

铜山矿深部矿体Ⅱ号探矿竖井工程岩体力学分析

赵纯林 焦东 丛浩

中国华冶科工集团有限公司 北京 100176

摘要：本文依托铜山矿深部矿体Ⅱ号探矿竖井工程项目，围绕岩石在单轴压缩条件下的破坏特征与机理、岩石应力应变全过程曲线、影响岩石强度和变形的因素、岩石蠕变的分类及特点以及岩体力学在矿山的应用场景等方面展开深入研究。通过对这些问题的分析，旨在全面阐述岩体力学的关键理论和实际应用，为矿山工程及其他相关领域提供理论支持和实践指导。

关键词：岩石力学；破坏特征；应力应变曲线；岩石蠕变；矿山应用

引言：岩体力学作为一门研究岩体在力场作用下变形与破坏规律的学科，在工程建设中占据着举足轻重的地位。近年来在矿山工程领域岩体力学的关键地位愈发突显。一方面，矿山开采活动深入地下，岩体的稳定性直接关乎矿工的生命安危。借助岩体力学知识，技术人员可对巷道围岩、采场顶板等关键部位进行稳定性分析，提前预判可能出现的坍塌风险，进而合理安排支护措施，如采用锚杆、锚索固定岩体，或喷射混凝土强化围岩，切实保障作业面的安全，降低事故发生率。另一方面，从资源开采效率来看，岩体力学助力矿山优化开采方案。了解岩石的硬度、强度以及节理裂隙分布等，能指导矿山精准选择爆破参数，确保矿石破碎均匀，便于后续的采掘工作，减少矿石损失与贫化，提升矿山的经济效益。

1 岩石在单轴压缩条件下的破坏特征与机理

1.1 破坏特征

1.1.1 岩石在单轴压缩下的常见破坏形式：（1）脆性破坏，这种破坏过程通常伴随着清脆的响声，岩石试件会迅速破裂成多个碎块，碎块的形状和大小不一，破裂面比较平整、光滑，且具有明显的方向性。例如，在实验室对石英岩进行单轴压缩试验时，当应力达到峰值后，石英岩试件瞬间崩裂，产生许多带有尖锐棱角的碎块，碎块沿着大致平行的方向裂开，这是因为石英岩内部的微裂纹在高应力下迅速扩展并贯通，导致岩石突然断裂。（2）塑性破坏，岩石在塑性破坏时，不会像脆性破坏那样突然断裂，而是逐渐产生较大的变形，试件的形状会发生明显改变，如出现鼓胀现象。最终，岩石可能会因为过度变形而失去承载能力。

1.1.2 不同岩石类型在单轴压缩下破坏特征的差异：

（1）花岗岩，由于花岗岩主要由石英、长石和云母等矿物组成，这些矿物颗粒之间的结合力较强，使得花岗岩具有较高的强度。但是，花岗岩内部的微裂纹在高应力

下容易扩展，尤其是在矿物颗粒边界处。例如，在对粗粒花岗岩进行单轴压缩试验时，破裂往往沿着石英和长石颗粒的边界产生，因为这些边界处可能存在原始的微缺陷，导致在受压时成为裂纹扩展的薄弱环节。（2）砂岩，砂岩的破坏形式因成分和颗粒结构的不同而有所差异。一般来说，砂岩的破坏兼具脆性和塑性特征。对于细粒砂岩，其破坏形式更偏向于脆性。在单轴压缩过程中，细粒砂岩在达到峰值强度后会迅速破裂，破裂面相对平整，碎块数量较多且颗粒较小。

2 破坏机理

2.1 脆性破坏机理

2.1.1 裂纹的萌生：从微观结构来看，岩石是由各种矿物晶体和非晶质物质组成的集合体。在岩石形成过程中，由于矿物结晶顺序、温度变化、应力作用等因素，其内部不可避免地存在许多微缺陷，如晶界、孔隙、微裂纹等。这些微缺陷成为裂纹萌生的潜在位置。

2.1.2 裂纹的扩展：微观结构与裂纹扩展方向，裂纹一旦萌生，其扩展方向会受到岩石微观结构的强烈影响。在晶体岩石中，裂纹往往沿着晶界、解理面或者矿物颗粒之间的薄弱连接区域扩展。例如，在花岗岩中，石英和长石矿物颗粒之间的边界就是裂纹容易扩展的路径。因为这些边界处的化学键强度可能相对较弱，或者存在微观的晶格错配等情况。

2.1.3 裂纹的贯通：微观结构连通性促进贯通，在岩石内部，众多的裂纹在扩展过程中会受到微观结构的引导。当这些裂纹在扩展过程中遇到相互交叉或者相邻的裂纹时，由于岩石内部矿物颗粒排列和孔隙结构等微观因素，它们有较高的概率相互连接起来。例如，在具有层状结构的岩石中，平行于层面的裂纹在扩展过程中更容易相互贯通，因为层间的结合力相对较弱^[1]。

2.2 塑性破坏机理

2.2.1 位错运动

位错概念及在岩石中的存在形式：在岩石内部的晶体矿物中存在位错这种晶体缺陷。位错是晶体中原子排列的一种局部不规则性。以金属矿化的岩石为例，其中的金属矿物晶体如方解石中的金属离子替代钙原子时，可能会引入位错。位错的存在使得晶体在受力时，原子平面的滑动更容易发生。

位错运动导致塑性变形：当岩石受到单轴压缩时，晶体内部的位错会在应力作用下开始运动。位错运动的过程实际上是原子平面的相对滑移。在塑性较好的岩石中，如某些含有黏土矿物的岩石，位错运动相对容易。随着位错的不断运动和积累，岩石会产生宏观的塑性变形。例如，在云母片岩中，云母晶体的层状结构使得位错能够在层间相对容易地移动，从而使岩石在单轴压缩下表现出明显的塑性变形，这种变形是连续且渐进的，与脆性岩石的突然断裂形成鲜明对比。

2.2.2 晶粒滑移

晶粒结构与滑移条件：岩石是由众多矿物晶粒组成的多晶集合体。这些晶粒之间的接触方式和结合力对岩石的力学行为有重要影响。在一些具有较好塑性的岩石中，晶粒之间的结合力相对较弱，且晶粒的形状和排列方式有利于滑移。例如，在某些细粒的大理岩中，方解石晶粒呈紧密堆积但又具有一定的自由度。

晶粒滑移过程与塑性变形：当受到单轴压缩时，晶粒之间会发生相对滑移。这种滑移是由于晶粒间的切应力超过了它们之间的摩擦力和结合力。随着晶粒的滑移，岩石的形状会发生改变，产生塑性变形。而且，晶粒滑移不是孤立的现象，一个晶粒的滑移会引起周围晶粒的应力重新分布，从而导致更多的晶粒参与滑移。这种连锁反应使得岩石的塑性变形不断积累，最终可能导致岩石在宏观上呈现出较大的塑性变形，甚至失去承载能力而发生塑性破坏。

3 获取岩石应力应变全过程曲线的实验方法

3.1 实验设备准备

3.1.1 材料试验机：这是获取岩石应力应变全过程曲线的核心设备。它能够精确地对岩石试件施加轴向压力，并实时测量压力大小。材料试验机通常具有较高的精度，可以根据实验要求设定加载速率，并且能够记录加载过程中的力-位移数据。例如，电液伺服材料试验机可以通过计算机控制系统，精确地控制加载过程，确保实验数据的准确性。

3.1.2 应变测量装置：为了测量岩石在加载过程中的应变，需要使用应变测量装置。常用的有电阻应变片和

引伸计。电阻应变片是一种基于金属丝或半导体材料的应变敏感元件，当岩石发生变形时，应变片的电阻会随之改变，通过测量电阻变化就可以计算出应变。引伸计则是直接测量试件两点之间的相对位移，从而计算出应变。这些应变测量装置需要精确地粘贴或安装在岩石试件上，以确保能够准确地测量轴向和横向应变。

3.1.3 数据采集系统：用于收集材料试验机记录的力数据和应变测量装置测量的应变数据。数据采集系统可以将这些模拟信号转换为数字信号，并存储在计算机中，以便后续的处理和分析。

3.2 岩石试件制备

3.2.1 试件尺寸要求：试件的尺寸应符合相关标准，一般要求试件的直径（对于圆柱形试件）或边长（对于立方体试件）不小于岩石最大颗粒直径的10倍，以确保试件能够代表岩石的整体力学性质。同时，试件的高度与直径（或边长）之比也有一定要求，通常在2-3之间，这样可以减少端部效应对实验结果的影响。

3.2.2 试件加工精度：试件需要加工成标准的几何形状，表面平整度要求较高。加工过程中要尽量减少对岩石内部结构的破坏，避免产生额外的微裂纹等缺陷。例如，在切割岩石试件时，应采用合适的切割工具和工艺，确保试件的两端面平行且垂直于轴线。

3.3 实验步骤

3.3.1 试件安装：将制备好的岩石试件放置在材料试验机的上下压板之间，确保试件与压板接触良好。如果需要测量横向应变，还需要安装好横向应变测量装置，如应变片或引伸计。

3.3.2 初始数据记录：在加载前，记录试件的初始尺寸和应变测量装置的初始读数，作为后续计算应变的基础数据。

3.3.3 加载过程：按照预定的加载速率启动材料试验机对试件进行单轴压缩加载。加载速率的选择要根据岩石类型和实验目的确定，一般来说，较慢的加载速率可以更准确地反映岩石的塑性变形行为，而较快的加载速率可能更接近实际工程中的动态加载情况。在加载过程中，材料试验机不断记录轴向压力数据，应变测量装置同时记录轴向和横向应变数据，数据采集系统实时采集并存储这些数据。

3.3.4 直至破坏：持续加载直至岩石试件发生破坏。当试件出现明显的破裂声或者试验机的压力突然下降（对于脆性破坏），或者应变急剧增加而压力基本保持不变（对于塑性破坏）时，停止加载。

3.3.5 数据处理与曲线绘制：将采集到的数据进行处

理,根据应力和应变的定义,计算出每个数据点对应的应力和应变值。以应变作为横坐标,应力作为纵坐标,将所有数据点绘制在坐标图上,就可以得到岩石应力应变全过程曲线。在绘制过程中,需要注意数据的准确性和曲线的光滑性,对于异常数据点要进行分析和处理,确保曲线能够真实地反映岩石的力学行为。

4 矿山巷道支护

4.1 巷道围岩稳定性分析

4.1.1 应力分布研究

运用岩体力学理论,可以分析矿山巷道围岩的应力分布情况。在巷道开挖前,岩体处于原始应力平衡状态。开挖后,巷道周边的应力重新分布,形成了应力集中区域。例如,在圆形巷道中,根据弹性力学理论,巷道周边的切向应力会显著增大,其最大值可达原始垂直应力的数倍。这种应力集中程度与巷道的形状、尺寸以及岩体的力学性质等因素密切相关。

通过数值模拟方法(如有限元法、离散元法),可以更精确地计算不同地质条件下巷道围岩的应力场。这些模拟能够考虑岩体的非均质性、各向异性以及节理裂隙等复杂因素,帮助工程师准确判断应力集中的位置和大小,为后续的支护设计提供依据。

4.1.2 变形特征评估

岩体力学还用于评估巷道围岩的变形特征。在应力作用下,巷道围岩会产生弹性变形、塑性变形甚至破裂。对于脆性围岩,可能会出现片帮、冒顶等现象;对于塑性围岩,可能会产生较大的收敛变形。例如,在软岩巷道中,由于岩石的强度较低,在高地应力作用下,围岩容易产生向巷道内的塑性流动,导致巷道断面缩小。

通过现场监测(如使用收敛计测量巷道的收敛变形、多点位移计测量围岩深部的位移)结合岩体力学理论,可以建立起围岩变形与时间、应力等因素之间的关系,预测围岩变形的发展趋势,提前采取措施防止变形过大而影响巷道的正常使用^[2]。

4.2 支护方法设计与优化

4.2.1 锚杆支护

锚杆支护是矿山巷道常用的支护方法之一。岩体力学原理为锚杆的设计提供了理论支持。锚杆通过锚固在围岩深部的稳定岩体中,将浅部围岩的载荷传递到深部岩体,从而提高围岩的整体稳定性。例如,根据锚杆的锚固力计算公式,锚固力与锚杆的直径、长度、岩体的粘结强度等因素有关。通过岩体力学试验确定这些参数后,可以合理设计锚杆的规格和间距。

在实际应用中,还可以根据围岩的不同性质和变形

情况,采用不同类型的锚杆,如全长粘结式锚杆、端头锚固式锚杆等。对于破碎围岩,全长粘结式锚杆能够更好地发挥其加固作用,防止围岩进一步破碎和脱落。

4.2.2 锚索支护

锚索支护主要用于深部矿山或高地应力巷道。锚索的长度较长、承载能力较大,能够有效控制围岩的大变形。从岩体力学角度看,锚索可以深入到巷道围岩的高应力区域,将深部岩体的强大约束力传递到巷道周边,限制围岩的变形和破坏。例如,在深部煤矿巷道中,采用锚索支护后,能够显著减小巷道顶板的下沉量和两帮的移近量。

锚索的设计参数(如锚索的预应力、长度、布置方式等)也需要依据岩体力学原理进行优化。合理的预应力可以使锚索在巷道开挖后立即发挥作用,主动加固围岩,抑制围岩的初始变形。

4.2.3 喷混凝土支护

喷混凝土支护能够及时封闭巷道围岩表面,防止围岩因风化、水蚀等因素而降低强度。从岩体力学角度,喷混凝土与围岩紧密结合后,形成了一个复合承载结构。混凝土的弹性模量和强度能够分担一部分围岩的应力,同时对围岩的表面起到约束作用,提高围岩的抗剪强度。例如,在一些金属矿山的破碎带巷道中,喷混凝土支护可以有效防止围岩掉块,为后续的锚杆或锚索支护创造良好的条件。

喷混凝土的厚度和强度设计需要考虑围岩的性质、巷道的服务年限等因素。对于服务年限较长、围岩压力较大的巷道,需要适当增加喷混凝土的厚度和强度等级。

结束语

本研究围绕岩体力学核心内容展开了系统探究,取得了丰硕成果。在岩石单轴压缩特性方面,明晰了脆性破坏与塑性破坏的显著差异。脆性破坏以瞬间失稳、裂纹快速萌生扩展贯通为特征,源于矿物颗粒间强化学键结合下塑性变形受限;塑性破坏则呈现渐进变形,由矿物颗粒滑移、位错运动主导,与黏土矿物等具可塑性成分紧密相关。理论升华不可或缺,构建统一本构模型,注入时变、多场耦合理念,推动岩体力学迈向新高度,全方位护航工程建设。

参考文献

[1]任大财.矿山开采与地质工程相结合的岩土控制技术探讨[J].冶金与材料,2024,44(06):91-93.

[2]程谞,汤华,吴振君,等.矿山岩质边坡地层结构及岩体抗剪强度参数随钻智能识别方法[J].工程科学与技术,2024,56(05):35-47.