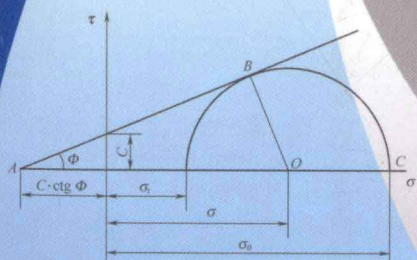


赖应得 著

# 能量支护学

NENGLIANGZHIHUXUE



煤炭工业出版社

# 能 量 支 护 学

赖应得 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

能量支护学/赖应得著. -- 北京: 煤炭工业出版社,  
2010

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3638 - 6

I. ①能… II. ①赖… III. ①矿山支护 IV. ①TD3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017865 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)

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 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 3<sup>5</sup>/<sub>8</sub>

字数 71 千字 印数 1—1,000

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 6448 定价 12.00 元

---

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

## 内 容 提 要

本书为地下工程和采矿工程支护理论方面的书籍。第一章对各种支护理论进行评述,介绍能量支护理论的研究对象、研究现状和研究方向。第二章推导能量支护平衡方程,介绍实现能量再分配的方法,确定围岩释放能量的基本原则以及用能量支护理论解释各种支护的稳定、变形位移和破坏现象。第三章介绍反力和反力系数,推导变形压力公式、冻结压力经验公式和矿区数理统计公式,介绍膨胀力的试验和确定方法,碎岩散渣压力的计算方法以及围岩反力系数和变形位移量的确定与计算方法。第四章着重介绍释放能量的材料,特别列出木材、碎木板、刨花板、木屑板、软木砖、软木板、钙塑发泡板、泡沫塑料等的物理力学性能及选用方法。第五章对圆碇支护,圆碇和冻结砌块井壁夹砌木砖,锚喷支护,锚喷和大弧板联合支护,条带碇、离壁支护,冻结井筒井壁和井帮垫释放能量的泡沫塑料等,进行设计公式推导和计算实例分析。

本书可供地下工程工作者、采矿工程技术人员和研究人员以及大专院校师生参考。

## 序

赖应得先生从 1975 年开始研究能量支护理论，在此后 10 年间却进展缓慢，但他没有灰心，坚持研究，1985 年写成了第一篇论文——《能量支护初论》。随后每年都在公开刊物发表 1~2 篇文章，短短几年，共发表了 9 篇能量支护理论方面的论文。另外，还研究能量注浆，并发表了一篇论文——《炸药和岩石的能量匹配》。这说明作者前阶段的基础理论研究非常扎实。

我国煤炭工业随着国民经济的发展而健康地发展，煤炭年产量达到 29 亿 t，每年掘进的岩石井巷达到 160 万 m。而煤矿的煤系地层绝大部分属沉积地层，95% 的井巷工程都需要支护，因此，用什么方法、什么材料支护，既能保证井巷工程安全，又能降低井巷工程施工成本呢？

传统的煤矿支护形式有木棚、混凝土棚、型钢棚和砌碛支护，这是建立在地面结构力学为基础的支撑学说。其特点是，有多大的地压，设计施工多大尺寸的支架。但在软岩巷道中砌料石圆碛，甚至双层料石圆碛，仍然被压垮，支撑学说解释不通，也说不明白。20 世纪 70 年代，随着锚喷支护在煤炭行业推广应用，井巷工程开挖之后，围岩原有的裂隙、层理、解理，爆破施工后又出现新裂纹，但围岩并非碎渣壤土，仍然有一定强度，只要稍微加固，如打锚杆、注浆、喷射混凝土，可变荷载结构为承载结构，出现了加固学

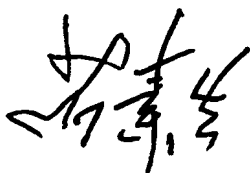
说。但是，锚杆的悬吊作用、组合梁作用和组合拱作用，以及荷载结构变为承载结构，仍是支撑学说的范畴。

能量支护学说则不同，它根据能量守恒和能量转换基本规律，让围岩有限制地变形位移，以释放一部分多余的有害能量，支护吸收一部分能量，从而实现围岩和支护的能量补偿和能量再分配。要达到此目的，支护结构需设计成可缩性，使能量释放自动进行。

这就是赖应得先生所提出的“能量支护理论”，即用以柔克刚、刚柔相济的原理，当围岩压力很大时，设计的可缩性支架就收缩、退让，以释放能量，从而使围岩压力下降，支护压力减小，以达到地下工程和井巷工程安全的目的。

采矿工程、水工隧洞、铁路隧道及各种地下工程的掘进、支护、维护和管理，都可以用能量支护理论作为指导思想；工程的稳定和破坏，也可以用能量支护理论进行详细、清楚、透彻的解释，因此，能量支护学说具有普遍意义。

本书的出版，对提高采矿工程与地下工程的设计和施工、维护和管理水平，对提高支护理论学术水平和理论研究气氛有着重要作用。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Lai Yingde, the author mentioned in the text.

2009年3月20日

## 前 言

1975年，我从一次非煤炭专业学术报告会上得到启发，开始研究能量支护理论，因这方面研究甚少，资料不多，又是单枪匹马，进展缓慢。

1978年，我在济南锚喷支护原理与适应性学术讨论会期间，结识了许多学术界朋友。在畅谈支护理论时，无形中发现了锚喷和围岩的能量补偿，并对此有了兴趣，回京后，立即对它研究，翻阅中外有关书刊和资料，建立数学模型，并于1980年冬，写了《围岩与锚喷支护的能量补偿》这篇论文，写完后，觉得不满意，就放了起来。

1981年，借在烟台出差的机会，我把我的想法讲给几位朋友听，他们非常支持，并在一些关键性问题上为我出谋划策，使我心中更加开朗，更加有数。

于是，我把《围岩与锚喷支护的能量补偿》这篇论文又拿了出来，认真阅读和思考，觉得以前的眼光太狭窄，局限在锚喷支护上。以后逐步发现，能量支护理论可以解释冻结井有小砌块夹刨花板井壁；井壁和井帮之间夹泡沫塑料，可以释放冻结能量；锚喷支护与围岩固结在一起，释放能量最有利；软岩巷道二次支护比一次支护更有利于能量的释放；膨胀岩体井巷采用刚度很大的双层料石圆碇支护，其所以被压坏，就是封得死死的，一点能量也释放不出来，等等。能量支护理论能解释各种各样支护的稳定和破坏现象，

是具有普遍性的支护理论。

1985年，我写了《能量支护初论》，并在全国煤炭高校第六届建井学术会上作了报告，引起了学术界的关注和重视。以后几年间分别在四川省煤炭学会、江西省煤炭学会、湖南省煤炭学会，以及第二届全国采矿会议上作了发言，使许多代表对能量支护理论有了认识 and 了解。

在能量支护研究的过程中，吸收了岩石力学和支护理论研究、工程实测和室内试验的有益成果，以充实和提高研究的内涵。

需要说明一点，机器做功消耗能量，很容易理解。井巷工程和地下工程支护是静止的，静到一定的程度（量变）就要冒顶、塌方（质变），比较难以理解。因此，能量支护的研究，国内外还没有引起足够的重视。

为适应地下工程和采矿工程的需求，我把以前研究的成果进行了整理，并增加了计算数字、图表和设计计算实例，写成本书，希望能促进能量支护学说的发展。

感谢煤炭科学研究总院原院长芮素生先生为本书作序，感谢中国老科协煤炭工业分会和煤炭科学研究总院技术创新基金有关人员的大力支持，感谢中国煤炭学会、《煤炭学报》、《煤炭科学技术》在本书出版过程中给予的大力支持和帮助。

由于作者水平有限，书中谬误难免，望广大读者批评指正。

作 者

2009年10月

# 目 次

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第一章 能量支护概论</b> .....   | 1  |
| 第一节 支护学说简介.....           | 1  |
| 第二节 能量支护的研究对象.....        | 3  |
| 第三节 能量支护的研究现状.....        | 4  |
| <b>第二章 能量支护平衡方程</b> ..... | 6  |
| 第一节 地下工程的能量平衡.....        | 6  |
| 第二节 围岩支护的能量再分配.....       | 9  |
| 第三节 围岩释放能量的原则 .....       | 13 |
| 第四节 对各种支护现象的解释 .....      | 15 |
| <b>第三章 反力与反力系数</b> .....  | 22 |
| 第一节 概述 .....              | 22 |
| 第二节 变形压力 .....            | 23 |
| 第三节 冻结压力 .....            | 35 |
| 第四节 膨胀力 .....             | 39 |
| 第五节 碎岩散渣压力 .....          | 44 |
| 第六节 围岩反力系数和变形量 .....      | 46 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第四章 释放能量的材料</b>          | 51  |
| 第一节 概述                      | 51  |
| 第二节 木材                      | 52  |
| 第三节 碎木板、刨花板、细木工板和木屑板        | 54  |
| 第四节 软木砖和软木板                 | 55  |
| 第五节 钙塑发泡板                   | 56  |
| 第六节 泡沫塑料                    | 57  |
| 第七节 沙子、炉渣及其他材料              | 59  |
| <b>第五章 能量支护结构设计</b>         | 61  |
| 第一节 概述                      | 61  |
| 第二节 无能量释放的裸体巷道              | 62  |
| 第三节 料石圆碇吸收能量的计算             | 63  |
| 第四节 圆碇加砌释放能量的木砖             | 67  |
| 第五节 释放能量的条带碇                | 70  |
| 第六节 型钢和 U 型钢可缩性支架           | 74  |
| 第七节 锚喷支护                    | 81  |
| 第八节 离壁支护的能量释放               | 88  |
| 第九节 锚喷与大弧板联合支护              | 90  |
| 第十节 冻结外壁和井帮之间垫释放能量的<br>泡沫塑料 | 95  |
| 第十一节 冻结外壁砌块夹砌释放能量的<br>木屑板   | 98  |
| <b>参考文献</b>                 | 103 |

## 第一章 能量支护概论

### 第一节 支护学说简介

理论的发展离不开实践，采矿工程中，井巷工程的掘进；铁路建设中，单轨和双轨隧道的开凿；水利电力开发中，地下电站和水工隧洞的建设；以及地下厂房、人防工程、地下油库、地下商店及地下国防工程的施工建设，均需要相应的理论对其进行设计计算。在施工过程中，工程出现局部变形，发展到片帮、底鼓、塌方等破坏现象，需要从理论上给予解释，并在使用过程中进行相应处理，从而建立了岩石力学和支护理论。

到目前为止，建立的支护理论很多，但仍然不能适应变化的地下岩层的需要，因而，设计计算出的工程支护尺寸，不是小了就是大了。小了，围岩变形大，把支架压坏，不能维持地下空间的正常使用，只得停用，待处理和维修好再复用；大了，浪费建筑材料，浪费人力物力。尤其是对那些软弱膨胀岩土层设计和施工的支护刚度越大，越易被压坏，这似乎是“大逆不道”。但从能量支护理论来说，由于软弱膨胀岩体潜伏着巨大的破坏能量，而支护刚度越大，有害能量反而释放不出来，因而，越易被破坏。

#### 一、支撑学说

支撑学说是以结构力学为基础建立的一种支护学说，在我国采矿工程和地下工程中有一定的影响。锚杆支护的悬吊作用、组合梁作用和组合拱作用，都属于支撑学说的范畴。20 世纪 60 年代兴起的新奥法和锚喷支护，是在井巷和地下工程喷一层薄的混凝土，能够代替厚度较大的砌碛体，使人们认识到围岩并非松散体，即使围岩有破碎、裂隙、节理、层理的存在，仍然具有一定的强度和抗力，只要把围岩稍微加固（如注浆、打锚杆、喷浆、喷射混凝土），就能支护围岩，把围岩由支撑荷载变成承载结构。

## 二、加固学说

加固学说是以工程地质力学和岩体力学为基础而发展起来的一种学说。该学说认为，井巷工程和地下工程开掘之后，在围岩变形和位移到一定程度，在塌方之前进行加固，限制变形和位移的发展，以改善围岩的受力状态，提高围岩的强度和自稳能力。

## 三、能量支护学说

近几年来，软岩支护技术出现较多问题，在解决这些问题的过程中，找到了让、放、躲、支的办法，较好地解决了软岩支护问题。

“让”围岩有限制的变形，释“放”围岩多余的有害潜伏能量，支护“躲”开应力高峰，在围岩变形稳定下来之后，再进行结构上的“支”护。即围岩释放一部分有害能量，支护吸收一部分能量，围岩和支护进行能量补偿和能量再分配。利用这种学说，可以解释各种复杂的支护稳定和破坏现象。

## 第二节 能量支护的研究对象

宇宙间的能量转换和能量守恒，无奇不有。物理的势能和动能；化学的分解和还原；能源转化为电能，电能又转化为机械能，机械能又转化为电能，等等。自然界的能量的存在，和人类创造条件，使它互相转换，因而促进了科学的繁荣和社会的进步。

人和动物的生存和栖息，一要有提供能量的原料（食品），二要有把能量转化为热量的机器（消化器官和吸收器官），三要有把热量排泄的功能（发热、出汗、排泄），这是能量互相转化的过程。

井巷工程和地下工程的掘进和支护也遵循这一转换规律。在井巷工程和地下工程形成所需的空间之后，由于地热、水和空气的存在，使千变万化的地层发生了各种奇特的性质变化。加上机械的做功，炸药的爆破，化学物质的分解，空气中氧气的氧化，水的作用，地层中矿物组分的物理效应和化学反应，使围岩出现变形、裂缝、片帮、底鼓、冒顶和塌方等，这些地压现象，都是能量转换的结果。

能量支护理论根据能量守恒和能量转换的基本规律，研究在井巷工程和地下工程的岩层开凿中，进行结构上的支护，研究围岩释放能量和支护吸收能量的许多重大问题。应用能量支护理论，可以解释各种地压现象，以及各种支护的稳定和破坏现象，能够弥补当前某些支护理论和支护学说对某些地压现象和支护破坏原因解释不通或不清楚的问题，还可以进行井巷工程和地下工程的设计计算。

### 第三节 能量支护的研究现状

萨拉蒙 (M. D. Salamon) 曾把岩体视为均质、线性、弹性体, 并对岩体进行分析, 列出了能量守恒定律表示式, 即

$$W_n + U_m = U_c + W_r \quad (1-1)$$

式中  $W_n$ ——整个有关岩体体积内的内应力因开硐而做的功;

$U_m$ ——该硐开挖出的那部分岩体释放出的应变能;

$U_c$ ——紧邻围岩因开硐而重新积累的应变能;

$W_r$ ——开硐过程中损失的弹性能。

朱维申认为, 硐体开挖后, 围岩发生物理力学效应, 具有非线性、不可逆性, 在围岩应力重分布达到一定程度后, 岩体的黏性、塑性、脆性、破裂和局部破坏等各种运动形式, 都要损耗一定的能量  $W_r$ 。同时, 围岩内部重新积聚弹性变形能  $W_c$ 。开硐后某一时刻, 设置的支护结构或回填、构筑物要吸收一部分能量  $W_s$ 。根据圣维南局部性原理, 在多数情况下, 可以认为围岩释放、损失的弹性能  $W_r$  是近似不变的, 至于  $U_m$ 、 $U_c$  则更不变, 因此式 (1-1) 可改写为

$$U_c + U_m = W_c + W_r + W_n + W_s \quad (1-2)$$

$$W_c + U_m + W_s = \text{常数} \quad (1-3)$$

式中  $W_c$ ——在非完全弹性介质中开挖硐室, 硐体围岩重新积聚的弹性应变能,  $W_c \leq U_c$ ;

$W_s$ ——开硐后构筑物消耗的能量;

$W_r$ ——岩体的黏性、塑性、脆性、破裂和局部破坏等各种运动损失的应变能。

该能量方程可看做是研究及控制岩硐稳定性应该遵循的

基本原则。为了使围岩保持稳定，应使其新积累的应变能  $W_e$  不超过一定限度，即  $W_e \leq U_c$  ( $U_c$  为允许值，可通过增大  $W_n$  和  $W_s$  来实现)。但  $W_n$  为非弹性损耗功，只能适当增大，但应有一定限度，即

$$W_n \leq [W_n]$$

否则，过分变形位移，则会导致围岩破坏，支护负载过大或岩硐失去使用价值。

$W_s$  是人工构筑物所消耗的能量。这个构筑物设置越早，刚度越大， $W_s$  值越大，付出的费用越昂贵。在对围岩能量转化认识的基础上，应选取和设计一种合理的构筑体系，使  $W_s$  值尽量小。

作者认为，硐体开凿和支护完毕， $U_c$ 、 $U_m$  和  $W_r$  已消失，而黏性、塑性、脆性、破裂和局部破坏等各种运动的结果，都将使围岩的变形能  $W_e$  增大，因而  $W_n$  可合并到  $W_e$  中去，所以式 (1-2) 可简化成

$$W_e + W_s = 0$$

如果把吸收的能量  $W_s$  规定为负，放出的能量  $W_e$  规定为正，则上式可写成

$$W_s = W_e \quad (1-4)$$

式 (1-4) 的演变过程，即研究围岩、支护的能量再分配问题。

## 第二章 能量支护平衡方程

### 第一节 地下工程的能量平衡

地下工程和井巷工程未开挖之前，地下原岩体的能量  $W$  处于能量平衡状态，即

$$\sum W_i = 0 \quad (2-1)$$

除了某个地区遇到地球内部能量失去平衡，而产生的地壳活动，引起地震外，很少有其他现象发生。

一旦井巷工程和地下工程开挖，工程围岩就要发生各种变化，使能量失去平衡，产生能量重新分配。由于爆破和机械做功，水、空气和岩石的物理化学作用，岩石自重及围岩内部潜伏能量的释放，使围岩应力发生变化。当应力  $\sigma$  未达到岩石极限强度  $R_c$  时，即

$$\sigma \leq R_c \quad (2-2)$$

围岩首先出现弹性变形，但内部能量继续释放，应力继续增大。当达到并超过岩石极限强度时，即

$$\sigma \geq R_c \quad (2-3)$$

在岩石较软，强度较低，应力集中的薄弱处，开始出现变形、开裂，这就是塑性变形。如果支护不及时或没有支护，让围岩变形任其发展，就会引起塌方。围岩的变形过程就是

释放能量的过程。

为进行采矿或其他用途，在某一深处的原岩体中，采用钻眼爆破法、机械破岩法、火力破岩法、化学破岩法等，开挖地下工程和井巷工程，清除岩渣后要进行工程支护，形成地下空间，以适应人们生产和生活的需要。另外，在施工过程中，地下水和其他化学物质反应、空气中氧的氧化作用、地应力及地层内部能量的释放，都有可能使围岩的物理力学性能发生变化。

总之，地下工程的开挖，使原岩体的能量失去平衡并出现能量再分配。围岩应力也发生变化，并产生应力重分布，出现塑变、蠕变、流变，向工程空间变形和位移，由脆性破裂、局部破坏，发展到片帮、底鼓和冒顶。这些复杂的地压现象，自始至终都是能量相互转化的结果，都是能量由一处生成、发展和消失，转化到另一处生成、发展和消失的过程，但总能量是不变的。

潜伏在地下工程的能量是多种多样的，主要有炸药爆破的爆破能  $W_b$ ，凿岩机和掘进机破岩的机械能  $W_z$ ，重力作用下产生的地应力能  $W_d$ ，围岩吸水膨胀的膨胀能  $W_p$ ，围岩的地温促使物理化学性质发生变化的地温能  $W_l$ ，水、空气和其他地下化学物质的作用下围岩吸收或放出的能量  $W_y$ ，岩层内部储存和潜伏的内能  $W_n$ ，围岩产生变形位移的变形能  $W_e$  等。为了维护地下工程和井巷工程的空间，给生产和生活创造一个安全、舒适的空间环境，进行如锚喷、架型钢、架木棚、架混凝土棚和砌碛等工程构筑物的支护，要吸收一部分支护能量  $W_s$ 。井巷工程和地下工程从开挖到形成稳定的空间，能量严格遵守能量守恒定律，即