

矿山岩石力学与矿井支护

礦山岩石力學 與礦井支護

蘇聯工學博士
維·德·斯列薩列夫教授著

馬英芳譯 劉之祥校訂

蘇聯高等教育部審定作為高等礦業學校教材

燃料工業出版社

本書分兩部分：礦山岩石力學和礦山巷道的支護。在第一部分，著者對於岩石的物理機械性質、礦山壓力問題有關的理論和計算方法作了詳盡的敘述。在第二部分，分別闡述了礦井支護用的材料，採礦場、水平巷道、傾斜巷道和豎井、斜井的各種支護形式和不同方法等。

本書可作高等礦業學校教材，並可供採礦工程技術人員在生產和設計工作中參考。

本書主要由北京鋼鐵學院馬英芳同志翻譯，劉之祥同志校訂，其中第四章是由東北工學院開井送道、鑿岩爆破教研組翻譯和校訂的。

* * *

礦山岩石力學與礦井支護

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД И РУДЯННОЕ КРЕПЛЕНИЕ

根據蘇聯國立煤礦技術書籍出版社(УГЛЕТЕХИЗДАТ)

1948年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯 В. Д. СЛЕСАРЕВ 著

馬英芳譯 劉之祥校訂

燃料工業出版社出版

地址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業營業許可證出字第 012 號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：張伯顏 程魁忠 校對：劉露溪 何忠

書號294 * 煤113 * 787 × 1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 125印張 * 279千字 * 定價19,500元

一九五四年十二月北京第一版第一次印刷(1—5,000冊)

目 錄

序	4
引言	5

第一部分 礦山岩石力學

第一章 礦山岩石的物理機械性質	7
§ 1. 緒言	7
§ 2. 剛性岩石	7
§ 3. 塑性岩石	23
§ 4. 散粒岩石	31
§ 5. 流砂	35
§ 6. 岩石的堅硬性係數及其分類	40
§ 7. 礦山岩石的物理機械性質決定於其埋藏條件	41
第二章 礦山壓力	43
§ 8. 礦山壓力現象的一般性質及其研究方法	43
§ 9. 掘進巷道所引起的礦山岩石的受力狀態	51
§ 10. 礦山壓力理論	58
§ 11. 於非連結性(散粒)頂板岩石決定頂板壓力的大小	63
§ 12. 極限跨度	65
§ 13. 時間的作用	75
§ 14. 原始礦山壓力和已定礦山壓力	76
§ 15. 等值跨度	77
§ 16. 於連結性頂板岩石決定頂板壓力的大小	81
§ 17. 於頂板為不同種的岩石總體決定頂板壓力的大小	85
§ 18. 於很厚的非連結性岩石決定頂板壓力的大小	87
§ 19. 由於開採礦層所引起的岩層變形(採空區的影響圈)	87
§ 20. 於厚層頂板岩石決定頂板壓力的大小	92
§ 21. 巷道的兩幫及底板壓力	93

§ 22. 在決定礦山壓力大小時的強度安全係數	99
§ 23. 決定連結性頂板岩石壓力大小的例子	100
§ 24. 岩層傾角的影響	102
第三章 礦山巷道的維護方法	103
§ 25. 賦予適宜形狀及大小的巷道橫截面	103
§ 26. 留護頂礦皮	103
§ 27. 礦柱	105
§ 28. 峒室礦柱的計算	115
§ 29. 決定圓形、方形及長方形橫截面的礦柱的尺寸	116

第二部分 礦山巷道的支護

第四章 對礦山支架的要求和支護材料	120
§ 30. 對礦山支架的要求	120
§ 31. 礦山支架類型	120
§ 32. 木料	122
§ 33. 膠結物	132
§ 34. 混凝土	141
§ 35. 天然石料和人造石料	153
§ 36. 金屬材料	158
§ 37. 防水材料	158
第五章 採礦場支護	159
§ 38. 一般知識	159
§ 39. 簡單支護	160
§ 40. 採礦工作面支護的基本規程	171
§ 41. 特殊支架	171
§ 42. 金屬支護	178
§ 43. 金屬支護的特殊形式	187
§ 44. 木料支架立柱的回收	188
§ 45. 支護材料的運至工作面	192
§ 46. 採礦工作面支護的安全規程	192
§ 47. 採礦場支護的計算	193
§ 48. 採礦場支護工作組織的基本原理	195

第六章 水平的主要巷道及準備巷道的木料支護及金屬支護	196
§ 49. 木料支架的基本形式	196
§ 50. 門框的特殊形式	206
§ 51. 可縮性門框	208
§ 52. 木料支護的修理	212
§ 53. 木料的加工	213
§ 54. 門框各部分尺寸的決定	213
§ 55. 金屬支護	214
§ 56. 巷道的輕便支護	219
§ 57. 崩塌處的支護	219
第七章 水平的主要巷道及準備巷道的石料支護及混凝土支護 ..	221
§ 58. 石料支架的基本形式	221
§ 59. 石料支架的各組成部分	224
§ 60. 混凝土支護	232
§ 61. 噴射法	235
§ 62. 決定拱形支護的尺寸	238
§ 63. 鋼筋混凝土支護	245
§ 64. 混合支架	256
§ 65. 水平巷道的連接處及交叉處的支護	258
第八章 水平巷道及準備巷道在「鼓起的」底板岩石情況下的支護	261
第九章 垂直巷道的支護	265
§ 66. 加予礦井支架的礦山岩石壓力	265
§ 67. 礦井的木料支護	272
§ 68. 礦井木料支護的計算	283
§ 69. 礦井的石料及混凝土支護	285
§ 70. 礦井的鋼筋混凝土支護	291
§ 71. 在建築混凝土及鋼筋混凝土支護時所用的模架	293
§ 72. 石料混凝土及鋼筋混凝土支護的礦井的裝備	293
§ 73. 礦井的金屬支護	298
§ 74. 井底車場與井筒連接處的支護	308
第十章 傾斜巷道的支護	311

序

「礦山岩石力學與礦井支護」課程包括關於礦山岩石的物理機械性質、礦山壓力、支護材料及礦井支架的結構等基本內容。

特別注意到礦山壓力問題，不計算礦山壓力就不可能正確地進行地下工程。這裏，引證了巷道對於圍岩的影響、等值跨度及巷道「推移」方法的應用、巷道的兩幫及底板的壓力問題、時間對於出現礦山壓力的影響以及解決礦山壓力問題的近似方法的理論。

於支護材料章，詳細地研究了在應用支護木料的代用品時起很大作用的「非水泥」的膠結材料；於第五章「採礦場支護」中，詳細地研究了支護的可縮性及割截工作對於採礦工作面支護的影響的問題，指出了採礦工作面支護的基本規程，研究了沒有立柱的支護及組合支護（走動支架），於「支架結構」部分，詳細地研究了可縮性支護（各軸節支護）及在岩石鼓起情況下的支護的問題，並且介紹了在這些情況下的支架的結構；在這部分，也研究了關於場陷地點支護的問題。

工作組織問題在本書中沒有論及（某些斯達哈諾夫工作原理例外），這些問題可在「巷道掘進」及「採礦方法」課程中加以研究。

維·斯列薩列夫

引 言

在 1946—1950 年恢復與發展蘇聯國民經濟的五年計劃的法令中指出：「保證採煤工業的迅速發展，到 1950 年，煤的產量與戰前水平相比應提高 50%。煉焦煤產量（頓巴斯，庫茲巴斯，卡拉甘達，基澤洛夫，別左爾，特克瓦爾且里及特克維布里等礦區）提高到 57.7 百萬噸，以充分滿足工業的需要。恢復頓巴斯戰前採煤的水平，並在 1950 年超過這個水平，將產量提高到 88 百萬噸」。

「爲了保證預定的礦山建設規模就須在煤礦工業的礦山住宿及文化生活等房屋建設中廣泛採用先進的工作方法，以保證建設期限的大爲縮減」。

法令中規定在 1950 年應達到煤的產量 250 百萬噸，鐵的產量 40 百萬噸。「保證進一步擴大與鞏固有色金屬礦廠的基地，並消滅鋁工業原料基地的落後現象」。

這些決議完全決定了蘇聯採礦工業的發展並特別指出了正確開採礦體的全部重要性，它與採礦方法、進行礦山工作的方法及消滅事故的巷道支護問題都是有聯繫的。

地下巷道的正確支護不僅可以使得工作安全，正確的支護方法可以降低有用礦物的成本，也可以減少其損失。採礦工作面的不正確支護方法時常引起工作面的崩塌。

在實際工作中都採用各種各樣的支架來維護地下巷道，但是，開採某些礦體（如岩鹽和鉀鹽），是用在採空區保留礦柱來維護巷道的，這就提出了關於礦柱尺寸的選擇問題，這種礦柱尺寸既要保證維持採空區，又要保證有用礦物的最小損失。

地下巷道的支護是頂板管理中最主要的部分。

爲了對於礦山巷道推進有更全面的和明確的概念，就必須很好地認識正在掘進的岩石的物理機械性質，礦山壓力出現的基本規律，支架

的基本結構及其特點。

即使現在所談的問題是很複雜的，但是在每一個具體的情況下都可用理論研究的方法找到較正確的解決辦法（用實際經驗校正），這樣，就可以較正確地選擇巷道支架的結構。

第一部分 礦山岩石力學

第一章 礦山岩石的物理機械性質

§1. 緒 言

礦山岩石的物理機械性質是決定那些現象的一切性質的基本因素之一，這些現象是由於在礦山岩石中掘進巷道破壞了它的原有平衡而產生的。準確知道礦山岩石的物理性質和機械性質，就能預知新平衡形式，這也幫助了解巷道的穩定程度和其遭受變形的大小，從而解決巷道支護的型式和方法問題。

但是要徹底了解礦山岩石的一切性質是很困難的，因為在大多數情況下，大型區域岩石的性質是根據試驗其樣品來判斷的，本質上樣品的性質是代表樣品的，而不能代表大型區域岩石的性質。因此，欲正確判斷大型區域岩石的性質，不僅要研究其樣品，而且要研究其埋藏條件及其歷史。

所有礦山岩石可以分為四大類：1) 剛性岩石，2) 塑性岩石，3) 散粒岩石及 4) 流動岩石或流砂。

這種分類也是有條件的，不能以之作爲岩石性質的絕對標誌，因為所觀察到的岩石狀態是隨岩石所處的條件而不同的。例如：在強大壓力下，剛性岩石能變爲塑性岩石；含有足夠水量時，散粒岩石變成了流砂。

§2. 剛 性 岩 石

一切固體（或剛性體）的基本性質是要維持其固有形狀，近代分子物理學給我們帶來了一切物件的內力的觀念，這種內力，一方面使分子維持一定的系統，另方面使分子之間保持一定的距離，而此距離的大小決定於物體的物態。分子力的存在及其大小決定剛性礦山岩石的主要

物理機械性質。

緻密的剛性礦山岩石（花崗岩，砂岩，頁岩，礫煤等）也和所有一般的任何固體一樣，存在兩種內力：1) 岩石分子相互結合的連結力；2) 岩石分子之間的摩擦力，當連結力遭受破壞時，摩擦力還存在着。

從上面的理由出發，剛性岩石的機械性質可以用下列公式表示：

$$T = C + f \cdot n, \quad (1)$$

式中 C ——連結力， f ——摩擦係數，等於 $\tan \varphi$ (φ 為內摩擦角)， n ——垂直壓力。

在固體中，拉應力的出現是完全可能的，因為連結力 C 的大小，是大大地超過摩擦力 $f \cdot n$ 的。

剛性岩石的結構和組織 所有的剛性岩石可分為兩類：1) 岩石顆粒直接結合的，2) 岩石顆粒藉膠結物間接結合的。

在第一類岩石（火成岩，晶質頁岩，石英岩）中，各組成礦物（晶體）係藉其間之連結力直接結合。通常，如實驗室的試驗所證明的，各顆粒間的結合強度（即岩石抵抗分裂的能力）比顆粒自身的強度大。因此，斷口面不是沿各顆粒間的邊界，而是通過各顆粒的內部。此種岩石的抗裂強度決定於顆粒的結合性質。例如，相互嵌入結合的顆粒結合體（圖1）或混雜黏結的纖維結合物，其抵抗外力的能力要比圓形和多角形顆粒集合物（圖2）的大。

具有間接連結顆粒的第二類岩石分為四種，是根據顆粒本身的強度 K_k ，膠結物的強度 K_b 以及顆粒與膠結物之間的結合強度 H 之間



圖1

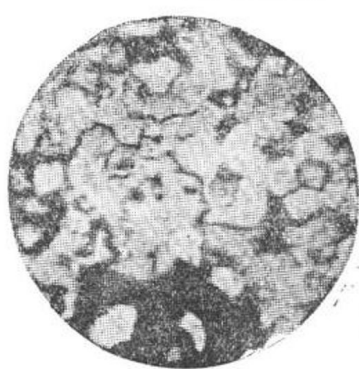


圖2

的關係來分的。即：

- 1) $K_b < K_k$ ——斷口面通過膠結物而不通過顆粒；
- 2) $K_b > K_k$ ——斷口面通過膠結物和顆粒；
- 3) $H < K_b$ 又 $H < K_k$ ——在破裂時，膠結物和顆粒分開；
- 4) $H = K_b < K_k$ ——斷口面一部分通過膠結物，一部分沿膠結物與顆粒的交界。

膠結物的成分對此類岩石的強度具有重大意義。它有砂質的，石灰質的，石膏質的，泥灰質的，泥質的。具有砂質膠結物的砂岩是此類岩石中最強的。

礦山岩石的結構反映其形成情況及歷史，即反映岩石在形成後所遭受的物理化學的和機械的作用。從進行礦山工作與支護地下巷道的觀點看，在大型區域岩石中，連結力受到破壞或減弱的地區的存在是很重要的。連結力減弱通常是沿層理面和節理面的。

這些面的存在減弱了岩石的強度：岩石樣品可以指出高的抗外力強度，但是，大型區域岩石由於分裂面的存在，這種強度是表示得很弱的。因此，必須把[碎塊岩石的堅硬性]與[大型區域岩石的堅硬性]的觀念區別開來。岩石樣品的強度和大型區域岩石的強度之間的差別，可以到100%。

礦山岩石的成層性，使其物理機械性質在各方向各不相同。例如：在平行層理的方向和在垂直層理的方向，岩石的抗外力強度是不同的，彈性及其他性質也有區別。

礦山岩石的裂縫性 裂縫的起源有兩種：1) 在構造過程中形成的——如斷層裂縫，壓力裂縫，張力裂縫等；2) 岩石生成時形成的——如火成岩冷卻時產生的裂縫及水成岩乾燥時產生的裂縫（此種裂縫稱收縮裂縫）。

裂縫是表示出不同程度的強度的：有的裂縫顯示得很厲害，如張力裂縫；有的裂縫則只剛剛被看得出來，如斷層裂縫。裂縫總是大大地減弱了岩石抵抗外部機械作用的強度。最小裂縫（毛細管性質）也減弱岩石強度（由分子壓力決定）許多倍。例如，切耳查格教授指出：固體在結構破壞後的抗壓強度不超過分子內部壓力的2%。上述原理為許多試

驗資料所證實。

剛性礦山岩石的孔隙性 由於裂縫的存在，礦山岩石不是完全緻密體。因此，在其體積比重與重量比重之間是有區別的。礦山岩石的體積比重小於組成它的礦物的重量比重。

知道重量比重 P 和體積比重 P_1 ，可以決定岩石的孔隙性係數，這種係數一般表示為孔隙體積對於不包括孔隙在內的岩石體積的百分數。

$$K = \frac{P - P_1}{P} \times 100\%.$$

岩石的密度決定於其孔隙性，而可用如下的比值表示：

$$D = \frac{P_1}{P}.$$

礦山岩石的密度總是小於 1。

剛性岩石的孔隙性變動於很大的範圍內。例如：某些花崗岩的孔隙性係數變動於 0.33—0.38%，紅星礦井（在頓巴斯的啓斯卡可夫地區）的砂岩的孔隙性係數超過 13%。岩石的孔隙性決定其蓄水能力。

岩石的孔隙性愈大，其體積比重（即一般所指的比重——譯者）愈小。岩石的體積比重與其對外力的抵抗強度之間存在着一一定的關係，此關係見表 1：

表 1

石 灰 岩		砂 岩	
體 積 比 重	抗壓強度 (仟克/厘米 ²)	體 積 比 重	抗壓強度 (仟克/厘米 ²)
2.10	200	1.87	150
2.25	300	1.95	200
2.35	400	2.05	300
2.45	600	2.10	400
2.60	1000	2.20	600
2.67	1400	2.30	700
2.70	1800	2.57	900

從上表看出：岩石的抗壓強度隨其體積比重的增大而增大。

礦山岩石的硬度 關於礦山岩石硬度的觀念，如同對物體抵抗尖形物鑽進的觀念一樣，係僅對單體岩石而言。在此情況下，可以應用摩氏硬度計來定硬度。

因為組成複體岩石的各礦物的硬度是不同的，所以斷定其硬度要複雜得多。岩石的硬度隨其所含固體礦物成分的增加而增大。試驗資料指出：岩石的硬度隨所含石英成分的增加而增大。在開鑿岩石時，岩石的硬度具有主要意義。

礦山岩石的破碎膨脹性 從岩石區開採岩石時，採下來的岩石體積較其原有體積增大了，此種增大，就是岩石的破碎膨脹性。

破碎膨脹的程度用破碎膨脹係數表示。該係數是取出的岩石體積對其原來體積的比值，由岩石的堅硬性及開採岩石的方法來決定。

費拉脫夫得出幾種岩石的破碎膨脹係數如下：

黏土岩石	1.2
緻密的黏土	1.20—1.25
粗石岩	1.25—1.33

勒·德·舍維亞科夫院士得出以下的破碎膨脹係數：

軟石岩	1.3—1.4
硬石岩	1.4—1.5

礦山壓力可以藉大冒頂方法管理，故從開採工作的觀點看，岩石破碎膨脹性具有很重大的意義。

岩石在崩落時的破碎膨脹係數值決定於：

- 1) 岩石的強度，岩石的物理機械性質；
- 2) 開採層的厚度及其傾角，即岩塊的掉落高度；
- 3) 決定岩石成板狀還是成大小塊崩下來的崩落帶寬度。

觀察指出：岩石強度愈大，開採層厚度愈大。及崩落帶寬度愈小時，則破碎膨脹係數愈大。

比較已有資料，可以得到岩石在崩落時的破碎膨脹係數的平均值（表2）。

表 2

層 厚 (公尺)	頂 板 岩 石	
	軟 的 黏 土 頁 岩	堅 硬 的 頁 岩
不到 1	1.15—1.20	1.20—1.25
1—2	1.25—1.30	1.30—1.35
2—3	1.30—1.35	1.35—1.40

剛性礦山岩石的彈性 剛性礦山岩石在或大或小程度上是彈性體。礦山岩石的彈性，既為其傳播聲音及地震波所證明，也為許多實驗室內對於其樣品的試驗所證實。這些試驗指出：所有剛性礦山岩石都是彈性體，但它們的彈性和金屬的彈性是不同的。

照例，礦山岩石是不服從虎克定律的，即在試驗時，得不到應力與變形之間的直線關係。表 3 所列舉的有關砂岩、黏土頁岩及煤的抗壓強度數據證實了這種原理。

表 3

壓力 (仟克/厘米 ²)	壓縮後減小的體積與原來體積的比值(%)		
	砂 岩	黏 土 頁 岩	煤
235	0.19	0.16	0.63
308	0.27	0.21	0.83
410	0.30	0.27	1.03
512	0.40	0.32	1.25
1024	0.57	0.71	2.22

圖 3 和圖 4 表示巴哈所得到的壓縮花崗岩樣品的圖形。

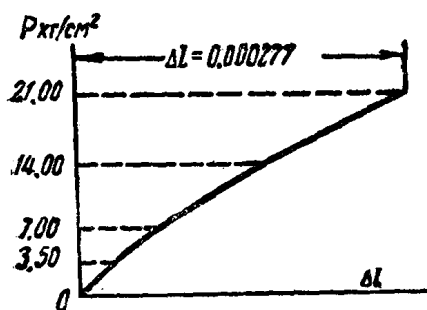


圖 3 巴哈得到的花崗岩變形圖

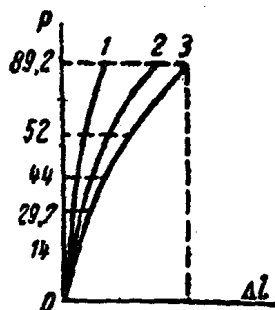


圖 4 巴哈得到的花崗岩變形圖

巴哈根據他自己的研究，提出用「漸次定律」來表示岩石彈性變形與應力的關係，漸次定律有以下形式：

$$e = \frac{1}{\alpha} P^m,$$

式中 係數 α 和 m 是從試驗數據中選擇的。當 $m=1$ 和 $\alpha=E$ 時，此公式就成為虎克定律。

對某些情況來說，漸次定律僅是適當的插入公式，因此，不能要求它的所有結果都是正確的。姆·勒·基耳彼且夫指出：在做試驗時，僅當試驗在小應力情況下進行才與漸次定律符合。

漸次定律公式的不準確性，使得企圖採用下列公式來表示應力與變形的關係：

$$e = \frac{1}{E}(p + b_1 p^2 + b_2 p^3 + \dots),$$

式中 E ——彈性係數， b_1 和 b_2 ——試驗係數。

此公式稱為「拋物線定律」。當應力 p 的值小到能使其平方以上的各項可以不計時，則上式變成虎克定律。

據吉漢生科的資料，拋物線定律公式適合於生鐵的應力情況。因為生鐵的機械性質在許多地方類似於礦山岩石的機械性質，則可以認為：拋物線定律的公式比漸次定律的公式較準確地表示了礦山岩石的彈性。

剛性礦山岩石的第二特點是，彈性係數是變的。因此波桑係數也是變的。勒·伊·阿尼施奇克教授指出：岩石的彈性係數隨着應力的增長而不斷地減小。但是，彈性係數變化決定於應力的定律仍然是不知道的。同一種岩石的彈性係數可以變化很大，例如：據巴哈試驗，花崗岩的彈性係數，依據決定彈性係數的應力的大小，變化於 4000—14 000 仟克/毫米²之間。

岩石的彈性係數也因其成層性而不一致：垂直於層向的方向的彈性係數要比平行於層向的方向的小。

例如：在 100—400 仟克/厘米²的壓力下試驗砂岩時，若壓縮方向與層向垂直時，得到的彈性係數為 3.4×10^5 — 4.3×10^5 仟克/厘米²；與層向平行時，得到的為 5.0×10^5 — 5.5×10^5 仟克/厘米²。

岩石對各種不同變形的抵抗總是不同的。剛性岩石的瞬時抗壓強度一般比其瞬時抗拉強度大許多倍。據此，從壓縮試驗得來的彈性係數要比從拉伸試驗得來的大。表 4 列舉了德涅泊彼特羅夫斯基礦業學院的有關礦山岩石彈性的數據。

表 4

岩 石	力的方向	彈性係數 (據壓縮試驗得的) (仟克/厘米 ²)	波桑係數	瞬時抵抗強度 (仟克/厘米 ²)	
				抗壓強度	抗拉強度
黏土頁岩(頓巴斯)	平行層向	$120 \times 10^3 - 470 \times 10^3$	0.10—0.45	500—650	10—32
同 上	垂直層向	$110 \times 10^3 - 330 \times 10^3$	—	—	—
砂岩和石灰岩(頓巴斯)	平行層向	$300 \times 10^3 - 330 \times 10^3$	0.10—0.46	370—1000	30—70
同 上	垂直層向	$300 \times 10^3 - 560 \times 10^3$	—	—	—
無煙煤(頓巴斯)	—	62×10^3	0.11	66—94	—
石英岩(克里沃-羅格)	—	—	—	450—500	—
岩鹽(阿耳且莫斯克)	—	260×10^3	—	350	—

表 5 列舉了一些有關石英岩和砂岩的彈性係數資料

表 5

岩 石	樣 品 號 碼	成 分 的 百 分 數		彈性係數 (仟克/厘米 ²)
		砂 (石英)	黏 土	
細粒石英岩	I	58.0	42.0	5.6×10^5
細粒石英岩	II	17.0	83.0	3.4×10^5
細粒砂岩	I	79.1	20.9	7.4×10^5
細粒砂岩	II	58.4	41.6	4.23×10^5
粗砂岩	I	57.2	42.8	5.0×10^5
粗砂岩	II	57.2	42.8	4.26×10^5

研究岩石的機械性質在於試驗岩石對於壓縮、斷裂、彎曲、切削或切割等的抗力如何。

上述的抗力試驗是用從大型岩石中以石鋸鋸出的樣品來作的。

表 6 列舉了恩·普·格里舍可娃教授對頓巴斯地區岩石所作的單向壓縮和拉伸試驗的數據。

表 6

岩 石	瞬時抗拉強度 (仟克/厘米 ²)	瞬時抗壓強度 (仟克/厘米 ²)	比 值
里幾夫斯克層的頂板的黏土頁岩	10	174	1/17
3號礦井層(波畏雷克層)的頂板的黏土頁岩	16	630	1/30