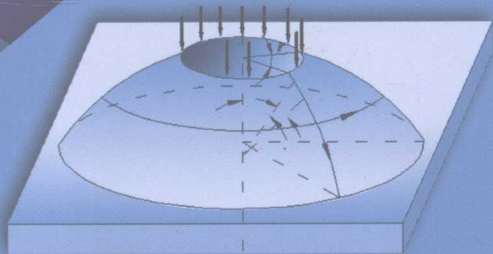


刘少伟 马念杰 武建栋 张 辉 著

MAOGANZHIHUMEIHANGMAODINGWEIXIANQU  
YUCEJIGONGCHENGYINGYONG

# 锚杆支护煤巷冒顶危险区 预测及工程应用



煤炭工业出版社

河南理工大学博士基金项目 (B2006-21)

河南理工大学青年骨干教师计划项目

资助

# 锚杆支护煤巷冒顶危险区 预测及工程应用

刘少伟 马念杰 武建栋 张辉 著

煤炭工业出版社

·北京·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

锚杆支护煤巷冒顶危险区预测及工程应用/刘少伟,  
马念杰, 武建栋, 张辉著. —北京: 煤炭工业出版社,  
2008. 9

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3362 - 0

I. 锚… II. ①刘…②马…③武…④张… III. 煤  
巷—锚杆—巷道支护 IV. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第111953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)  
北京房山宏伟印刷厂 印刷  
新华书店北京发行所 发行

\*

开本 850mm × 1168mm<sup>1/32</sup> 印张 7<sup>1/4</sup> 插页 1  
字数 179 千字 印数 1—1,500  
2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷  
社内编号 6167 定价 18.00 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

顶板事故是煤矿的五大灾害之一，发生的概率居首，而锚杆支护煤巷顶板的冒顶事故经常发生，因此，对锚杆支护煤巷冒顶危险区的预测技术的研究及应用，对保障矿井安全、高效生产有重要意义。本书主要包括锚杆支护煤巷冒顶危险性预测研究概述、锚杆支护煤巷冒顶危险区与锚固体特征研究、锚杆支护煤巷锚固系统各构件受力特征研究、锚杆支护煤巷冒顶危险区预测方法研究、锚杆支护煤巷冒顶危险区预测方法工程应用等内容。

本书可作为高等院校煤炭类采矿等专业师生、煤炭科研院所科研工作者使用的参考书，也可供从事采矿、地下工程建设等工作的工程技术人员参考。

# 前 言

20世纪90年代以来,随着我国煤巷锚杆支护理论及设计方法的不断完善,新的支护材料和支护器具不断研制成功并生产投入使用,我国煤矿巷道大范围推广使用锚杆支护,锚杆支护以其显著的技术、经济优越性已成为煤矿巷道支护的一种重要支护形式之一,这是煤矿巷道支护形式的一场革命。

但是,目前在使用锚杆支护过程中,几百米甚至上千米长的巷道中经常在某个区域出现冒顶事故,造成的危害非常巨大。出现这种现象的原因主要是煤巷锚杆支护设计的地质依据存在以点代面、以偏概全的现象,使整个巷道存在支护不足区域。现场不能够及时发现存在冒顶危险的区域,进而采取有针对性的控制措施,导致锚杆支护煤巷冒顶事故越来越多。

锚杆支护煤巷顶板的灾害是非常严重的,深入细致地研究顶板的稳定性,是防止顶板灾害的有效手段。国内外学者主要通过理论分析、模拟试验、监测方法3方面对锚杆支护煤巷顶板的稳定性进行了大量研究。

笔者在近几年的研究工作中,通过锚杆支护煤巷冒顶事故的广泛调查和资料阅读,以现场锚杆支护煤巷顶板锚固系统破坏方式为例,指出引起顶板破坏的原因。将锚杆支护煤巷中高应力区域、顶板岩层节理发育以及顶板存在隐含破碎带的区域定义为典型地质区域。设计了三大类型数值模型,分别为不同应力组合条件与不同顶板节理、裂隙程度以及节理、破碎带距顶板表面不同位置3种情况。在设计的模型中,巷道地质条件存在正常地质条件和典型地质条件。利用离散元软件 UDEC 对设计模型进行了数值模拟,分析了顶板锚固体的受力特征、变形特征以及破坏特

征。发现了在巷道应力调整趋于稳定过程中，存在冒顶危险区域。巷道顶板锚杆与稳定区域相比，任何位置的锚杆所承受载荷都大，为确定反映顶板危险性的相对指标——顶板锚杆载荷提供了依据。

通过对巷道顶板锚杆支护系统各构件受力特点及相互间的力学关系分析得出，锚杆和托盘是顶板锚固系统稳定性的外在表现构件。在工作状态时，托盘球壳的受力载荷与锚杆的托锚力是作用力与反作用力关系，为通过锚杆受力预测冒顶危险区域转化为利用托盘受力预测冒顶危险区域提供了理论依据。为了利用托盘变形预测煤巷冒顶危险区域，采用弹性力学中的旋转球壳无矩理论，分别对托盘垂直受载和偏心受载两种工作状态的受力特征和变形特征进行了理论计算。研究得出，当托盘球壳受偏心载荷时，同一系列的托盘承受最大载荷的能力优于球壳受垂直载荷时承载能力。虽然球壳受偏心载荷时对托盘的工作状态有利，但是现场使用锚杆过程中，由于偏心载荷作用，使锚杆尾部发生断裂的现象，锚杆支护系统失去作用，所以对于锚杆支护系统来说，偏心工作状态是有害的。

采用 RMT 150b 电液伺服试验机分别对 6, 8, 10mm 3 种不同厚度的托盘进行压缩试验，利用回归分析方法得出了托盘在弹性变形阶段受力载荷与球壳变形量之间关系。通过理论计算和实验室试验研究成果可知，托盘球壳在发生微小变形时，托盘已经承受较大的载荷，即托盘材料的刚度较大。此结论为在巷道支护初始阶段跟踪顶板微变形提供了理论基础。

结合现场，设计了顶板微变形监测的方法，研究了微变形监测点的设置原则。为提取顶板微变形监测数据，开发了顶板微变形监测仪器，仪器包括应变仪、位移传感器及安装附件。该仪器具有体积小、安装与拆卸方便、精度高等优点。

为了验证锚杆支护煤巷冒顶危险区预测方法的可行性，在东庞矿 2608 工作面上巷某段进行了长达 1 个月左右的监测。共 6

组循环监测。每次循环共布置 5 个测站，分别为距掘进头 10, 12.4, 14.8, 17.2, 19.6m 处，共监测巷道总长度约 72m。采用时间序列分析、相关性分析、神经网络等方法对微变形监测数据进行处理，对冒顶危险区域进行预测，取得了很好的效果。

本书是在修改博士论文的基础上，在博士生导师马念杰教授的悉心指导下完成的。本书第 1 章由刘少伟、马念杰、武建栋共同撰写，第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 6 章由刘少伟撰写，第 4 章由刘少伟、武建栋共同撰写。研究生张辉做了本书出版前的文字修改工作。

本书部分研究成果得到了河南理工大学博士基金和河南理工大学青年骨干教师资助计划项目的资助，特此感谢。

由于时间仓促，作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请专家、同行批评指正！

**著 者**

2008 年 8 月

# 目 次

<b>1 锚杆支护煤巷冒顶危险性预测研究概述</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 煤巷锚杆支护理论研究现状 .....	4
1.3 煤巷锚杆支护设计方法研究现状 .....	10
1.4 锚杆支护煤巷冒顶危险性预测研究现状 .....	12
1.5 锚杆支护煤巷冒顶危险性预测存在的问题 .....	25
1.6 本书主要研究内容 .....	26
<b>2 锚杆支护煤巷冒顶危险区与锚固体特征研究</b> .....	28
2.1 数值模拟分析方法 .....	29
2.2 数值模拟分析的步骤 .....	31
2.3 锚杆支护煤巷顶板锚固体特征模拟内容与 模型建立 .....	50
2.4 巷道不同应力影响区顶板锚固体的特征研究 .....	52
2.5 巷道顶板不同节理发育程度的各区域顶板 锚固体的特征研究 .....	58
2.6 巷道不同地段顶板存在隐含节理时顶板锚固 体的特征研究 .....	64
2.7 锚杆支护煤巷存在冒顶危险地段顶板锚固体 特征 .....	70
2.8 本章小结 .....	70
<b>3 锚杆支护煤巷锚固系统各构件受力特征研究</b> .....	71
3.1 煤巷顶板锚固系统构件之间力学关系 .....	71
3.2 煤巷顶板锚固系统中托盘的受力分析 .....	82
3.3 煤巷顶板碟形托盘球壳受力与变形关系实验	



研究	97
3.4 煤巷顶板托盘变形与巷道冒顶危险性关系	109
3.5 本章小结	111
<b>4 锚杆支护煤巷冒顶危险区预测方法研究</b>	<b>113</b>
4.1 锚杆支护煤巷冒顶危险区预测方法的原理	113
4.2 锚杆支护煤巷冒顶危险区监测应遵循的原则	113
4.3 锚杆支护煤巷顶板变形监测方法原理	114
4.4 锚杆支护煤巷顶板变形监测仪器的开发	115
4.5 锚杆支护煤巷冒顶危险区监测点布置	125
4.6 锚杆支护煤巷顶板微变形监测数据处理方法	136
4.7 锚杆支护煤巷冒顶危险区预测流程	148
4.8 本章小结	148
<b>5 锚杆支护煤巷冒顶危险区预测方法工程应用</b>	<b>150</b>
5.1 东庞矿 2608 工作面概况	150
5.2 地质及生产技术条件	150
5.3 2608 工作面上巷顶板微变形监测方式及监测区域划分	158
5.4 顶板微变形监测数据结果及相关性分析	161
5.5 2608 工作面上巷监测段冒顶危险区域的神经网络预测	192
5.6 2608 工作面上巷监测段顶板危险区域预测	199
5.7 存在冒顶危险区域的控制措施	199
5.8 本章小结	200
<b>6 主要结论</b>	<b>202</b>
附表	204
参考文献	216

# 1 锚杆支护煤巷冒顶危险性 预测研究概述

## 1.1 引言

在煤巷支护中，棚式支护居于“被动”支护，基本不具有初阻力，只是在围岩变形后，随着围岩变形的增加，支架支护阻力随之增加。而通常使用的锚杆支护属于“主动”支护，在锚杆安装后，可充分利用围岩的自承能力将载荷体变为承载体，锚杆对围岩提供轴向或横向的支护阻力，且随围岩变形支护阻力不断增加。锚杆支护与传统的棚式支护相比，具有显著的技术、经济优越性，主要表现在：锚杆支护更有利于改善巷道的维护状况，保持巷道围岩的长期稳定，在相同生产地质条件下，锚杆支护的巷道围岩变形量通常要比棚式支护减少一半以上；锚杆支护还可以节约大量钢材，减少支护材料的运输和装卸支架工作量，减轻工人的劳动强度和改善作业环境；锚杆支护巷道施工简单，机械化程度高，可大幅降低巷道支护成本，提高掘进速度和生产效率<sup>[1-3]</sup>。

但是，在几百米甚至上千米的锚杆支护煤巷经常发生冒顶事故。据调查，我国很多大型矿业集团的锚杆支护煤巷每年都发生冒顶事故3~8次，人员伤亡事故也屡有发生。国内锚杆支护煤巷冒顶事故伤亡次数与二级以上非伤亡事故次数的比例高达1:19.3<sup>[4]</sup>。虽然很多冒顶事故没有造成人员伤亡，但给煤矿的正常生产和井下人员的安全造成了很大的影响。国内现场实际巷道冒顶事故情况，见表1-1。

从表1-1分析得出，冒顶事故主要发生在断层、破碎带附

表 1-1 现场实际巷道冒顶事故调查表<sup>[4]</sup>

序号	冒顶区域	冒顶地点	巷道类型	冒顶规模 长×宽×高/(m×m×m)	冒顶原因
1	断层、 破碎带	交岔点	顶层煤巷	7~8×5.5×3~5	断层带
2		运输巷	顶层煤巷	8.8×3.2×3.5	未发现巷道上帮隐含落差为0.6m的小断层
3		运输巷	顶层煤巷	6.4×3×2.5~4	顶板存在一条落差0.8m的断层,造成顶板破碎
4		运输巷	顶层煤巷	4.8×2.8×1.2~3	断层带
5		运输巷	顶层煤巷	8×3.5×2.5~3.5	有一落差1.0m的正断层
6		风巷	顶层煤巷	4.8×2.5×3	断层带
7		下运巷	顶层煤巷	4.6×3×2~2.5	断层带
8		上山迎头	顶层煤巷	6×3.2×1~4	断层带
9		下山迎头	顶层煤巷	4.8×3.2×2~3	断层带
10		机巷	顶层煤巷	5×3.8×1.3~2.2	断层带
11		风巷	顶层煤巷	5×4×7	断层带
12		下巷	全煤巷道	8.5×5×4	巷道在上帮隐含断层
13		下巷	顶层煤巷	(5~6)×3.2×2	断层带

表 1-1 (续)

序号	冒顶区域	冒顶地点	巷道类型	冒顶规模 长×宽×高/ (m×m×m)	冒顶原因
14		开切眼	顶层煤巷	9×5.5×3~5	断层破碎带
15		运输巷	顶层煤巷	7.2×2.8×5	顶板有落差0.4~0.6m的断层
16		下顺槽运输巷	顶层煤巷	4.7×3×0.6~2.0	节理发育
17		开切眼	顶层煤巷	8×6.5×4	巷帮有一隐含斜切弱面
18		西运输巷	顶层煤巷	12.5×5.2×6	上帮隐含一滑动弱面
19		风巷	顶层煤巷	4.8×3×1.4~3	冒顶后巷壁有一隐含弱面
20		下巷	顶层煤巷	7×3.2×2~3.5	巷道前方存在陷落柱
21	高应力	风巷	顶层煤巷	9×6×5	裂隙发育,顶板含水
22		运输巷	顶层煤巷	6.7×3.2×2.3	节理裂隙发育
23		回风巷	顶层沿空	17×4.5×5	压力大,支护强度不足
24		巷道	顶层煤巷	20×4.2×2	受煤柱集中应力影响,压力大
25		中部运输巷	顶层煤巷	10×3.6×2.4	该巷垂深近千米,水平应力为垂直应力的1.1~2.3倍,煤层强度较小,造成突然闭合型冒顶
26		下巷	顶层煤巷	5×3×1.2~3	巷帮煤层较软,锚固力小
27		运输巷交口	全煤巷道	14.9×6.4×6.8	该区域水平应力比其他区域大

近和高应力区。分析以上引起冒顶事故的原因可知，对于能够揭露的断层可以预先加强支护，而对于巷道围岩附近的隐伏断层不易发现，在支护过程中不能重点加强支护，在巷道开挖后，围岩结构和应力状态发生改变，从而发生冒顶。

目前现场煤巷由于岩层结构和各种地质构造的影响，致使巷道不同区域应力都不尽相同。理论研究和现场实践表明<sup>[5-7]</sup>，巷道在高应力的作用下围岩变形严重，是冒顶事故的高发地带，地壳经过地质构造运动，在巷道顶板覆盖着各种类型的沉积岩，不同层位的沉积岩厚度变化不定，岩层突然变薄的和组合裂化的区域，也是存在冒顶危险的地点<sup>[4]</sup>。

锚杆支护由于是锚固到巷道围岩的内部，是一项隐蔽性工程，因理论和技术条件的限制，必然存在支护不足的区域。发现这些支护不足的区域，采取相应措施最大限度地控制冒顶事故的发生，对于保障矿井高效、安全生产具有重要意义。

## 1.2 煤巷锚杆支护理论 research 现状

### 1.2.1 国外锚杆支护理论

目前国外对锚杆支护的机理研究较多，可归纳为以下几种。

#### 1.2.1.1 悬吊理论

1952年，路易斯·阿·帕内科（Louis A. Panek）等发表了

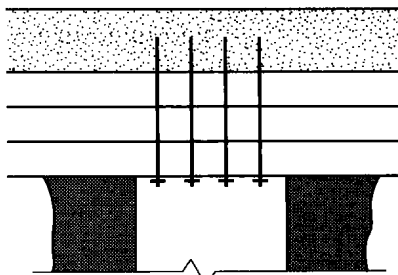


图 1-1 悬吊理论示意图

悬吊理论。悬吊理论认为锚杆支护的作用就是将巷道顶板较软弱岩层悬吊在上部稳固的岩层上，如图 1-1 所示。

对于回采巷道揭露的层状岩体，直接顶均有弯曲下沉变形趋势，如果使用锚杆及时将其挤压并悬吊在基本

顶上，直接顶就不会与基本顶离层乃至脱落。锚杆的悬吊作用主要取决于所悬吊的岩层的厚度、层数及岩层弯曲时相对的刚度与弹性模量，还受锚杆长度、密度及强度等因素的影响。这一理论提出的较早，在满足其前提条件时，有一定的实用价值。但是大量的工程实践证明，即使巷道上部没有稳固的岩层，锚杆亦能发挥支护作用。如在全煤巷道中，锚杆锚固在煤层中也能达到支护的目的，说明这一理论有局限性。

### 1.2.1.2 组合梁理论

组合梁理论认为巷道顶板中存在着若干分层的层状顶板，可看做是由巷道两帮作为支点的一种梁，这种岩梁支承其上部的岩层载荷，如图 1-2 所示。

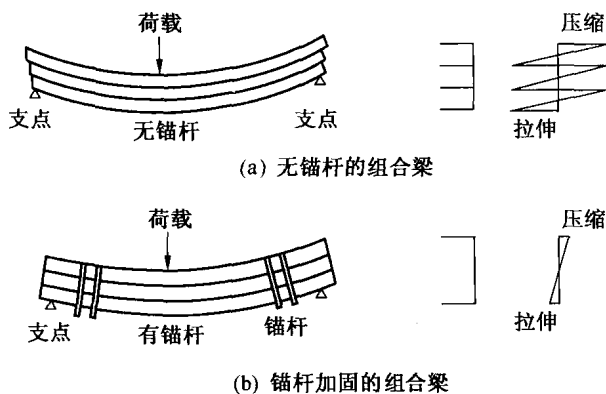


图 1-2 组合梁理论示意图

使用锚杆将各层“装订”成一个整体的组合梁，防止岩石沿层面滑动，避免各岩层出现离层现象。在上覆岩层载荷作用下，这种较厚的组合梁比单纯的叠加梁，其最大弯曲应变和应力将大大减小，挠度亦减小。而且各层间摩擦阻力愈大，整体强度愈大，补强效果愈好。但是，这种理论在处理岩层沿巷道纵向有裂缝时梁的连续性问题 and 梁的抗弯强度问题时有一定的局限性。

### 1.2.1.3 组合拱理论

组合拱理论是由兰氏 (T. A. Lang) 和彭德 (Pender) 通过光弹试验提出来的。组合拱理论认为, 在拱形巷道围岩的破裂区中, 安装预应力锚杆时, 在杆体两端将形成圆锥形分布的压应力, 如果沿巷道周边布置的锚杆间距足够小, 各个锚杆的压应力锥体相互交错, 使巷道周围的岩层形成一种连续的组合拱(拱), 如图 1-3 所示。

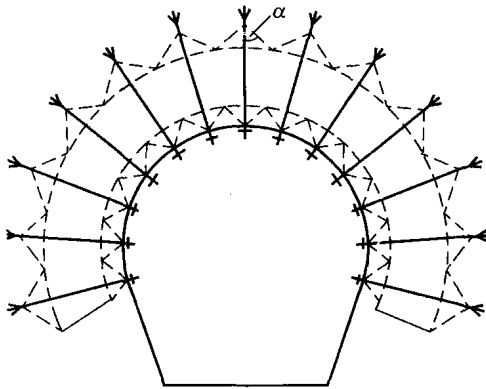


图 1-3 组合拱理论示意图

这个组合拱可承受上部岩石的径向载荷, 如同墩体起到岩层补强的作用, 承载外围的压力。组合拱理论的不足是缺乏对被加固岩体本身力学行为的进一步探讨, 与实际情况有一定的差距, 在分析过程中没深入探索围岩-支护的相互作用。

### 1.2.1.4 最大水平应力理论

澳大利亚学者盖尔 (W. J. Gale) 在 20 世纪 90 年代初提出了最大水平应力理论。该理论认为, 矿井岩层的水平应力一般是垂直应力的 1.3~2.0 倍。而且水平应力具有方向性, 最大水平应力一般为最小水平应力的 1.5~2.5 倍。巷道顶底板的稳定性主要受水平应力影响 (图 1-4), 且有 3 个特点: ①与最大水平

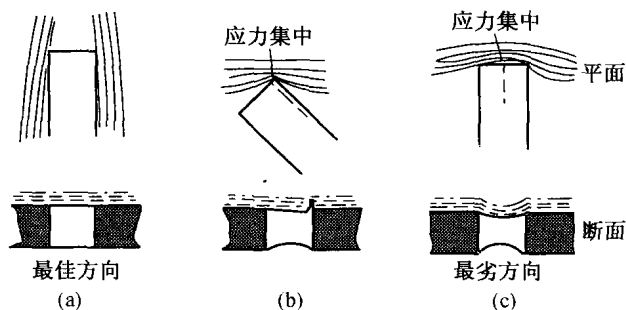


图 1-4 不同巷道布置方向的应力效应

应力平行的巷道受水平应力影响最小，顶底板稳定性最好；②与最大水平应力呈锐角相交的巷道，顶板变形破坏偏向巷道某一帮；③与最大水平应力垂直的巷道，顶底板稳定性最差。

最大水平应力理论论述了巷道围岩水平应力对巷道稳定性的影响以及对锚杆支护所起的作用。在最大水平应力作用下，巷道顶底板岩层发生剪切破坏，因而会出现错动与松动引起层间膨胀，造成围岩变形。锚杆所起的作用是约束其沿轴向岩层膨胀和垂直于轴向的岩层剪切错动，因此要求具有强度大、刚度大、抗剪阻力大的高强度锚杆支护系统。

### 1.2.2 国内锚杆支护理论

近十几年来，国内很多学者在公认的三大传统的锚杆支护理论基础上，对锚杆作用机理作了大量的深入研究与探讨，进一步揭示了锚杆支护的实质，促进了锚杆支护理论研究的发展，扩大了锚杆支护技术应用的范围，主要观点如下。

#### 1.2.2.1 全长锚固中性点理论

全长锚固中性点理论由东北大学王明恕教授等提出。该理论认为在靠近岩石壁面部分（锚杆尾部），锚杆阻止围岩向壁面变形，剪力指向壁面。在围岩深处（锚杆头部），围岩阻止锚杆向壁面方向移动。锚杆上的剪力指向相背的分界点，称为中性点，



该点处剪应力为零，轴向拉应力最大。由中性点向锚杆两端剪应力逐渐增大，轴向拉应力逐渐减少（图 1-5）。近年在国内理论分析中该理论的“中性点”观点被普遍接受，但其理论形式还存在着一定的争议，因为它难以解释锚杆尾部的断裂机理，有人认为是该理论假设未设托盘之故。

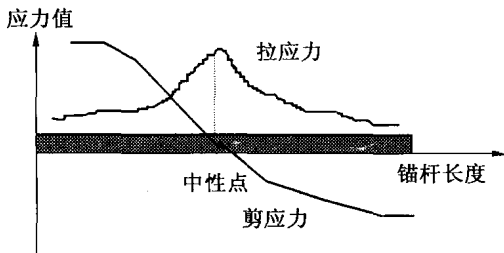


图 1-5 锚杆受力曲线

#### 1.2.2.2 松动圈理论

围岩松动圈巷道支理论由中国矿业大学董方庭教授等提出，该理论是在对巷道围岩状态进行深入研究后提出的。研究发现围岩松动圈的存在是巷道固有的特性，它的范围大小（厚度值  $L$ ）目前可以用声波仪或者多点位移计等仪器进行测定。巷道支护的主要对象是围岩松动圈产生、发展过程中产生的碎胀变形力，锚杆承受的拉力来源于松动圈的发生、发展，并根据围岩松动圈厚度值的大小，将其分为小、中、大 3 类。

松动圈的类别不同，则锚杆支护机理不同。Ⅰ类围岩  $L = 0 \sim 400\text{mm}$ ，围岩的碎胀变形量很小，此类围岩巷道支护一般无须锚杆，可以裸露围岩或者喷射混凝土单独支护；Ⅱ，Ⅲ类围岩  $L = 400 \sim 1500\text{mm}$ ，用悬吊理论设计锚喷支护参数；Ⅳ，Ⅴ类围岩  $L = 1.5 \sim 2.0\text{m}$ ， $L = 2.0 \sim 3.0\text{m}$ ，采用组合拱理论确定锚喷支护参数；Ⅵ类围岩  $L > 3.0\text{m}$ ，在没有进一步研究资料之前，应采用以锚喷网为基础的复合支护。该理论的优点是简单直观，对研