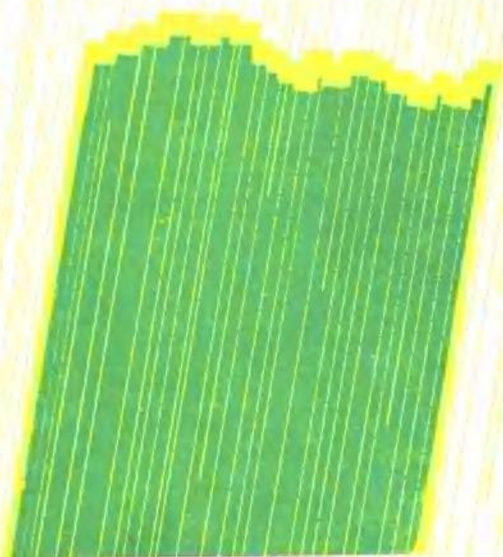


地下岩石力学 实用手册

〔联邦德国〕 T.R.斯塔西 C.H.佩吉



煤炭工业出版社

地下岩石力学实用手册

〔联邦德国〕 T.R.斯塔西 C.H.佩吉

朱 浮 声 译

煤炭工业出版社

内 容 提 要

这本手册是地下工程围岩稳定性分析与支护设计的实用指南。作者根据长期从事岩土工程咨询的实践经验,讨论了岩石和岩体的破坏准则和稳定性分析方法,给出了地下工程优化设计步骤。并围绕支护设计和选型,讨论了主动与被动支护、矿柱分析与设计,以及地压的回填控制等大量理论结果和经验公式。本书对于地下工程的初步分析和设计尤其适用。

本手册立足于岩石力学理论的实际应用,可供从事地下工程设计和施工的工程技术人员日常使用,对于矿山、交通与土木工程管理人员也有实用价值,并可供大专院校、科研设计单位有关人员参考。

责任编辑:田克运

〔联邦德国〕T.R.斯塔西 C.H.佩吉

PRACTICAL HANDBOOK

FOR UNDERGROUND ROCK MECHANICS

Trans Tech Publications

Clausthal-Zellerfeld·F.R.Germaky 1986

*

地下岩石力学实用手册

朱浮声译

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092mm¹/₃₂ 印张 4¹/₈

字数 91 千字 印数1—1,930

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

ISBN 7-5020-0185-9/TD·175

书号 3034

定价 1.85元

序

我们经常听到从事实际工作的采矿和土建工程师对于岩石力学的评价，认为它理论性强、深奥难懂、无法应用。对于工程师来讲，这种评价的产生是由于岩石力学的复杂表述方式，使得他们无法直接应用这些理论，更不能通过应用进一步学习理论。我们承认，本手册对岩石力学理论可能进行了过分的概括和简化，但我们的目标就是以实用和简化的形式表达岩石力学。如果这样能使工程师们在工程实践中更多地将岩石力学应用于设计中，并因此对复杂岩体有一个较为正确的认识，我们的目的就算达到了。

我们希望，本手册能够按照作者预期的目的得到用户的使用。

T.R.Stacey

C.H.Page

目 录

序

第1章 绪论	1
第2章 稳定性	4
2.1 岩石的破坏	6
2.1.1 完整脆性岩石 (弹性分析)	6
2.1.2 完整脆性岩石 (经验方法)	7
2.1.3 完整塑性岩石	7
2.1.4 塑性岩体破坏	8
2.1.5 岩体破坏 (经验方法)	9
2.2 主要构造失稳	10
2.2.1 岩块与岩楔	10
2.2.2 岩梁	13
2.3 岩体构造失稳	14
2.3.1 Q系统分级	16
2.3.2 地力学分级	17
2.3.3 矿山开采岩体分级	19
2.4 岩体的潜在性	21
2.5 几何特征优选	22
2.5.1 位置	22
2.5.2 方位	23
2.5.3 形状	24
2.5.4 尺寸	25
2.6 稳定性估算法总汇	26
第3章 支护	30
3.1 支护估算	33
3.1.1 土木工程与永久性矿山地下工程	33

3.1.2 矿山服务工程与采准工程 ——高应力与开采条件	36
3.1.3 动荷载	39
3.2 矿柱	40
3.2.1 矿柱强度	41
3.2.2 矿柱基础的强度	46
3.2.3 矿柱应力	48
3.2.4 屈服矿柱	50
3.2.5 矿柱设计安全系数	51
3.3 井筒保护矿柱	51
3.3.1 沉陷的预防	53
3.3.2 应力防护	54
3.4 被动支护	55
3.5 充填	57
附录 原始资料	60
A 1 单轴抗压强度	60
A 2 三轴抗压强度	63
A 3 单轴抗拉强度	63
A 4 抗剪强度	64
A 5 岩石材料的耐久性 (durability)	65
A 6 岩石材料的变形性	67
A 7 岩石的各向异性	68
A 8 岩体节理	68
A 9 节理抗剪强度	75
A10 岩体分级Q系统	78
A11 地力学分级	83
A12 矿山开采岩体分级	83
A13 原岩应力	86
A14 围岩应力分布	90
A15 岩体强度	116

A16 岩体强度 (经验方法)	117
A17 岩体弹性模量	120
参考文献	121
索引	125

图目录

- 1 完整塑性岩石的剪切破坏准则
- 2 表明岩楔存在失稳可能性的赤平投影图
- 3 表示摩擦圆及潜在不稳定岩楔的赤平投影图
- 4 顶板岩梁稳定性 ($\sigma_c = 20\text{MPa}$)
- 5 顶板岩梁稳定性 ($\sigma_c = 50\text{MPa}$)
- 6 顶板岩梁稳定性 ($\sigma_c = 100\text{MPa}$)
- 7 顶板岩梁稳定性 ($\sigma_c = 200\text{MPa}$)
- 8 无支护地下工程跨度与 Q 值的关系 (根据 Houghton 和 Slac-ey [24]重绘)
- 9 无支护地下工程跨度、稳定时间与RMR的关系 (据Bieniawski [9]重绘)
- 10 无支护地下工程尺寸、崩落性与MRMR值的关系
- 11 能量释放率与应力、采场跨度的关系
- 12 地震活动与能量释放率的相关性 (依Ortlepp [36]重绘)
- 13 地下工程重新布置在较坚固岩石中
- 14 改变开挖方向实现稳定性
- 15 受地质构造控制的开挖形状
- 16 使应力引起的破坏最小
- 17 应力造成严重破坏时增强稳定性的办法
- 18 利用 Q 系统估算锚杆支护
- 19 利用 Q 系统估算喷射混凝土与金属网支护
- 20 考虑最大应力和破坏时采矿工程的支护 (依 Laubscher [27]重绘)
- 21 考虑拉力和松脱时矿山地下工程的支护 (依 Laubscher [27])

重绘)

- 22 矿柱强度随宽高比的变化
- 23 构造弱面引起的矿柱强度降低 (根据 page等[37]重绘)
- 24 矿柱基础的强度
- 25 基础承载能力系数
- 26 压力拱宽度 (依文献[1]、[35]改绘)
- 27 井筒保护矿柱
 - a) 井筒穿过薄层板状矿体
 - b) 位于层状矿体内或其下方的斜井
 - c) 矿石采出后受松动影响的井筒 (远离矿体)
- 28 井筒保护矿柱尺寸 (依Wagner[45]重绘)
- 29 采场木支架支护原理
- 30 架式支护的变形特性 (依Wagner[44]重绘)
- 31 充填料抗压强度特性 (依Singh和Hedley[42]重绘)
 - A 1 点荷载试件尺寸修正表 (依 Broch 和Franklin[14]重绘)
 - A 2 斯密特回弹量 (L -锤) 和 σ_c 关系 (依Mille.[31]重绘)
 - A 3 风化引起的强度降低
 - A 4 斯密特回弹量 (L -锤) 和弹模关系 (依Miller[31]重绘)
 - A 5 赤平极射投影
 - A 6 岩体描述与分级表
 - A 7 节理残余摩擦角的分布 (依参考文献[52]重绘)
 - A 8 节理粗糙表面纵断面 (依Barton和Choubey[4]重绘)
 - A 9 MRMR节理间距数值 (依Laubscher[27]重绘)
 - A10 斯堪地那维亚水平应力趋向 (依 Myrvang[34]重绘)
 - A11 澳大利亚水平应力趋向 (依Worotnicki 和 Denham[50]重绘)
 - A12 南非水平应力趋向 (依Gay[20]重绘)
 - A13 北美水平应力趋向 (依Haimson[21]重绘)
 - A14 圆形断面巷道围岩应力 ($P/Q = 0.5$)
 - A15 圆形断面巷道围岩应力 ($P/Q = 1$)

- A 16 正方形断面巷道围岩应力 ($P/Q = 0.5$)
- A 17 正方形断面巷道围岩应力 ($P/Q = 1$)
- A 18 正方形断面巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 0.5$)
- A 19 正方形断面巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 1$)
- A 20 矩形断面 (2:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 0.5$)
- A 21 矩形断面 (2:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 1$)
- A 22 矩形断面 (2:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 2$)
- A 23 矩形断面 (2:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 0.5$)
- A 24 矩形断面 (2:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 1$)
- A 25 矩形断面 (2:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 2$)
- A 26 矩形断面 (4:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 0.5$)
- A 27 矩形断面 (4:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 1$)
- A 28 矩形断面 (4:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 2$)
- A 29 矩形断面 (4:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 0.5$)
- A 30 矩形断面 (4:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 1$)
- A 31 矩形断面 (4:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 2$)
- A 32 矩形断面 (10:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 0.5$)
- A 33 矩形断面 (10:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 1$)
- A 34 矩形断面 (10:1) 巷道围岩应力 ($P/Q = 2$)
- A 35 矩形断面 (10:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈 45° 角, $P/Q = 0.5$)
- A 36 矩形断面 (10:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈
-

45°角, $P/Q = 1$)

A 37 矩形断面 (10:1) 巷道围岩应力 (主应力 Q 与水平轴呈45°角, $P/Q = 2$)

A 38 Q 值、RMR值和 m 、 s 值的关系

A 39 软弱夹层引起 σ_c 减小 (依 Laubscher[27]重绘)

A 40 岩体分级与岩体变形模量的关系

第 1 章 绪 论

岩石力学是近年来形成的一门复杂学科。它仍保留着手工劳动的技艺，将高超的分析技巧和实践经验混合并用，使人难于掌握。因此，在目前出版的教科书中，不是总能很容易地找到适用的计算程序和设计方法。当然，这是由于问题的极端复杂性所致，而不应对这些教科书加以责难。另外，岩石力学又是一门紧密依赖于经验的学科。这本手册既不能代替实际经验，也不能替代详尽的教科书。它的作用是提供一些步骤和方法，从而，可以利用有限的资料进行可行性估价。它是一本必备的工具书——使用者指南，而不是一本简易教科书。因此，我们完全是在这个意义上来考虑它的作用，并给它定名为“手册”的。我们希望，本手册的使用者能对岩石力学有一个（预先的）一般性的了解。同时，我们又确信，手册的使用者将不仅仅限于岩石力学工作者。例如，一个土木工程的承包商可以利用本手册来了解和评价一个开挖工程的设计；一个矿山管理人员可以利用它预先进行有关方面的准备工作，并从技术的角度估算矿山日常作业的材料用量等。

本手册主要可应用于“可行性评价”。在制订计划时，往往是实用的计算尚未做出，实际勘探、调查与设计工作却早已远远走在前面，这种情况经常可见。因此，在尚未得到较详尽的地质资料之前，使用本手册十分有益。例如，在找到埋藏的矿体之后，开采矿石的利润可能将取决于采矿方法的选择。对这种可行性的估计可能并不要求很精确，但却必须尽早做出。这种估计应能确定是否需要进行更加详细的勘

探工作。又如，在土木工程中，一个水利水电计划的是否可行依赖于能否采用某一尺寸的地下硐室，这种硐室的可用性必须尽早确定下来。

这两个例子都要求在资料不完整和难于进行现场施工的情况下进行（岩体工程）稳定性评价和初步的支护设计。本手册正是满足这种要求的一个工具。有经验的使用者总能通过它得到一个有实际意义的答案。如果能进一步得到计算所需要的资料，就可以利用本手册得到更精确的分析。

这本手册收集了大量简单公式、经验公式、简化的数据收集方法、岩石性质的资料、由已发表的文献中提取的计算方法、观点和建议，以及我们自己的经验。我们清楚地认识到，自己可能因手册内容的过于简化而遭到非难，但是，我们仍试图避免不必要的繁琐，并忽略了许多可供挑选的方法。根据我们的经验，所选定的方法和分析（步骤）足以满足初步计算的要求。

地下开挖工程的设计方法：

● 开挖目的决定了它的形状和尺寸，例如：

——服务性线路，如铁路，公路隧道，矿山开采的运输线路等；

——供应设备和材料的工程，如地下电站，贮油岩洞，核原料仓库及矿山的矿仓等；

——矿体开采工程；由矿体形状及给定采矿方法决定的巷道等。

最初选定的设计是一个满足这些目的的“理想开挖工程”。此后，必须做如下工作以使这些“理想开挖工程”与它们所存在的岩体性质相适应：

● 地下工程是否稳定？

- 有关的失稳方式如何？

- 通过改变地下工程的尺寸、形状、方位或位置，能否克服失稳，从而对原“理想开挖工程”设计进行修改？

在采矿中，对于要求失稳的开采条件的分析（例如，崩落采矿法设计），上述过程通常是很复杂的，但所用方法没有改变。为了崩落矿岩，开挖工程的尺寸必须大于某一临界值；为了保证岩体稳定，它的尺寸应小于这个临界值，或者进行支护。

支护形式是否恰当，取决于地下工程的风险程度。对于公共服务性地下工程，或者，当一个潜在的失稳会危及人身安全时，安全性是最为重要的。相反地，矿石开采中出现的失稳可能并不危及人身安全，而更重要的是应考虑回采过程的效率。大体上说来，这本手册给出了进行（地下工程）稳定性估计，以及随之而来的支护选择等的实用指南。

本手册是按照稳定性分析、支护选取和支护设计这样一个逻辑顺序进行编排的。下面的第二和第三两章包括了全部必需的计算方法和设计步骤。每一章都进行了详细讨论以便于实际应用。但是，理论基础仅限于能对有关资料的理解和应用。在第2章的末尾，将有关稳定性分析的公式和资料进行了汇总。

在附录中，给出了收集、量测、计算或由现场以及预先的研究工作得到所需资料的方法。但是，不必预先阅读这个附录，它仅为第2章和第3章提供基础资料，在需要时，只要参照第2和第3两章的有关章节，就能应用这些资料。

我们没有专门讨论开挖方法和采矿方法的选择，以及有关的地下开挖工程设计，而只是提供了一个工具，利用这个工具，人们可以进行这些选择和设计，并对它们进行评价。

第 2 章 稳 定 性

对于将要进行的开挖工程，估算稳定性是开挖设计中一个基本步骤。由于开挖的目的不同，有时需要出现不稳定（如崩落法采矿），有时只要求短期内的稳定（如暂时性的矿山开挖工程与土木开挖工程），而大多数的土木开挖工程与重要的矿山地下工程则必须保持长期的稳定性。地下工程的稳定性、它的失稳机理及对失稳模式的估计等是支护系统设计的必要前提。

在下述情况下，可能出现开挖工程的不稳定：

- 因岩石材料或围岩中应力高于强度条件而破坏。
- 岩块由于地质构造产生的移动或塌落-构造失稳 (Structural instability)。
- 由岩石破坏与构造失稳引起的应力组合产生的失稳。
- 由二次应力引起的、并因其它因素（如地震力）而加剧了的失稳。

对于上述各种情况，提出了大量稳定性分析方法。这些方法不仅是适用的，而且，根据我们的经验，它们能够提供足够满意的结果。在讨论这些分析方法之前，首先考虑一下失稳的种类。

岩石破坏

这类破坏实质上发生在完整岩石中。对于脆性岩石与塑性岩石，破坏形式各有不同。脆性岩石的失稳表现为岩石沿开挖面的片落、碎裂以及矿柱的剥落等。这种情况的典型实例，如南非的深部矿山中围岩的一种特殊破坏形式^[48]，挪威^[15]和纽约一些隧道表面发生的爆裂^[11]，以及Mtisa矿^[19]

和Nasliden矿出现的矿柱剥落〔13〕。

对于白垩及泥岩一类完整塑性岩石，它们通常出现剪切破坏机制〔29〕。

岩体破坏

当地质构造很发育，岩石试块的强度参数不能反映岩石的性质时，需要考虑岩体的强度。由岩石试块的强度降低为岩体强度的数值大小要根据实际情况确定，建议根据岩体分级（rock mass classification）确定。另外，对于岩体而言，我们认为，以剪应力为基础的破坏准则可能是最适用的。

主要结构失稳

利用地形图、航空照片和地面判读以及预先完成的地质工作，可以确定断层、岩脉以及主要节理方向。这些地质结构面可以组合起来，形成一个特定的不稳定岩块。建议采用一种近似的空间网格方法（stereonet approach）估计失稳的可能性。如果失稳是可能的，再采用更精确的方法做进一步分析。

主要结构失稳的一个特殊情况是有关天然岩梁（rock beam）的稳定性问题，这些岩梁存在于层状岩体中，并构成地下工程的顶板。在这种情况下，建议根据梁的理论进行稳定性评价。

岩体结构失稳

已经证明，对于不具有起控制作用结构弱面的岩体，岩体分级方法是一种评价地下工程稳定性的极为有效的方法。我们反复强调要利用常规的岩体分级方法，因为它带来的好处极大。常规的、系统化的岩体分级可以加深技术人员和操作人员之间的理解与交流，指导矿山的生产和土木工程合同的制订，造成更安全的条件，制订出更好的计划，并降低总成本。

在稳定性评价中，对于每一种情况最好不要只用一种方法，而应同时采用几种可行的方法，并对结果加以比较。在此基础上，根据每个人的工程判断能力得到稳定性的最终评价。

建议按下述顺序进行稳定性评价：

- 检验应力引起的围岩破坏。在很多情况下，只要（根据经验）进行判断。例如，在未风化的花岗岩中，埋深为100m、跨度为10m的地下工程的围岩是不太可能破坏的。

- 检验大岩块的失稳。这通常也是依经验进行判断。在层状岩石中，需要对顶板或顶板悬臂梁的稳定性进行估算。

- 对岩体分级并检验岩体是否失稳。这个岩体分级应包括几乎每一种情况，即使失稳模式是由应力引起的破坏也不例外。

- 对地下工程的位置、方位、形状与尺寸等进行选优。对于任何几何特性的改变，都要重复进行上述稳定性评价的全过程。

- 评价外部因素（例如地震力）的影响。

2.1 岩石的破坏

评价岩石是否破坏所需要的资料是：原岩应力（附录A 13）、岩石试块强度（附录A 1）、或者岩体强度（附录A 15）和围岩应力分布（附录A 14）。

2.1.1 完整脆性岩石（弹性分析）

对完整脆性岩石，可以利用有限大小的拉应变来圈定实际的破裂范围^[43]。这个应变由下式计算：

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

式中 ν ——泊松比；
 E ——岩石试块的弹性模量。

ν 和 E 可以由附录A 6 中给出的关系确定。 σ_1 和 σ_3 可以由附录A 14中的应力分布图得到。假定 σ_2 是水平原岩应力，并且垂直于附录13 中的应力分布图纸面。如果经计算得到的 ε 为负的（压应力为正），并且，它的数值大小超过下表所列的值，则岩石将出现片落及碎裂破坏。

完整脆性岩石的临界拉应变值 表 1

岩 石 类 型	临界拉应变值
玄武岩、辉绿岩、粗玄岩、辉长岩	0.000300
石英砾岩	0.000160
花 岗 岩	0.000250
石英岩、石英砂岩	0.000200

为了确定地下工程围岩中岩石破裂带深度，在应力分布图中增加地下工程埋深，将不同 σ_1 和 σ_3 值代入前述方程，并使求得的拉应变值小于临界拉应变。

2.1.2 完整脆性岩石（经验方法）

人们发现^[49]，对于在脆性岩石中开挖的、跨度约为 3m~4m 的隧洞，最大原岩主应力与岩石试块单轴抗压强度 σ_c 的比值可以作为判定破坏的准则（见表 2）。

2.1.3 完整塑性岩石

完整岩石非脆性破坏的破坏准则应以剪切破坏机制作为基础，采用下述方程式^[7]；