

沿空留巷巷旁控制技术及其适用条件分析

曹树刚¹ 陈先哲¹ 杨红运¹ 王 帅¹ 邹德均²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室 重庆 400044; 2. 重庆工程职业技术学院 重庆 402260)

摘 要: 为了研究目前我国沿空留巷巷旁控制技术及其适用条件, 笔者对 150 个沿空留巷巷道典型案例进行了分析, 结果表明: 目前主要应用的巷旁控制技术有高水材料充填、混凝土材料充填、膏体材料充填、块体类充填、矸石类充填、冒落矸石自然充填、切顶成旁支护技术等, 其中高水材料充填、混凝土材料充填使用率最高; 各巷旁控制技术的应用范围在煤层埋深、倾角、煤厚等 3 个地质条件上差别较大, 在直接顶岩性和直接顶厚度上的差别较小。另外发现, 高水材料充填、混凝土材料充填、膏体材料充填适用于深部及厚煤层条件, 冒落矸石自然充填适用于大倾角、急倾斜条件。

关键词: 沿空留巷; 巷旁控制技术; 煤层条件; 适用条件

中图分类号: TD823.48 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)04-0027-07

Analysis on roadside control technology of gob-side entry retaining and applicable conditions

Cao Shugang¹, Chen Xianzhe¹, Yang Hongyun¹, Wang Shuai¹, Zou Dejun²

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China)

Abstract: In order to study the roadside control technology of the gob-side entry retaining and the applicable conditions in China, an analysis was conducted on the typical cases of 150 gob-side entry retaining. The result showed that the present applied roadside control technology could be divided to a high water material backfill, concrete backfill, paste backfill, lump material backfill, coal refuse backfill, falling waste rock natural backfill, roof cutting backfill and other types and among them, the high water material backfill and concrete backfill had the highest utilization rate. The application scope of each gateway roadside control technology would have big difference in three coal conditions of the seam depth, inclination and thickness and would have less difference in the immediate roof lithology and thickness. Also the practices found that the high water material backfill, concrete backfill and paste backfill could be applied under the deep mine and thick seam conditions and the falling rock waste natural backfill could be applied under the high inclination and steep inclination conditions.

Key words: gob-side entry retaining; roadside control technology; seam condition; applicable conditions

0 引 言

沿空留巷能够实现无煤柱开采, 缓解采掘接替关系, 有效降低开采成本, 是适应我国当前煤矿发展的开采技术, 满足绿色开采、科学开采要求, 是我国煤矿技术发展的重要方向之一^[1]。多年来, 我国学者围绕沿空留巷做了大量研究工作, 文献[2-3]分

析了沿空留巷围岩活动规律, 并分别提出了沿空留巷的支护原则; 文献[4-6]分析了沿空留巷顶板破坏规律, 不同支护方法对顶板运动的影响以及充填体参数的确定方法; 文献[7-8]建立了膏体充填力学模型, 提出沿空留巷支护参数的确定方法, 并在实际应用中取得了良好的留巷效果; 文献[9]对薄煤层群沿空留巷开采顺序进行了研究, 提出上行式开

收稿日期: 2016-02-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.04.006

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474039, 51404046); 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主课题资助项目(2011DA105287-ZD201302); 重庆市煤矿安全生产科技资助项目(渝煤 2015-kj-13)

作者简介: 曹树刚(1955—), 男, 重庆人, 教授, 博士, 博士生导师。E-mail: caosg@cqu.edu.cn

引用格式: 曹树刚, 陈先哲, 杨红运, 等. 沿空留巷巷旁控制技术及其适用条件分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 27-33.

Cao Shugang, Chen Xianzhe, Yang Hongyun et al. Analysis on roadside control technology of gob-side entry retaining and applicable conditions [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 27-33.

采有利于沿空巷道围岩及充填体保持稳定。淮南朱集东矿 1112-1 工作面在 960 m 采深条件下留巷成功;李子垭南煤矿 5225 工作面在平均 67° 倾角条件下留巷成功;九里山矿 24021 工作面在平均煤厚 6.4 m 条件下留巷成功^[10-12]。

截至目前,我国针对沿空留巷进行了大量的工业试验,但是针对这些工业试验的总结和分析却不多。笔者认为,总结当前主要巷旁控制技术种类和分析沿空留巷地质影响条件,对沿空留巷的进一步推广具有重要意义。基于此,笔者通过调研和收集应用成功的沿空留巷案例,总结了较常用的沿空留巷巷旁控制技术,并对煤层埋深、煤层厚度、煤层倾角、直接顶岩性、直接顶厚度影响系数等 5 个煤层地质条件进行分析,研究沿空留巷的应用分布状况,对比分析各巷旁控制技术应用差异,并对一些极端条件下的沿空留巷巷旁控制技术的选用提出建议。

1 沿空留巷巷旁控制技术

无煤柱开采技术分沿空留巷技术和沿空掘巷技术。根据巷旁控制方式的不同,沿空留巷又分为构筑充填墙成巷和其他方式切顶成巷,如图 1 所示。构筑充填墙成巷是在留巷巷道靠采空区侧,人工构筑充填墙体支撑顶板并隔离采空区。根据充填墙体使用的材料不同,构筑充填墙体巷旁控制技术又分为胶凝类材料充填、块体类材料充填、矸石类材料充填、冒落矸石自然充填,切顶成巷则是利用一定的技术手段切落巷道上方向在采空区或煤体侧顶板以减轻巷道载荷,同时加强巷道支护,达到留巷的目的,包括巷道采空区侧设置密集支护切顶成巷和超前预裂爆破切顶成巷 2 种。以下主要介绍巷旁控制技术的机理、充填材料及优点。

1) 胶凝类充填。胶凝类充填基本上是将原料加水混合搅拌制成充填料浆,沿管路向巷道采空区侧预先设置好的模板输送浆体,浆体脱去多余的水后形成具有一定强度和整体性的充填体^[13]。根据原料的不同,可将胶凝类充填分为高水、混凝土及膏体充填。①高水材料分为甲料和乙料,每部分单独加水搅拌,24 h 内不会凝结,但 2 种料混合后能迅速凝结,并具有增阻速度快、早期强度大、塑性变形大、工人劳动强度小等优点。我国煤矿使用的高水材料多为 ZKD 型高水材料^[14]。②混凝土材料以水泥为胶凝材料,加入一些惰性材料和改性材料搅拌制成,具有终凝强度高、工人劳动强度低等优点。适合矿

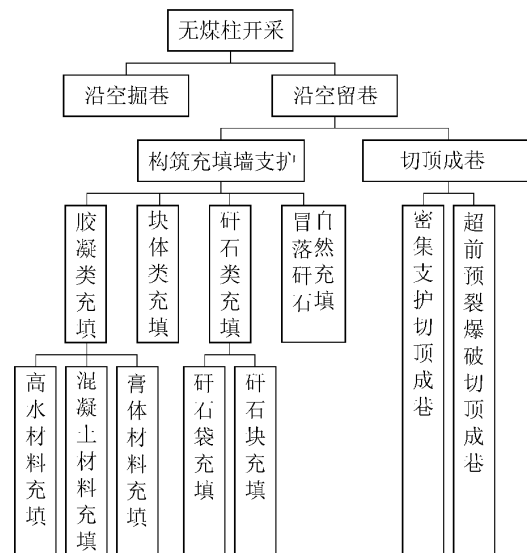


图 1 沿空留巷分类

Fig. 1 Gob-side entry retaining classification

山用胶结料的水泥品种主要包括矿渣硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥等;常用的惰性材料主要为粉煤灰、石子、砂子、矸石、煤粉等;改性材料主要包括减水剂和早强剂。③膏体材料与混凝土材料类似,最终强度也与水泥用量有关,不同的是膏体材料主要为粒径小于 0.25 mm 的细粒级混合料,不含粗骨料。与混凝土材料相比,膏体材料具有更好的可泵性。

2) 块体类充填。块体充填使用的材料包括预制混凝土砌块、烧制的轻砖、毛料石等,其中预制砌块是使用最多的材料。块体充填具有刚度大、切顶效果好、可缩量小等优点。

3) 矸石类充填。矸石类充填利用井下掘进巷道排出的矸石或者采空区矸石构筑充填墙体。矸石类沿空留巷具有稳定性好、成本低、技术要求低等特点。按照充填形式不同,可分为矸石袋或矸石块砌筑充填墙。矸石块充填与块体充填的区别在于块体充填材料是外部运进,而矸石块则是矿井内部产生。

4) 冒落矸石自然充填。当煤层倾角大于矸石的自然安息角,采空区的冒落矸石将向下滚动,在沿空留巷的采空侧设置挡矸设施,挡住滚落下来的矸石,达到支撑顶板、隔绝采空区的目的^[15]。虽然该方法也是使用的矸石进行充填,但是无须人工构筑。所以,这种方法主要应用于倾角较大的煤层中,具有施工简单、成本低等优点,目前成为大倾角、急倾斜煤层沿空留巷技术的发展方向。

5) 切顶成巷。①密集支护切顶成巷依靠密集

支护使巷道上方的顶板在自重及上覆岩层作用下沿采空区边缘自动切落,形成新的巷帮。老式的密集支护主要靠打密集木点柱切落顶板,现在多采用强力锚索、工字钢、单体柱联合支护切落顶板。②超前预裂爆破切顶成巷是近几年开始推广使用的沿空留巷新方法。在工作面推过之前,在巷道靠工作面侧预先布孔爆破,形成定向裂缝;当工作面推过之后,顶板在采场周期来压作用下切落,沿裂缝切落的顶板岩石形成新的巷帮,支撑上覆岩层,隔绝采空区,从而达到保留巷道的目的^[16]。该方法操作简单,省去了充填墙的砌筑,适用于顶板坚硬的巷道。

通过前期收集与整理,提取出 150 条沿空留巷成功的典型案例,将其分类见表 1。

表 1 巷旁控制技术应用统计

Table 1 Gob-side support technology applied statistics

项目	高水	混凝土	膏体	块体	矸石类	冒落矸石	切顶类
数量/条	34	37	12	20	23	9	15

可以发现,高水充填、混凝土充填使用频率超过

20%,为常用巷旁控制技术;块体类充填、矸石类充填使用率超过 10%,为较经常使用技术,其中矸石类充填技术研究为热点;膏体、密集支护、爆破切顶使用率不足 10%,为一般使用率技术。除了以上一些常规的方法外,近期出现了钢管混凝土支护^[17]、气囊充填^[18]等新型巷旁控制技术,这些技术虽然尚未推广使用,但是其在支护强度、施工操作、成本上有很大的优势。

2 巷旁控制技术影响因素分析

2.1 煤层埋深

在收集的信息中,有 78 例涉及到煤层埋深,以 100 m 为一个区间进行统计,各巷旁控制技术与埋深关系统计分布见表 2。在埋深 400500 m 范围内,沿空留巷使用最多,共有 19 例,占总数的 24%,其次为 400600 m 范围,共有 12 例。在 700 m 以上埋深,只有使用胶凝类 3 种充填技术。由表 2 可得,沿空留巷的使用在 400 m 以后范围是随着煤层埋深的增大逐渐减少。

表 2 沿空留巷埋深分布

Table 2 Depth distribution of gob-side entry retaining

巷旁控制技术	不同埋深区间沿空留巷应用案例/例									
	0100 m	100200 m	200300 m	300400 m	400500 m	500600 m	600700 m	700800 m	800900 m	9001 000 m
高水材料充填	0	0	3	7	1	3	2	1	2	0
混凝土材料充填	1	2	2	0	10	2	4	2	2	0
膏体材料充填	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1
块体类充填	0	1	2	0	5	1	0	0	0	0
矸石类充填	0	1	3	0	0	4	2	0	0	0
冒落矸石自然充填	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0
切顶成巷	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0
合计	1	6	11	10	19	12	9	5	4	1

开采进入深部后,沿空留巷将受“三高一扰动”环境影响^[19],沿空留巷施工也较困难。埋深对各巷旁控制技术影响基本是随着埋深的增大而增大,但是影响程度有差异,各巷旁控制技术对埋深的适应性也不相同,由表 2 分析可得,胶凝类 3 种充填技术对埋深影响适应最强,其次是矸石类充填;冒落矸石自然充填、块体类充填、切顶成巷对大埋深条件适应性较弱。

深部开采是我国未来煤炭发展的方向,同样也是沿空留巷的发展方向,目前在已经成功的沿空留巷案例中只有胶凝类充填在深部得以应用^[20]。各巷旁控制技术应用的最大埋深分别是:高水材料充

填 852 m;混凝土材料充填 850 m;膏体材料充填 960 m;块体类充填 520 m;矸石类充填 650 m;冒落矸石自然充填 550 m;切顶成巷 530 m。

2.2 煤层倾角

在收集的信息中,有 129 例涉及到煤层倾角,以 10°为一个区间进行统计,各巷旁控制技术与倾角关系统计分布见表 3。在倾角 0°10°的数量最多,有 67 例,占总数的 51%;在倾角 10°20°范围内有 39 例;在倾角 20°30°范围内有 11 例;30°以上共有 12 例。在 0°30°范围内,除冒落矸石自然充填外,其余方法都有使用;在 30°以上范围,只有少量使用膏体充填、块体充填等技术,冒落矸石自然充填则主要集

中在此区域使用。由表3可得沿空留巷的使用随着煤层倾角的增大逐渐减少。

表3 沿空留巷倾角分布

Table 3 Dip angle distribution of gob-side entry retaining

巷旁控制技术	不同煤层倾角区间留巷应用案例/例						
	0°10°	10°20°	20°30°	30°40°	40°50°	50°60°	60°70°
高水材料充填	17	9	2	0	0	0	0
混凝土材料充填	20	14	2	0	0	0	0
膏体材料充填	4	0	2	1	0	0	0
块体类充填	11	4	1	1	0	0	0
矸石类充填	9	4	2	1	0	0	0
冒落矸石自然充填	0	0	0	4	2	2	1
切顶成巷	6	8	2	0	0	0	0
合计	67	39	11	7	2	2	1

煤层倾角的增大主要影响的是沿空留巷工艺的选择,常规的充填墙的构筑方式并不能适应大倾角的留巷要求,需要辅以相应的防倾倒措施,另外在大倾角施工环境下,还应该设置防窜矸设施,以防人、机受到窜矸的危害。从表3能够明显看出随着倾角的增大,其影响也越大,而沿空留巷也主要是在30°以内的范围应用。

除冒落矸石自然充填外的其他几类巷旁控制技术在30°以内均有较强的适用性,而冒落矸石自然充填^[21]则主要应用30°以上的范围。各巷旁控制技术应用的最大倾角分别是:高水材料充填28°;混凝土材料充填22°;膏体材料充填38°;块体类充填

32°;矸石类充填40°;冒落矸石自然充填67°;切顶类巷旁支护技术26°。

2.3 煤层厚度

在收集的信息中,有142例涉及到煤层厚度,以0.5 m为一个区间进行统计,各巷旁控制技术与煤层厚度关系统计分布见表4。在煤层厚度1.01.5 m范围内使用最多,有39例,占总数的27%,其次为2.03.5 m范围,有25例。在3.5 m以上的煤厚范围内,只有胶凝类3种巷旁支护技术使用。由表4观察可得沿空留巷的使用随着煤层厚度的增大逐渐减少。

一般而言,煤层厚度越大,开采空间也越大,由

表4 沿空留巷煤厚分布

Table 4 Coal thickness distribution of gob-side entry retaining

巷旁控制技术	不同煤厚区间留巷应用案例/例									
	00.5 m	0.51.0 m	1.01.5 m	1.52.0 m	2.02.5 m	2.53.0 m	3.03.5 m	3.54.0 m	4.04.5 m	4.5 m 以上
高水材料充填	0	2	7	5	6	3	3	0	4	1
混凝土材料充填	0	3	8	5	8	6	3	1	2	0
膏体材料充填	0	1	4	1	1	3	0	0	1	0
块体类充填	0	1	6	3	4	4	1	0	0	0
矸石类充填	0	4	8	5	2	0	2	0	0	0
冒落矸石自然充填	0	0	2	3	2	2	0	0	0	0
切顶成巷	0	3	4	2	2	4	0	0	0	0
合计	0	14	39	24	25	22	9	1	7	1

此直接顶及基本顶的垮落空间越大,导致顶板岩层获得平衡时的垮落高度增大,顶板来压强度大,不利于巷道围岩控制。另外,开采高度越大,巷旁支护体高度也越大,将会耗费更多充填材料,增加充填难度,同时,将会减小充填体整体的稳定性。

由表4分析可知,各巷旁控制技术与煤厚的适应性不同,胶凝类对煤厚的适应性最强,能够在厚煤

层条件下使用,其次为块体类和矸石类,冒落矸石自然充填和切顶成巷对煤厚适应性较弱,只在薄煤层、中厚煤层有应用。各巷旁控制技术应用的最大煤层厚度分别是:高水材料充填6.4 m;混凝土材料充填4.4 m;膏体材料充填4.1 m;块体类充填3.5 m;矸石类充填3.5 m;冒落矸石自然充填2.8 m;切顶类巷旁支护技术3.0 m。

2.4 煤层直接顶岩性

在收集的信息中,有 136 例涉及到直接顶岩性,其分布见表 5。从有关文献中发现,煤层直接顶主要有以下 9 类岩石:灰岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩、

粗砂岩、砂质泥岩、泥质砂岩、泥岩、页岩。从表 5 可以看到,粉砂岩数量最多为 35 例,泥岩次之为 26 例,灰岩 23 例,砂质泥岩 19 例,细砂岩 15 例,中砂岩、粗砂岩、泥质砂岩、页岩数量较少。

表 5 沿空留巷直接顶岩性分布

Table 5 Immediate roof lithology distribution of gob-side entry retaining

巷旁控制技术	不同岩性直接顶沿空留巷应用案例/例								
	灰岩	粉砂岩	细砂岩	中砂岩	粗砂岩	砂质泥岩	泥质砂岩	泥岩	页岩
高水材料充填	7	11	3	0	0	4	0	7	1
混凝土材料充填	4	11	4	4	1	4	1	5	0
膏体材料充填	1	2	0	0	0	4	1	1	0
块体类充填	3	4	4	0	1	0	1	2	1
矸石类充填	4	2	3	4	0	4	0	5	0
冒落矸石自然充填	1	3	1	0	1	2	0	1	0
切顶成巷	3	2	0	0	0	1	1	5	1
合计	23	35	15	8	3	19	4	26	3

直接顶抗压强度对沿空留巷影响明显。抗压强度小,则巷内顶板破碎,不利于维护,需要加强巷内支护;抗压强度大,则巷道顶板的垂直位移和垂直应力大,所需要的巷旁切顶阻力也大。灰岩一般是抗压强度较大的岩石,泥岩、页岩一般是抗压强度较小的岩石,而砂岩类抗压强度变化较大,无规律性,大小皆有。

在灰岩和泥岩岩性条件下,各类沿空留巷都有应用的案例,在坚硬顶板和软弱顶板下都能应用,即各类巷旁控制技术在直接顶岩性上的应用差距并不明显。从表 5 可以看出,我国沿空留巷技术具备在各种岩性条件下施工的能力。

2.5 煤层直接顶厚度

直接顶厚度分析用直接顶厚度影响系数来代替,表达式如下:

$$N = M/m$$

其中: M 为直接顶厚度; m 为工作面采高。研究表明^[22],当 $N > 4$ 时,直接顶垮落后能及时充满采空区,支撑上覆岩层,减少巷旁支护的承载力,有利于充填体的稳定;当 $N < 4$ 时,直接顶的垮落不足以充满采空区,导致其上覆岩层的破断,直至顶板达到稳定状态。

在收集的信息中,有 120 例涉及到直接顶影响系数,以 0.5 为一区间,其分布见表 6。

表 6 沿空留巷直接顶厚度影响系数分布

Table 6 Immediate roof thickness impact coefficient distribution of gob-side entry retaining

巷旁控制技术	不同直接顶厚度影响系数沿空留巷应用案例/例								
	00.5	0.51.0	1.01.5	1.52.0	2.02.5	2.53.0	3.03.5	3.54.0	4.0 以上
高水材料充填	5	6	5	5	1	2	1	2	4
混凝土材料充填	8	6	1	1	6	1	2	1	3
膏体材料充填	1	2	1	1	0	1	1	0	1
块体类充填	3	2	0	0	2	1	1	0	3
矸石类充填	2	1	4	4	2	1	1	2	5
冒落矸石自然充填	1	0	3	3	0	0	1	2	0
切顶成巷	2	1	1	1	0	1	0	1	1
合计	22	18	15	15	11	7	7	8	17

由表 6 可知,直接顶厚度影响系数 0.51.0,留巷使用最多,有 22 例,占总量的 18%;其次为 1.0-1.5,有 18 例。随着系数的增大留巷数量呈现减小趋势。

在 $N < 4$ 的情况下,巷道及巷旁充填体变形量较大,难以维护沿空留巷巷道的稳定性,需采取特殊支护措施,增加了开采成本。直接顶厚度影响系数小于 4 的占总数的 85.6%,这说明大多数留巷巷道直

接顶较薄,工作面在回采之后采空区垮落矸石无法接顶,需要切落顶板降低巷道支撑压力。同时也说明我国现有的沿空留巷技术能够很好的适应薄直接顶的煤层,达到切顶并支撑顶板的效果。

分析表6可以发现,各巷旁控制技术在直接顶厚度适应性上的差异性较小,且均存在直接顶较薄的情况下应用情况。各巷旁控制技术应用的最小直接顶厚度影响系数分别是:高水充填0.428;混凝土充填0.375;膏体充填0.468;块体充填0.312;矸石类充填0.432;冒落矸石自然充填0.848;切顶成巷0.500。

3 结 论

1) 统计数据显示当前我国沿空留巷主要巷旁控制技术中,高水充填与混凝土充填使用率较高;砌块充填与矸石类充填次之;膏体、密集支护与爆破切顶技术应用最少。

2) 随着埋深的增大,沿空留巷使用逐渐减少;胶凝类3种充填技术在浅部、深部均有应用,而其他技术在深部应用较少。因此建议深部沿空留巷采用胶凝类材料充填。

3) 随着倾角的增大,沿空留巷使用量逐渐减少;大倾角、急倾斜煤层以冒落矸石自然充填技术为主;倾角小于30°煤层采用其他技术充填。建议在大倾角、急倾斜条件下采用冒落矸石自然充填。

4) 胶凝类材料充填在不同厚度煤层均有应用,其余充填技术主要运用于薄及中厚煤层。建议厚煤层条件下采用胶凝类充填技术。

5) 直接顶岩性和厚度影响系数对各巷旁控制技术影响较小。

参考文献(References):

- [1] 陈勇,柏建彪,朱涛垒,等.沿空留巷巷旁支护体作用机制及工程应用[J].岩土力学,2012,33(5):1427-1432.
Chen Yong, Bai Jianbiao, Zhu Taolei, et al. Mechanism of roadside support in gob-side entry retaining and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1427-1432.
- [2] 康红普,牛多龙,张镇,等.深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):1977-1987.
Kang Hongpu, Niu Duolong, Zhang Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [3] 李春杰,刘银先,乔卿付,等.综放沿空留巷采空区侧向围岩移动数值模拟研究[J].中州煤炭,2015(3):48-50.
Li Chunjie, Liu Yinxian, Qiao Qingfu, et al. Study on numerical simulation on movement of lateral surrounding rock mass of gob-side entry retaining in fully-mechanized caving face [J]. Zhongzhou Coal, 2015(3): 48-50.
- [4] 阚甲广,张农,李宝玉,等.典型留巷顶板条件下巷旁充填体支护阻力分析[J].岩土力学,2011,32(9):2778-2784.
Kan Jiaguang, Zhang Nong, Li Baoyu, et al. Analysis of supporting resistance of backfilling wall for gob-side entry retaining under typical roof conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2778-2784.
- [5] 李迎富,华心祝.沿空留巷上覆岩层关键块稳定性力学分析及巷旁充填体宽度确定[J].岩土力学,2012,33(4):1134-1140.
Li Yingfu, Hua Xinzhu. Mechanical analysis of stability of key blocks of overlying strata for gob-side entry retaining and calculating width of roadside backfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1134-1140.
- [6] 张吉雄,姜海强,缪协兴,等.密实充填采煤沿空留巷巷旁支护体合理宽度研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(2):159-164.
Zhang Jixiong, Jiang Haiqiang, Miao Xiexing, et al. The rational width of the support body of gob-side entry in fully mechanized backfill mining [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(2): 159-164.
- [7] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):59-62.
Bai Jianbiao, Zhou Huaqiang, Hou Chaojiong, et al. Development of support technology beside roadway in gob-side entry retaining for next sublevel [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(2): 59-62.
- [8] 唐建新,胡海,涂兴东,等.普通混凝土巷旁充填沿空留巷试验[J].煤炭学报,2010,35(9):1425-1429.
Tang Jianxin, Hu Hai, Tu Xingdong, et al. Experimental on roadside packing gob-side entry retaining for ordinary concrete [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1425-1429.
- [9] 曹树刚,邹德均,白燕杰,等.“三软”薄煤层群沿空留巷区段上行式开采研究[J].采矿与安全工程学报,2012,35(3):322-327.
Cao Shugang, Zou Dejun, Bai Yanjie, et al. Study on upward mining of sublevels for gob-side entry retaining in three-soft thin coal seam group [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 35(3): 322-327.
- [10] 张农,陈红,陈瑶.千米深井高地压软岩巷道沿空留巷工程案例[J].煤炭学报,2015,40(3):494-501.
Zhang Nong, Chen Hong, Chen Yao. An engineering case of gob-side entry retaining in one kilometer-depth soft rock roadway with high ground pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 494-501.
- [11] 符明华,李正军,秦云文.急倾斜松软突出煤层沿空留巷效果分析[J].水力采煤与管道运输,2011(3):83-85.
Fu Minghua, Li Zhengjun, Qin Yunwen. Effectiveness analysis on gob-side entry retaining in steeply inclined and soft condition

- [J]. Journal of Hydraulic Mining and Pipeline Transport, 2011 (3): 83-85.
- [12] 陈勇, 柏建彪, 朱涛垒, 等. 沿空留巷巷旁支护体作用机制及工程应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1427-1432.
Chen Yong, Bai Jianbiao, Zhu Taolei, et al. Mechanisms of road-side support in gob-side entry retaining and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1427-1432.
- [13] 孙恒虎, 黄玉诚, 杨宝贵. 当代胶结充填技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [14] 张贻广, 赵祉军. 高水速凝材料在薄煤层沿空留巷中应用[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(6): 6-10, 61.
Zhang Yiguang, Zhao Zhijun. The application of high water rapid hardened material in thin seam gob-side entry retaining[J]. Journal of Coal Science and Technology, 1997, 25(6): 6-10, 61.
- [15] 孙乐乐. 大倾角中厚煤层软弱顶底板沿空留巷[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [16] 张国锋, 何满潮, 俞学平, 等. 白皎矿保护层沿空切顶成巷无煤柱开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 511-516.
Zhang Guofeng, He Manchao, Yu Xueping, et al. Research on the technique of no-pillar mining with gob-side entry formed by advanced roof caving in the protective seam in Baijiao Coal Mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(4): 511-516.
- [17] 黄万朋, 高延法, 文志杰, 等. 钢管混凝土支柱巷旁支护沿空留巷技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 604-611.
Huang Wanpeng, Gao Yanfa, Wen Zhijie, et al. Technology of gob-side entry retaining using concrete-filled steel tubular column as roadside supporting[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(4): 604-611.
- [18] 彭小亚, 许家林, 张超, 等. 煤矿沿空留巷巷旁气体充填方法: 中国, CN102155262A[P]. 2011-08-17.
- [19] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
Xie Heping, Zhou Hongwei, Xue Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535-542.
- [20] 陈鹏飞. 深井三软煤层复合顶板下的沿空留巷[J]. 中州煤炭, 2016(1): 65-67, 70.
Chen Pengfei. Gob-side entry retaining of deep mine shaft under compound roof and three soft coal seam[J]. Zhongzhou Coal, 2016(1): 65-67, 70.
- [21] Yang Hongyun, Cao Shugang, Li Yong, et al. Soft roof failure mechanism and supporting method for gob-side entry retaining[J]. Minerals, 2015, 5(4): 707-722.
- [22] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 123-125.