

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

我国是目前世界上最大的煤炭生产国和消费国，煤炭资源量占国内化石能源总量的 95%。根据国民经济发展对能源需要的预测，我国煤炭最低的需求量 2020 年为 2 100 Mt，2050 年为 2 700 Mt。到 2050 年，煤炭将占一次能源需求比例（不含生物质能量）的 55%左右。由于我国石油、天然气等能源紧缺，因此从某种意义上来说，煤炭在今后几十年内仍将是我国的重要能源。

根据第 3 次全国煤炭资源勘测结果，我国埋深 2 000 m 以内的煤炭资源总量约为 5.57 亿吨，其中埋深超过 1 000 m 的煤炭资源量约为 2.86 亿吨，占总量的 51.34%。我国煤炭资源分布与区域经济发展水平、消费需求极不适应。从煤炭资源的地理分布看，在昆仑山—秦岭—大别山—一线以北保有煤炭资源储量占 90%，且集中分布在山西、陕西、内蒙古 3 省（区）<sup>[1]</sup>。煤炭资源分布地域广阔，煤层赋存条件多样，地质条件也极其复杂。目前我国 1 000 m 以内浅煤炭

资源量中可靠储量仅有 9 169 亿吨,且主要分布于新疆、内蒙古、山西、贵州和陕西 5 省(区)<sup>[2]</sup>。而经济社会发展水平高,能源需求量大的东部地区(含东北)煤炭资源量仅为全国保有资源储量的 6%。中东部地区的浅部煤炭资源已近枯竭,但深部煤炭资源还相对丰富;华东地区的煤炭资源储量 87%集中在安徽省和山东省;中南地区煤炭资源的 72%集中在河南省<sup>[3]</sup>。华北聚煤区东缘深部资源潜力巨大,河北、山东、江苏、安徽省深部资源量为浅部资源量的 2~4 倍。东北及华北聚煤区拥有蒙东(东北)、鲁西、两淮、河南、冀中等 5 个大型亿吨级煤炭基地(全国共 13 个)。

由于近年来的大规模开采,一些地区的浅部煤炭资源已近枯竭,煤矿开采每年将以 8~10 m 的速度向深部递增。目前已有江苏、山东、河南、河北、黑龙江等省多个大型煤矿的采深超过 1 000 m<sup>[4]</sup>。随着开采深度的日益增大,深部井的数量不断增多。表 1-1 为全国各省主要深部矿井数量统计情况。由表 1-1 知,目前全国深部煤矿以山东、河南和河北 3 省占多数,3 省深部矿井数量达到 80 个,占全国深部矿井数量的 57.97%。目前我国煤矿矿井正以 8~12 m/a 的平均速度向深部延伸,中东部地区的延伸速度为 10~25 m/a。已有深部煤矿的省份,尤其是山东、河南、安徽、河北等中东部省区国有重点煤矿目前的平均采深在

600 m 以上,按照 10~25 m/a 的延伸速度,在未来 10 年内普遍进入深部开采,并且未来我国深部煤矿数量及产能所占比例越来越大。

表 1-1 全国主要深部矿井数量分布统计<sup>[5]</sup>

省份	矿井数量/个			比例/%
	开采深度 800~1 000 m	开采深度 1 000~1 200 m	开采深度 >1 200 m	
江苏	3	3	7	9.42
河南	19	8	0	19.57
山东	10	8	11	23.91
黑龙江	11	5	0	11.59
吉林	0	2	2	2.90
辽宁	6	5	0	7.97
安徽	14	0	0	10.14
河北	15	3	2	14.49

## 1.2 深部岩体力学的基本任务

### 1.2.1 深部地下工程的环境特点

深部与浅部开采的明显区别在于深部岩石所处的特殊环境,即“三高一扰动”的复杂力学环境。“三高”主要是指高地应力、高地温、高岩溶水压,“一扰动”主要是指强烈的开挖扰动。

(1) 高地应力:进入深部开采以后,仅由重力引起的垂直原岩应力(约 20 MPa)通常已超过工程岩体的抗压强度,而由于工程开挖所引起的应力集中

(大于 40 MPa) 则远大于工程岩体的抗压强度。资料表明<sup>[6]</sup>, 深部岩体形成时间久远, 形成过程中留有远古构造运动的痕迹, 其中存有构造应力场或残余构造应力场, 二者的叠合累积为高应力。因而在深部岩体中形成了异常的地应力场, 据南非地应力测定, 在深部 3 500 ~ 5 000 m, 地应力水平为 95 ~ 135 MPa, 属于高地应力。

(2) 高地温: 测量结果显示, 越往地下深处地温越高。地温梯度为 30 ~ 50 °C/km, 一般取 30 °C/km。有些地区如断层附近或导热率高的异常局部地区, 地温梯度有时高达 200 °C/km。岩体在超出常规温度环境下, 表现出的力学、变形性质与普通环境条件下具有很大差别<sup>[7]</sup>。地温可使岩体热胀冷缩破碎, 而且岩体内温度变化 1 °C 可产生 0.4 ~ 0.5 MPa 的地应力变化。岩体温度升高产生的地应力变化对工程岩体的力学特性会产生显著的影响。

(3) 高岩溶水压: 进入深部开采后, 随着地应力及地温的升高, 同时将会伴随着岩溶水压的升高, 当采深大于 1 000 m 时, 其岩溶水压将高达 7 MPa, 甚至更高。岩溶水压的升高, 使矿井突水灾害更严重。深部开采高井深环境 (开采深度大于 500 m) 将使煤炭提升和排水的技术困难加大, 成本上升, 管理更加困难。

(4) 开挖扰动：进入深部开采后，在承受高地应力的同时，大多数巷道要经受巨大的回采空间引起强烈的支承压力作用，使受采动影响的巷道围岩压力是原岩应力的数倍，甚至近十倍，从而造成在浅部表现为普通坚硬的岩石，在深部可能表现出软岩大变形、大地压和难支护的特征；浅部的原岩体大多处于弹性应力状态，而进入深部以后则可能处于塑性状态，即由各向不等压的原岩应力引起的压、剪应力超过岩石的强度，造成岩石的破坏。

### 1.2.2 深部岩体变形破坏特点

#### 1. 围岩分区与破裂

浅部巷道围岩状态通常可分为松动区、塑性区和弹性区 3 个区域，其本构关系可以采用弹塑性力学理论进行推导求解。然而，研究表明，深部巷道围岩产生膨胀带和压缩带，或称为破裂区和未破坏区交替出现的情形，且其宽度按等比数列递增，这一现象被称为区域破裂现象。现场实测研究也证明了深部巷道围岩变形力学的拉压区域复合特征。因此，深部巷道围岩的应力场更为复杂。深部的岩石在受到较大外部压力的影响下，就会表现出较为容易破裂的特点，且上述破裂现象主要发生于围岩区域的压缩带以及膨胀带当中。上述两个区域所发生的破裂严重程度通常还会随着所受到压力的提升产生范围的扩大，并且

范围扩大的速度亦随着压力的提升而提升。因此可以发现，对于深部岩石层的研究不仅应当考虑岩石本身所具有的特性，还需要考虑与机械作用力之间的关系，以便于防止破裂情况的产生。

## 2. 深部岩体动力响应的突变性

浅部岩体破坏一般是渐进的，且在临近破坏时经常表现出变形加剧现象，破坏前兆明显。在深部工程条件下，岩体破坏则具有强烈的冲击破坏性质，其动力响应的破坏过程往往是突发、无前兆的突变过程。在巷道中该过程表现为大范围巷道的突然坍塌和失稳，在工作面中该过程则表现为顶板的突然大面积冲击来压。深部与浅部岩体破坏形式如图 1-1 所示。

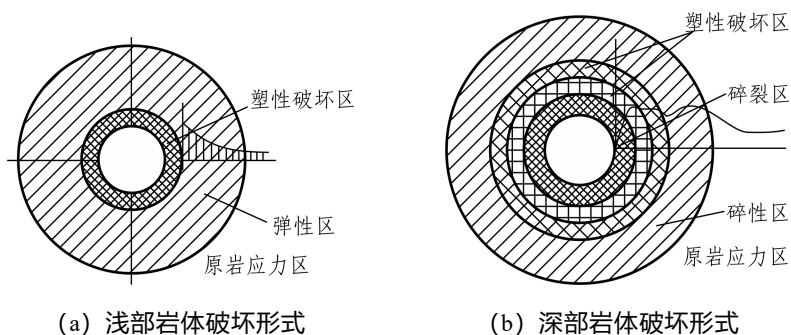


图 1-1 深部和浅部岩体破坏形式

## 3. 深部岩体的大变形和强流变性

岩体变形具有两种完全不同的趋势：① 岩体表现为持续的流变特性，变形较大但仍保持连续，如煤矿中有些巷道 20 余年底臃不止，累计底臃量达数十米。

② 有的岩体并未发生明显变形但破碎却十分发育，按传统的关于破坏和失稳的概念，这样的岩体不再具有承载能力，而实际上深部破碎岩体却具有再次稳定的能力，有的巷道还不得不在破碎岩（煤）体中掘进开挖（如沿空掘巷）。因此，已破坏巷道围岩和支护相互作用达到二次稳定问题是深部岩体力学有别于浅部岩体力学的重要特征之一。

#### 4. 深部岩体的脆-延性转化

岩石在不同围压下表现出不同的峰后特性，脆-延转化即岩石在低围压下表现为脆性，在高围压下转化为延性或韧性的行为。在浅部（低围压）开采中岩石破坏以脆性为主，通常没有或仅有少量永久变形或塑性变形，而进入深部开采以后，由于岩体处于“三高”和“一扰动”的作用环境之中，表现出的实际是其峰后强度特性。在高围压作用下，岩石可能转化为延性，破坏时其永久变形量通常较大。因此，随着开采深度增加，岩石已由浅部脆性力学响应转化为深部潜在的延性力学响应行为。

Karman<sup>[8]</sup>首次用大理岩进行了不同围压条件下的压缩试验，Parterson<sup>[9-11]</sup>在室温下也对大理岩进行了一系列试验研究，发现随着围岩增大，岩石变形行为由脆性向延性转变的特性，如图 1-2 所示。

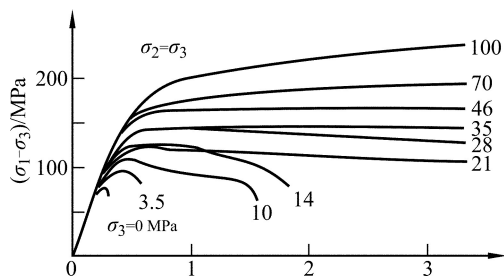


图 1-2 不同围压下大理石的脆性-延性转化现象

Mogi<sup>[12-13]</sup>发表过类似的试验结果, 并指出脆-延转化通常与岩石强度有关。

由图 1-2 可见, 岩石破坏时在不同围压水平上表现出不同的应变值, 当岩石发生脆性破坏时, 通常不伴有或仅伴有少量的永久变形或塑性变形, 当岩石呈延性破坏时, 其永久应变通常较大, 因此有人建议用岩石破坏时的应变值作为脆-延转化判别标准, 如根据 Heard<sup>[14]</sup>的建议, 如果岩石发生破坏时的应变值为 3% ~ 5%, 就可视为岩石发生了脆-延转化。Singh<sup>[15]</sup>则从应力和强度的角度提出了脆-延转化条件, 根据大量实验数据, 他认为脆-延转化条件为<sup>[16]</sup>:

$$\sigma_1 / \sigma_3 = (3 \sim 5.5) \text{ 和 } \sigma_c / \sigma_3 = (0.5 \sim 1.25)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为最大、最小主应力;  $\sigma_c$  为岩石的单轴抗压强度。总之, 脆-延转化是岩石在高温和高压作用下表现出的一种特殊的变形性质, 如果说浅部低围压下岩石破坏仅伴有少量甚至完全没有永久变形的话, 则深部高围压条件下岩石的破坏往往伴随有较大的塑性变形。目前的研究大多集中在脆-延转化的



判断标准上,而对于脆-延转化的机理却研究较少,还没有比较成熟的成果。

### 5. 深部岩体开挖岩溶突水的瞬时性

浅部煤层开采中,矿井水主要来源是第四系含水层或地表水通过采动裂隙网络进入采场和巷道。矿井水水压小,渗水通道范围大,基本服从岩体等效连续介质渗流模型,涌水量也可根据岩体的渗透率张量进行定量估算,因此突水预测预报尚具可行性。而深部的状况却十分特殊:①随着采深加大,承压水位高,水头压力大。②由于采掘扰动造成断层或裂隙活化,而形成渗流通道相对集中,矿井涌水通道范围窄,使奥陶系岩溶水对巷道围岩和顶底板造成严重的突水灾害。另外,突水经常发生在采掘工作结束后的一段时间内,具有明显的瞬时突发性和不可预测性。

### 1.2.3 深部巷道围岩控制理论

深部巷道围岩控制涉及围岩强度、围岩应力和支护技术三大因素,所以应从这三个方面来考虑,实现深部巷道围岩稳定:

#### 1. 提高围岩强度

破碎围岩中锚杆支护的作用在于提高围岩强度,随锚杆支护强度提高,锚固体极限强度、残余强度增大,残余强度增大更为显著,因此采用高强锚杆支

护可显著提高围岩的承载能力。研究表明,在一定范围内支护阻力与围岩变形量呈负指数关系,提高支护阻力可大大减少围岩变形量,有利于巷道围岩稳定。由于深部巷道围岩比较破碎,采用围岩注浆加固可明显改善围岩力学参数、充填裂隙、提高岩体强度和锚杆锚固力,并且可以封闭水源、隔绝空气,保护围岩免受风化。注浆材料可选用化学类、水泥类、高水速凝材料等。注浆对象主要是软弱、破碎围岩。

## 2. 减小巷道围岩应力

合理布置巷道,从时间、空间减少采动支承应力对巷道作用的强度和次数,减小围岩应力、采动支承应力对巷道围岩破坏;合理设计煤柱尺寸,既要保持煤柱稳定,又要使巷道受到的集中应力尽可能小,将巷道布置在应力降低区内。对于深部巷道来说,采取应力转移、减小浅部围岩应力是减小巷道围岩变形量、保持巷道良好维护状态的重要技术途径。

## 3. 采用合理的锚杆支护技术

(1) 高强度、大延伸量锚杆支护:阻止深部回采巷道围岩发生较大变形既不经济也不合理。高强度锚杆支护可提供较大的支护阻力,控制围岩塑性区及破碎区发展、降低塑性区流变速度,提高支护阻力可以大大减小围岩变形;大