

立井破碎基岩段围岩强度及支护等级划分标准

李廷春¹, 张仕林¹, 王群¹, 尚立斌², 杨晓成²

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 阳泉煤业(集团)责任有限公司, 山西 阳泉 045000)

摘要:立井过破碎基岩段施工过程中常常发生围岩的突然垮塌,造成人员伤亡事故。通过分析现有技术存在的问题,有必要提出一套操作性好、可量化的围岩强度及支护等级划分标准。综合考虑岩体基本质量指标、RQD值、岩石软化系数等因素,有针对性的对立井破碎基岩段进行了围岩强度等级再划分;通过不同围岩强度等级、不同开挖直径和不同深度的井筒破碎段围岩稳定性数值模拟,并提取其位移关键值,利用围岩失稳的位移判据,提出了一套针对立井破碎基岩段围岩支护等级划分标准;结合现有立井施工支护技术,形成以不同支护等级为依据的立井破碎基岩段围岩稳定控制技术。通过阳煤集团景福煤矿副立井过破碎基岩段的实际应用,验证了该技术的科学性、合理性、有效性。

关键词:立井;破碎基岩;围岩强度;支护等级

中图分类号:TD262 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)01-0001-07

Classification standard of strength and supporting level for surrounding rock in shaft broken bedrock section

LI Ting - chun¹, ZHANG Shi - lin¹, WANG Qun¹, SHANG Li - bin², YANG Xiao - cheng²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Yangquan Coal Industry (group) Co. Ltd., Yangquan 045000, China)

Abstract: The surrounding rock often collapse suddenly in the construction of vertical shaft through fractured rock, causing casualties accidents. Classification standard of rock strength and supporting level, which is operationally and can be quantitated, should be proposed necessarily by analyzing the problems of existing technology. Taking into account basic quality indicators of rock mass, RQD value and softening coefficient of rock, the strength grade of surrounding rock was classified. The stability of broken surrounding rock was numerically simulated through different strength of surrounding rock, different excavation diameter and different depth shaft, and the critical values of displacement were picked up and analyzed. Using rock failure displacement criterion, the standard of supporting grade was classified for broken surrounding rock in vertical shaft. Combined with current support technology in shaft construction, the technology of stability control for corresponding fractured rock was formed on the basis of different supporting level in vertical shaft. The technology is actually used for vice shaft through fractured rock in Jingfu coal mine, and proved scientifically, reasonably and effectively.

Key words: vertical shaft; fractured rock; strength of surrounding rock mass; support grade

在煤矿立井井筒破碎段施工过程中,由于井壁围岩松软、破碎或裂隙发育,常常造成人员伤亡事

故。例如山西阳煤集团五矿赵家分区回风立井距离井口约529~533 m处,由于井壁围岩裂隙发育,在

工程施工扰动下发生突发性垮落,造成一死两伤的事故.因此,对立井破碎基岩段围岩稳定性控制技术展开研究具有重要的现实意义.

近年来,关于井筒过破碎带的施工安全问题,为了保证立井正常掘进、保障施工安全,许多专家学者进行了研究,提出了很多保证安全施工的方法或措施.其中利用注浆技术^[1-7]对破碎围岩进行加固是最常用的方法,并取得较好的效果;任智富、檀远远、杨兴全^[8]研究了井壁内层现浇混凝土和外层锚网喷临时支护的结构,为杨柳煤矿立井井筒过基岩断层破碎带的施工提供了安全保证;当围岩条件较好时,采用常规的方法最简单,如挂圈背板、喷射混凝土等^[9].

上述研究成果可见,由于围岩种类、物理力学性质、破碎程度等不同,支护不能一概而论,最好提出操作性好、可量化的支护等级划分标准.目前,这方面的研究成果较少,需要继续完善立井井筒过破碎带的支理论.本文以景福煤矿副立井井筒过破碎段施工为研究背景,综合考虑岩体基本质量指标、RQD值、岩石软化系数等因素,有针对性的对破碎基岩段进行了围岩强度等级再划分;通过不同围岩强度等级、不同开挖直径和不同深度的井筒破碎段围岩稳定性数值模拟,并提取其位移关键值,

利用围岩失稳的位移判据,提出了一套针对立井破碎基岩段围岩支护等级划分标准;结合现有立井施工支护技术,形成以不同支护等级为依据的立井破碎基岩段围岩稳定控制技术.

1 破碎围岩强度等级划分标准

工程围岩或岩体的强度分级方法较多^[10-11],但是没有专门针对破碎基岩段围岩强度等级的划分标准.为了恰当地评价井壁围岩在所处应力环境条件下支护的难易程度,更加准确地指导井筒过破碎段的现场施工,有必要开展立井破碎基岩段围岩强度等级再划分标准研究.

一般而言,每个立井井筒施工前矿井地质报告已经完成,它应该含有每个分层的岩石物理力学性质、RQD值、岩石软化系数等指标.在对立井破碎基岩段进行围岩分级时,为了提高分级的准确性和可靠性,采取2步进行的方法.首先按照岩体基本质量指标对井筒围岩进行分级^[12-13],然后针对质量较差的III、IV、V级,综合考虑岩体基本质量指标、RQD值、岩石软化系数等,对破碎基岩段进行围岩强度等级再划分,将其划分为S1~S5级,如表1所示,其定性特征如表2.

表1 破碎段围岩强度等级再划分标准

基本质量指标 BQ	软化系数	RQD 值/%					
		60~70	50~60	40~50	30~40	20~30	<20
450~351	$\delta > 0.75$	S1	S1	S2	-	-	-
	$\delta < 0.75$	S2	S2	S3	S3	-	-
350~251	$\delta > 0.75$	S2	S3	S3	S3	S4	S4
	$\delta < 0.75$	-	S4	S4	S4	S5	S5
≤ 250	$\delta > 0.75$	-	-	S4	S5	S5	S5
	$\delta < 0.75$	-	-	-	S5	S5	S5

表2 破碎段围岩强度等级定性特征表

基本质量级别	岩体基本质量的定性特征
S1	坚硬岩,岩体较破碎;较坚硬岩或软硬岩互层,岩体较完整;较软岩,岩体完整
S2	较坚硬岩,岩体较破碎
S3	软硬岩互层,岩体较完整~较破碎;软岩,岩体较完整;较坚硬岩,岩体较破碎~破碎
S4	较软岩,岩体破碎;软岩,岩体较破碎~破碎
S5	各类极破碎围岩;破碎极软岩

2 立井井筒破碎段围岩稳定性判据

对于围岩的失稳判据,到目前为止还没有一个

统一的标准.一般来说主要有3种判据:围岩强度判据、极限应变判据和位移判据.当围岩变形接近其极限变形量时,虽然从理论上来说,此时围岩处

于稳定状态.但由于岩体性质的离散型和不可预测的人为扰动,井筒围岩允许变形值约取极限变形量的 2/3.当围岩变形超过这一数值时,就认为围岩已不稳定,应当采取支护措施.

由于新奥法施工的广泛应用,在围岩稳定性判断中,围岩位移判据在实际工程中是较为常用的一种.位移量与变形区域大小有关,对于本研究,相同应变量条件下,井筒深度越深位移量越大.参照《铁路隧道喷锚构筑法技术规范》(TB10108 - 2002)^[14]和岩石硐室地基稳定性分析方法与实践^[15],确定了立井井筒破碎段围岩允许位移值,如表 3,该位移值的确定综合考虑了井筒埋置深度和破碎段围岩等级(如表 1)2 项因素.

表 3 立井井筒破碎段围岩允许位移值

深度/m	允许位移/mm				
	S1	S2	S3	S4	S5
0 ~ 200	3	10	15	30	40
200 ~ 400	7	20	25	50	70
400 ~ 600	10	25	50	80	120
600 ~ 800	15	40	90	150	250
800 ~ 1 000	20	60	300	500	700

3 井筒围岩稳定性数值分析

数值模拟技术在岩土工程稳定性分析中已得

到广泛的应用,本次数值模拟利用 FLAC^{3D} 软件分析井筒围岩稳定性.理论和实践都表明:模型的准确度和参数的精确度是保证 FLAC^{3D} 软件分析计算结果正确性的基础.

1) 数值模型的建立

为了建模的方便和保证模型的准确度,在深度上每 100 m 建立一个模型,几何模型如图 1 所示,所建模型尺寸为 68 m × 68 m × 100 m.

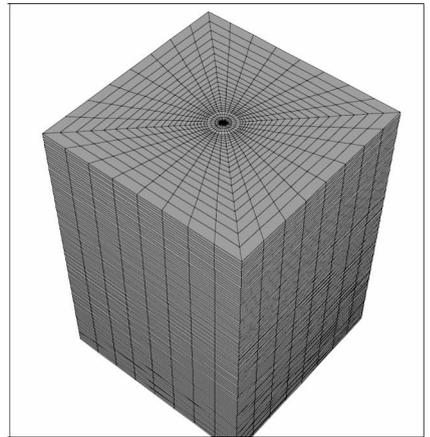


图 1 井筒几何模型图

2) 围岩力学参数的选取

参照《岩石力学参数手册》^[16],确定围岩的物理力学参数如表 4 所示.

表 4 物理力学参数表

围岩强度等级	密度/(kg/m ³)	抗剪断峰值强度		变形模量 E/GPa	泊松比 μ	抗拉强度/MPa
		内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 C/MPa			
S1	2 400	39	1.5	5	0.25	0.30
S2	2 300	37	1.2	4	0.28	0.28
S3	2 200	34	0.8	3	0.30	0.25
S4	2 100	32	0.5	2	0.33	0.22
S5	2 000	29	0.4	1	0.36	0.18

3.1 围岩强度对井筒围岩稳定性影响分析

以开挖直径为 9 m、深度 550 m 的井筒围岩为例,对同一深度、直径但不同围岩强度等级井筒的数值模拟结果进行比较,以分析井筒围岩的最大主应力、最小主应力、塑性区和收敛位移的变化情况.各种情况的井壁围岩应力分布形态比较相似,S4 级围岩开挖后的最大、最小主应力图见图 2、图 3;不同等级围岩随开挖的塑性区分布变化情况见图 4;不同围岩强度等级井壁水平收敛位移变化情况见图 5.

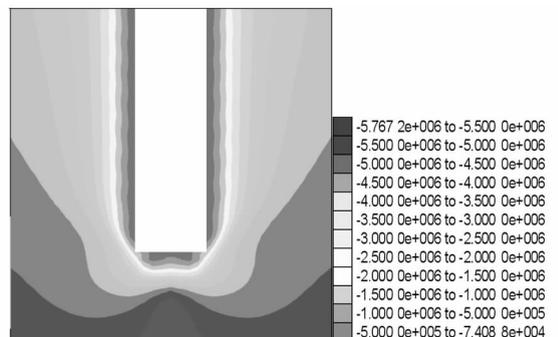


图 2 S4 级围岩所受最大主应力图

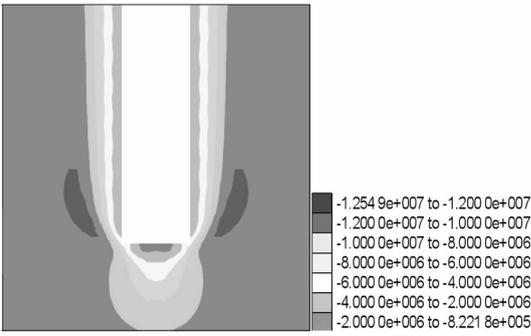


图3 S4级围岩所受最小主应力图

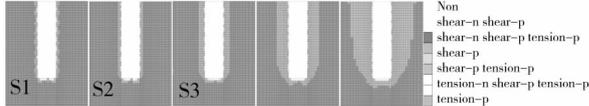


图4 S1,S2,S3,S4,S5级围岩内塑性区分布图

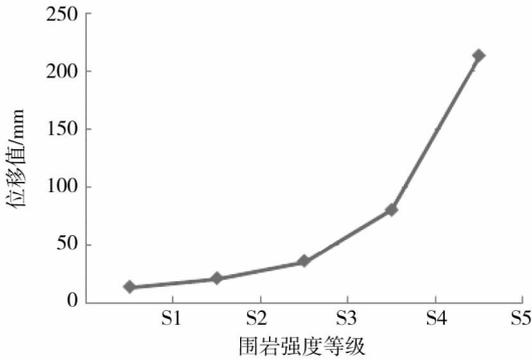


图5 不同围岩强度等级井壁水平收敛位移图

为了分析的方便,将井筒开挖至 550 m 时不同围岩强度等级数值模拟的关键数据提取整理,其结果如表 5.

分析不同围岩强度等级条件下的数值模拟结果,可以得到如下结论:

1)从井筒开挖后围岩的主应力分布图 2、图 3 和不同围岩强度等级数值模拟结果表 5 可以看出:井筒开挖后,井壁和井底围岩处于受压状态,最大主应力和最小主应力的数值随着围岩强度等级的增大而减小,但是变化并不明显.

2)从不同围岩强度等级围岩塑性区分布图 4 和数值模拟结果表 5 可以看出:井筒围岩进入塑性区的厚度随着围岩强度等级的增大而增大,随开挖面推进,已开挖段的变形、破坏会有所增加.

3)由不同围岩强度等级的收敛位移图 5 和数值模拟结果表 5 可知,随着围岩强度等级的增大,井壁水平收敛位移和井底竖向位移快速增大,在井筒底部中心位置位移最大,最大达到 96.6 mm.

3.2 开挖直径对井筒围岩稳定性影响分析

以 S4 级围岩、开挖深度 550 m 的井筒为例,不同开挖直径的围岩稳定性数值模拟结果进行比较,以分析围岩的最大主应力、最小主应力、收敛位移和塑性区的变化情况.结果整理成表 6.

表5 不同围岩强度等级数值模拟结果表

强度等级	最大主应力/MPa		最小主应力/MPa		收敛位移/mm		井壁塑性区厚度/m
	井壁	井底	井壁	井底	井壁水平位移	井底竖向位移	
S1	-5.0	-5.5	-10.0	-10.0	13.40	16.45	2.0
S2	-4.0	-5.0	-9.5	-8.0	20.90	20.10	2.5
S3	-4.0	-4.5	-9.0	-7.0	35.86	27.50	4.0
S4	-3.5	-4.0	-8.0	-6.0	79.95	43.75	7.0
S5	-3.0	-4.0	-7.0	-6.0	213.60	96.60	12.5

表6 不同开挖直径井筒数值模拟结果表

开挖直径/m	最大主应力/MPa		最小主应力/MPa		收敛位移/mm		井壁塑性区厚度/m
	井壁	井底	井壁	井底	井壁水平位移	井底竖向位移	
7	-3.0	-3.0	-7.5	-5.0	37.3	18.9	4.0
8	-3.5	-3.5	-8.0	-6.0	52.7	26.2	5.5
9	-4.0	-4.0	-9.0	-6.5	79.9	43.7	7.0

分析不同开挖直径井筒数值模拟结果(见表 6),可以得出如下结论:

1)井筒开挖后,井壁和井底围岩处于受压状态;最大主应力和最小主应力随着井筒直径的增大而增大,但数值相差不大.

2)随着开挖直径增大,井壁水平收敛位移快速增长,最大达到 79.9 mm,井筒底部中心位置竖向位移最大.

3)随着开挖直径的增大,塑性区的厚度越来越大,当开挖直径 9 m 时围岩塑性区厚度达 7.0

m;继续向下开挖,已开挖段的围岩破坏范围会增大.

3.3 深度对井筒围岩稳定性影响分析

以 S4 级围岩、开挖直径 9 m 的井筒为例,在不同开挖深度时围岩稳定性的数值模拟结果进行比较,以分析围岩的最大主应力、最小主应力、收敛位

移和塑性区的变化情况.结果整理成表 7.

分析不同深度井筒围岩数值模拟结果(见表 7),可以得出如下结论:

1)井筒开挖后,最大主应力随着深度的增大而增大;井壁和井底围岩处于受压状态,压应力的

大小随着深度的增大而增大.

表 7 不同深度围岩数值模拟结果表

围岩深度/m	最大主应力/MPa		最小主应力/MPa		收敛位移/mm		井壁塑性区厚度/m
	井壁	井底	井壁	井底	井壁水平位移	井底竖向位移	
50	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	8.32	2.96	0
250	-1.3	-2.0	-5.0	-3.0	27.90	17.17	3.9
550	-3.5	-4.0	-8.0	-6.0	79.90	43.75	7.0
750	-4.0	-5.0	-10.0	-10.0	132.00	67.71	8.0
950	-5.0	-6.0	-15.0	-12.0	207.00	95.08	9.0

2)随着井筒深度的增大,井壁收敛位移快速增长,最大达到 206.9 mm;随着深度的增大井筒底部位移快速增长,井筒底部中心位置位移最大,最大达到 95.08 mm.

3)深度不大时,井筒围岩没有塑性区或塑性区很小;随着深度的增大,塑性区的厚度越来越大,其中 950 m 处塑性区厚度达到 9.0 m,井筒围岩破坏程度严重.

1)D1 支护等级的临时支护方案

此类支护等级的围岩属于中等稳定类围岩,岩体稍破碎或较破碎,可采用挂圈背板临时支护.现场施工过程中,可使用拆装式背板支护作为临时支护,随永久支护进程而拆卸.

表 8 破碎基岩段围岩支护等级划分标准表

井筒直径/m	深度/m	围岩强度等级				
		S1	S2	S3	S4	S5
7	0~50	D1	D1	D1	D2	D2
	50~250	D1	D1	D2	D3	D4
	250~550	D1	D1	D2	D4	D4
	550~750	D2	D2	D3	D4	D5
	750~950	D2	D3	D4	D5	D5
8	0~50	D1	D1	D1	D2	D3
	50~250	D1	D1	D2	D3	D4
	250~550	D1	D2	D3	D4	D5
	550~750	D2	D3	D4	D4	D5
	750~950	D2	D3	D4	D5	D5
9	0~50	D1	D1	D2	D2	D3
	50~250	D1	D2	D3	D4	D4
	250~550	D2	D2	D3	D4	D5
	550~750	D2	D3	D4	D5	D5
	750~950	D2	D3	D4	D5	D5

4 破碎围岩支护等级及支护措施

4.1 破碎段围岩支护等级划分标准研究

通过模拟结果及分析可知:3种模拟情况的井筒围岩都处于受压状态,且压应力不超过 25 MPa,因此在支护等级划分中可不考虑应力影响;开挖直径、深度和围岩强度等级对井壁收敛位移、塑性区影响较大,依据立井井筒破碎段围岩允许位移值表 3,结合塑性区厚度大小,现整理出基于不同开挖直径、不同深度和不同围岩强度等级的立井破碎基岩段围岩支护等级划分标准,见表 8.

4.2 破碎基岩段围岩支护措施

在现场施工中,根据立井井筒破碎段围岩强度等级划分标准确定围岩强度等级,然后结合井筒开挖直径和深度,按照立井井筒破碎段围岩支护等级划分标准确定围岩支护等级,最后根据支护等级确定相应的支护方案.参照前述数值模拟结果和工程类比^[1-9],结合立井井筒过破碎段临时支护的常用方法,对 D1~D5 支护等级分别制定了相应的临时支护方案.

2)D2 支护等级的临时支护方案

此类支护等级的围岩属于中等稳定~稳定性较差围岩.在施工中,围岩径向变形较小,可以充分考虑其自身承载能力,采用喷射混凝土作为临时支护,以达到封堵围岩、防止落石的效果.喷射混凝土厚度可取 50 mm,C20 标号.

3)D3 支护等级的临时支护方案

此类支护等级的围岩属稳定性较差围岩,自稳

时间较短.施工时宜采取短段掘砌的方法施工,临时支护可采用锚杆+喷射混凝土方式.

喷射混凝土厚度设计为 50 mm,标号为 C20;锚杆支护可采用 $\phi 16$ mm \times 1 800 mm 的麻花式树脂锚杆,配合 150 mm \times 150 mm \times 10 mm 的钢托板,锚杆间排距取 800 mm \times 800 mm.

4) D4 支护等级的临时支护方案

此类支护等级的围岩属于稳定性差的围岩,围岩性质较差,采用短段掘砌作业,在工作面进行锚杆+金属网+喷射混凝土临时支护.

锚杆间距设计为 600 mm \times 600 mm,三花布置,锚杆规格为 $\phi 20$ mm \times 2 000 mm 金属锚杆,托板采用 150 mm \times 150 mm \times 10 mm 的钢托板,挂菱形钢筋网,喷射混凝土厚度为 100 mm,强度为 C20.

当围岩涌水较大时,应按 D5 支护等级处理.

5) D5 支护等级的临时支护方案

此类支护等级的围岩为极破碎岩层或极软破碎岩层,围岩几乎无自稳能力,因此,在井筒掘砌接近此类岩层时,必须进行工作面预注浆.同时,边开挖边支护,采用锚杆+金属网+喷射混凝土临时支护方案.

临时支护锚杆采用 $\phi 18$ mm \times 1 800 mm 的麻花式树脂锚杆,钢托板型号为 200 mm \times 200 mm \times 10 mm,间排距 600 mm \times 600 mm,三花布置;金属网型号为 $\phi 6$ mm,100 mm \times 100 mm 的钢筋网,搭接长度 20 mm;考虑围岩性质,喷射混凝土厚度可视具体岩体条件稍作改变,一般为 100 mm,标号为 C20.

5 工程实例

现以阳煤集团景福煤矿副立井过破碎段施工过程为工程背景,验证立井破碎基岩段围岩强度及支护等级划分标准的科学性、合理性、有效性.

5.1 工程背景

景福煤矿副立井井筒的开挖直径为 8.3 m,深度 486 m.根据工程地质资料,立井施工共穿过 7 层特别破碎的岩层,工程地质条件较差,表 9 列述了井筒通过的主要破碎岩层.

5.2 景福煤矿破碎基岩段围岩强度等级确定

根据景福煤矿工程地质资料和岩体物理力学性质,对照表 1 中的 BQ 值、RQD 值和软化系数,确定了景福煤矿破碎段围岩强度等级,如表 10.

表 9 景福煤矿副立井主要破碎岩层表

破碎岩层	底板深度/m	岩层厚度/m	岩石名称	岩性描述
P1	62.10	7.92	浅绿泥岩	弱风化裂隙发育
P2	107.10	3.57	灰色中砂岩	局部破碎状
P3	120.70	2.08	灰色中砂岩	底部岩体破碎
P4	179.50	6.63	灰白色粗砂岩	破碎状
P5	259.10	13.16	灰白含砾粗砂岩	顶部岩体破碎状
P6	292.60	4.51	黑色砂质泥岩	局部破碎状
P7	460.40	23.01	黑色砂质泥岩	大部破碎状

表 10 景福煤矿副立井主要破碎岩层围岩强度等级表

破碎岩层编号	岩石名称	BQ 值	RQD 值	软化系数	围岩等级
P1	浅绿泥岩	380	55	<0.75	S2
P2	灰色中砂岩	430	42	<0.75	S3
P3	灰色中砂岩	320	43	>0.75	S3
P4	灰白色粗砂岩	290	38	<0.75	S4
P5	灰白含砾粗砂岩	270	28	<0.75	S5
P6	黑色砂质泥岩	330	45	>0.75	S3
P7	黑色砂质泥岩	265	41	<0.75	S4

5.3 景福煤矿破碎段支护等级确定

根据景福煤矿副立井井筒围岩强度等级、开挖直径和破碎岩层深度,结合立井井筒破碎段围岩支护等级划分标准(见表 8),确定了景福煤矿副立井井筒破碎段的支护等级,如表 11.

表 11 景福煤矿副立井主要破碎岩层围岩支护等级表

破碎岩层	岩石名称	底板深度/m	围岩等级	开挖直径/m	支护等级
P1	浅绿泥岩	62.10	S2	8.3	D1
P2	灰色中砂岩	107.1	S3	8.3	D2
P3	灰色中砂岩	120.7	S3	8.3	D2
P4	灰白色粗砂岩	179.5	S4	8.3	D3
P5	灰白含砾粗砂岩	259.1	S4	8.3	D5
P6	黑色砂质泥岩	292.6	S2	8.3	D3
P7	黑色砂质泥岩	460.4	S4	8.3	D4

5.4 景福煤矿破碎段支护效果

根据立井破碎基岩段围岩强度分级标准,确定了景福煤矿副立井围岩的强度等级,依据井筒开挖直径、深度和围岩强度等级,确定了井筒施工过程的支护等级.在景福煤矿副立井的掘进施工中,有效控制了破碎围岩的变形破坏,避免了井筒围岩发生坍塌、片帮、涌水等事故,保证了施工安全.

6 结论

利用理论分析、数值模拟、现场试验等方法,对

立井破碎基岩段围岩强度及支护等级划分标准的研究,得到如下结论:

1)结合现有的围岩强度等级划分标准及划分办法,通过分析对破碎围岩稳定性有较大影响的因素,首次提出了针对立井破碎基岩段围岩强度的等级划分标准.

2)利用数值模拟,研究了不同围岩强度等级、不同开挖直径和不同深度对井壁收敛位移和围岩破坏程度的影响,结合立井井筒破碎段围岩稳定性判据,提出了相应的立井井筒破碎段围岩支护等级划分标准.

3)创新性的提出了根据不同的支护等级采取不同临时支护方案,为其它类似地质条件下通过不良地层的施工提供了很好的借鉴价值.

4)以阳煤集团景福煤矿副立井为工程背景,验证了立井破碎基岩段围岩强度、支护等级划分标准和围岩稳定性控制技术的科学性、合理性、有效性.

参考文献:

- [1] 冯向东. 立井穿过断层破碎带预注浆[J]. 煤炭科学技术, 1997, 5(5): 41 - 42.
- [2] 李廷义, 李渊毅. 立井井筒工作面预注浆封水施工技术与安全措施[J]. 中国科技信息, 2010, 23: 70 - 72.
- [3] 全洪昌. 立井井筒突水淹井事故的快速处理[J]. 建井技术, 2008(1): 3 - 5.
- [4] 王志骅, 汤友谊. 立井井筒工作面预注浆堵水技术的研究与应用[J]. 煤炭技术, 2009, 28(3): 116 - 118.
- [5] 杨祖根. 青岛胶州湾海底隧道断层破碎带安全快速施工技术[J]. 隧道建设, 2009, 29: 97 - 99.
- [6] 张霄, 李术才, 张庆松, 等. 矿井高压裂隙涌水综合治理方法的现场试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1314 - 1318.
- [7] 张顶立, 李治国. 高压富水区隧道帷幕注浆止浆系统分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1151 - 1154.
- [8] 任智富, 檀远远, 杨兴全. 杨柳煤矿立井井筒过基岩断层破碎带技术研究[J]. 能源技术与管理, 2010(3): 59 - 60.
- [9] 刘兵晨. 姚家山矿千米立井井壁稳定性及支护技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [10] 原国红, 陈剑平, 马琳. 可拓评判方法在岩体质量分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1539 - 1544.
- [11] 连建发, 慎乃齐, 张杰坤. 基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1450 - 1453.
- [12] 柳赋铮. 岩体基本质量和工程岩体分级[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(4): 55 - 63.
- [13] 林韵梅. 岩体基本质量定量分级标准 BQ 公式的研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 481 - 485.
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. 铁路隧道喷锚构筑法技术规则(TB10108 - 2002)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [15] 张永兴, 王桂林, 胡居义. 岩石硐室地基稳定性分析方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [16] 水利水电科学研究院, 水利水电规划设计总院, 水利水电情报研究所, 水利电力岩石力学与工程情报网. 岩石力学参数手册[S]. 北京: 水利电力出版社, 1991.