問題，更有了較爲詳盡的研究。很多關於礦井支護資料的系統化的發現以及有關分類及名詞上的問題，在該書中都獲得了闡明，而且在各方面迄今仍然有效。

在本世紀初，M. M. 普羅托吉雅可諾夫教授更詳細地研究了礦井支架的問題。他在自己的碩士論文「岩層對於礦井支架的壓力」中，創立了自然平衡拱的理論，並指出了拱內的岩石重量就是作用在礦井支架上地壓的大小。他還研究出一些很簡單的計算公式，用這些公式計算所得的結果都非常接近於經驗上的數據。於是，這些公式在參考書中和在各項實際計算工作中都逐漸地獲得了廣泛的應用。特別是有了關於岩石強度的指標(岩石強度係數)，這個指標在計算採礦工程及地壓問題時具有很大的意義。甚至到現在，在計算中也要常常用到這個係數和M. M. 普羅托吉雅可諾夫的理論。M. M. 普羅托吉雅可諾夫的地壓理論就是根據自然平衡拱的概念研究出來的，這個理論是應用於決定水平巷道頂板方面的穩定地壓的，它可以解釋和近似地計算用窄面掘進法開掘不寬的準備巷道和採煤巷道中的地壓。

現在，地壓問題已經成爲很迫切的問題了，所以蘇聯科學研究院的工作人員和礦業學院的科學研究人員都在研究地壓的問題。

現在，在高等礦業學院內，除了研究教學計劃中其它課程

外，我們的任務就是來仔細地研究「岩石力学和礦井支護」這門課程。爲了能用採礦工程方面的方法与科学知識來充实自己以便成爲向社会主义、共產主义道路前進的積極參加者，我們研究這門課程是非常必要的。

對於「岩石力学和礦井支護」一課的學習，我們準備一共用72小時，其中包括講課、課堂實習、課堂討論以及課堂練習和實驗。

以本書作爲主要教材，另以Г. М. 秦巴列維奇教授所著的「岩石力学」（苏联煤礦技術出版社1948年原文版），和「礦井支護」（苏联煤礦技術出版社1951年原文版）作爲參考書。除此之外，我還希望大家常常閱讀「煤」、「礦業雜誌」和「煤礦工長」等定期刊物，因爲這些定期刊物常常登載和本課有關的一些文章，可供大家做獨立研究工作的參考。

第一部分 岩石力学

第一篇 岩石力学基礎知識

第一章 岩石力学概論

岩石力学是在開採有用礦物礦体時，研究岩体中所發生的力学現象的一門科学。岩石力学這門課程所研究的內容有：岩石的物理机械性、巷道的穩定條件和地压。

礦井支護是採礦工程方面的專業課程，這門課程研究巷道維護方法、支架材料、支架結構以及支護方法。岩石力学与礦井支護之間是有密切联系的。

第二章 岩石的物理机械性

第1節 岩石——力学研究的对象

根據各种不同的條件，岩石在地殼中可能處於固態、液態、或處於這兩者之間的一種狀態。按一般情況來說，我們在採礦過程中通常遇見的岩石，是處於固態的岩石。這種狀態的特徵是物体的各向異性和彈性等。岩石是由礦物質膠結物或压力所黏結起來的礦物顆粒所組成的。在個別情況下，這種黏結是不存在的；當岩石堅硬顆粒呈機械堆積時，則這種岩石叫做鬆散性岩石；膠結的岩石也就是黏結的物体。

茲用圖1來說明岩石的物理机械性——力学研究对象。

圖1是一個从地表開始的岩層的垂直剖面，下面是未被採動

的岩体。假設距離地表 h 深度处有一個小立方塊岩石，它承受着上方來的压力，則該立方体的四面就要被压脹起來（或變形）。但是这种情况不可能發生，因為這樣會產生反作用力，也就是立方体会處於应力狀態——產生压力。在很深的地方（如現代很深的礦井）压力是極

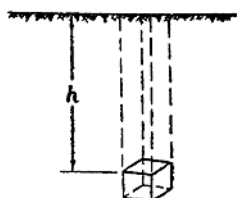


圖 1

大的，而產生出各種的应力，因此在巷道中就出現了岩石噴射。發生岩石噴射現象的原因是由於应力重新分配，因而使位能變成動能。

其他例証，如圖 2 巷道的圍岩並非十分堅硬（如頁岩黏土等）



圖 2



圖 3

而巷道又未進行支護，那麼在頂板和兩幫就會出現裂縫。這些裂縫互相交叉而使岩塊離開岩體冒落下來。在這種情況下，巷道便必須進行支護（如圖 3）。

在圖 3 情況下，支架便承受了岩石压力，作用於支架上的压力是決定於岩石物理機械性的，因此我們就應當研究這一基本特性。而在研究這一基本特性之前，我們首先要進行岩石的分類：

1. 膠結性岩石（在岩石內部存在內聚力）。
2. 非膠結性岩石（鬆散性岩石，在岩石內部只存在摩擦力）。

有一種膠結性小的疏松岩石（岩石內部內聚力小——也就是土壤岩石）。

當疏松岩石充滿了水分或其顆粒極小的時候，在適當的條件

下就有流砂性，於是這樣的岩石被稱為流砂性岩石（或流砂）。

下面我們來研究小塊岩石和整體岩石的特性，並且還將要區別它們的特性。

第2節 岩石的密度

岩石的密度與任何物體的密度是一樣的，就是物體的質量和其容積的比，也可以說密度就是在單位容積中所含的礦物質的數量。

為了實用的目的，我們還可以把它看成是在一定的岩石容積中為礦物質所填塞的程度。

假定某一個試樣的容積是 V ，它的重量是 G 。

岩石中的空隙完全被礦物質所填滿的情形是沒有的。它必然有許多空隙（孔），因而也就具有空隙率。例如，白堊就有很大的空隙率，在白堊試樣上倒多少水，白堊試樣就能透過多少水。

因此可以肯定：岩石內有礦物質和孔隙。

我們用符號 V_1 來表示某種試樣的礦物質容積，那麼孔隙的容積必定是： $V - V_1$ 。

岩石中的孔隙有微細孔和粗大孔之分，但我們祇來研究粗大孔。微細孔的大小為一公尺的幾百萬分之一，煤的粗大孔充滿沼氣（ CH_4 ），而微細孔則由吸收性的煤來充填。吸收的意義是指固體物從其周圍空間吸收氣體物質或液體物質的作用。

假定岩石的密度 Δ 以下列公式來表示：

$$\Delta = \frac{V_1}{V},$$

則岩石的空隙率 n 可按下列公式求得：

$$n = \frac{V - V_1}{V} \times 100\%,$$

式中 n 是空隙率，其值通常小於 1。以 100% 來乘 n ，我們就求得了它的百分率（%）。

白堊的空隙率 n 是 20—30%，煤的空隙率是 5—8%。

空隙率 n 就是空隙容積對總容積的比。空隙率加密度就等於單位容積 1；反之，空隙率也等於單位容積 1 減去密度，即：

$$n + \Delta = 1; \quad n = 1 - \Delta.$$

假如我們用符號 G 來表示某種岩石的重量，那麼該岩石的比重 δ 可按下列公式求得：

$$\delta = \frac{G}{V_1}.$$

它的容重 γ ——可按下列公式求得：

$$\gamma = \frac{G}{V}.$$

比重永遠大於容重，因為 $V_1 < V$ 。

通過上面兩個公式得出 $V_1 = \frac{G}{\delta}$ 和 $V = \frac{G}{\gamma}$ ，再把兩個值代入求密度的公式，即得下列公式：

$$\Delta = \frac{V_1}{V} = \frac{G \cdot \gamma}{\delta \cdot G} = \frac{\gamma}{\delta}.$$

上列公式把密度，容重和比重的關係聯結起來了。既然 $n = \frac{V - V_1}{V} \times 100\%$ ，那麼以 V 除之，再去掉 100% 即得下列公式：

$$n = \frac{V}{V} - \frac{V_1}{V} = 1 - \Delta = 1 - \frac{\gamma}{\delta} = \frac{\delta - \gamma}{\delta},$$

或者用百分率來表示，即為：

$$n = \frac{\delta - \gamma}{\delta} \times 100\%.$$

因此岩石的空隙率能根據空隙性指數來計算。

因為各種岩石都具有空隙率，所以他們就有壓縮率。例如，砂岩、頁岩和煤的試樣，在 200, 500, 1000 公斤/平方公分等各種壓力作用下的壓縮率（係實驗的數據），如以壓縮體積的百分率表示，則有如表 1：

表 1

岩石名称	压 縮 率		
	200公斤/平方公分	500公斤/平方公分	1000公斤/平方公分
砂岩	0.13	0.40	0.57
頁岩	0.16	0.32	0.71
煤	0.63	1.25	2.32

由表中可以看出，岩石的壓縮率並不大，但確實有壓縮率。

空隙率 n 能決定岩石的含水性、物理機械性、傳熱性以及其它特性。

我們在研究岩石物理機械性的時候，有時也把岩石的空隙容積和礦物質容積的比率當作空隙率。

現在我們假定有一單位體積的岩塊，它的礦物質容積為 A ，空隙容積為 B ，則：

$$A+B=1; \quad \text{空隙率 } \varepsilon = \frac{B}{A}.$$

各種岩石的空隙率常是不相同的，例如黏土的空隙率的值 $\varepsilon > 1$ 約為10—12，這就可以用來解釋巷道底板上岩石如為黏土時，發生隆起現象的原因。為什麼這樣呢？黏土內部的構造究竟如何呢？現在我們來簡單地談一談。

黏土的礦物成分是高嶺土，它是由鱗片狀質點（其大小為一公尺的百萬分之幾）所組成；鱗片之間永遠有水，鱗片中間的孔隙可以看成是特殊的毛細管（圖4）；在黏土中表現出毛細管壓力。

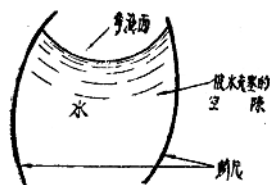


圖 4

把黏土侵入水中時彎液面就消滅了。水進入了空隙，黏土就開始膨脹。在這種情況下， $\varepsilon > 1$

但是若從水中把黏土取出並使之脫水（用蒸乾法等），就可以得到和石頭一樣堅硬的黏土，在這種情

況下, $\varepsilon < 1$ 。

黏土在膨脹時能增加很大的壓力, 爲了消除這種現象在巷道裏就應當採取辦法使礦產地乾燥。

根據實驗可以確定空隙率 ε 與應力 σ 的關係。

取幾個小立方體使之受壓, 在一般情況下, 其空隙率與應力之間的關係如圖 5 所示。

關於土壤變形與應力之間的關係, 請自學 H. A. 崔托維奇 所著 [土壤力學] 的 85—91 頁 (1951 年原文版)。

第 3 節 岩石的彈性、塑性和其他性質

我們首先把本節將要用到的各種符號列舉如下:

- (1) R'_1 ——單軸拉伸的極限強度,
 R'_2 ——單軸壓縮的極限強度,
 R'_3 ——單軸剪力的極限強度。
- (2) R''_1 ——雙軸拉伸的極限強度,
 R''_2 ——雙軸壓縮的極限強度,
 R''_3 ——雙軸剪切的極限強度。
- (3) R'''_1 ——三軸拉伸(體積的拉伸)的極限強度,
 R'''_2 ——三軸壓縮(體積的壓縮)的極限強度,
 R'''_3 ——三軸剪力(體積的剪切)的極限強度。

現在我們開始講授課文。堅硬岩石按其狀態可以分爲彈性岩石、塑性岩石和脆性岩石。

彈性岩石在外力的作用下, 能夠改變自己的形狀, 並且在去掉外力時, 又能恢復到原來的狀態。

塑性岩石在去掉外力之後, 仍然呈現相當大的永久變形(剩餘變形), 但並沒有任何破壞的痕跡。脆性岩石在外力的作用下,

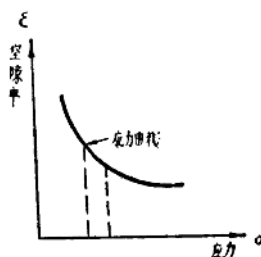


圖 5

馬上就要破壞。不會發生顯著的永久變形(剩餘變形)。

岩石兼有彈性與塑性是很普遍的情況，圖 6 乃是一種岩石試樣在常溫下受到簡單壓縮(或拉伸)時的「應力——應變」圖，這是我們用一塊中等強度的岩石來做強度試驗所得到的結果。

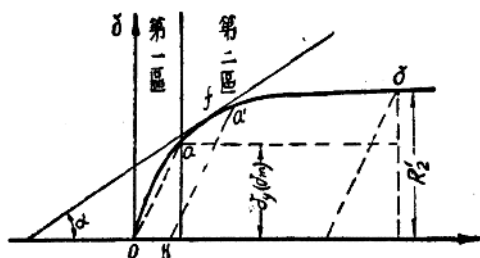


圖 6

在圖 6 上，曲線 ob 是由 oa 及 ab 兩部分所組成。 oa 段表示彈性變形(第一區)， ab 段表示塑性變形(第二區)。

a 點的縱座標表示彈性極限 σ_y (屈服點 σ_m)， b 點的縱座標表示單軸壓縮時的極限強度(R_2)。

假如把外力增加到 a 點，然後去掉外力，那麼其一部分應力就極快地消失掉(其消失速度和聲速一樣)，而另一部分應力則將逐漸減小，這種現象稱為彈性後效。

曲線 ab 段是典型地符合於永久變形的(剩餘變形)，在這裏所表現的是固體的塑性。

假如我們從 a 點取去外力，則無論如何再不能回到 O 點，而是回到 K 點， OK 段就表現出該物體的永久變形。因為曲線 ab 所表現的不是直線函數，所以該岩石的彈性係數不是常數。為了按這條曲線求出某一點的彈性係數(E)，則必須對此曲線作一切綫通過該點，並求出其與橫座標交角之正切值，如是即可決定彈性係數(圖 6, f 點)，其計算公式如下：