

苏联 K. B. 魯賓涅依特著

矿山岩石力学的 几个问题

煤炭工业出版社

250.5
673

矿山岩石力学的几个問題

苏联 K.B. 魯賓涅依特著

馬英芳譯 馬光校

煤炭工业出版社

內 容 提 要

本書介紹了矿山岩石力学的几个問題:平巷型巷道支架上压力的決定;矿柱上压力的決定及矿柱强度的計算;峒室型巷道頂板应力的決定。在不少問題的計算中,引进了不少图和表,这样就簡化了計算过程,避免了查專門交鍵。

本書供采矿(煤,金屬……)工程技術人員,采矿专业的師生和科学研究人員参考。

本書由北京鋼鐵学院爆破掘进教研組馬英芳翻譯,中国科学院矿冶研究所馬光波題,北京鋼鐵学院采矿系学生雷化南、韓福娥、李碩、馮修等亦参加校校、写工作。

К.В.РУЩЕНКО НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Углетехиздат Москва 1954

根据苏联国立煤矿技术書籍出版社1954年版譯

1408

矿山岩石力学的几个問題

馬英芳譯 馬光波

*

煤炭工业出版社出版(社址:北京东长安街煤炭工业部)

北京市書刊出版业營業許可証出字第084号

煤炭工业出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

开本850×1168毫米¹/₃₂ 印张13¹¹/₁₆ 字數310,000

1960年5月北京第1版 1960年5月北京第1次印刷

統一書号:15035-1057 印数:0,001—3,000册 定价:2.10元

序

由于党和政府經常的关怀，苏联煤炭工业已成为拥有大量现代装备的重工业先进部門。

苏共第十九次代表大会在对第五个五年計劃的指示中，提出了进一步增加煤炭产量和进一步改进煤炭工业工作的詳尽的斗争綱領。执行第五个五年計劃的前三年表明，这一綱領是一定会实现的。五年計劃規定的前三年的采煤計劃已完成。在1953年，国内煤的年产量已达三亿二千万吨，即超过战前1940年的年产量一倍以上。各矿井的装备正在不断地改善。繁重的采煤过程正在广泛地机械化。以1953年和1952年相比，各项作业机械化程度增加如下：采煤增加了18%，掘进井巷时装煤和装岩增加了17%。广泛地采用了各种新型支架。

系统地改进采煤方法，广泛采用最新式机器，以及进一步重新装备煤炭工业，这些最重要的問題对国民經济具有巨大的意义，解决这些問題与矿山岩石压力管理有密切的关系。然而，矿山岩石压力管理問題的解决与矿山岩石力学的发展是密切結合着的。矿山岩石力学即是利用把矿山岩石物理机械性考虑在内的属于变形介質力学的准确方法来研究岩体中所发生的过程的科学。最近几年来，在矿山岩石力学領域內进行了許多的理論和試驗研究。以属于变形介質力学的准确方法和模型法为基础的研究工作，获得了特別巨大的发展。

在上述許多問題中，首先需要解决的是：为采准巷道和回采巷道創立可靠且經濟的支架；尋求緩傾斜和急傾斜煤层內回采巷道頂板的最有效的管理方法；从保証工作安全和减少矿柱

損失量出发，确定矿房跨度和矿柱尺寸間的合适比例。解决这些問題也就是要研究为巷道所破坏的岩体中所发生的力学过程。

本書的目的是創立解决下列問題的方法：决定平巷型巷道支架上的压力，决定矿房頂板的最大許可跨度，計算矿柱強度和决定填料或暫留矿石的压力。保証对这些問題能建立有科学根据的有效解法的前提是：在塑性理論和数学弹性理論領域內的現代成就。例如：由于苏联科学院通訊院士 B.B. 索可洛夫斯基对塑性理論和疏松介質靜力学进行研究的結果，已建立了解决平面問題的方法。在能綜合計及矿山岩石机械性方面，即在解相应的矿山岩石压力理論問題方面，这种方法是有十分广闊的前途的。根据数学科学博士 A.H. 舍耳孟对数学弹性理論研究的結果以及他建立的解多連通周边問題的方法，可以确切地来决定在用长壁法开采时平巷周围矿柱上的压力以及在用峒室法（盐矿和金屬矿中广泛采用）开采时房間矿柱上的压力。Г.Н. 薩文教授和 С.Г. 列赫尼茨基教授对各向异性介質的弹性理論所作出的研究結果，可用来評定岩区的各向异性对巷道周围应力分布性質的影响。

本書对长壁工作面的頂板管理問題不作研究。长壁采矿法岩区中所发生的力学过程是与形成很大的岩石破坏区有关的，因此，对这种問題暫且不能用連續介質力学方法来得到很有根据的解。当用等值材料模型法研究长壁工作面的矿山岩石压力現象时，有可能虑及時間因素，且比較簡單和直观，因此，有理由認為：在目前，在这个問題上实验方法比理論研究方法有更广闊的远景。

除了 § 24 是根据 A.H. 景尼克和 Г.Н. 薩文所发表的材料来研究为未支护巷道所变弱的岩区內的应力分布情况，及在 § 33

“决定矿柱上的压力”中簡要地綜合了Д.И. 舍耳孟在各种巷道形状下决定矿柱上压力方面的研究結果以外，本書乃是对作者在上述矿山岩石力学理論問題及在已发表的有关期刊上的研究結果的綜合和进一步发展。

本書共有十章。

第一章：簡述了矿山岩石压力理論方面的新著作。敘述了解决所提出問題的基本原則，并且，論証了所采用的研究方法。

第二章：对岩石机械性、其研究方法以及在用連續介質力学方法解題时所需参数的决定方法作了簡述。

对岩石机械性的敘述乃是根据全苏煤矿研究所的研究資料写成；这些研究是于1952年在作者领导下在叶那基也夫的瓦·馬克斯矿井（屬頓巴斯）的野外實驗室中进行的。給机械試驗取样和对样品作最初的野外岩相学的描述是由苏联科学院地質科学研究所工作人員A.E. 施且林別尔克和B.Я. 斯且巴洛夫完成的。

第三章：講述了一些必需的塑性和弹性理論知識，并詳細地講述了本書中所采用的数学內容。

第四章：研究了岩体中出現非弹性变形时圓形巷道周围的应力分布和位移情况。

第五章：講述了对不受回采工作影响的平巷型巷道，决定支架上压力的解題方法。

第六章：研究了未支护峒室型巷道頂板中的应力分布。

第七章：敘述了在各种矿柱几何尺寸比下决定矿柱中应力状态的方法。

第八章：闡述了在計及矿柱接触面上的边界条件时，計算矿柱强度的方法。

第九章：研究了決定填料或暫留矿石压力的問題。

第十章：闡述了研究結果的總結及有關所述計算方法適用範圍的意見。

為了解具體問題時盡量減少計算工作，本書運用了一些輔助圖表；書內的理論敘述都有數字例子作說明。

目 录

序

第一章 緒言

- § 1 对矿山岩石压力理論新著作的簡評, 以特种假說为基础的研究 7
- § 2 用連續介質力学方法研究矿山岩石压力理論 20
- § 3 評定强度的原則, 研究方向 34

第二章 岩石的机械性質

- § 4 引言 38
- § 5 表示岩石机械性質的参数 42
- § 6 研究方法 57
- § 7 研究結果 69
- § 8 几种岩石的計算参数和强度图的決定 87
- § 9 小結 95

第三章 研究方法

- § 10 基本关系式、平衡方程式及变形一致性 102
- § 11 应力分量与变形分量之間的关系及塑性条件 111
- § 12 平面变形情况下的极限平衡理論方程式 118
- § 13 极限平衡方程式的积分 129
- § 14 研究軸对称变形情况下的塑性理論方程式系 142

第四章 单一未支护巷道周围的应力分布

- § 15 計算图 149
- § 16 圓形橫截面巷道周围的应力分布 155
- § 17 在复合塑性条件下巷道周围的应力分布 162
- § 18 豎井筒周围的应力分布 167

第五章 单一巷道支架上压力的決定

§ 19	非彈性變形區和解答的適用範圍	174
§ 20	巷道周邊上位移與支架反力之間的關係、崩落拱及 支架上的主動壓力	185
§ 21	支架的機械性質及支架上壓力的決定	203
§ 22	決定支架上壓力的例子以及計算結果與實際測量結果的 比較	214
第六章 未支护巷道(峒室或礦房)頂板中的應力狀態		
§ 23	計算圖	225
§ 24	單一未支护巷道圍岩中的應力狀態、各向異性的影響	229
§ 25	單層式頂板中應力的決定	242
§ 26	雙層式頂板的計算以及決定頂板中應力的例子	253
第七章 礦柱的極限應力狀態		
§ 27	計算圖	262
§ 28	在包絡綫基本形式下條帶式礦柱中的應力分布	267
§ 29	接觸條件及其對礦柱應力狀態的影響	283
§ 30	較寬條帶式礦柱中的應力分布	301
§ 31	圓柱形礦柱中的應力分布	315
第八章 礦柱強度的計算		
§ 32	破壞負荷的決定	324
§ 33	礦柱上壓力的決定	347
§ 34	礦柱強度的計算	356
第九章 支架上填料壓力的決定		
§ 35	引言	378
§ 36	填料區的應力狀態	384
§ 37	把按近似公式算得的結果與試驗作比較以及決定 填料壓力的例子	407
第十章 結論		
參考文獻		

第一章 緒 言

§ 1. 对矿山岩石压力*理論新著作的簡評,

以特种假說为基础的研究

在1930年前所发表的矿山岩石压力理論的基本研究作品中, 仅研究了决定采准平巷型巷道支架上压力的問題, 或决定各种用途隧道的加固壳上压力的問題。問題的研究是以应用某些預測結果的特种假說为基础的。

但是, 由于問題的复杂, 这些假說很少适宜的; 各作者所推荐的計算公式总是互相抵触的, 且很少給出适合实际的結果。M. M. 普罗托济雅可洛夫教授在其名著“矿山岩石压力与矿井支护”〔48〕中, 对在1930年前所出現的大量研究作品作了詳尽的分析。M. M. 普罗托济雅可洛夫所作的彻底的批判, 确实地証实了: 里特且耳、毕耳巴烏麦耳、康麦列利等人的理論是在理論上沒有根据和在实际上不适宜的。于是, 可以不詳細地分析这些理論, 而直接轉到分析矿山岩石压力理論在这以后的发展及其現狀。

从1930年到現在, 矿山岩石压力理論的发展基本上走两个方向。第一个方向是吸收材料力学的方法, 改善以特种假說为基础的決定平巷型巷道支架上压力的方法, 并研究了一些新的問題, 如在用峒室采矿法时計算矿柱及頂板等。这个方向本質上是以前存在方向的繼續发展。

* 矿山岩石压力原文为 Горное давление 或 Давление горных пород, 有的譯为矿山压力, 也可譯为岩石压力。它的定义是“存在于巷道围岩中的力”。

第二个方向是借弹性理论和塑性理论研究矿山岩石压力理论问题，这个方向是在原则上与第一个方向不同的新方向。

教授 M. M. 普罗托济雅可洛夫、B. Л. 斯列萨列夫、П. М. 景巴列维奇及院士 Л. Л. 舍维亚科夫的研究作品是第一个方向的著作。在这些研究作品中，制定了在工业上获得局部应用的工程计算方法。

我们来研究以特种假说为基础的理论。在这些理论中，应用最广的是 M. M. 普罗托济雅可洛夫关于决定平巷型巷道支架上压力的理论。按照这个理论，在支架与抛物线形拱之间的岩石以自重作用于巷道支架的顶部构件上（图 1）。当巷道侧岩

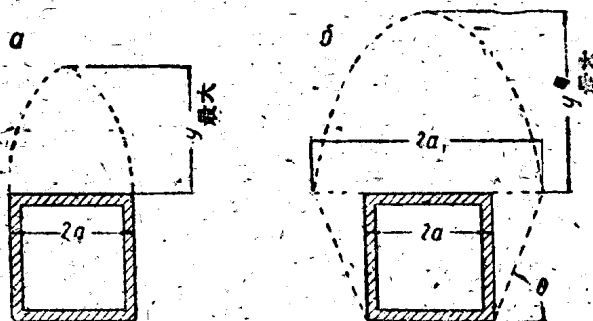


图 1 按拱形假说决定支架上压力

a—仅有垂直压力时的崩落拱；b—有垂直压力及侧压力时的崩落拱。

是软岩时，侧岩可能向巷道发生滑落，此时，产生侧压力，而崩落拱^①的尺寸由于巷道的跨度增大而增大了。当内摩擦角 ρ 已知时，滑落面的倾角按公式

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}$$

① 崩落拱的原文为 Свод обрушения，有译成塌落拱、自然平衡拱或破裂拱的。——译者

找出，众所周知，这个方法是在计算挡土墙时用来决定土壤滑落面的位置的。

崩落拱的尺寸按下式决定：

$$y = \frac{x^2}{a \cdot f}, \quad (1.1)$$

式中 a ——巷道宽度的一半；

f ——岩石的坚硬性系数^①。

于松散岩石，坚硬性系数等于内摩擦角系数^②；于連結性岩石，坚硬性系数没有物理意义，而是一种假定值^③。

岩石的坚硬性系数值列于众所周知的 M. M. 普罗托济雅可洛夫的岩石分类表中。

M. M. 普罗托济雅可洛夫的理论是以前研究结果的合理综合，它建筑在许多实际观察的基础上。

M. M. 普罗托济雅可洛夫的理论具有许多重大优点，且很符合实际结果。该理论的缺点是在某种程度上缺乏根据及引入该公式中的坚硬性系数有假定性。该公式仅在松散顶板岩石情况下决定支架上垂直压力值时是适宜的。按这个理论，支架上

① 当力 = a ，得 $y_{\text{max}} = \frac{a}{f}$ ，即得常见的关于崩落拱高度的公式 $b = \frac{a}{f}$ 。

——译者

② 坚硬性系数的原文为 Коэффициент Крепости，现时有译成硬度系数、强度系数或普氏系数的。——译者

③ 按理论意义： $f = \frac{C}{n} + f'$ 式中， f ——坚硬性系数， $\frac{C}{n}$ ——連結力系数， f' ——内摩擦系数。于松散岩石， $C = 0$ ， $\therefore f = f'$ 。——译者

④ 即指岩石的坚硬性系数视为岩石的抗压强度除以100：

$$f = \frac{R}{100}$$

式中 f ——岩石的坚硬性系数； R ——岩石的抗压强度，公斤/厘米²。——译者

的压力值与巷道所在的深度及支架的机械性质无关。于連結性岩石，M.M. 普罗托济雅可洛夫的理论过于有假定性，且决定压力大小在本质上变成选择压力的数质，因为引入公式(1.1)分母中的坚硬性系数对于各种岩石都有很广的变化范围。

当巷道的顶板岩石比其两帮岩石坚硬时，M.M. 普罗托济雅可洛夫的理论是不适宜的。在此情况下，侧压力可以超过垂直压力，M.M. 普罗托济雅可洛夫的方法是显示不出这个关系的。也不能借此理论决定从底板方面加于底拱盖的压力。这样，该理论只有很小的应用范围：基本上用于决定顶板为松散岩石时，梯形巷道支架上的压力。虽然如此，M.M. 普罗托济雅可洛夫教授的见解仍是很适宜的见解之一，因为正确地预计了关于巷道围岩部分地变为破坏状态的问题。在第九章中将指出：当在支架的可缩性方面具备某种条件时，形成崩落拱。

院士 И. И. 舍维亚科夫所制订的计算矿柱强度的方法是另一种在工业上获得承认的理论。

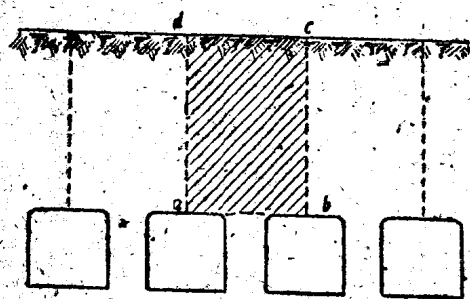


图 2 按 И. И. 舍维亚科夫方法决定矿柱上的压力

1 米长矿柱上的负荷等于体积为 $abcd$ 的岩石重量，矿柱上方石柱的重量，该石柱的横截面为该矿柱的横截面和与该矿柱相邻的两侧室的顶板石柱的横截面的一半所组成（图 2）。

2. 矿柱横截面上的应力分布是均匀的，且与横截面的位置无关。

3. 借把矿柱的作用应力与某种許可应力作比較来評定矿柱的強度。同时，建議：矿柱的高度对其底面尺寸的比值不同时，用的許可应力值也不同。

对于壁形矿柱，Л.Д.舍維亞科夫所采取的計算图如图2所示。

必須指出，Л.Д.舍維亞科夫完全正确地指出了：在設計于整个矿床开采期內維持頂板的矿柱时，应当考虑它系維持頂板的全部重量。实际上，在开采层状矿床（如岩盐或鉀盐）时，开始，矿柱上的压力不等于复盖岩层的重量，但是，随着矿房数目的增加和采空区露出面的扩大，矿柱上的压力将增大且趋达最大值，即复盖岩层的全部重量。

周边矿柱在某种程度上未充分地受到負荷而变为强度儲备了，在实际上，并不影响到有用矿物的总損失。

在开采有限面积的矿床时則不然。在此情况下，假如按矿床面积总共只布置几个矿房，那么，設計承受石柱全重的矿柱实际上沒有承受这么大的負荷，这就意味着有用矿物的額外損失。沿矿床走向布置的矿房数目愈少，此种損失愈大。当只有两个矿房时，按頂板石柱全重算得的压力值比用較准确方法算得的大30~50%（參看第八章）。

关于在矿柱橫截面內应力系均匀分布的假說是Л.Д.舍維亞科夫理論的弱点。

对于較高的矿柱，即 $\alpha = \sqrt{F}/h < 0.8$ （式中， h —矿柱的高度， F —矿柱的底面积）的矿柱，这种假說接近于实际（參見第七章）；而对于 $\alpha > 1.0 \sim 2.0$ 的矿柱，它是完全不适宜的。按 α 采取不同的許可应力值的假說一般說是正确的，但是，由于指定适于矿山岩石力学問題的許可应力值的方法本身需待研究，所以也就把未决定的东西带进理論中来了。

尽管有上述缺点，Л.Д. 舍維亞科夫的方法对于計算較高的矿柱，特别是对盐矿床來說是可以利用的，对于盐矿床，由于盐的特殊机械性質——在負荷作用下較高程度的可塑性和蠕变性，矿柱橫截面內的应力实际上能分布得很均匀。正是在这种情况下，按Л.Д. 舍維亞科夫方法計算矿柱的結果很好地为Г.Н. 庫茲涅佐夫和М.А. 斯罗波果夫的直接实验所証实了〔26〕。借弦測力計（卸載式方法）在矿柱周圍測定垂直压縮应力的結果指出：实际应力与按Л.Д. 舍維亞科夫方法算得結果的差別在1%到16%的範圍內。

教授B.Д. 斯列薩列夫企图用材料力学来解决最重要的矿山岩石压力理論問題，这些問題为：嗣室（矿房）頂板和矿柱的計算以及准备巷道和采矿巷道支架上压力的決定等。B.Д. 斯列薩列夫在自己的許多著作中〔64~68〕，引入一些簡化的假設，得出一些孤立的、外表上簡單的、按作者意見是解决矿山岩石压力理論基本問題的計算公式。

B.Д. 斯列薩列夫的理论是高等矿业学校某些教材的基本內容，因此需要很仔細地加以研究。

必須指出：按問題的提法，B.Д. 斯列薩列夫解决各問題的方法相互略有不同，但是，他所采用的基本数学手段几乎都是一样的。

从研究关于水平巷道的支架上压力、跨度大小和頂板中应力的問題开始。B.Д. 斯列薩列夫把用嗣室采矿法时的嗣室頂板的計算以及采矿場和平巷型巷道支架上压力的決定归为此类問題。

計算是以用一些集中垂直力为 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ (图3)代替頂板重量为基础的。用普通方法按这些力画出压力曲綫——索多边形。

在单質頂板岩石这种个别情况下，压力曲线的縱坐标值按下式决定：

$$y = \frac{\gamma x}{2K_p}(l-x) - \frac{\gamma l^2}{12K_p} \quad (I.2)$$

式中 γ ——岩石的体重；

l ——巷道的寬度；

K_p ——岩石的极限抗拉强度。

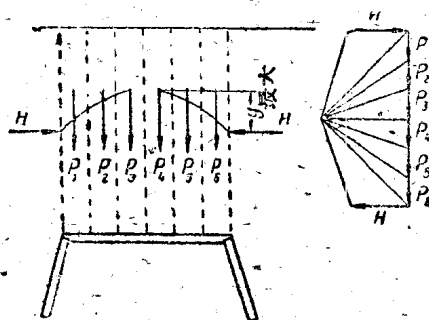


图 3 B.Д. 斯列薩列夫决定支架上压力的计算图及索多边形的作法图

P_{1-6} ——为虚线所划分的小石柱重量

H ——为集中力所代替的侧压力。

于松散岩石，方程式(I.2)为下式代替：

$$y = \frac{x}{h}(l-x) \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right), \quad (I.3)$$

式中 ρ ——內摩擦角；

h ——頂板厚度。

① 該公式是在考虑頂板固結在支壁上时得的，当考虑頂板不固結在支壁上时，拉应力公式为：

$$y = \frac{lx}{2K_p}(l-x). \quad \text{——譯者。}$$

假如有頂边支架，那末，決定其上壓力的問題順便為B.Д. 斯列薩列夫很簡單地解決了。于松散岩石，該問題的解決是以在頂板岩石中形成方程式為(1.3)的拋物綫形崩落拱為基礎。崩落拱的最大高度按公式(1.3)決定，乃是

$$y_{\text{макс}} = \frac{l^2}{4h} \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right), \quad (1.4)$$

由此可見，巷道1米長度上的壓力是：

$$p = \frac{2}{3} \gamma l y_{\text{макс}}. \quad (1.5)$$

為了決定未予支撐的頂板中的應力，B.Д. 斯列薩列夫把巷道上方岩層看成是承受偏心壓縮負荷的角柱體，該偏心壓縮負荷等於岩體中的側壓力。

側壓力的偏心距按公式(1.2)或(1.3)決定。

此時，為了決定頂板中的應力，得出下式：

$$p = K_p \left(1 + 12 \frac{y_{\text{макс}}}{h^2} x_1 \right), \quad (1.6)$$

式中 $y_{\text{макс}}$ ——在所研究的截面上，壓力曲綫的縱坐標；

x_1 ——所求應力點的縱坐標。

恰恰對最簡單情況，用這種方法得的公式來決定支架上壓力及頂板中應力時，所得結果是很難解釋的。

顯而易見，巷道頂板岩層為單質岩石時乃是最簡單情況。如果這種岩層是松散岩石（砂）以及巷道已予支撐，那末，當 $\gamma = 2 \text{ 噸/米}^3$ 、 $l = 4 \text{ 米}$ 及 $\rho = 30^\circ$ 時，按公式(1.5)，深度 $h = 100$ 米處巷道支架上壓力是0.64噸/米；而當深度改到500米時，這種壓力減小了，為每米巷道長度上154公斤。這個結果從數量上尤其從質量上是完全不能令人置信的。現時，可以無疑地認為：如果岩層性質不變，支架上壓力將隨巷道深度的增加而增