

国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAK29B04、2007BAK24B01)

国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB202200、2007CB2094C2) 资

北京市教育委员会科研基地项目

华北煤田 岩溶陷落柱 及其突水研究

尹尚先 吴文金 李永军 刘国林 杨为民 著

煤炭工业出版社

责任编辑：高 专 王 青

封面设计： 艺峰工作室

ISBN 978-7-5020-3307-1



9 787502 033071 >

定价：78.00 元

国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAK29B04、2007BAK24B01)
国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB202200、2007CB209402) 资助
北京市教育委员会科研基地项目

华北煤田岩溶陷落柱及其 突 水 研 究

尹尚先 吴文金 李永军 刘国林 杨为民 著

煤炭工业出版社

·北 京·

内 容 提 要

本书通过对华北型煤田岩溶陷落柱的现场观测、实验研究、数值模拟、理论分析等综合研究,构建了岩溶陷落柱突水灾害致因理论,形成了陷落柱特征—分类—成因—多种突水模式—对应的力学模型—相应的突水机理解释—突水与判别—突(涌)水预测—陷落柱预测—探查—治理的基本理论体系。

本书可供能源资源、煤炭、地质、冶金、土木、水利、交通等行业广大工程技术人员和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究/尹尚先,吴文金等著.

—北京:煤炭工业出版社,2008.11

ISBN 978-7-5020-3307-1

I. 华… II. ①尹…②吴… III. ①煤田—岩溶—垂直下沉—研究—华北地区②煤田—岩溶—矿山突水—研究—华北地区 IV. TD327 TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 059722 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
北京中科印刷有限公司 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 787mm×1092mm^{1/16} 印张 14^{1/4}
字数 344 千字 印数 1—1,100
2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
社内编号 6112 定价 78.00 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

前 言

陷落柱对煤矿生产的影响最初表现在影响采区和采煤工作面的合理布置、减少煤炭储量、缩短矿井服务年限或报废井巷工程,给采煤方法和采掘机械的选择增加困难等。然而岩溶陷落柱导致的突水具有隐蔽性、突发性且导通丰富岩溶地下水等特点,对煤矿安全生产、环境及当地人民生活危害更大。由于岩溶陷落柱特殊的分布形态,难以在煤田勘探过程中发现,更难做到采掘工程布置前判断和把握其存在的具体范围、位置和规律,致使岩溶陷落柱成为矿井地质工作中的难题之一,对矿井安全生产构成相当大的潜在威胁,因此陷落柱及其突水研究意义重大。

本书以华北石炭二叠纪煤田岩溶陷落柱为研究对象,运用构造地质学、岩体力学、工程地质和水文地质等学科的理论和方法,初步构建了陷落柱特征—分类—成因—多种突水模式—对应的力学模型—相应的突水机理解释—突水与否判别—突(涌)水量预测—陷落柱预测—探查—治理的基本理论体系,为华北地区岩溶陷落柱的研究提供了理论依据。其主要内容概况如下:

(1) 通过煤矿矿区大量实际揭露资料的分析研究,系统分析研究了华北型煤田岩溶陷落柱资料,分析了岩溶陷落柱区域和煤田的分布规律,总结了岩溶陷落柱的平面形状、剖面形状、中心轴形状、地表出露景观、充填物、柱体在横向上和纵向上的分带特征等,采掘工程接近岩溶陷落柱时的表现特征。

(2) 系统总结了岩溶陷落柱的分类方法,形成了华北型煤田岩溶陷落柱形成条件和成因的基本认识,给出了岩溶陷落柱导水的基本条件,并提出了岩溶陷落柱的突水方式、特点和规律。

(3) 运用FLAC^{3D}数值模拟方法分析和计算典型矿区采动过程中岩溶陷落柱应力的应变规律,从而解释了岩溶陷落柱突水机理;根据陷落柱与煤层的相对位置关系,提出了薄板突水、剪切破坏突水、厚壁筒突水和压裂突水四种突水模式和机理,并导出了剪切破坏和厚壁筒突水模式的力学判据。

(4) 依据岩溶陷落柱的分布规律、分类特点等,实施了典型矿区岩溶陷落柱预测,建立了岩溶陷落柱突水本构模型,在流—固完全耦合规律研究的基础上,实现了突水危险性定量评估及突水量预测。

(5) 在岩溶陷落柱宏观预测的基础上,在三维地震资料精细解释确定的异常预测区,利用电法、重力、电磁法、地震法、井间透视等物探手段,圈定陷落柱异常,为钻探定位提供依据;通过有针对性的放水试验、连通试验,进一步查明陷落柱范围和导水性。最后,布置钻探工作量验证陷落柱的存在与导水性。

(6) 在地质、水文地质条件分析的基础上,依据水量、水温、水质综合分析快速判识导水

性或突水水源,井下物探、钻探相结合综合探查陷落柱位置和范围,钻探探查、注浆封堵相结合完成突水通道超前治理。治理之后应评估注浆封堵效果,确保安全生产。

此项研究工作得到国家自然科学基金(40672156)的资助,同时得到国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAK29B04、2007BAK24B01)、国家重点基础研究计划(973)项目(2006CB202200、2007CB209402)的资助,也得到北京市教育委员会科研基地项目、河北省自然科学基金(D2007000765)的资助,谨表衷心感谢。

本书融入了大量有关方面的研究成果,包括华北各矿区的有关研究成果,也包括众多学者的相关成果,更包括本课题研究过程中课题组人员的努力,也有出版过程中各方领导、老师、同学等付出的艰辛劳动,还有许多学者提出的意见建议以及支持与帮助,在此谨表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中可能存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

尹尚先 吴文金

2008年8月

目 录

绪 论	(1)
1 华北型煤田岩溶陷落柱特征	(3)
1.1 岩溶陷落柱的形态特征	(3)
1.2 岩溶陷落柱的内部物质特征	(5)
1.3 岩溶陷落柱的出露特征	(8)
1.4 井下遇岩溶陷落柱前的征兆	(12)
2 华北型煤田岩溶陷落柱发育分布规律	(14)
2.1 区域岩溶陷落柱分布规律	(15)
2.2 煤田内岩溶陷落柱发育分布规律	(16)
3 华北型煤田岩溶陷落柱分类	(21)
3.1 岩溶陷落柱的分类	(21)
3.2 陷落柱发育期的分类方案	(25)
3.3 陷落柱发育层位的分类方案	(28)
3.4 岩溶陷落柱的综合分类及其地质特征	(32)
4 华北岩溶陷落柱导水性	(33)
4.1 华北煤田陷落柱的水文地质类型	(34)
4.2 岩溶陷落柱导水条件和影响因素	(36)
4.3 岩溶陷落柱的突水特点和规律	(39)
4.4 岩溶陷落柱活化导水分析	(42)
5 华北岩溶陷落柱成因	(45)
5.1 陷落柱形成的基本条件及控制因素	(45)
5.2 岩溶陷落柱成因	(48)
6 华北型煤田岩溶陷落柱预测	(54)
6.1 岩溶陷落柱成因的宏观预测	(54)
6.2 预测岩溶陷落柱位置、形状和大小	(56)
6.3 岩溶陷落柱预测实例	(56)
7 岩溶陷落柱探测技术	(60)

7.1	三维地震勘探	(60)
7.2	高密度电法探测	(62)
7.3	瞬变电磁法探测	(65)
8	岩溶陷落柱形成的岩体力学特征	(69)
8.1	岩溶陷落柱形成的岩体力学背景	(69)
8.2	岩溶陷落柱形成的岩体力学条件	(72)
9	陷落柱突水模式及判据	(76)
9.1	顶底部突水(筒盖)	(76)
9.2	陷落柱侧壁突水	(79)
10	采动条件下陷落柱影响围岩稳定性评价	(86)
10.1	研究区区域地质背景	(86)
10.2	研究区矿井充水特征及地下水动态	(91)
10.3	研究区岩溶陷落柱发育分布特征	(92)
10.4	岩溶陷落柱的成因分析	(98)
10.5	富含水性及导水性分析	(100)
10.6	过陷落柱开采地质稳定性评价计算模型的建立	(102)
10.7	过陷落柱开采地质稳定性分析	(106)
10.8	过陷落柱开采地质稳定性模拟计算结论	(123)
11	陷落柱围岩应力场与渗流场全耦合研究	(125)
11.1	裂隙岩体中水压力作用机理	(125)
11.2	应力场与渗流场全耦合实验研究	(128)
11.3	应力场与渗流场全耦合数学模型	(133)
12	矿井突水量评价预测	(136)
12.1	地应力场对渗流场的宏观控制	(136)
12.2	地应力对介质微观渗透特征的影响	(139)
12.3	地应力影响介质渗透性的微观机理	(141)
12.4	矿井地下水系统模型	(144)
12.5	矿井涌水量评价预测	(149)
13	岩溶陷落柱突水风险评价	(156)
13.1	研究区区域地质背景	(156)
13.2	研究区矿井充水特征及地下水动态	(161)
13.3	研究区岩溶陷落柱发育分布特征	(162)
13.4	研究区陷落柱导水原因及其影响因素	(164)
13.5	陷落柱及其裂隙围岩导突水岩体本构关系	(167)
13.6	ANSYS 数值模拟	(170)

13.7	FLAC ^{3D} 数值模拟结果及分析	(179)
14	陷落柱治理技术	(209)
14.1	梧桐庄矿 3 号陷落柱治理实例	(209)
14.2	任楼矿区陷落柱超前治理实例	(213)
参考文献		(217)

绪 论

1 岩溶陷落柱危害

我国煤炭资源丰富,是世界产煤最多的国家之一,原煤总产量的 95% 来自地下开采。然而我国煤田地质条件十分复杂,突水事故、瓦斯灾害是世界上最严重的国家,中国的煤与瓦斯突出总次数占全世界突出现象总数的 1/3 以上,受水威胁的煤炭储量占探明储量的 27%,采矿中频繁发生的矿井水灾害严重威胁着煤矿的安全生产。例如,1935 年 5 月 13 日,山东淄博市北大井,由于巷道掘至与河水连通的断层带,造成突水,最大涌水量 $648\text{ m}^3/\text{min}$,矿山停产报废,淹死矿工 350 人,到 1978 年恢复生产;1984 年 6 月 2 日,河北开滦范各庄矿 2171 综采工作面发生世界采矿史上罕见的透水灾害,最大涌水量 $2\,053\text{ m}^3/\text{min}$,迫使该矿井处于停产状态,直接经济损失数亿元。总体来讲,我国主要有以下四方面的矿井水害严重地影响着煤矿安全生产:(1)全国普遍存在的采空区突水;(2)中国北方石炭二叠纪煤层下伏的奥灰岩突水;(3)中国南方二叠纪灰岩及晚二叠世上覆的三叠纪灰岩突水;(4)在黄河和淮河冲积平原区,新生界孔隙含水层突水。

根据资料分析,所有突水灾害中,以采空区突水、断层、陷落柱突水为主。而陷落柱突水造成的经济损失最大,见表 0-1。

表 0-1 历次岩溶陷落柱突水统计表

发生地点	最大突水量/ ($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$)	突水时间	损失程度 (经济损失)
开滦范各庄矿 2171 工作面	2 053	1984-6-2	淹 4 井
邢台东庞矿 2903 工作面	1 167	2003-4-12	淹井,3 亿元
皖北任楼矿 7 ₂₂ 工作面	576	1996-3-4	淹井,3.5 亿元
徐州张集矿-300 水平轨道下山	400	1997-2-18	淹井
焦作李封矿东 18	53	1967-3-29	淹井
辉县吴村矿 32031 工作面	40	1999-11-25	淹采区
安阳铜冶矿 103 工作面下顺槽	25.3	1965-8-25	淹井

2 岩溶陷落柱及其突水研究所面临的挑战

岩溶陷落柱是我国华北煤田广泛发育的一种极富区域特色的地质现象。它是煤系下伏可溶岩系中的大跨度溶洞发生持续向上塌陷所产生的,绝大多数以隐伏形式存在,在华北晚古生代(辽冀鲁晋蒙陕豫皖苏)和中生代(大同煤田)、华南晚三叠世须家河组含煤岩系中广

泛分布,其特殊的工程地质水文地质特征,严重威胁着煤炭资源的安全开采。

陷落柱属岩溶塌陷的研究范畴,由于其塌陷体的形态特征,在煤矿区将其称为岩溶陷落柱,在煤炭的开采过程中,陷落柱是不容忽视的重要地质灾害。在目前的机械化采煤中,陷落柱的存在会形成良好的导水通道,产生煤层顶、底板的突水问题;陷落柱会使采煤机械下沉压架,造成不可估量的经济损失;在煤层气的勘探中,由于陷落柱具有高孔隙度、低应力分布的特点,使之成为良好的煤层气吸附区带;陷落柱的发育,破坏煤层的完整性,减少了可采储量,造成无效进尺,影响掘进进度和采煤产量,影响安全生产以及影响煤质的好坏等。

陷落柱作为一种强导水通道,常导致奥陶系灰岩(以下简称奥灰)突水事故,已经造成我国矿山多次淹井和淹工作面灾害。受灾煤矿由华北型煤田北部的开滦矿区到南部的平顶山、两淮矿区,从西部的渭北矿区到东部的肥城、淄博矿区,几乎涵盖了整个华北煤田,陷落柱突水已成为近 20 年来煤矿最严重的灾害之一。自 1984 年 6 月 2 日河北开滦范各庄矿 2171 工作面陷落柱(该矿的 9 号陷落柱)突水,最大瞬时涌水量高达 $2\,053\text{ m}^3/\text{min}$ ($123\,180\text{ m}^3/\text{h}$)而震惊中外,此后陷落柱水害开始引起人们的重视,特别是 1996 年 3 月 4 日任楼矿 7222 工作面 $576\text{ m}^3/\text{min}$ ($34\,570\text{ m}^3/\text{h}$)的陷落柱水害和 1997 年 2 月 28 日徐州张集矿 $400\text{ m}^3/\text{min}$ ($24\,000\text{ m}^3/\text{h}$)的陷落柱(该陷落柱未见柱体)水害,接踵发生后,陷落柱水害愈来愈受到人们的重视,但仅有重视还不够,2003 年 4 月 12 日邢台东庞矿 2903 工作面发生陷落柱特大突水淹井事故,最大突水量达 $70\,000\text{ m}^3/\text{h}$,造成直接经济损失达 3 亿元。因此,加强陷落柱及其突水研究,真正掌握其致灾机制科学防范,才能从根本上解决问题。

陷落柱及其突水研究涉及地质学、岩体力学、岩体水力学、地质力学、数学以及系统工程等多个学科领域,陷落柱及其突水研究整体进展较快,但由于其复杂性,到目前为止,仍有许多问题需要继续探索和研究:

(1) 由于地质的复杂性和陷落柱的共性规律,岩溶陷落柱的发育特征和分布规律的研究,仅限于其形态特征和出露特征,对其分布规律还仅限于具体的煤田、井田,缺乏区域性、系统性的研究。

(2) 有关岩溶陷落柱的成因,观点上分歧较大,认识上远不统一,对岩溶陷落柱形成条件缺乏全面分析,对岩溶陷落柱成因机理没有做出深入剖析和系统阐述。

(3) 岩溶陷落柱岩体结构力学特性以及陷落柱突水的本构关系仍处于几近空白状态,通过本次研究,将目前的定性研究成果加以理论升华,逐步实现其本质性量化。

(4) 尽管岩体渗流场与应力场之间关系的研究已经很多,但采动条件下针对陷落柱及其围岩裂隙的渗流场与应力场的全耦合,不论是理论分析还是实验验证都有非常大的发展空间。

(5) 在岩溶陷落柱的预测和探查方面,是一个十分薄弱的环节,应加强先进理论的应用研究和现代先进技术手段的开发利用。

(6) 近几年随着计算机的飞速发展,数值模拟在地质及采矿中大量应用,也取得了很多成果,但如何建立适合陷落柱这种特殊构造的突水模型,应用何种方法及软件分析解算力学模型,真正做到定量评价岩溶陷落柱突水的危险性,这方面也有非常漫长的路要走。

1 华北型煤田岩溶陷落柱特征

岩溶陷落柱是岩溶动力地质作用的产物,是一种比较特殊的地质体。岩溶陷落柱的几何形态、赋存状态、出露状况以及揭露前的征兆等都有其固有特征,正确认识和分析这些特征,对于研究华北型煤田岩溶陷落柱的形成机理、导水性以及岩溶陷落柱突水防治等具有重要意义。

1.1 岩溶陷落柱的形态特征

岩溶陷落柱的形态是岩溶陷落柱最重要的特征之一,同时也是其最本质和最鲜明的客观表现形式。岩溶陷落柱的形态要素主要包括平面形状、剖面形状、柱体高度和柱体中心轴等。华北各煤矿区实际揭露资料表明,岩溶陷落柱的平面形状不一,面积大小不同;剖面形状多种多样,极不规则;柱体高度大小各异;柱体中心轴复杂多变。

1.1.1 岩溶陷落柱的平面形状

岩溶陷落柱的平面形状是指岩溶陷落柱柱体与地表或岩层层面的切割面形状,也称为横切面形状。根据目前揭露的岩溶陷落柱的资料,其平面形状主要有椭圆形、似圆形、肾形、长条形和不规则形等,其中呈椭圆形和似圆形者居多,尤以椭圆形为最多。同一岩溶陷落柱,由于垂向上围岩岩层性质的差异,其平面形状有时也有变化。在不同的矿区和井田,或同一井田不同构造区段的岩溶陷落柱,因受形成条件和各种因素的影响,其平面形状有所不同,长、短轴大小不一,平面面积有大有小,并且相差十分悬殊。最大的长轴近 600 m,最小的长轴不足 10 m。面积最大可达数万平方米到十余万平方米,面积最小者仅几十平方米。河北开滦矿区唐家庄矿发现的 5 个岩溶陷落柱,平面形状有椭圆形、似圆形和肾形,其中最大的长轴 116 m,最小的长轴 20 m,而与其邻近的范各庄矿揭露的 13 个岩溶陷落柱均为椭圆形,其中面积最大的 6 号岩溶陷落柱,长轴 91 m,短轴 55 m;面积最小的 5 号岩溶陷落柱,长轴 50 m,短轴 29 m。山西霍县矿区曹村矿发现的 52 个岩溶陷落柱,多数为椭圆形,少数为似圆形,长短轴之比以 3:1~2:1 者居多;大者长轴 94 m,小者长轴仅 18 m。阳泉矿区三矿揭露的 220 余个岩溶陷落柱,平面形状为椭圆形者占 97.3%。汾西矿区三矿较场井田揭露的一个岩溶陷落柱,长轴 580 m,短轴 200 m,面积超过 $9 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。据统计,河北井陘矿区已发现的 112 个岩溶陷落柱中,椭圆形为 58 个,占 51.8%;似圆形为 33 个,占 29.5%;不规则为 21 个,占 18.7%;岩溶陷落柱面积大于 $5\,000 \text{ m}^2$ 的 1 个,占 0.8%; $5\,000 \text{ m}^2 \sim 50\,000 \text{ m}^2$ 的 4 个,占 3.6%; $500 \text{ m}^2 \sim 5\,000 \text{ m}^2$ 的 53 个,占 47.3%;小于 500 m^2 的 54 个,占 48.2%。鲁西新汶矿区协庄矿的 14 个岩溶陷落柱,椭圆形占 1.4%,似圆形占 28.6%,其中最大的岩溶陷落柱长轴 170 m,短轴 70 m,面积为 $9\,341.5 \text{ m}^2$,最小的岩溶陷落柱长轴 30 m,短轴 24 m,面积 565.2 m^2 。滕州煤田枣庄矿区柴里矿揭露的 4 个岩溶陷落柱,其中 3

个为椭圆形,1个为似圆形。肥城煤田发现的9个岩溶陷落柱均为椭圆形,最大的长轴120 m,最小的长轴为33 m。

岩溶陷落柱的长轴展布方向常有变化,主要受井田构造线方向的控制。河北峰峰矿区三矿井田发现的18个岩溶陷落柱,其长轴方向为NW向的8个,NE向的10个,分别与该井田的NW向和NE向两组主要断裂的走向一致。井陘矿区一矿发现的34个岩溶陷落柱,其长轴方向多呈NEE向,少数呈近SN向。山西霍县矿区曹村矿揭露的32个岩溶陷落柱,长轴方向 $300^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 占多数,明显受该矿NW向断裂构造控制。鲁西新汶矿区协庄矿的14个岩溶陷落柱,多数长轴方向为NNW向,与断裂方向一致。

1.1.2 岩溶陷落柱的剖面形状

岩溶陷落柱的剖面形状主要受所穿过岩层的岩石物理力学性质制约,其粗细变化不一,多呈不规则的柱状体。在岩性比较坚硬均一、裂隙又比较发育的岩层中,其剖面形状多呈上小下大的圆锥状,塌陷角一般在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间,华北型煤田中这种形状的岩溶陷落柱最多。在松散层中,岩溶陷落柱的剖面形状多呈上大下小的漏斗状,塌陷角比较小,约 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,此种岩溶陷落柱在华东地区的一些煤田中多见。当岩溶陷落柱穿过软硬相间的岩层段时,其剖面形状常呈时凸时凹和时粗时细的不规则状。华北煤田岩溶陷落柱的剖面形状除大多数呈上小下大的圆锥状和极少数呈上大下小的漏斗状柱体外,还有上下粗细相近的圆筒状柱体以及两头大中间小的不规则状柱体和弯曲状柱体。河北井陘矿区的112个岩溶陷落柱中,96%为上小下大的圆锥状柱体,4%为两头大中间小的不规则状和圆筒状柱体。目前,鲁西煤田发现的岩溶陷落柱基本上都是上小下大的圆锥状柱体。

1.1.3 岩溶陷落柱高度

岩溶陷落柱高度一般是指溶洞的底面至岩溶陷落柱柱顶的距离,但至今尚未有钻孔直接探到溶洞底面的资料报道,此处所谓的岩溶陷落柱高度笼统的指奥陶系石灰岩顶部至柱顶或塌陷顶的距离。华北型煤田不同矿区的不同岩溶陷落柱,柱体高度大小差别十分显著。有的岩溶陷落柱塌至地表,其高度比较大,如山西阳泉、汾西矿区和河北峰峰矿区有少数岩溶陷落柱塌至地表,柱体高度可达数百米。更多的岩溶陷落柱只塌至太原组或山西组,其柱体高度相对比较小,多数为数十米至百余米,个别只有十余米。目前发现的岩溶陷落柱柱体高度最大的是山西阳泉矿区的—个岩溶陷落柱,高度达600 m。河南鹤壁矿区四矿的15号岩溶陷落柱,柱体高度约400 m。河北井陘矿区揭露的岩溶陷落柱,柱体高度大者为150 m~200 m,多属塌至山西组的岩溶陷落柱,小者仅50 m左右,属塌至太原组底部的岩溶陷落柱。鲁西新汶煤田协庄矿发现的14个岩溶陷落柱中有11个塌至山西组,滕州煤田柴里矿的4个岩溶陷落柱全部发现于山西组3#煤层中,柱体高度多在300 m左右。肥城煤田的9个岩溶陷落柱有2个发现于山西组,其中杨庄矿在山西组3煤中揭露的1个岩溶陷落柱,柱体高度约370 m,在太原组8#煤层、9#煤层中揭露的2号、4号岩溶陷落柱,柱体高度分别为95 m和75 m。岩溶陷落柱的柱体高度与奥陶系石灰岩顶部岩溶洞穴的规模大小、地下水径流条件、上覆岩层的岩石物理力学性质、裂隙发育程度和稳定性有关。如果奥陶系石灰岩顶部溶洞体积大,地下水径流条件好,上覆岩层裂隙发育且稳定性差,则岩溶陷落柱的柱体高度就大,反之则小。

1.1.4 岩溶陷落柱的中心轴

岩溶陷落柱各横切面中心点的连线称为岩溶陷落柱的中心线或中心轴。从理论上讲,岩溶陷落柱的中心轴应垂直于所穿过岩层的层面,但由于所穿过岩层的产状变化、岩石物理力学性质差异、裂隙发育程度不同以及后期构造运动的改造和影响,岩溶陷落柱的中心轴常有变化。实际揭露的岩溶陷落柱中心轴大多数不是垂直岩层层面,而是歪斜或弯曲多变的,有的甚至发生扭转。中心轴的形状反映了岩溶陷落柱在垂向上的伸展变化以及在空间产生的状态。山西霍县矿区曹村矿发现的 50 多个岩溶陷落柱,中心轴并不垂直岩层层面,常弯曲多变;河北井陘一矿贾南井田的 9 号岩溶陷落柱,在 80 m 的高差内,中心轴在水平方向偏移 22 m,呈歪斜状;井陘三矿的 30 余个岩溶陷落柱,有中心轴与岩层层面垂直的(如 29 号岩溶陷落柱),有水平偏移的(19 号沿某一方向偏移的岩溶陷落柱),也有扭转偏移的(17 号岩溶陷落柱);开滦矿区唐家庄矿的岩溶陷落柱,柱顶一般向岩层倾斜上方歪斜;鲁西新汶煤田协庄矿的岩溶陷落柱,中心轴常发生偏移,并且柱顶多偏向北,与该矿滑动构造的滑移方向基本一致。岩溶陷落柱造成中心轴发生偏移、扭转的原因,除了与穿越岩层的产状和岩性变化有关外,其中一个重要的原因,是岩溶陷落柱形成过程中或形成以后,被煤层及其顶底板附近的滑动构造所改造的缘故。掌握岩溶陷落柱中心轴的变化规律,可以全面了解岩溶陷落柱的空间赋存状态,有助于预测岩溶陷落柱在下部煤层或下水平的平面位置。

1.2 岩溶陷落柱的内部物质特征

华北煤田陷落柱具有独特的沉积建造,它不应仅视为岩层(固相)破碎、再堆积的简单过程。现根据对露头及巷揭情况的观察,可将陷落柱的沉积充填特征进行初步总结。

1.2.1 岩溶陷落柱的内部物质特征

陷落柱内部结构具有堆积物杂乱无章、充填物多为煤系地层岩块、不同陷落柱或同一陷落柱的不同部位岩石下移的距离不一样、充填物风化程度明显差异等特征。

(1) 陷落柱内的充填物为煤系地层陷落的岩块,是岩石脱离原层位下移形成的,且冒落堆积是分期逐步向上发展的。

(2) 内部堆积物杂乱无章(以开滦范各庄矿为例):

① 不同陷落柱由于发育高度不同,岩石下移的距离也不同,3 号陷落柱在 9[#] 煤层位置见到 A 层泥岩,下落约 200 m,5 号、6 号陷落柱在 12[#] 煤层底板位置见到 11[#] 煤层顶板岩石,只下移约 20 m;

② 同一陷落柱的不同部位岩石下落的距离也不一样,9 号陷落柱中心位置 15 号孔中 12[#] 煤层底板岩石只比正常层位下降 8 m,而边缘的 27 号孔中 12[#] 煤层底板岩石则下降约 50 m。

(3) 不同陷落柱或同一陷落柱的不同部位充填物的风化程度有明显差异。如 3 号陷落柱在 9[#] 煤层位置所见充填物中,软岩石已风化成泥土状,硬岩石碎块被泥土胶结紧密;7 号陷落柱在 7[#] 煤层位置所见大部分岩石已风化为黄色细砂,只有少量 5[#] 煤层顶板的钙质砂岩还保持较大岩块;8 号陷落柱在 7[#] 煤层位置所见充填物中,软岩石开始风化变软,颜色微

变黄,浅灰色和灰色细砂岩呈蓝色,破碎后内部为白色,外部有一层蓝色圈,为还原环境的水浸现象;5号、6号陷落柱在12[#]煤层底板所见充填物均为原状岩石破碎,无风化变色现象;从钻探取芯和冲入巷道中的堆积物看,9号陷落柱内充填物的大部分软岩石已风化变软,而硬岩石基本保持原岩状态,12[#]煤层以上岩石风化较差,基本保持原色,12[#]煤层以下硬岩石裂隙面多被浸蚀变色并染有黄色黏泥,很多菱铁矿结核被浸蚀出现溶孔,有的在裂隙中再沉积形成溶滤式小铁矿石,软岩石多风化成黄色,有的已形成黏泥和碎屑。

(4) 陷落柱内部的水流活动改变了其内部结构和充填物的状态。1984年6月2日,9号陷落柱透水时,由陷落柱内冲出的充填物约65 653 m³,陷落柱顶部空洞体积约39 700 m³,冲出物有黏泥、煤屑和岩块,岩块均已滚圆呈卵石,经鉴定层位越低的岩石块越小,滚圆度越好,这可能与岩石风化强弱和水流搬运距离大小有关。

(5) 不同陷落柱或同一陷落柱的不同部位裂隙和空洞发育不一样。陷落柱内部裂隙和空洞发育情况取决于充填物的风化和压实程度,不同陷落柱间差别很大,3号和7号陷落柱充填物已风化成砂子和黏泥并压实,裂隙率很小,陷落柱内部已不导水,而9号陷落柱平均裂隙率达12.6%,导水性很强。同一陷落柱的不同部位裂隙和空洞的发育也不一样,9号陷落柱上部裂隙率高达21%,中部为6.2%,下部为4.7%。

1.2.2 煤系中泥石浆型堆积

煤系中泥石浆型堆积是煤系段陷落柱最主要的充填物,它有以下特点:

1. 具泥砾结构

泥砾中的大角砾和块石来自上覆岩层,主要为坚硬的砂岩、灰岩块,以砂岩块居多,大小相差悬殊,从数厘米至数十厘米,其中巨大板条状块石长可达约8 m~10 m,这种条石有的斜歪、有的竖直、有的平卧,姿态多样。基质由较细至极细的岩屑、岩粉、黏粒组成,含量较高,通常大于60%,它们包裹着大大小小的岩块,胶结紧密,不少大岩块恰似悬浮在基质中,堆积物无分选,无层理显示。这种泥砾与山区黏性泥石流的结构相似,估计冒落时,石、泥、水俱下,落底后又被充分搅混,由于固体物质含量大,黏粒成分高,泥石浆黏稠,浮力大,推测容重约2 000 kg/m³,泥石浆析水固结时结构保持稳定,形成泥砾。边缘“泥浆”渗入陷落柱边缘围岩内的开启裂隙,透入深度可达3 m~5 m,将裂隙封堵。

2. 腔壁掏蚀现象

陷落腔壁在煤层、弱岩层特别是软弱夹层部位存在明显掏蚀现象。掏蚀部位被泥石浆充填取代,故陷落柱在软弱岩层中往往有:柱径增大[图1-1(a)]、向腔壁后参差嵌入或钻入煤层现象[1-1(b)],掏蚀深度1 m至数米不等。该特征可与跌水在跌落后,翻卷起的水流对崖壁的掏蚀作用相类比。由于陷落腔内快速充填,岩体被掏蚀的部位也随之抬升。

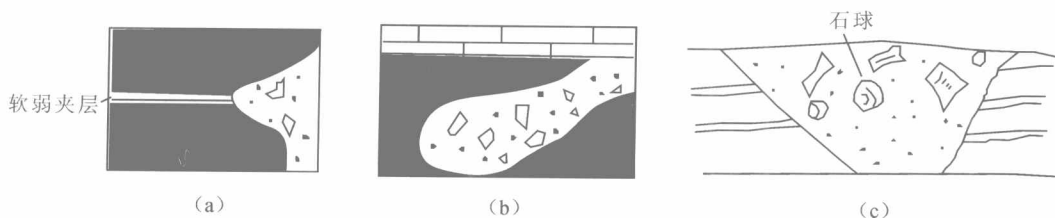


图 1-1 泥石浆型充填堆积特征

3. 其他动力现象

泥砾堆积物内曾见到直径为 20 cm~40 cm 的“煤球”或“石球”[1-1(c)], 滚圆程度为圆到极圆, 上有擦痕。它是煤块和中等强度的岩块在滚翻的泥岩浆中被打磨的产物, 也是固结前浆液曾遭类似旋涡式搅动的证明。

综上所述, 当岩体在封闭的陷落腔内发生陷落时, 岩体中出现竖井式垂直通道, 使柱腔上、下不同含水层发生贯通, 由于水动力加入, 必然引发腔内流体(液、气)同时发生流动, 故在陷落堆积中保存着固、液、气三相动力作用记录; 另外在煤系中含有许多易于分散溶解于水中的泥岩、页岩, 可成为造浆的物源, 它们在陷落、粉碎及水动力作用下便可造出泥浆。所以, 陷落柱的泥砾堆积是以煤系砂、泥岩为物源, 由致塌岩体坠落时的重力和巨型垂直管道内的水动力共同作用下形成、建造。

1.2.3 干式顶冒堆积

在山西一带还可以见到另外一些不同充填特征的陷落柱:

(1) 堆积物具有“似层位”。即根据岩性、化石特征, 岩块原层位可辨, 并且同层岩块多数断续排列成层, 依据围岩层位和陷落物的“似层位”, 可算出该处岩层的冒落距离。这样落下的岩层虽已开裂、分离, 但岩层连续性仍可勾画。表明它在堆积时未受水力紊流作用, 基本上为干式塌落堆积(图 1-2)。



图 1-2 上方煤层及夹石层落入
开采煤层中示意图

(2) 与开放条件下山区的崩塌堆积物相比, 这种堆积物内岩屑、岩粉含量较大, 常占总体积的 50% 以上, 这可能与陷落腔处在岩体内部, 属封闭环境有关, 就像采煤工作面在突发冒顶时伴有高压气流、气击之类的事件产生, 往往形成超量粉尘, 并可吹入空隙、裂隙充填。因此, 这种冒顶式堆积也具有“泥砾结构”。但它是在空腔高度不大条件下的陷落充填, 故可依顶板逐层冒落方式堆积起来的。

1.2.4 柱内开放水体沉积

在霍县、汾西一带矿井内除了见到陷落柱泥砾堆积外, 有时在陷落柱内还存在一套新第三纪砂、泥岩堆积, 它们与静水湖泊沉积相似, 层理、微细层理十分清晰, 其中还发现淡水瓣腮及龟类化石。它表明这类陷落腔已与地表水体相通, 导入湖相沉积物。在这类陷落柱内, 有时见有“套锥体”、柱缘泥质充填带及小断层斜切陷落柱等多次活动现象, 隐示着受水浸泡及古地震活动的遗迹。但这类陷落柱在别的地方尚未见报道。

1.2.5 岩溶陷落柱柱顶情况

大多数陷落柱顶端都终止在岩体内部不同深度上, 如侵蚀不到位, 即使在暴露煤田内也主要为地表无露头的“盲柱”。因此, 野外调查时, 能直接观察到陷落柱顶部及终止层位的机遇和寻求见底的机遇实属罕见。有些矿区陷落柱虽成群发育, 勘探钻孔也很多, 但从上部正常岩层钻入陷落柱顶部的钻孔很少, 在采掘巷道内能实见柱顶的例子更属鲜见。这里仅介绍部分个例。太原西山矿区一些向下钻遇的陷落柱, 多是从北岔沟砂岩下始见, 其上岩层完

整;也有的是在上石盒子组 K_6 砂岩下始见。该地曾在庙口灰岩下 5 m 煤层中见陷落柱柱顶空洞,洞底不深,由洞口向下看去能见到已陷落的煤层,而顶板庙口灰岩完整。以上岩层多为致密坚硬,弹性模量大,强度高,节理平均间距大的强岩层,它们可阻止断面较小的陷落柱向上发展。另一种情况,如汾西张家庄矿下部 10[#] 煤层中所见陷落柱,有的可塌穿上部 4[#] 煤层,有的却在 4[#] 煤层相当位置上变为放射状正断层,呈现“裂而不陷”。4[#] 煤层底板为铝土页岩和多层海相泥岩,后者吸水膨胀为水敏岩,具较强塑性变形和膨胀变形能力,故能使较小陷落柱终止上升。

通过对华北煤田及皖北矿区内岩溶陷落柱充填特征的研究,认为泥石浆型堆积是煤系段陷落柱的主要充填物。泥石浆不仅充填陷落主腔体,同时也封堵腔壁裂隙带,“结石体”成泥砾结构,渗透性极低,是柱腔内最主要的“堵水塞”,而柱旁贯通性节理由于高压水楔渗透劈入,可成为最优导水通道,它可将动水切入陷落柱,进而引发活化突水。

1.3 岩溶陷落柱的出露特征

岩溶陷落柱的出露特征包括岩溶陷落柱的地表出露特征和井下揭露特征。掌握岩溶陷落柱的出露特征是识别和判断岩溶陷落柱、预测和圈定岩溶陷落柱的一个重要环节。

1.3.1 岩溶陷落柱地表出露特征

在山西阳泉、汾西等矿区,常有一些岩溶陷落柱出露于地表。由于出露于地表的岩溶陷落柱与周围正常岩层的层位、岩性和产状都不相同,并且又形成各种奇特的地貌景观,因此可以利用这些差异和地貌特征,判断岩溶陷落柱的存在,圈定其在地表的出露范围以及进一步预测岩溶陷落柱在井下的大致形状和大小。

1. 盆状塌陷坑

岩溶陷落柱出露地表后,常呈圆形或椭圆形的盆状凹坑,坑内混杂堆积着上覆不同岩层的大小岩块,坑外的岩层层位正常,但裂隙比较发育,且微向坑内倾斜。

2. 柱状破碎带

在太原西山矿区和汾西矿区的自然剖面或人工剖面上,有时可见到岩溶陷落柱出露的柱状破碎带,破碎带内的岩层层序混乱,大小岩块混杂堆积,两侧岩层层序正常,产状略有变化,裂隙比较发育。

3. 丘状凸起

丘状凸起是岩溶陷落柱在地表出露后形成的一种十分奇特的微型地貌。在山西阳泉和平定等矿区,常见到在山西组页岩中有隆起的石盒子组或石千峰组的砂岩堆,因石盒子组砂岩比山西组页岩坚硬、抗风化剥蚀能力强,从而残留下来形成丘状凸起的地貌景观。

此外,山西汾河沿岸黄土层发育的矿区,岩溶陷落柱发育的黄土覆盖地段,常形成一些奇异的地貌。汾西矿区张家庄矿,岩溶陷落柱塌至第三纪砾岩之上,覆于其上的第四系黄土层经雨水的长期冲蚀,地面上常形成大小不等的圆形空洞,直径最大者达 20 m,最小者约 1 m,成为一种特殊的黄土岩溶地貌。在分布有圆形空洞的地带,井下一般可揭露到岩溶陷落柱,有时也可能遇到由几个岩溶陷落柱组成的岩溶陷落柱群。黄土覆盖区岩溶陷落柱在地表还会形成大大小小的裂缝,其走向多呈圆弧形,大的裂缝可以跌进耕牛,故有“跌牛缝”