

## · 水文地质工程地质 ·

## 岩溶陷落柱形成的岩体力学条件

杨为民 周治安 (淮南矿业学院资源与环境工程系 232001)

**摘要** 在研究刘桥一矿岩溶陷落柱基本特征的基础上,结合华北陷落柱资料,认为岩溶陷落柱多形成在现代伸展构造或自重应力为主的地区,柱体围岩具备易于冒落的岩体结构,陷落过程围岩应力条件与采空区覆岩冒落过程类似,奥灰岩溶的持续作用是陷落柱体不断向上发展的根本原因。

**关键词** 岩溶陷落柱 形成 应力分析

**中国图书资料分类法分类号** P163.1

**作者简介** 杨为民 男 32岁 讲师 工程地质

## 1 引言

岩溶陷落柱在华北许多矿区都有分布,但发生严重突水的较少。自 1996 年 3 月 4 日皖北任楼矿发生岩溶陷落柱突水(突水量为  $11\ 854\ \text{m}^3/\text{h}$ )淹井的重大灾害后,引起毗邻刘一、刘二等矿的高度重视。陷落柱是否突水成为煤层底板突水研究中的首要问题之一。本文在研究刘桥一矿岩溶陷落柱基本特征基础上,结合区域陷落柱资料,分析岩溶陷落柱形成发展的岩体力学条件,为进一步探求岩溶陷落柱的突水机理提供依据。

刘桥一矿位于安徽省濉溪县城西,与任楼煤矿同属淮北煤田,相距 60 km,井田面积  $12\ \text{km}^2$ 。构造上位于徐宿弧形构造的外缘,属肖西向斜的东南翼。陈集向斜是井田的主体构造,向斜轴总体延伸为  $\text{NE}20^\circ$ ;枢纽向  $\text{NNE}$  倾斜。井田主采煤层为二叠系下石盒子组 4 煤和山西组 6 煤,6 煤底板距太灰顶界平均为 49.39 m。自建井至今,井下共揭露岩溶陷落柱 5 个,揭露达 15 次,仅个别陷落柱有淋水现象。

## 2 岩溶陷落柱的基本特征

刘桥一矿陷落柱发育规律明显,均沿陈集向斜轴部展布,编号为  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 、 $Z_4$ 、 $Z_5$ 。其基本特征如下:

a. 陷落柱的平面形态为椭圆形或似圆形,椭圆长轴近  $\text{SN}$  向。剖面上表现为上小下大,柱体与水

平面呈大角度相交,均超过  $65^\circ$ ;  $Z_2$  向上分叉,6 煤揭露为一大陷落柱,在上覆 4 煤中成为两个小陷落柱。

b. 柱体规模在 6 煤中为  $70\ \text{m} \times 35\ \text{m}$  左右,其中  $Z_2$  陷落柱达  $350\ \text{m} \times 105\ \text{m}$ 。

c. 陷落柱由煤系中各类砂岩、泥岩和煤的碎块混杂堆积而成,岩块大小不一,棱角明显,柱体内滑动面发育。柱体本身较密实,多数干燥无水,仅个别潮湿,有淋水现象,如  $Z_2$  陷落柱淋水量为  $0.5\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

d. 陷落柱围岩小断层发育,断层倾向柱体,断距小,延伸不远。

## 3 岩溶发育状况

刘桥一矿太原群灰岩有 13 层薄层灰岩。一灰、二灰分别厚 2~3 m,质较纯,三、四、五灰分别厚 8 m、12 m、4 m,一至四灰水互补关系十分密切。一至五灰局部岩溶发育,特别是处于断裂构造附近,如边界断层、小断层岩性破碎部位。太灰岩溶发育程度总体上属中等偏弱。一至四灰钻孔单位涌水量  $q < 1\ \text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,含水量属中等偏小。

从矿区揭露的岩溶陷落柱分布规律来看,它们应为奥灰岩溶陷落柱。奥灰曾经历过强烈岩溶作用,且陈集向斜轴部是岩溶水强循环交替带。

奥陶纪灰岩在井田范围内厚约 450 m,其上部马家沟组岩性多为灰色中厚层至厚层灰岩、白云质

灰岩,质较纯。奥灰距 6 煤约 180 m,顶面埋深为 120 ~ 620 m,属埋藏型深岩溶。目前矿区奥灰水位标高为 +10 m。井田北东淮北相山一带出露的奥灰直接伏于松散层下。矿区外围供水水源资料显示奥灰钻孔单位涌水量  $q = 3.83 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,  $k = 2.36 \text{ m}/\text{d}$ 。突水 4 天后,距突水点 12.6 km 的童亭矿奥灰观测孔水位下降了 7.04 m,这些都说明本区奥灰水量丰富,连通性强。根据水质化验资料,奥灰水质类型为  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$  型,其中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量较低,  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{NO}_2^-$  含量极低,反映矿区奥灰水径流条件好,岩溶作用较强烈,陈集向斜轴部为集中循环交替带。

在正常情况下,奥灰与太灰水力联系较弱。但如果井田内存在落差较大的断层和岩溶陷落柱,局部地段奥灰水有可能成为太灰及上部含水层的强补给水源。

#### 4 岩溶陷落柱的形成条件

##### 4.1 岩体力学条件

陷落柱是在下伏岩溶洞穴形成和发展过程中,引起上覆岩层冒落、塌陷而形成的。根据对刘桥一矿及华北岩溶陷落柱资料的综合分析,它们大体具备以下条件:

a. 陷落柱在区域上多分布在现代伸展构造或自重应力为主的地区,如山西阳泉、西山、霍县、汾西等矿区。与构造应力为主的地区相比,伸展构造区或自重应力为主的地区,其最大主应力处于铅直方向,水平应力相对较低。这种应力状态利于垂直裂隙张开、剪滑和岩体塌落、陷落的发生<sup>[1]</sup>。据刘桥二矿井巷工程稳定性初步分析,矿区地应力为自重应力。

b. 形成陷落柱的围岩具备易于冒落和不断向上发展的岩体结构。陷落柱发育地点岩层产状一般较平缓,倾角小于  $20^\circ$ ;柱体边缘多受区域节理或次级向斜轴控制。这类区域性节理多属褶皱前早期平面 X 剪节理,延伸远,切割深,穿层高度大,不受局部地层岩性、小构造的限制。它们将层板状岩体切割成菱形块体,在张应力作用下,当这类结构岩体底部蚀空后,易于发生坍塌、陷落。在西山、霍县、汾西一带的沟谷剖面上,除了见到大量层间节理外,这类连续贯穿几十米,甚至数百米地层的垂直节理、节理密集带也随处可见,那里的陷落柱总体上也沿两组 X 节理的方向成列成行分布。在向斜轴部,经常发育两

种节理,一种是先存在的区域性节理,另一种是由向斜轴部应力场所派生的节理系统,它们的产状也多为陡倾至近直立。由于向斜轴部各岩层组的上层面受挤压,下层面受拉张,这两种节理都易形成向下张开的张裂隙,有些向向斜核部收敛,形成大头向下的楔形结构或块体(图 1)。一旦下方出现足够大的岩溶空穴,这种楔形体极易首先松动脱出,向下滑落或跌落,继而带动、引发相邻岩块迅速一齐冒落。因此向斜轴部一方面是层状岩溶水的汇集径流带,同时也是岩体冒落结构特别发育的部位,二者结合在一起,使向斜轴部成为陷落柱的多发部位。刘桥一矿、开滦范各庄<sup>[2]</sup>、徐州大黄山等矿陷落柱皆与上述情况相符。

c. 陷落柱陷落过程围岩应力条件与采空区覆岩冒落过程相似。在溶洞形成后,覆岩未塌之前,铅直方向上受拉,水平方向上受压(图 2),当拉伸应力超过下部岩体的抗拉强度时,岩层发生冒落<sup>[3]</sup>。冒落作用向上发展,进入煤系后,可形成混杂堆积,并易于被击实、压密或胶结。刘桥一矿所见的陷落柱,从奥灰上部溶洞多发层位向上推算,其高度至少在 300 m 之上,这样高的陷落柱决非一次冒落形成,它是由深部溶洞扩展或冒落体底部一再蚀空,柱体多次陷落,不断向上发展生长而成。陷落柱内的岩块经反复冒落破坏,其冒落距(与岩块原层位的垂直距离)不断加大,岩块一再变小,岩屑、岩粉、岩泥成分增多,使再形成的塌落体碎胀系数、孔隙率降低,密度提高。因此,陷落柱在煤系部位自身的渗透性很

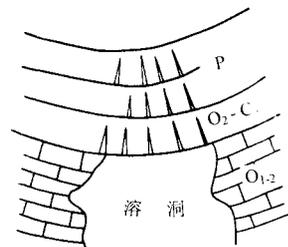


图 1 向斜轴部下张式裂隙形成楔形结构体示意图

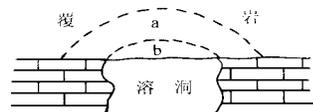


图 2 溶洞顶岩层塌落前围岩应力状态示意图

a—垂直压缩应力区 b—垂直拉伸应力区

低,井下观测陷落柱大多干燥无水或少水。

## 4.2 岩体的混合溶蚀作用

持续的岩溶水交替产生流速场效应<sup>[4]</sup>,使碳酸盐岩的岩-水界面处  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度积经常低于饱和溶解度,溶蚀作用不断推进,岩溶洞穴不断扩展。洞穴内存在着较强的管道流,其水动力作用可将冒落物中较小的岩块和岩屑带走。砂、泥岩等软弱岩块,经水理作用后发生崩解、泥化、溶解,泥化物及易溶组分也在水循环中被移出。溶洞处于不断扩大或陷落充填-蚀空-再陷落充填-再蚀空的动态变化之中,持续的水动力条件为多次陷落一再提供自由空间,岩体冒落的应力状态随之一再上移,这是陷落柱生长阶段必须的水动力条件。

陷落柱冒落时,在一定的时段内,可导通奥灰水与上覆各含水层之间的水力联系,使不同水质的水混合,引起混合溶蚀作用<sup>[5]</sup>,促进岩溶进一步发育。这种混合溶蚀作用主要表现在以下 3 个方面:

a. 两种或两种以上不同浓度的  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  水混合,混合后的溶液加强了对奥灰的侵蚀作用。刘桥一矿太灰水中的  $\text{CO}_2$  平均含量比奥灰水高,当陷落柱导通太灰水和奥灰水时,奥灰水中的  $\text{CO}_2$  含量增加,将对奥灰产生较强的混合溶蚀作用。

b. 不同温度的水混合,使奥灰发生冷却溶蚀作用。环境温度降低时,水对  $\text{CO}_2$  吸收系数增大,有更多的  $\text{CO}_2$  溶解于水;同时,温度降低,饱和溶液中  $\text{CaCO}_3$  含量所需的平衡  $\text{CO}_2$  减少,多余的  $\text{CO}_2$  转变成游离的  $\text{CO}_2$ ,因而增加了水对碳酸盐岩的溶解能力<sup>[4]</sup>。本区深部的奥灰水温可达  $34\sim 35^\circ\text{C}$ ,比砂岩裂隙水温高出  $8\sim 10^\circ\text{C}$ ,当砂岩裂隙水(冷水)直接导入奥灰水(温水)时,引起奥灰水温降低,发生冷却溶蚀作用。

c. 含煤地层中常含有黄铁矿,携带  $\text{FeS}_2$  的砂岩裂隙水与奥灰水混合后,发生异离子效应,促进岩溶作用。

## 5 陷落柱突水机理初探

陷落柱经多次冒落堆积而形成,柱体边缘多受穿层节理控制。冒落过程中,周边围岩又因卸荷、松动、撞击、悬梁弯曲等原因,产生了一些新的裂隙,因此在有的柱体围岩边界处,可存在裂隙带、破碎带、泥化带<sup>[6]</sup>,它们成为该处岩体的软弱带。

宏观上可将陷落柱视为封堵在贯通组合层板(岩体)孔洞内的“长塞子”,一般情况下,能有效地隔绝各含水层之间的水力联系。但如果巷道内存在着高水头条件,“塞子”又受力松动时,深部奥灰水便可沿着陷落柱周边的软弱带首先楔入上突,使软弱带很快活化,陷落柱的“塞紧作用”随之失效,便会造成矿井突水灾害。据陷落柱突水资料,任楼突水点水压为  $3.8\text{ MPa}$ ,范各庄矿突水点为  $3.13\text{ MPa}$ ,这两起突水灾害皆在采掘活动逼近陷落柱时发生。具体作用方式有两种:

a. 受采动所产生集中应力影响 因为采动集中应力作用于铅直方向,与柱面剪应力( $\tau$ )大体一致,当接近或等于柱面抗剪强度( $\tau$ )时,即  $\tau \rightarrow \tau$  就可产生柱面滑剪,引起水楔入侵。

b. 受采动所产生的卸压带影响 卸压带内垂直和水平应力都降低,尤其水平应力( $\sigma$ )的降低,会直接造成柱面抗剪强度( $\tau$ )降低,此时强度公式应写为:

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi$$

式中  $\sigma$  —— 水平应力(柱体侧压);

$C$  —— 软弱带的结合力;

$\varphi$  —— 软弱带的内摩擦角。

随  $\tau$  的降低,水楔的劈入,  $C$  和  $\varphi$  都会急骤下降,进而引发突水灾害。

本文收集资料时得到皖北矿务局刘桥一矿地测科同志的帮助,在此致谢。

## 参考文献

- 1 孙广忠. 工程地质与地质工程. 北京:地震出版社,1993:97~127
- 2 开滦矿务局,煤炭科学研究院地质勘探分院等. 开滦范各庄矿岩溶陷落柱特大突水灾害的治理. 煤田地质与勘探,1986;(2):35~42
- 3 煤炭科学研究总院开采所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用. 北京:煤炭工业出版社,1981:130~168
- 4 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质. 北京:水利电力出版社,1994:11~15,329~331
- 5 张俤元等. 工程地质分析原理. 北京:地质出版社,1994:471~481
- 6 项远法. 陷落柱突水的力学模型. 煤田地质与勘探,1993;(5):36~39

收稿日期(1997-02-17)

# 煤层顶板工程地质分类方案初步研究

彭向峰 于双忠 (中国矿业大学资环学院 徐州 221008)

**摘要** 通过调查研究,提出了煤层顶板工程地质分类方案,此方案简单易行,验证可靠,适用于煤田勘探阶段。

**关键词** 煤层 顶板 工程地质 分类 勘探阶段

**中国图书资料分类法分类号** TD327.2

**作者简介** 彭向峰 男 33岁 讲师 煤田地质

## 1 引言

在煤层回采过程中,煤层顶底板的岩性及其工程地质性质,直接影响着回采方法、回采效率和安全生产条件等。不少煤矿由于对煤层顶底板的工程地质性质研究不够,管理措施和采掘方法选用不当,给煤矿生产和安全带来很大困难,甚至造成人员伤亡或不应有的巨大经济损失。在煤田勘探工程中,如何根据勘探资料,认真研究煤层顶底板的岩性、结构及其工程地质特征,正确进行顶底板类型的划分,就显得特别重要。

## 2 煤层顶板分类现状

目前我国实际采用的煤层顶板分类方案,主要是由煤炭科学研究总院开采研究所、中国矿业大学等单位根据对350个工作面的矿山压力观测资料提出的《缓倾斜煤层工作面的顶板分类方案》,该方案已被煤炭部批准为“部颁试行方案”,其对直接顶进

行分类的主要指标为强度指标 $D$ ;参考指标为直接顶初次垮落步距,其中:

$$D = R_c C_1 C_2,$$

式中  $R_c$  —— 岩石单轴抗压强度;

$C_1$  —— 节理裂隙影响系数;

$C_2$  —— 分层厚度影响系数。

老顶的分级主要采用直接顶厚度和采高的比值  $K_m = m/h$ ,再参照老顶初次来压步距  $L$  和老顶来压显现特征,将老顶分成4级。

这一分类方案在煤矿开采顶板管理中,发挥了重要的指导作用。但该方案中的某些主要指标,如直接顶初次垮落步距、老顶初次来压步距及对节理、裂隙观察统计方面的资料,只有在煤层开采之后才能获得,而在煤田勘探阶段,这些资料基本上是无法取得的。因此这一分类方案缺乏必要的预计性。欲在煤层开采之前,预先为矿井设计和以后的生产、管理提供比较可靠的工程地质依据,就必须重新探索研究新的分类方法和分类方案。

## THE ROCK MECHANICS CONDITIONS FORMING KARSTIC COLLAPSE COLUMN

Yang Weimin Zhou Zhian (Huainan Mining Institute)

**Abstract** Based on study of fundamental features karstic collapse column of in Liuqiao NO. 1 coal mine, and some of mine in other region, it is concluded that the rock mechanics conditions consist of the following aspects: 1st, the collapse column are almost contribued over an area of extensional tectonics or self-weight street field; 2nd, its rock structure is easy to fall; 3rd, its stress state of cave-in is similar to the roof fall caused by mining; 4th, the essential factor of the column growing up is sustained karstification

**Keywords** Karst collapse column; formation; stress analysis