

岩石力学及矿山支架

1
蘇聯專家講稿

岩石力學及礦山支架

技術科學碩士、副教授 格·德·邱普隆諾夫著

井巷工程教研組譯

~~~~~ 僅供內部參考 ~~~~~

東北工學院

1955

## 出 版 說 明

在我院工作之蘇聯專家，爲我院研究生講過許多門課程。這些課程都系統地介紹了蘇聯先進的科學技術。爲了解決目前教材的不足，及時地供給我院教師，學生、兄弟學校以及有關科學工作人員作參考，我院決定將這些講稿陸續整理出版。

岩石力學及礦山支架係根據蘇聯專家技術科學碩士 Г. И. 邱普隆諾夫 (Г. И. Чупрунов) 副教授爲我院探礦系礦山企業建築專業研究生講課之講稿翻譯而成，由林韻梅同志翻譯。

本譯稿係初稿，由於翻譯同志俄文及技術水平之不足，翻譯中不妥及錯誤之處，實爲難免，希望讀者多多地提出意見，以便再版時改正。

本譯稿未經作者本人校對，如有錯誤，概由編譯者負責。

## 緒 言

今天蘇聯的採礦工業正以前所未有的速度向前發展着。例如，在煤礦工業中正在進一步改善開採方法，使採煤中最繁重的過程——如採煤掌子面的裝煤工作，掘進採準巷道時的裝煤和裝岩工作——機械化。爲了擴大採煤的機械化程度而廣泛地使用着最新的機器和機械。

蘇聯政府撥出巨額的款項，用來建設新的礦井。目前有幾百個新的煤礦和露天礦正在進行建設，這些礦井將以最新的技術裝備起來。

在新的建井工程中正在廣泛地運用先進的技術，使繁重的勞動過程機械化。根據生產革新者的成就採用完善的工作組織。（僅舉下面一個事實就足以說明這一點：在頓巴斯，某一豎井的掘進速度達到月進度爲二百公尺）。

建築工程的工廠化日益得到發展。如在工廠中事先將個別的支柱結構製好，在建設礦井中只是進行裝配工作。廣泛地使用當地的建築材料。

縮短基本建設的時期，降低成本和提高質量是建設新礦井中的主要問題。今天在採礦工業中更進一步轉向深部開採有用礦物，而深處的地壓增大，因而岩石力學和支架工程的研究也就佔着更主要的地位了。

現在我們開始來研究我們專業中最重要的課程——岩石力學和礦山支架。

礦山支架這就是爲了進行生產而維持地下巷道，使其處於安全狀態的各種措施的總和。在這些措施中礦山支柱佔着很主要的地位。它是保護巷道，防止圍岩發生危險變形的特殊構築物。

必須指出，沒有這種構築物，即沒有支柱的巷道，在煤礦工業中是比較少見的。

礦山支柱爲地下巷道中的工作人員創造安全的工作條件，這便是它的主要用途。礦山支柱的費用很大。如在主要巷道的成本中，支柱的成本往往要佔 25~30%，甚至更多一些。而在有用礦物的採掘成本中，要佔 10~25%。

礦山支柱應滿足一系列的要求，其中最重要的是技術上的要求。這就是——強度，穩定度，剛性或可縮性。如果支柱經過適當的計算，這些要求是能滿足的。計算支柱時首先應考慮到該支柱工作時所處之條件，這些條件在很多方面取決於圍岩的性質。

在掘進採礦巷道時，岩石最初的平衡狀態遭到破壞。這種平衡狀態是未經開採過的岩石（原岩）所特有的性質。巷道中原岩暴露面逐漸地變形，同時隨着變形常會落下個別的石塊或岩粒，發生岩石的冒落。爲了預防這些危險的現象，因而要架設支柱。它承受着圍岩方面來的壓力，同時阻止上述變形的發生。這種壓力就稱爲岩石加在礦山支柱上的壓力，或簡稱爲地壓。地壓的方向、數量及分佈情況應供計算礦山支柱之用。

凡研究開採有用礦物時原岩在力學方面的一些現象的知識領域稱爲岩石力學。

在岩石力學中研究岩石的物理機械性，其中包括強度問題，研究巷道穩定的條件和地壓。

「岩石力學」和「礦山支架」是彼此有密切聯繫的課程，在學習「礦山支架」之前必須先學習「岩石力學」。

在近代的有用礦物開採工作中管理地壓的問題有着特別重要的意義。這些問題是如此衆多，並在很多方面是如此地複雜和廣泛，以致其整個內容構成爲所謂地壓管理問題，到目前爲止這個問題在很多方面已進行了研究，但是，很多方面尚有待於更廣泛地探討。

在四十——五十年前上述問題尚未像現在這樣現實，甚至可以說，當時並不存在這樣的問題。當

時主要採用的是手工勞動，工作面，特別是採煤工作面的長度很小。由於這一些原因，圍岩的暴露面是不大的，因而地壓一般也是有限的。

現在，在機械化採煤的條件下，一般都要求採用長工作面。在礦山上採煤工作面長達幾百公尺。頂板暴露出很大的面積，致使大量的岩石發生移動。地壓達到很大的數值，這就要求控制地壓的大小，不使它發展得很大，從而產生了地壓管理問題。

「岩石力學」給出管理地壓的科學根據。在「礦山支架」中則研究管理地壓的重要工具——礦山支柱。因此，在此情況下「岩石力學」的問題和「礦山支架」的問題是密切相關的。

「岩石力學」和「礦山支架」的發展和採礦科學的發展是密切聯係着的。其開始發展是在上一世紀的中葉，現在我們追溯一下俄國採礦科學及蘇維埃採礦科學發展的情況。

採礦科學作為一門實用的知識領域發展着。在上述時間內（自十九世紀中葉開始）有這樣一些學者，他們的名字是 И. А. 吉瑪和 Г. А. 吉瑪 (И. А. Тимо и Г. А. Тимо)、羅蒙納索夫斯基 (Г. Д. Румановский)、杜羅申柯 (Г. И. Дорошенко)、可佐夫斯基 (И. И. Козовский) 等，這些學者為了使採礦工藝納入真正科學的軌道做了不少工作。他們的著作給下一代的俄國學者奠定了順利研究採礦科學的基礎，這些後來的學者就像本世紀初的採礦工作者博基 (В. И. Бокий)、普洛托基雅珂諾夫 (М. М. Протодаконов)、德爾皮戈利耶夫 (А. М. Терпигорьев)、麥巴列維奇 (П. М. Цымбарович) 等人。

在上一世紀礦山支架的問題尚未系統地歸納成為一門統一的課程。在一百多年前，即在 1843 年出版的，由烏柴基斯 (А. И. Ушатис) 所編寫的第一部俄國採礦工藝教科書中，這些問題在描述礦層開採方法時曾被研究過。而 1880 年在杜羅申柯所編寫的「採礦工程師和採礦技術人員手冊」中礦山支架的問題已經研究得相當詳細和充分了。他在这方面曾化費了不少精力。使礦山支架資料得以系統化的許多原理，分類方法和技術名詞上的問題，在他的著作中得到了闡明，很多方面直到現在還是有效的。

以後，在本世紀初 М. М. 普洛托基雅珂諾夫教授對礦山支柱作了更詳細的研究。在他的學位論文「岩石作用在礦山支柱上的壓力」一文中，他研究出自然平衡拱形的理論，在此拱形內的岩石重代表作用在礦山支柱上的地壓值。他曾求出極其簡單的公式，據此公式計算所得出的結果和經驗數據非常近似。此後這些公式被廣泛地運用在教學參考資料中，應用在實際計算中。尤其在礦山工作和地壓計算中，很有意義的是他的岩石強度係數。這係數，以及普氏的拱形理論，到現在還常在計算中運用。

М. М. 普洛托基雅珂諾夫根據自然平衡拱形概念得出的地壓理論，是指水平巷道中來自頂板方向的穩定地壓。這一理論用來解釋地壓現象，和近似的計算地壓值是足夠的（在窄工作面的採準和回採巷道中）。

今天地壓問題已成為這樣的現實，在蘇聯，有一系列的科學研究機關從事研究這些問題，如全蘇煤礦研究院，礦山測量研究院，庫茨尼茨克、頓尼茨、莫斯科、馬克耶夫斯基 (Макеевский)、克里沃羅斯基 (Криворожский) 等採礦研究院以及各礦業學院中的科學研究部門——如莫斯科礦業學院、列寧格勒礦業學院、德尼泊爾彼得洛夫斯基礦業學院等。

# 目 錄

|     |   |
|-----|---|
| 緒 言 | 1 |
|-----|---|

## 第一章 岩石的物理機械性

|              |   |
|--------------|---|
| § 1 概 論      | 1 |
| § 2 岩石的構造和結構 | 1 |
| § 3 密 度      | 2 |
| § 4 岩石的狀態    | 3 |
| § 5 強 度      | 4 |
| § 6 碎脹性      | 5 |
| § 7 鬆散岩石     | 6 |
| § 8 連結性岩石    | 6 |
| § 9 岩石的流動性   | 7 |

## 第二章 岩石暴露面的穩定性

|                  |    |
|------------------|----|
| § 10 原岩的應力狀態     | 8  |
| § 11 斜坡的穩定性      | 10 |
| § 12 地下巷道暴露面的穩定性 | 14 |

## 第三章 地 壓

|                 |    |
|-----------------|----|
| § 13 地壓和時間      | 19 |
| § 14 水平巷道中的地壓理論 | 20 |
| § 15 垂直巷道中的地壓   | 27 |
| § 16 傾斜坑道中的壓力   | 29 |
| § 17 深部地壓       | 30 |
| § 18 煤和瓦斯的突然噴出  | 31 |
| § 19 地壓的測定      | 32 |
| § 20 坑道的維護方法    | 33 |

## 第四章 礦山支架

|                 |    |
|-----------------|----|
| § 21 概 論        | 38 |
| § 22 礦山支架所使用的材料 | 38 |
| § 23 木 材        | 39 |
| § 24 礦山的貯木場     | 41 |
| § 25 礦坑內木材的使用年限 | 41 |
| § 26 用防腐劑浸透木材   | 41 |

|      |              |    |
|------|--------------|----|
| § 27 | 將防腐劑注入木材中的方法 | 42 |
| § 28 | 木材防火性的措施     | 43 |
| § 29 | 膠結物質的灰漿      | 43 |
| § 30 | 混凝土          | 45 |
| § 31 | 石 材          | 47 |

## 第五章 水平巷道的支架（主要巷道和採準巷道）

|      |                 |    |
|------|-----------------|----|
| § 32 | 木材支柱            | 49 |
| § 33 | 普通棚的計算          | 53 |
| § 34 | 棚子各部份的聯接        | 54 |
| § 35 | 木質棚子的架設         | 56 |
| § 36 | 金屬支柱            | 57 |
| § 37 | 石材和混凝土支柱        | 61 |
| § 38 | 拱形支柱的計算         | 64 |
| § 39 | 沉降縫和溫度縫         | 74 |
| § 40 | 石材弧形支柱（剛性和可縮性的） | 74 |
| § 41 | 混合支柱            | 75 |
| § 42 | 巷道連接處和交叉處的支架    | 75 |

## 第六章 垂直巷道的支柱

|      |         |    |
|------|---------|----|
| § 43 | 木材支柱    | 78 |
| § 44 | 木材支柱的計算 | 82 |
| § 45 | 金屬支柱    | 82 |
| § 46 | 石材支柱    | 86 |

## 第七章 傾斜巷道的支架

|      |                |    |
|------|----------------|----|
| § 47 | 木材支柱           | 89 |
| § 48 | 金屬支柱           | 91 |
| § 49 | 石材、混凝土、鋼筋混凝土支柱 | 91 |
| § 50 | 混合支柱           | 92 |
| § 51 | 斜井的裝備          | 93 |

## 第八章 回採巷道的支架

|      |      |     |
|------|------|-----|
| § 52 | 木材支柱 | 94  |
| § 53 | 金屬支柱 | 96  |
|      | 結束語  | 100 |

# 第一章 岩石的物理機械性

## §1 概 論

由於岩石所處條件的不同，在地壳中的岩石可以是固態的，液態的，或者是中間態的。

岩石是由礦物粒——如碎屑、顆粒、結晶體等——所組成，它們之間由礦物質的膠結物或壓力（毛細管壓力）的關係而凝聚起來。如果在岩粒之間，缺乏這種凝聚能力，那麼這種岩石就僅是一些固體顆粒或碎屑機械地堆積在一起，這種岩石稱為鬆散岩石。

所有的岩石可以分成下列四類：

1) 固體岩石：大部份的岩石都屬於這一類，如粘土頁岩、石灰岩、砂岩等。2) 可塑性岩石：如粘土。3) 鬆散岩石：如砂、礫石等。4) 流沙岩石：如流沙。

固體岩石主要的性質，就是在外力作用下，力求保持自己的形狀。

可塑性岩石在不太大的荷重下也能留下殘餘變形（永久變形）。

鬆散岩石的岩粒之間沒有聯繫（凝聚力）。

如果鬆散岩石為水所飽和，而且具有非常小的顆粒時（0.1~0.2公厘或更小些）往往能夠流動，這樣的岩石稱為流沙岩石。

但是，岩石之被劃分為這四類，是有條件的。因為，由於岩石所處條件的不同，它可以表現為這一種狀態或另一種狀態。例如：在足夠大的壓力下固體岩石可以成為可塑性的岩石，在有足夠大量的水的時候鬆散岩石可以成為流沙岩石。

岩石主要的物理機械性有以下幾種：

1) 結構和構造；2) 密度；3) 彈性；4) 脆性；5) 塑性；6) 強度；7) 碎脹性及其他。

下面將分別研究這些性質。

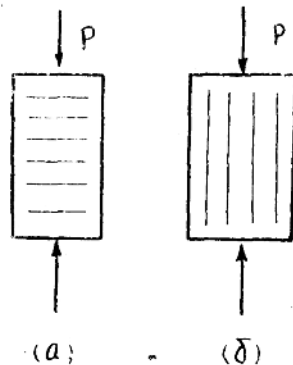
## §2 岩石的構造 (Сложение) 和結構 (Строение)

構造和結構(或稱組織)是岩石主要特徵之一。結構(組織)表徵出組成岩石的顆粒的粒度(細粒組織，中粒組織，粗粒組織)。構造表徵出岩粒在岩石中的位置情況(如成層狀的，片岩狀的，裂隙狀的等)。

通常，岩石中礦物粒愈小，強度就愈大。

岩石在不同方向上具有不同的性質，因為，在岩石中存在着岩層(Слоя)和層理面(Плоскость, напластования)。

例：如果這裡有二塊岩石的試樣a和б(圖1)。試樣處在受壓情況下，在試樣a上所加的壓力垂直於岩層層理面，在試樣б上所加的壓力平行於岩層層理面。則岩石的強度是不同的。也就是說，垂直層理面方向岩石的抗壓力大於平行層理面方向岩石的抗壓力。在圖上，即試樣a的抗壓力大於試樣б的抗壓力。



【註】：在此處 Строение 和 Структура 的含義是一致的，相當於結構(組織)。Сложение 和 Текстура 的意義是一致的，相當於構造。此二對同義語中前一字(Строение 和 Сложение)是一般的通稱，後一字(Структура 和 Текстура)是對岩石而言的專門名詞。

圖 1



### §3 密度

岩石的密度——即岩石中質量和其容積之比。或者說，密度是岩石在這容積內被礦物質所充填的緻密程度。

如圖2所示，岩石由骨架（緻密質）部份  $b$  和空隙部份  $a$  所組成（所有的岩石內通常都有孔隙和空穴）所以，設  $V_1$ ——骨架或緻密質的容積；

$V$ ——試樣的全部容積。

其中  $V_1$  永遠小於  $V$

$$\text{則 } D = \frac{V_1}{V} \quad (1)$$

式中  $D$  為緻密度係數 (коэффициент плотности)  
以容積重  $r$  和比重  $\delta$  來表示  $D$ ，並設  $G$  為岩石試樣的重量。

$$\text{比重 } \delta = \frac{G}{V_1}; \quad G = \delta V_1; \quad V_1 = \frac{G}{\delta} \quad (2a)$$

$$\text{容積重 } r = \frac{G}{V}; \quad G = rV; \quad V = \frac{G}{r} \quad (2b)$$

將 (2) 式中  $V$  和  $V_1$  值代入 (1) 式中，則

$$D = \frac{V_1}{V} = \frac{Gr}{\delta G};$$

$$\therefore D = \frac{r}{\delta} \quad (3)$$

既然  $V_1$  永遠小於  $V$ ，所以比重  $\delta$  永遠大於容積重  $r$ 。

因而  $D$  永遠小於 1 即  $D < 1$ 。

在岩石中除了緻密質以外還有孔隙、裂縫等。所以就有孔隙度。孔隙度是用孔隙度係數  $n$  來表示的，它是試樣中孔隙容積（空穴、裂縫）和總容積之比，即

$$n = \frac{V - V_1}{V} = \frac{\frac{G}{r} - \frac{G}{\delta}}{\frac{G}{r}} = \frac{\frac{G \cdot \delta - rG}{r \cdot \delta}}{\frac{G}{r}} = \frac{\delta - r}{\delta}$$

$$\therefore n = 1 - \frac{r}{\delta} \quad (4)$$

將公式 (3) 代入 (4) 式中，得

$$n = 1 - D$$

一般孔隙度是用百分率來表示的，所以

$$n\% = (1 - D) 100 \quad \text{或}$$

$$n\% = \frac{\delta - r}{\delta} 100 \quad (5)$$

根據這些關係，我們能解決下面一類的問題。

習題一：決定岩石（石灰岩）的緻密度係數和孔隙度。

已知其容積重  $r = 2.5$  噸/立方公尺，比重  $\delta = 2.67$  噸/立方公尺。

【解】：1) 岩石的緻密度係數；

$$D = \frac{r}{\delta} = \frac{2.5}{2.67} = 0.94$$

2) 孔隙度；

$$n\% = (1 - D) 100 = (1 - 0.94) \cdot 100 = 6\%$$

岩石的孔隙度可以相差很大（如花崗岩類的孔隙度大約為 0.3%，而某些砂岩的孔隙度有超過 13% 以上的）。一般說來，岩石的孔隙度愈小，則其容積重愈大，同時其強度也愈大，反之亦然。

岩石的孔隙度能說明岩石中有關水的性質——含水性及透水性。

岩石的孔隙度係數  $n$  只表示出岩石中孔隙的總容積，而不能反映出個別孔隙的大小。如有的岩石中總孔隙量很大，但每個空隙的體積很小。有的岩石中總孔隙量很小，而每個空隙很大。當岩石孔隙的總容積都一樣時，由於他們當中各空隙大小和其數量的不同，這些岩石的性質也就可能不同。這點是很重要的。因為孔隙和空穴愈大，則透水性愈大，含水性愈小，反之亦然。

#### §4 岩石的狀態

固體岩石，按其狀態可分為彈性、塑性和脆性的。

彈性岩石在外力作用下能够改變自己的形狀或容積，當去掉這些外力後又能回復其自己原來的形狀或容積。

塑性岩石在去掉外力後，留下永久變形，並且沒有破壞的痕跡。

脆性岩石在外力作用下很容易破壞，而且沒有顯著的永久變形。

我們觀察一下岩石試樣在受簡單壓縮（單向壓縮）下應力與應變關係的一般情況：

在圖 3 中，設試樣所產生的應力為  $\sigma$ ，在這應力下試樣的變形為  $\Delta l$ 。

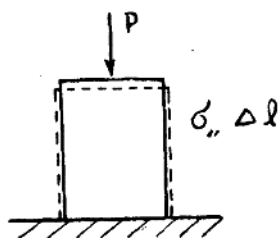


圖 3

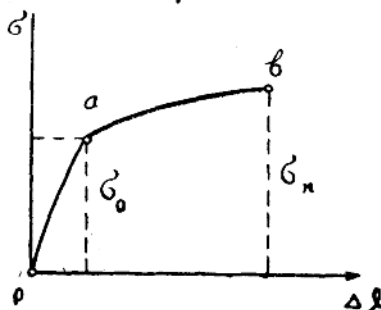


圖 4

應力和應變開始變化時，幾乎是按直線進行的，隨着應力值增加到  $a$  點（圖 4）後，應力和應變之間具有曲線關係。達到  $b$  點試樣遭到破壞。

$\sigma_0$ ——彈性極限。

$\sigma_n$ ——強度極限。

$0a$ ——彈性變形階段。在彈性極限內，當外力去掉後，可以沒有永久變形。

$ab$ ——塑性變形階段。在外力去掉後，物體並不完全回復原狀，存在永久變形。

既然大部份的岩石均呈脆性，所以彈性極限  $\sigma_0$  和強度極限  $\sigma_n$  彼此很靠近（圖 5）。

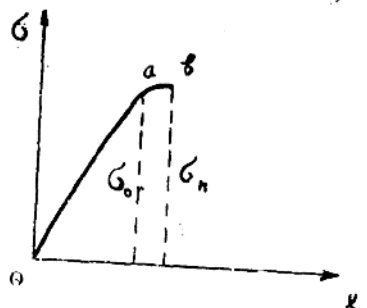


圖 5

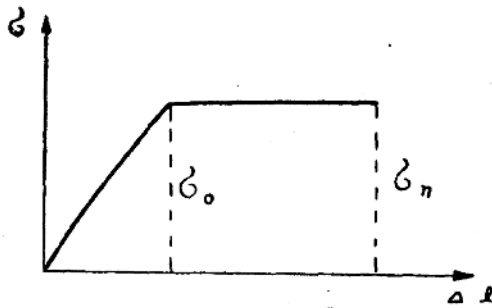


圖 6

$$\therefore \sigma_0 = \sigma_n$$

隨着荷重增加而產生的塑性變形稱為強化 (Упрочнение)。

在某一定值的應力下，隨着時間增加而所產生的塑性變形稱為繼續變形 (Ползучесть) (圖 6)。此時應力  $\sigma$  是常數。

岩石的脆性和塑性不是岩石的本性，而是它所處的一種狀態。因為同一種材料(岩石)可以在一種情況下表現為脆性物體，而在另一種情況下表現為塑性物體。例如，當很快或衝擊式地加上荷重時，岩石就可能呈脆性，當很緩慢和逐漸地加上荷重時，岩石就可能呈塑性。

## § 5 強 度

強度為固體抵抗那些力求引起某種變形的能力。

強度有三種類型：

$R_1$  —— 抗張強度

$R_2$  —— 抗壓強度

$R_3$  —— 抗剪強度

對岩石而言，通常總是抗張強度最小，抗壓強度最大。

即  $R_2 > R_3 > R_1$

強度還可分為單向的，雙向的和全面的（三向的），可用下列符號表示之：

$R_2'$  —— 單向抗壓強度

$R_2''$  —— 雙向抗壓強度

$R_2'''$  —— 三向抗壓強度

$$\text{通常, } R_1' = \left( \frac{1}{15} \sim \frac{1}{30} \right) R_2'$$

對單質岩石而言，在單向抗壓，單向抗張和單向抗剪強度之間存在着如下式的關係：

$$R_3' = \sqrt{\frac{R_1' \cdot R_2'}{3}}$$

這一公式不是十分精確的，僅能得出近似的結果。

習題二：

已知  $R_2' = 367$  公斤/平方公厘；

$R_3' = 68$  公斤/平方公厘；

求粘土頁岩的極限抗張強度  $R_1'$  之值。

$$\text{【解】: } R_1' = \frac{3(R_3')^2}{R_2'} = \frac{3 \cdot 68^2}{367} = 38 \text{ 公斤/平方公厘}$$

由此計算可看到  $R_2 > R_3 > R_1$

因為  $367 > 68 > 38$

$R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  的數值取決於組成岩石的顆粒的粒度、膠結物、孔隙度、濕度、試樣的大小和形狀。

粗粒的和有孔隙的岩石比細粒緻密岩石的強度要小一些。

若孔隙內含水，則會降低岩石的強度。

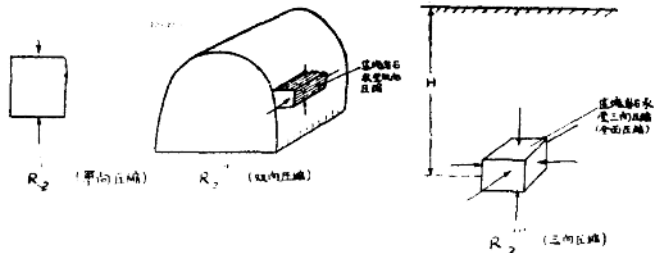


圖 7

根據試驗所得結果，一般  $R_2'' = (1.5 \sim 2.0) R_2'$   
 即雙向抗壓強度為單向抗壓強度的 1.5 到 2 倍，  
 $R_2'''$  要比  $R_2'$  和  $R_2''$  大得多。

## §6 碎脹性

當岩石從原岩中採出後，它的體積增大。這種體積增大的性質稱為碎脹性。

設  $V_1$  —— 採出岩石的體積；

$V$  —— 原岩的體積。

則  $\xi = \frac{V_1}{V}$   $\xi$  —— 碎脹係數。

$\xi$  值決定於以下因素：

- ① 岩石的結構（組織）和構造；
- ② 岩石的強度（強度愈大， $\xi$  值一般愈大）；
- ③ 溫度，也即與含水多少有關。一般溫度愈大， $\xi$  愈小；
- ④ 採掘方法；
- ⑤ 岩石掉落高度和其他因素。

碎脹係數的數值可以用岩石在原岩和鬆散狀態時的孔隙度與容積重來表示。

設在原岩狀態下，岩石的孔隙度和容積重為  $n$  和  $r$

在鬆散狀態下，岩石的孔隙度和容積重為  $n_p$  和  $r_p$

$$n = 1 - \frac{r}{\delta} \quad 1 - n = \frac{r}{\delta} \quad (6)$$

或寫作

$$n_p = 1 - \frac{r_p}{\delta} \quad 1 - n_p = \frac{r_p}{\delta} \quad (7)$$

今已知：

$$r = \frac{G}{V} \quad \text{即} \quad V = \frac{G}{r}$$

$$r_p = \frac{G}{V_p} \quad V_p = \frac{G}{r_p}$$

$$\therefore \xi = \frac{V_p}{V} = \frac{G}{r_p} \cdot \frac{r}{G} = \frac{r}{r_p} \quad (8)$$

$$\text{而} \quad \frac{1-n}{1-n_p} = \frac{r}{\delta} \cdot \frac{\delta}{r_p} = \frac{r}{r_p} = \xi \quad (9)$$

$$\text{所以} \quad \xi = \frac{r}{r_p} = \frac{1-n}{1-n_p} \quad (10)$$

一般  $\xi$  總大於 1，因為  $r_p < r$ 。

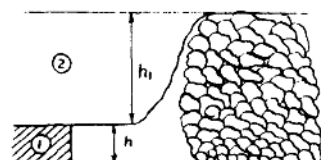
用冒落法回採有用礦物時，岩石的碎脹性對採空區的充填工作具有很大的意義。假設：

$h$  —— 煤層的厚度；

$h_1$  —— 冒落的直接頂的厚度。

在  $\xi \cdot h_1 = h_1 + h$  的條件下，冒落下來的岩石將撐住老頂。

$$\text{因而} \quad h_1 = \frac{h}{\xi - 1}$$



① — 煤層

② — 直接頂

圖 8

習題三：若直接頂為砂質頁岩，其厚度為  $h_1 = 15$  公尺。碎脹係數  $\xi = 1.15$  煤層厚為  $h = 1.6$  公尺，則在這些條件下直接頂是否能在冒落後充滿採空區而撐住老頂？

【解】若要使採空區完全充滿，所需的直接頂厚度為

$$h_{1\text{理論值}} = \frac{h}{\xi - 1} = \frac{1.6}{1.15 - 1} = 10.6 \text{公尺。}$$

而已知  $h_{1\text{實際值}} = 15 \text{公尺}$

既然  $h_{1\text{實際值}} (15 \text{公尺}) > h_{1\text{理論值}} (10.6 \text{公尺})$

所以採空區完全充滿是可能的，老頂能被冒下來的石塊撐住。

$\xi$  值隨着時間和荷重的增加而減少，此時也就發生所謂沉縮。因此在計算中應當使用剩餘碎脹係數（鬆散岩石在長期受壓後， $\xi$  值將減少，在減少以後的  $\xi$  值謂之剩餘碎脹係數），而且在實際採空區充填時，應當採用沉縮較小的岩石。

如果採空區岩石有水，能使岩石的沉縮增加。因為水起了滑潤劑的作用，使岩塊和岩塊之間容易靠近。

## §7 鬆散岩石

不同形狀和大小的礦物體（顆粒、碎屑）的堆積，它們之間缺乏凝聚力，僅存在着與整個堆積體比較起來甚小的摩擦力——稱為鬆散岩石。

鬆散岩石能保持自己的形狀是由於岩粒的自重和岩粒間所存在的摩擦力。如果鬆散的物體堆成圓錐形，則其表面與水平面成  $\alpha$  角，此角之值不大於被稱為自然安息角的某一臨界角  $\alpha_0$ 。

假想在鬆散岩石中有一平面  $AB$ ，I 部份受本身重力  $G$  的影響力求沿  $AB$  面下滑，（圖9）。

設  $AB$  平面和水平面所成角亦為  $\alpha$  角

將重力  $G$  分解為正壓力  $N$  和切線分力  $T$ ；

$$\text{則： } N = G \cos \alpha \quad (11)$$

$$T = G \sin \alpha \quad (12)$$

I 部份向下發生錯動的條件是：

$$T > fN$$

其中：  $f$  —— 內摩擦係數。

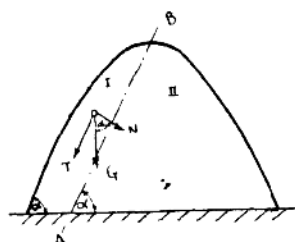


圖 9

如以角度來表示摩擦係數，使

$$f = \operatorname{tg} \varphi$$

則此  $\varphi$  角稱為內摩擦角。

假如處在極限平衡情況下，向下滑動力等於阻力，則

$$T = fN = N \operatorname{tg} \varphi$$

或

$$\frac{T}{N} = f = \operatorname{tg} \varphi \quad (13)$$

從 (11) (12) 式中又可得出

$$\frac{T}{N} = \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (14)$$

可見，在極限平衡時； $\alpha_0 = \varphi$ （自然安息角和內摩擦角相等）。

$\varphi$  角表示鬆散岩石粒子間摩擦力的大小。其值取決於岩粒的濕度，形狀和大小。

## §8 連結性岩石 (Связные породы)

在連結性岩石中，除了摩擦力以外，還有凝聚力。因此，和向下滑動力  $T$  對抗的就有二個阻力。

$$T = \text{凝聚力} + \text{摩擦力}$$

設  $ab$  面積的大小等於  $w$  (圖10)，

在極限平衡時，每單位面積上凝聚力的大小等於  $c$ 。

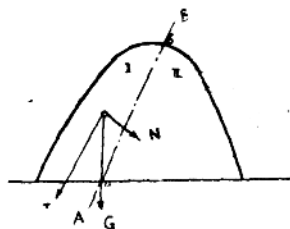


圖 10

則

$$T = cN + fN$$

普洛托基雅珂諾夫教授將上式兩邊均除以  $N$  值，並假設

$$\frac{T}{N} = f_1$$

則

$$\frac{T}{N} = \frac{cN}{N} + \frac{fN}{N}$$

$$\therefore f_1 = f + \frac{c \cdot w}{N} \quad (15)$$

式中  $f_1$  稱為像似摩擦係數或稱為岩石強度係數。普氏以岩石的極限抗壓強度  $R_2'$  除以 100 來表示此係數，

即

$$f_1 = \frac{R_2'}{100}$$

按普氏的意見，例如當  $R_2' = 400$  公斤/平方公分時，則  $f = \frac{400}{100} = 4$

根據岩石的  $f$  值，他作出如下的岩石分類表（表 1）：

普氏岩石分類表

表 1

| 岩石種類 | 堅硬程度  | 典 型 岩 石         | 強度係數 $f$ |
|------|-------|-----------------|----------|
| I    | 極度堅硬  | 石英，玄武岩等         | 20       |
| II   | 非常堅硬  | 花崗岩類岩石，非常堅硬的鐵礦石 | 15       |
| III  | 堅 硬   | 硬砂岩，石灰岩等        | 8~10     |
| IV   | 相當堅硬  | 普通砂岩，礫石，砂質頁岩等   | 5~6      |
| V    | 普 通   | 粘土頁岩            | 3~4      |
| VI   | 相 當 軟 | 白堊，岩鹽，石膏等       | 1.5~2.0  |
| VII  | 軟 岩 石 | 粘土，普通軟煙煤        | 1.0      |
| VIII | 土質岩石  | 腐植土，泥炭，濕砂       | 0.6      |
| IX   | 鬆散岩石  | 砂，漂礫等           | 0.5      |
| X    | 流砂岩石  | 流砂              | 0.3      |

【註】此表僅為一部份，詳見『探礦規程』附錄二第 7 表。

表 1 中小於 1 的岩石強度係數 ( $f$ ) 不是直接測得，而是假定的，因為，如流砂等岩石是不可能做壓力試驗的。

普氏分類表應用較廣。因為此表所根據的公式比較簡單。當然有些並不妥善，如  $f < 1$  的 VI, IX, X 級岩石。又如粘土的  $f=1$  而砂岩的  $f=6 \sim 8$ ，看來好像砂岩的採掘性 (Лобываемость) 要比粘土困難 6~8 倍，但實際上並非如此，甚至有時開採粘土比採砂岩還要困難一些。

## § 9 岩石的流動性

在一定條件下鬆散岩石可具有流動性。

這些條件就是：岩石完全地為水所飽和，同時岩粒非常小。

細砂 ( $d \leq 0.1 \sim 0.2$  公厘) 和某些土質岩石混合在一起可具有流砂性，這些土質岩石是：淤泥及粘土質細粒 ( $0.01 \sim 0.001$  公厘或更小一些)，砂質粘土，粘土，稀薄土壤 (Разжиженные грунты) 等。

流砂岩石具有二相：

固態相 (粒徑  $\geq 0.005$  公厘)，這類岩粒容易沉澱。

液態相——由極小的礦物粒 (粒徑  $< 0.005$  公 厘) 和水組成，這些礦物粒呈浮懸狀，不易沉澱，所以液態相的密度大於水的密度 (可達到 1.5)，因而在液態相內的浮懸作用大於在純水中的浮懸作用。

由於密度較大，以及具有浮懸能力，含有大量液態相的流砂在排水時不肯將砂析出，所以當掘進巷道時，想利用水位降低法 (Метод водопонижения) 來通過流砂層是不可能的。

## 第二章 岩石暴露面的穩定性

### §10 原岩的應力狀態

岩石的暴露面有：露天礦階段邊緣；水平或傾斜巷道的壁和底板；豎井井筒壁等。

未經開採過的原岩處在平衡狀態中，在巷道掘進時，這種平衡就遭到破壞，同時在所開掘的巷道的周圍發生應力集中現象，這就成為岩石暴露面變形的先決條件。

如果變形不超過彈性極限，則稱這樣的暴露面為穩定的暴露面。在這種情況下可以不設礦山支柱。

如果岩石暴露面的變形超過彈性極限，而成為塑性變形，則暴露面將是不穩定的，在此處也包括很容易脆性破壞的暴露面，即沒有顯著變形的暴露面。

現在我們觀察一下位於未經開採過原岩間的岩石的狀態：

假定，原岩由單質等方性的同類岩石所構成，在離地表深  $H$  的地下取一立方塊岩石（圖 11）。這塊立方體承受着其上部直到地面的岩柱體的重量  $G$ 。

$$G = \gamma H$$

在它的影響下岩石將要變形：

1) 沿水平方向的變形

$$\epsilon_1 = \frac{P_T}{E}$$

2) 由於沿垂直面作用力在水平面方向所引起的變形：

$$\epsilon_2 = \frac{P_B}{E} \mu$$

3) 由於垂直於紙面方向的作用力而形成的在水平面方向的變形

$$\epsilon_3 = \frac{P_T}{E} \mu$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_1 \mu$$

式中  $E$  —— 岩石的彈性模數，其值大約為  $75,000 \div 100,000 \text{ kg/cm}^2$

$\mu$  —— 泊松比，即橫向和縱向變形之比

根據條件，原岩處於平衡之中，所以這些變形的總和等於零，即

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3 = 0$$

$$\frac{P_T}{E} - \frac{P_B}{E} \mu - \frac{P_T}{E} \mu = 0$$

$$P_T(1 - \mu) = \mu P_B$$

$$P_T = \frac{\mu}{1 - \mu} P_B$$

(16)

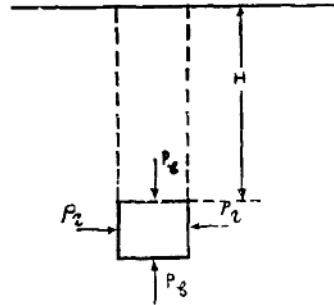


圖 11

設  $P_T$  為水平方向所作用的力

(16)式中的係數  $\frac{\mu}{1-\mu}$  稱為橫壓力係數

水的  $\mu$  值為 0.5;

岩石的  $\mu$  值為  $0.2 \div 0.25$  (平均值);

而通常對岩石而言,採用的此值為  $\mu = 0.1 \div 0.4$

按 (16) 式,如已知垂直作用力,則可決定沿水平面方向的作用力。

現在我們觀察一下有限深度  $H$  內鬆散岩石的應力狀態(圖12):

假想有一垂直平面  $AB$ ,

並假想將其左部份拋去,視平面  $AB$  為擋土牆。在這樣的條件下右邊的岩石的一部份將以一三稜柱的形狀下滑(假定沿  $AC$  直線),並施壓於「擋土」牆  $AB$  之上。

同時下面一些力將發生作用:

$G$  —— 滑動三稜柱的重量;

$D$  —— 擋土牆的反力;

$R$  —— 三稜柱對滑動面的作用力。

因為所有力保持平衡,所以他們全都交於一點,而且由它們所作成的力多邊形也是閉合的(圖13)。

從力多邊形中,可知

$$D = G \operatorname{ctg}(\theta - \varphi)$$

而三稜柱的重量(圖12)為

$$G = \frac{1}{2} H \cdot AC \cdot r$$

$$\text{式中: } AC = H \times \operatorname{ctg} \theta$$

所以

$$G = \frac{1}{2} H \cdot H \operatorname{ctg} \theta \cdot r$$

$$G = \frac{rH^2}{2} \operatorname{ctg} \theta$$

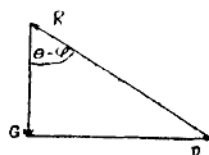


圖 13

則在擋土牆上的壓力為

$$D = \frac{rH^2}{2} \operatorname{ctg} \theta \operatorname{ctg}(\theta - \varphi) \quad (17)$$

欲求  $D$  的最大值  $D_{\max}$ , 需求一次導數  $\frac{dD}{d\theta}$  並使其等於零。

則可求出, 當  $\theta = \frac{90^\circ + \varphi}{2}$  時,  $D$  為最大值。

其值

$$D_{\max} = \frac{rH^2}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (18)$$

由公式 (18) 我們可以決定岩石在整個牆上的壓力。

為了要決定擋土牆上沿高度上任何地方每單位平方面積上的壓力必須對  $H$  來求  $D$  的導數, 即

$$\frac{dD}{dH} = P_{\text{top}} = rH \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (19)$$

式中

$$rH = P_B$$

因而

$$P_{\text{top}} = P_B \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

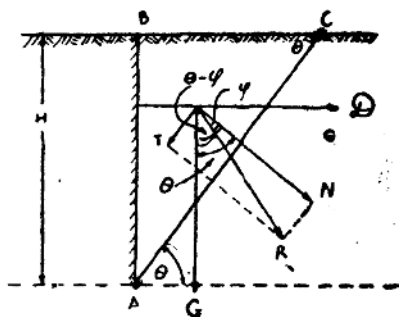


圖 12



令

$$\operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} = A \quad \text{這即是橫壓力係數}$$

因為對水來講， $\varphi=0$ ，所以  $P_1=P_B$ ，即符合流體靜力學的平衡條件。在實用中，(19)式可以應用到固體物體上，但需以內阻力角  $\beta$  值來代替內摩擦角  $\varphi$ 。

按公式(19)可繪出岩石作用於擋土牆的壓力圖(圖14)，其面積等於  $D_{MAX}$ ，而其底邊為

$$P_1 = rH \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

根據公式(18)所決定的壓力  $D_{MAX}$ ，即三棱形岩柱作用在擋土牆上的壓力，稱為主動壓力。

相反，牆作用在岩柱上的壓力，即如果由牆上對岩柱施加壓力，稱為被動壓力。

假設(圖15)在AB牆上作用  $P$  力， $P$  力企圖使牆向右邊的水平方向移動，同時鬆散岩石或土壤將給以反抗力。逐漸增加力  $P$  之值，可以克服這阻力，其結果就使ABC三棱柱向上移動——產生了土壤凸出現象。

在三棱柱ABC處於極限平衡時， $P$  力的數值反映了阻力、土壤的反抗力或被動壓力。

極限平衡時由BC錯動面(向上凸出)方面來的反力  $R$ ，很明顯，其方向將和此面垂直的法線成一角度，即向上成一內摩擦角  $\varphi$  之值，因為在此瞬間，推動三棱柱ABC向上的力和向下的摩擦力( $Nf=N \operatorname{tg} \varphi$ )大小相等，方向相反。因而，在三棱柱凸起情況下角  $\varphi$  之值應當採用和在三棱柱向下滑動時相反的符號，其他的結論都和以前相同。所以被動壓力的大小為

$$P = D_{nacc} = \frac{rH^2}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ + \varphi}{2} \quad (20)$$

$$\text{而角 } \theta \text{ 之值} = \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

比較式(18)與(20)式，可見  $D_{nacc}$  永遠大於  $D_{akt}$

在進行礦山支柱計算時，被動壓力有很大的意義。

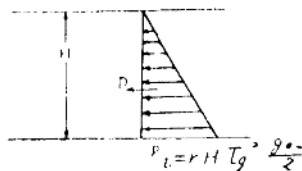


圖 14

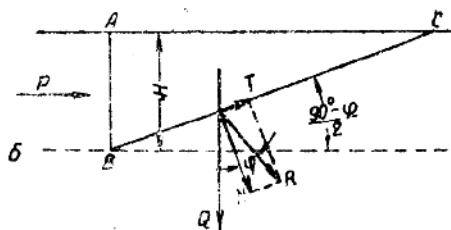


圖 15

## § 11 斜坡的穩定性

### 1. 概 論

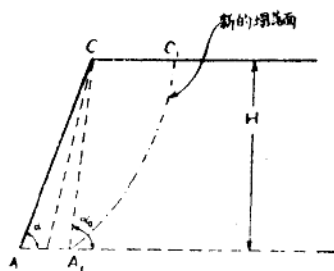


圖 16

斜坡的穩定性，即指運河的側壁，露天礦階段側面等的穩定性，它有很大的意義，因為在露天礦山中，這種巷道是最多的。

斜坡是與水平面成某傾角  $\alpha$  的自由面(暴露面)(圖16)

當  $\alpha$  角增加到某一臨界值  $\alpha_0$  時，斜坡就要失去自己的穩定性，順着新的曲面  $A_1C_1$  塌落，此曲面稱為塌落面。

在研究斜坡問題上，其任務是要在給與的一定條件下來決定塌落面的形狀和位置，並在給與的斜坡角  $\alpha$  值下計算出安全的探掘深度  $H$ 。

在自然條件中，應當把在鬆散岩石(土壤類)和在連結性岩石(基岩)中的斜坡加以區別。前者的穩定性大部份取決於原岩