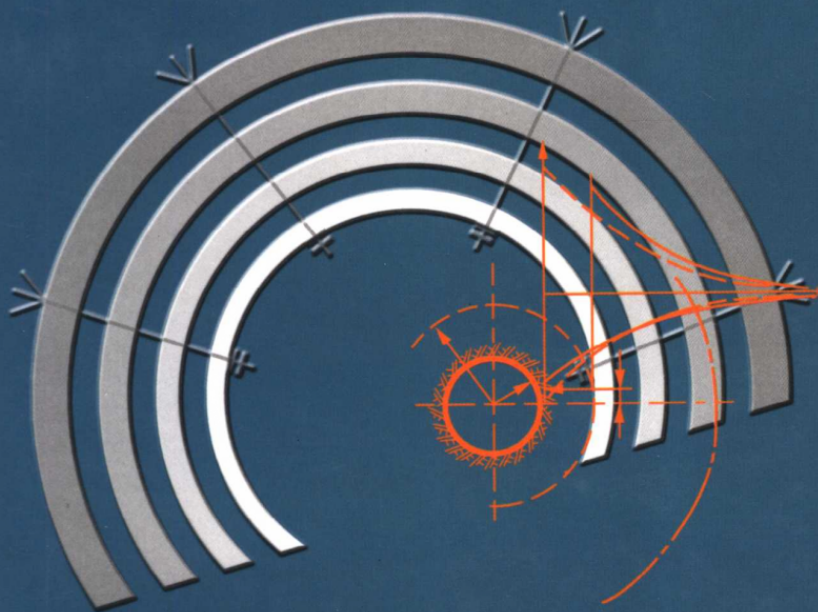


锚杆与围岩相互作用的 数值模拟

漆泰岳 著



中国矿业大学出版社

责任编辑: 刘社育 刘泽春
封面设计: 白海新 王 环

ISBN 7-81070-523-7



9 787810 705233 >

ISBN 7-81070-525-3/TD·77

定价: 20.00 元

锚杆与围岩相互作用的数值模拟

漆泰岳 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对高应力、软岩和采动等大变形巷道,从锚杆锚固力的发生和变化规律着手,在现场测试的基础上,深刻揭示了锚杆支护与围岩的相互作用关系,建立了能够反映围压对围岩力学参数产生显著作用、具有峰后应变软化和剪胀性的材料模型,得出了选取围岩力学参数的科学方法。在研究大变形巷道锚杆支护力学特性的基础上,建立了能够模拟锚杆支护应变软化特性全过程的锚杆结构模型,编制了“巷道锚杆支护数值模拟系统”专用软件。此软件能较真实地模拟锚杆与围岩的相互作用关系,并已成功地应用于工程实践,为大变形巷道锚杆支护的选型设计、机理研究以及扩大使用范围,提供了重要的科学依据,本书可供从事岩土工程的科研、设计、教学和现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

锚杆与围岩相互作用的数值模拟 / 漆泰岳著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2002. 5

ISBN 7-81070-525-3

I. 锚... II. 漆... III. 锚杆—巷道支护—数值模拟

IV. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 036037 号

- | | |
|------|---|
| 书 名 | 锚杆与围岩相互作用的数值模拟 |
| 著 者 | 漆泰岳 |
| 责任编辑 | 刘社育 刘泽春 |
| 出版发行 | 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编: 221008) |
| 印 刷 | 北京地质印刷厂 |
| 经 销 | 新华书店 |
| 开 本 | 850×1168 1/32 印张 5.875 字数 140 千字 |
| 版次印次 | 2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷 |
| 印 数 | 1000 册 |
| 定 价 | 20.00 元 |

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在岩土工程中，锚杆支护是兼有支架和加固两种作用的围岩控制技术，与框式支架相比具有显著的技术经济效益优势，因而在世界各国获得广泛应用。目前，锚杆支护的应用范围大多仍局限于地质和围岩条件较好的工程。研究有效地控制高应力、软岩和采动等大变形巷道锚杆支护的机理、模拟和技术，对进一步发展和完善锚杆支护具有重要意义，是当前锚杆支护的重要研究方向。弹塑性理论解析、现场测试、相似材料模型试验和数值模拟都是研究锚杆支护的重要手段。随着计算技术的发展，数值模拟对研究锚杆与围岩相互作用关系中存在的复杂的非线性大变形问题，具有很大的优越性和先进性。但是，现用数值模拟软件都缺乏模拟大变形巷道围岩和锚杆应变软化的功能，致使数值模拟结果经常严重偏离实际。

本书针对大变形巷道数值模拟中的上述问题，首先阐述了高应力、软岩和采动等大变形巷道锚杆锚固力的发生和变化规律；在现场测试的基础上，揭示了锚杆支护与围岩的相互作用关系，分析研究了显式有限差分单元法模拟锚杆——围岩关系的功效，建立了能够反映围压对围岩力学参数产生显著作用，具有峰后应变软化和剪胀性的材料模型；根据岩石力学试验和现场围岩损伤测试结果，运用岩体的屈服准则，得出了选取围岩力学参数的科学方法；在研究大变形巷道锚杆支护力学特性的基础上，建立了能够模拟锚杆支护应变软化特性全过程的锚杆结构模型。在理论研究的基础上，应用 VC++ 将上述成果程序化，编制了“巷道锚杆

支护数值模拟系统”专用软件。此软件能较真实地模拟大变形巷道锚杆与围岩的相互作用关系，并已成功地应用于工程实践，为大变形巷道锚杆支护的选型设计、机理研究以及扩大使用范围提供了重要的科学依据。

本书共分六章。第一章阐明了大变形巷道围岩的损伤变形规律；锚杆锚固力随巷道围岩损伤变形而呈现的上升、稳定、衰减和失效的变化规律；锚杆锚固力遏制围岩损伤变形的作用，揭示了大变形巷道锚杆支护与围岩的相互作用关系。第二章分析介绍了锚杆支护的多种数值模拟研究方法及其显式有限差分单元法的基本原理，得出显式有限差分单元法是研究锚杆与围岩相互作用过程的较为理想的方法。第三章通过对围压与粘聚力、内摩擦角和剪胀角等岩石力学参数之间关系的统计分析，得出两者之间的数学关系式，建立了具有能模拟围压对围岩力学参数产生显著作用的、反映围岩峰后应变软化和剪胀性的材料模型，在岩石力学试验和现场围岩损伤测试的基础上，根据 Hoek-Brown 与 Mohr-Coulomb 屈服准则之间的关系式，提出数值模拟中围岩力学参数的科学选取方法。第四章在显式有限差分程序 FLAC^{3D}3.3 的基础上，建立了能够模拟锚杆锚固力随围岩损伤变形而变化的全部过程、具有应变软化特性的锚杆结构模型，填补了现有商业化数值软件都不具备的模拟锚杆支护这一特性的功能。第五章开发了应用 VC++ 编制的基于 Windows98 平台的“巷道锚杆支护数值模拟系统”专用软件，该系统充分利用对内存的动态分配及数据管理编程技术，具有友好的人机交互式界面，计算速度和规模都得到大幅度提高。第六章阐述了本书编制的“巷道锚杆支护数值模拟系统”软件，对锚杆的初锚力、刚度和最大锚固力控制围岩变形的作用，对锚杆的托板、杆体和锚固剂三者的强度匹配关系以及锚杆围岩的相互作用关系进行模拟和工程实例分析。

本书基于作者博士学位论文的基本框架，书中凝集着导师陆

士良教授等的珍贵观点和热诚指导；书中还参考了国内外大量文献和研究成果。在此深表谢意。

由于水平所限，书中难免有疏漏和错误之处，恳请读者批评指正。

作者

2001年12月

目 录

第一章 大变形巷道锚杆与围岩的相互作用.....1	
第一节 大变形巷道锚杆支护与数值模拟概述.....1	
第二节 大变形巷道锚杆与围岩相互作用的内涵.....5	
第三节 巷道周边和岩体深处的变形损伤规律.....8	
第四节 巷道岩体变形损伤过程中锚固力的变化规律.....14	
第五节 锚固力对巷道围岩变形损伤的控制作用.....22	
第二章 显式有限差分单元法.....40	
第一节 岩土工程的数值模拟研究综述.....40	
第二节 显式有限差分单元法的基本原理.....45	
第三节 显式有限差分单元法计算过程的参数选择.....55	
第四节 四边形差分单元应力和应变的均化处理.....64	
小 结.....67	
第三章 岩石(岩体)峰后力学特性及数值模拟.....68	
第一节 岩石的力学特性.....68	
第二节 围压对岩体力学参数的影响.....75	
第三节 岩体峰后应变软化和剪胀性的材料模型.....82	
第四节 材料模型的参数.....93	
小 结.....94	
第四章 锚杆应变软化力学特性的数值模拟.....97	
第一节 现有数值分析方法模拟锚杆支护存在的问题.....97	
第二节 锚杆结构模型.....100	
第三节 模拟锚杆力学特性的参数.....116	

小 结	118
第五章 VC++编程与锚杆数值模拟系统	119
第一节 概述	119
第二节 面向对象编程及 VC++编程计算速度	121
第三节 VC++内存分配方法	124
第四节 “巷道锚杆支护数值模拟系统”的内容简介	135
小 结	143
第六章 “巷道锚杆支护数值模拟系统”的应用	145
第一节 系统的前处理和后处理	145
第二节 检验系统计算方法的正确性	153
第三节 数据准备—前处理	155
第四节 初锚力对围岩变形的控制作用	160
第五节 锚杆刚度和最大锚固力对围岩变形的控制作用	163
第六节 锚固方式对围岩变形的控制作用	165
第七节 锚杆失效原因的数值模拟	166
小 结	170
主要参考文献	171

第一章 大变形巷道锚杆与围岩的相互作用

第一节 大变形巷道锚杆支护与数值模拟概述

一、锚杆支护的发展和现状^[1~10]

锚杆作为一种行之有效的、经济优越的巷道支护技术，倍受世界岩土工程界的重视。从 1912 年艾尔弗雷德·布希(Alfred Busch)在阿伯施莱辛(Aberschlesin)的弗里登斯(Friedens)煤矿开始使用锚杆支护顶板以来，锚杆支护已经历了近百年的历史。如今锚杆支护已被广泛应用于煤矿、金属矿山、水利、隧道以及其他岩土工程中。世界锚杆支护经历了如下发展历程：1945 年~1950 年，机械式锚杆研究与应用；1950 年~1960 年，采矿业广泛使用机械式锚杆，主要形式为楔缝式、涨壳式、倒楔式等；1960 年~1970 年，树脂锚杆出现并得到大量应用；1970 年~1980 年，发明了管缝式锚杆、胀管式锚杆，并研究了新的设计方法，长锚索的应用；1980 年~1990 年，混合式锚头锚杆、组合锚杆、桁架锚杆、特种锚杆等得到应用，树脂锚固材料得到改进。如今，锚杆支护在世界各国的各类岩土工程中都已得到广泛应用。

我国煤矿从 1956 年起在岩巷中使用锚杆支护，20 世纪 60 年代扩大使用到采准巷道。40 余年来，锚杆支护取得很大进展，我国重点煤矿的巷道锚杆支护率已达到 60%。但是，我国煤矿的软岩地层分布十分广泛，加之占煤矿巷道总量 75%的采准巷道还要经受采动的强烈影响，大多巷道服务期间的围岩变形量都很大。研究开发有效地控制高应力、软岩和采动等大变形巷道的锚杆支

护技术,成为推动锚杆支护迅速发展的关键。

在世界范围内,目前锚杆支护大多应用于地质条件较好的岩土工程,围岩松软破碎、高应力、受采动影响的大变形巷道,锚杆支护仍然是尚待解决的难题。国内外锚杆支护正朝着提高锚固力、扩大应用范围、提高支护效率方向发展。普遍认为开发具有强初撑、急增阻、高阻力力学特性的锚杆支护,是控制高应力、软岩大变形巷道的有效途径,是锚杆支护的主要发展方向。

二、大变形巷道锚杆支护的力学特性

现场实测和实验室试验研究表明,锚杆锚固力是峰后围岩剪胀变形与锚杆相互作用的结果,随着巷道围岩损伤变形的发展,锚杆锚固力呈现增长、稳定、衰减、以致丧失等过程^[5: 16~20, 22~24]。锚杆力学特性的变化主要取决于:

- (1) 锚杆本身的结构、参数、锚固方式、锚固长度等;
- (2) 金属网和钢带、梁等护表附属构件;
- (3) 锚固岩体的坚硬度、结构和性质;
- (4) 锚固岩体的位移、流变、离层、破碎及坍塌等围岩损伤破坏过程。在软岩大变形巷道中,围岩损伤变形过程对锚杆力学特性产生很大影响。

锚固力和巷道围岩变形是锚杆与围岩相互作用的结果,锚固力是随锚杆与围岩相互作用而变化的。所以既不能离开围岩和围岩变形去分析研究锚固力和锚杆支护问题,也不能离开锚固力去分析研究围岩变形问题。煤系地层大多为比较松软的沉积岩,试验研究表明,岩石(岩体)在峰后具有明显的应变软化和剪胀特性,且这些特性与围压有密切关系。锚杆作为一种插入围岩内的支护方式,在巷道围岩损伤变形过程中,锚杆产生了约束弱面扩张和错动的锚固力,使围岩强度得到提高,自撑能力得到发挥,从而达到控制巷道围岩变形的目的。因此,对锚杆与围岩相互作用关

系进行深入研究,必须选择符合这一规律的方法。早期的锚杆支护理论^[4, 5, 6]都没有将围岩与锚杆的力学特性结合起来,无法对锚杆与围岩相互作用的过程进行研究。随着锚杆支护在软岩大变形巷道中的应用,经常出现锚杆锚固力显著下降和丧失的现象,促使人们采用新的方法对锚杆与围岩相互作用和相互制约的关系进行探讨研究,并已取得一些可喜的研究成果^[5, 6, 11, 12, 14~20, 27~29]。

三、大变形巷道锚杆支护数值模拟的问题

弹塑性理论解析、现场测试及相似材料模型试验都是研究锚杆支护机理的重要手段。关于数学力学法,通常都采用比较复杂的模型和公式,对工程条件作大量简化,将锚杆的作用等效为围岩力学参数的改善,然后应用工程力学原理进行理论分析。这种方法虽可得到实验室试验的部分验证,但在实际应用中等效力学参数很难确定。现场测试和相似材料模型试验得到的结果虽更接近实际,但由于测试手段的局限性,难以获取分析问题所需的足够的信息。

数值分析法(有限元法,有限差分法、边界元法、离散元法和显式差分元法等)为研究锚杆支护提供重要手段,但在实际应用中还存在许多问题。

(1) 岩体参数的选取,直接关系到最终计算结果的正确性^[75~77]。现有数值分析法普遍采取试算逼近法、反分析法等一些经验分析方法,这很难使实验室测定的岩石力学与现场的围岩力学特性联系起来。因此,迫切需要研究将实验室与现场测定相结合的选取岩体力学参数的科学、实用的方法。

(2) 大多数商业数值软件的研究对象为不发生塑性屈服破坏的稳定岩层,材料的本构模型不具备反映岩体峰后应变软化和剪切膨胀(剪胀性)的功能^[30, 66, 67],但软岩、高应力和受采动影响的大变形巷道,大多呈现出明显的塑性应变软化性和剪胀性,这就

要求数值分析软件具备模拟这些岩体力学特性的功能。

尽管著名的 FLAC^{2D}3.3 具有应变软化材料模型^[31],但是,该模型没有考虑应力状态(围压)对材料力学参数的影响,计算结果致使在有无支护和初锚力等支护强度(围压)相差悬殊的条件下,巷道的围岩变形相差不大,计算结果与实际差别较大。试验研究表明,岩体应力状态对已处于屈服破坏的围岩的稳定性有十分明显的影响,巷道支护的实质就是改变巷道周边不稳定围岩的应力状态,给围岩提供侧向围压。现有巷道支护所能提供的支护强度(围压)与围岩的极限强度相比尽管很小,通常都小于 0.4 MPa,但在软岩巷道中,支护强度(围压)对围岩变形的控制作用十分明显。因此,数值分析法的材料模型一本构方程不能反映围压(应力状态)对围岩力学特性(峰后应变软化性和剪胀性)的作用,必然会使与围压有关的数值模拟结果与实际不相符合。为此,需要研究建立能够反映围岩力学特性的、受围压作用的材料本构关系的力学模型(简称材料模型)。

(3) 锚杆力学特性是锚杆系统的力学参数、围岩的力学特性以及锚杆与围岩相互作用的结果^[16~21]。锚杆安设后,随围岩变形的增大,锚杆锚固力要经历初锚力、增阻段、恒阻段、降阻段和残余阻力段直至阻力丧失等过程。在大变形巷道中,经常会出现锚杆锚固力的变化、下降直至丧失的力学特性(其中锚固力的下降直至丧失的力学特性,本书称之为锚杆的应变软化力学特性)。现有的商业数值分析软件都不具备模拟锚杆支护这一力学特性的功能。为此,需要研究建立能够反映锚杆力学特性全过程的锚杆结构力学模型。

综上所述,锚杆的锚固力和力学特性随围岩变形损伤而变化,数值模拟分析法很易获得任意时刻的应力场、位移场等信息,是适用于研究锚杆与围岩相互作用过程的方法。但是,需要针对现

用数值模拟分析法存在的问题, 研究建立能够反映围岩和锚杆力学特性的模型, 探索科学实用的选取围岩力学参数的方法, 有效地实现锚杆与围岩相互作用关系的数值模拟, 这对锚杆支护的理论和应用都有重要意义。

第二节 大变形巷道锚杆与围岩相互作用的内涵

一、锚固力的内涵^[5]

锚杆安设在岩体内部, 它的受力以及它作用于围岩的力与框式支架相比要复杂得多。国标 GBJ 86—85 将锚固力定义为锚杆对围岩的约束力。在实际应用中, 大都以抗拔力为锚固力, 这给检验锚杆安设质量提供了简便的拉拔试验方法, 但国内外许多学者认为抗拔力与锚固力有区别, 所以有必要分析研究锚固力的含义。

1. 根据锚杆对围岩的稳定作用划分和定义锚固力

图 1—1 表示作用于围岩的两个方向的力, 即径向锚固力和切向锚固力, 径向锚固力包括托锚力和黏锚力。

(1) 托锚力。托板阻止围岩向巷道内位移, 对围岩施加径向支护力, 使围岩由平面应力状态转化为三向应力状态, 提高了围岩的强度, 这种来自于托板使围岩稳定的力, 称为托锚力。

(2) 黏锚力。锚固剂将围岩与锚杆黏结成整体, 由于围岩深部与浅部变形的差异, 锚杆便通过锚固剂对围岩施加黏结力来抑制围岩变形, 这种力对稳定围岩起着重要作用, 称为黏锚力。对于整根锚杆而言, 黏锚力的合力与锚杆体内轴力的合力是作用力与反作用力的关系, 但从锚杆某一段来看, 在这一段中的黏锚力与锚杆体内的轴力不一定相等。因此, 轴力沿杆体是不均匀分布的。关于这方面的内容将在第四章中进行详细阐述。

(3) 切向锚固力。围岩体的变形大多是从岩体中的弱面开始的，在围压的作用下，围岩沿着弱面滑动或张开，最终导致巷道断面的收缩。由于锚杆体贯穿弱面，它限制围岩沿弱面的滑动或张开，这种限制力称为切向锚固力。尽管杆体所能提供的切向锚固力与弱面的强度相比是较小的，但切向锚固力的存在可使弱面不致于因某个薄弱环节的突然破坏而影响原有承载力的充分发挥。

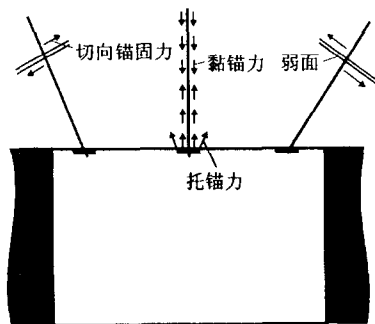


图 1—1 锚杆约束围岩的力

2. 根据锚固力的变形过程划分和定义锚固力

从锚杆安设到失效，在锚杆起作用的整个过程中，根据锚固力的发展，可分为初锚力、工作锚固力、残余锚固力三个作用阶段。

(1) 初锚力。安设锚杆时，人为地对锚杆进行张拉而使锚杆具有的作用于围岩的力，称为初锚力。

(2) 工作锚固力。锚杆安设以后，围岩变形，锚固剂开始发挥其黏结作用。这时锚杆对围岩的作用力，称为工作锚固力。

(3) 残余锚固力。当围岩的表面和深部的相对变形量超过了锚固剂的极限变形量以后，锚固剂破坏，工作锚固力丧失，但由于破坏的锚固剂仍具有残余黏结强度，以及钻孔围岩一破坏的锚固剂—锚杆杆体之间存在摩擦力，因此这时锚杆对围岩仍具有约束力，这种力称为残余锚固力。

二、锚杆与围岩相互作用的含义

1. 大变形巷道围岩的力学特性

一般情况下，大变形巷道的围岩都属于软弱破碎围岩，在巷

道未开挖之前,岩体内部就已经存在着大量的原生节理裂隙,巷道一经开挖,使巷道周边的围岩从原来的三向受力状态转变为双向受力状态,此时的围岩处于从稳定向不稳定过渡的临界状态,大多已经进入到屈服破坏阶段或塑性应变软化阶段。大变形巷道的围岩力学特性——塑性应变软化和剪胀性,决定了围岩中的弱面会在巷道开挖后迅速发生错动、扩张,承载能力也会迅速下降。如果此时不及时支护,巷道周边围岩将会发生冒落、坍塌现象。

2. 锚杆支护对围岩损伤变形的控制作用

锚杆作为一种插入围岩内的巷道支护方式,它不仅能给巷道周边围岩表面施加托锚力,起到支护巷道的作用,而且还能给锚固岩体施加约束围岩变形的锚固力,使被锚固岩体的强度得到提高,起到加固围岩的作用。另外,锚杆还能人为地给围岩施加一个主动的支护力——初锚力,使锚杆成为真正意义上的有别于框式支架的“主动”支护形式。上述锚杆支护的技术优势决定了锚杆能够在围岩发生较小变形时,就能给围岩提供足够大的约束围岩变形的力——锚固力,这个力能够使巷道开挖后处于临界状态的围岩,迅速地从临界状态转变成为稳定状态,获得更高的自承能力,使围岩变形迅速得到有效地控制。试验研究表明,虽然锚杆给巷道围岩提供的支护强度相对于围岩自身的极限强度是微不足道的(一般围岩强度为锚杆支护强度的100倍以上),但是,锚杆支护对围岩变形的控制作用十分明显,在软弱破碎围岩条件下表现得尤为显著。

3. 围岩力学特性对锚杆力学特性的影响

锚杆的实际工作性能往往主要地取决于围岩的力学特性,软弱破碎围岩的力学特性对锚杆的力学特性影响更加明显。锚杆的拉拔试验表明:同样的锚杆、锚固剂和锚固长度,在不同的围岩条件下,拉拔力是不同的,围岩越坚硬、越完整,锚杆的拉拔力

越大,反之,则越小。现场实测和实验室试验研究表明,围岩峰后剪胀变形过程对锚杆锚固力的产生和发展的影响十分明显,在围岩剪胀变形过程中,锚杆的应变软化特性,是软岩大变形巷道锚杆支护所特有的力学特性。在软弱破碎围岩条件下,围岩的力学特性对锚杆的力学特性具有明显影响。

综上所述,大变形巷道锚杆与围岩相互作用的关键取决于围岩的力学特性。锚杆对大变形巷道的围岩具有明显的控制作用,锚杆能够改变围岩的力学特性,提高围岩的自承能力,减少围岩变形,保持巷道围岩的稳定性。反之,围岩的力学特性对锚杆的力学特性具有十分明显影响。因此,锚杆与围岩是一种相互影响、相互制约的关系。

第三节 巷道周边和岩体深处的变形损伤规律^[5,16-20]

巷道围岩变形具有明显的时空性。从空间来看,巷道所处的位置决定了巷道围岩所处的应力场和围岩条件,这些因素决定着巷道围岩变形的速度和大小。从时间上看,巷道在不同时期的围岩变形速度是变化的:一方面是开挖和回采的动压影响;另一方面是围岩的流变性,它们都与时间有关。因此,巷道围岩变形过程是一个随时空变化的渐变过程。

一、原岩巷道的变形损伤规律

从空间来看,巷道围岩表面的变形与深部的变形是不一致的。巷道围岩变形都从表面向深部逐渐降低,围岩内部变形与其周边变形之间具有明显的相关性。其相关规律首先取决于巷道围岩应力的分布、变化及围岩性质。同时,与巷道支护阻力,尤其是锚杆与围岩的相互作用,以及岩体的流变性有关。