

沿空留巷巷旁墙体稳定性多因素影响分析

张源源, 季明, 韩昌良, 张鹏冲

(中国矿业大学矿业工程学院, 江苏徐州 221008)

摘要: 沿空留巷在形成过程中需要经受掘进和两次回采的扰动, 维护难度远非常规回采巷道所能比。巷旁墙体稳定性作为沿空留巷能否成功的关键因素, 开展巷旁墙体稳定性影响因素的分析与研究, 可为推广沿空留巷技术提供重要依据。通过总结近些年研究所取得的成果, 结合数值模拟和现场实践经验, 重点分析了充填材料力学性能、墙体几何参数、顶板岩层结构、回采速度等因素对巷旁墙体稳定的影响机理及效果, 得出高水速凝材料和膏体材料充填墙体具有很好的承载特性、不同地质条件下墙体宽度最优值不同以及施工质量等对巷旁墙体稳定性会产生很大影响等结论, 研究结果对于沿空留巷的工业性试验具有一定的借鉴意义。

关键词: 沿空留巷; 巷旁墙体; 高水速凝材料; 数值模拟; 合理宽度

中图分类号: TD353

Influence factors on stability of roadside wall of gob-side entry retaining

ZHANG Yuanyuan, JI Ming, HAN Changliang, ZHANG Pengchong

(School of Mining and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008)

Abstract: The gob-side entry retaining roadway need to suffer the disturbance effect of excavation and two minings, so its difficulty in maintaining is far from conventional roadway. Stability of roadside wall is the key factor to impact the gob-side entry retaining success, developing the analysis and research of influencing factors in stability of roadside wall could provide important basis to extend the gob-side entry retaining technology. According to the summary of research results in recent years, combining with numerical modeling and practical experience, we emphasizedly analysed the influencing factors of roadside wall's stability, such as the filling material's mechanical properties, the filling wall's geometric parameter, the roof's rock structure, the stoping speed and so on, we can draw the conclusions that the high-water rapid hardening materials and the paste filling material have good load-supporting properties, the optimal value of the filling wall's width is different in different conditions and the construction quality and so on have a great influence on the roadside wall's stability, the results have some reference meanings in industrial test of gob-side entry retaining.

Key words: gob-side entry retaining; roadside wall; high-water rapid hardening materials; numerical modeling; rational width

0 引言

沿空留巷是在上区段工作面采过后, 通过加强支护或采用其它有效方法, 将上区段工作面的一条顺槽保留下来, 供下区段工作面回采时作为一条顺槽使用^[1]。沿空留巷对降低回采巷道掘进率、减少综采工作面搬家时间、实现工作面正常接替、提高采区回采率、增加煤炭开采的经济效益和社会效益具有重要意义, 是煤矿开采技术的一项重大改革。

基金项目: 中国矿业大学校基金资助项目 (2011QNA12)

作者简介: 张源源 (1986—), 男, 河南省平顶山市郏县人, 中国矿业大学矿业工程学院 2010 届硕士研究生, 研究方向为巷道围岩控制理论与技术

通信联系人: 季明 (1982—), 男, 江苏盐城人, 博士, 中国矿业大学矿业工程学院讲师, 研究方向: 岩石力学与巷道围岩控制. E-mail: jim1117@126.com

沿空留巷技术实施的成功与否取决于巷内支护与巷旁支护联合作用的结果,其中巷旁支护是沿空留巷支护技术的关键之一。传统的巷旁支护如木垛、矸石带、密集支柱和混凝土砌块,它们普遍存在增阻速度慢、支承能力小、密闭性能差、机械化强度低、劳动强度大等缺点^[2]。巷旁充填带支护技术是近年来发展起来的一种新型巷旁支护技术,国内外沿空留巷实践表明,整体浇注的巷旁充填材料能克服传统巷旁支护的根本缺陷,显示出了其技术经济的优越性。但是巷旁支护问题作为沿空留巷的一个难点,巷旁充填墙体稳定性的控制在我国却一直没有得到很好地解决。

为了更好地提高巷旁墙体稳定性,指导沿空留巷工作的开展,本文从墙体的本身特性以及巷道顶板结构等因素入手,通过理论分析、结合现场实际情况进行数值模拟等手段探讨巷旁充填墙体稳定性的多种影响因素,这对促进我国无煤柱开采的进一步发展具有一定的指导意义和实践价值。下面本文依次从巷旁充填墙体材料、墙体宽度、直接顶结构以及其它影响因素一一入手探讨其对巷旁充填墙体稳定性的影响。

1 巷旁充填体作用机理

巷旁充填随回采工作面的推进间断逐段实施进行,和巷内支护共同作用,保证回采后所留巷道不随工作面后方顶板垮落而失稳破坏,并保证在下个工作面回采前能正常使用,沿空留巷围岩结构模型如图1所示,用巷旁充填墙体维护沿空巷道,其作用机理如下^[3]:

(1) 巷旁充填体应具有早期强度高,增阻速度快的力学特性,紧随工作面构筑,及时支护直接顶,控制巷道围岩的变形,与巷内支护共同作用,确保巷道内直接顶不破碎、避免与上部老顶离层,并切断采空区旁的直接顶,减小巷旁充填体所承受的载荷。

(2) 回采面的推进,必然引起老顶破断、失稳、剧烈沉降,此时巷旁充填体的支护阻力应达到切顶阻力,当老顶岩层中的弯矩在巷旁充填体边缘附近达到极限值时切断老顶。垮落的矸石由于破碎后体积增大,当充填满采空区时,更上位岩层在矸石及煤体的支撑作用下取得运动的平衡,巷道围岩变形趋于缓和并稳定下来。

(3) 巷道围岩运动稳定后,巷旁充填体具有的支护阻力为后期支护阻力,其大小应能够维持巷道上部已切断岩层的平衡,同时将巷道顶板下沉量控制在设计范围内。一般后期支护阻力小于切顶阻力。

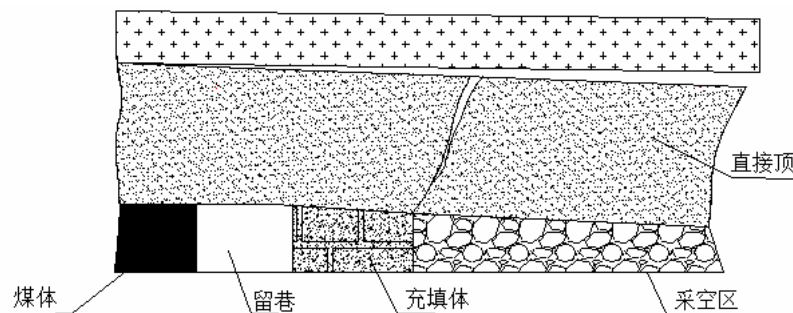


图1 沿空留巷围岩结构模型

Fig. 1 Surrounding structural model of the gob-side entry retaining

2 各个因素对巷旁充填墙体稳定性的影响

2.1 墙体材料的影响

巷旁充填墙体的稳定性与墙体的强度有着紧密的联系^[4],沿空留巷要经受两次回采强采

动的影响,因此对于巷旁充填墙体强度,最基本的要求就是强度要足够大,能够承受留巷两次回采产生的支撑压力。另外,还要求充填墙体初凝较快、增阻速度快、具有适度的可缩量,这与充填材料本身的材料组成类别以及配比有着紧密的联系。下面我们从充填材料入手来研究其对巷旁充填墙体稳定性的影响。

(1) 普通混凝土材料

泵送普通混凝土进行巷旁充填,由于混凝土材料本身为脆性材料,抗变形能力较差,只要超过混凝土的抗压极限就会发生脆性破坏,并且其初凝时间较长、初期强度低等这些缺点,影响了巷旁充填墙体的稳定性,严重阻碍了普通混凝土巷旁充填的推广^[5]。但由于混凝土本身特性决定了其具有抗压强度高、终凝强度高、具有良好的耐久性、劳动强度小、成本低和充分利用矸石以减少矸石排放等优点,所以经常用于现场实践。试验表明,采用普通混凝土巷旁充填结合巷内锚、网、索联合支护,巷旁充填体侧采用单体液压支柱临时支护以及采空区侧用锚索加强支护的护巷方式,能够在一定程度上弥补普通混凝土初凝时间长、初期强度低的缺点。

(2) 高水材料

高水材料是一种新型的特种混合料,特别适合于高水灰比下应用,具有用水量大(水体积比可达 90%以上)、固体料用量少、具有速凝强度高、韧性好等特点,是一种理想的煤矿井下巷旁充填材料。中国矿业大学从 1984 年开始研究用于整体浇注巷旁充填的高水速凝材料和巷旁充填技术,研制成功了以特制硫铝酸盐水泥熟料为基材的 ZKD 高水速凝材料,它是由甲料和乙料两部分组成,统称为胶结料,通常按重量比 1:1 配合使用。甲料以特制硫铝酸盐水泥熟料为基材与少量悬浮剂、超缓凝剂混和粉磨而成。乙料由石灰、石膏、少量悬浮剂和速凝强剂等多种原料配制混磨而成。ZKD 高水速凝材料是一种新型固体混合材料,它与水泥有某些相似之处,但又具有用水量大、速凝早强、良好的力学性能等特征^[6]。当加压至极限载荷,试件不发生脆性破坏、塑性变形量较大、残余强度高,有突出的塑性特征。

通过新汶矿务局翟镇煤矿现场工业性实验表明其具有良好的塑性性能和极限载荷后强度再发展性能,能适应巷道围岩的变形。并且由于增阻速度快、支护阻力高,充填墙体具有很好的稳定性,因而是一种理想的巷旁充填材料。

(3) 膏体材料

国内膏体材料巷旁支护一般是由胶结料与矸石加水搅拌混合均匀形成膏体状充填材料,经膏体充填泵泵送、钢管输送到回采工作面后方由模板构筑的充填空间内凝结而成^[7]。以矸石为集料的膏体材料在保留高水速凝材料力学特性的基础上显著降低巷旁支护成本,并能利用大量矸石,其中矸石占固体材料总重的 85%以上。膏体材料巷旁墙体初期强度高、增阻速度快,并且具有一定的可缩性。巷旁支护的塑性变形特征显著,在载荷达到峰值强度后,并不立即破坏、丧失承载能力,只是随着变形增大,承载能力缓慢下降,下降速度远小于一般的脆性材料。该特性表示在沿空留巷剧烈变形过程中,巷旁墙体能适当压缩变形、卸载,仍保持较大的支撑力,有效维护巷道,保持巷道稳定性。

淮南矿业集团研制了自主知识产权的膏体材料^[8],其主要成分是硅酸盐水泥、砂、粉煤灰及膏体混凝土外加添加剂等,其特点是初凝快,强度高,并具有适度的可缩性。在成功实验这种材料进行沿空留巷以后,山西晋煤和山西焦煤引进淮南矿业集团试验成功的膏体材料实施巷旁充填沿空留巷技术,并且都取得了很好的效果。

2.2 墙体宽度的影响

巷旁充填墙体宽度是设计巷旁支护的一个重要参数，它不仅影响巷旁充填带的稳定性，而且涉及巷旁支护的经济效果。研究表明将有限元数值模拟和现场实际条件相结合，能够比较准确有效地对工程参数进行优化。以某矿的一个工作面为工程背景，结合现场的实际条件运用数值模拟软件 FLAC-3D 建立模型，模拟基于锚杆索支护形式，主要针对留巷回采期间采用不同的墙体宽度分别进行模拟分析（除了墙体宽度不同其它情况都一样），比较当墙体宽度为 1.0m、1.5m、2.0m、2.5m 时墙体的塑性变形特征。模拟结果如图 2 所示：

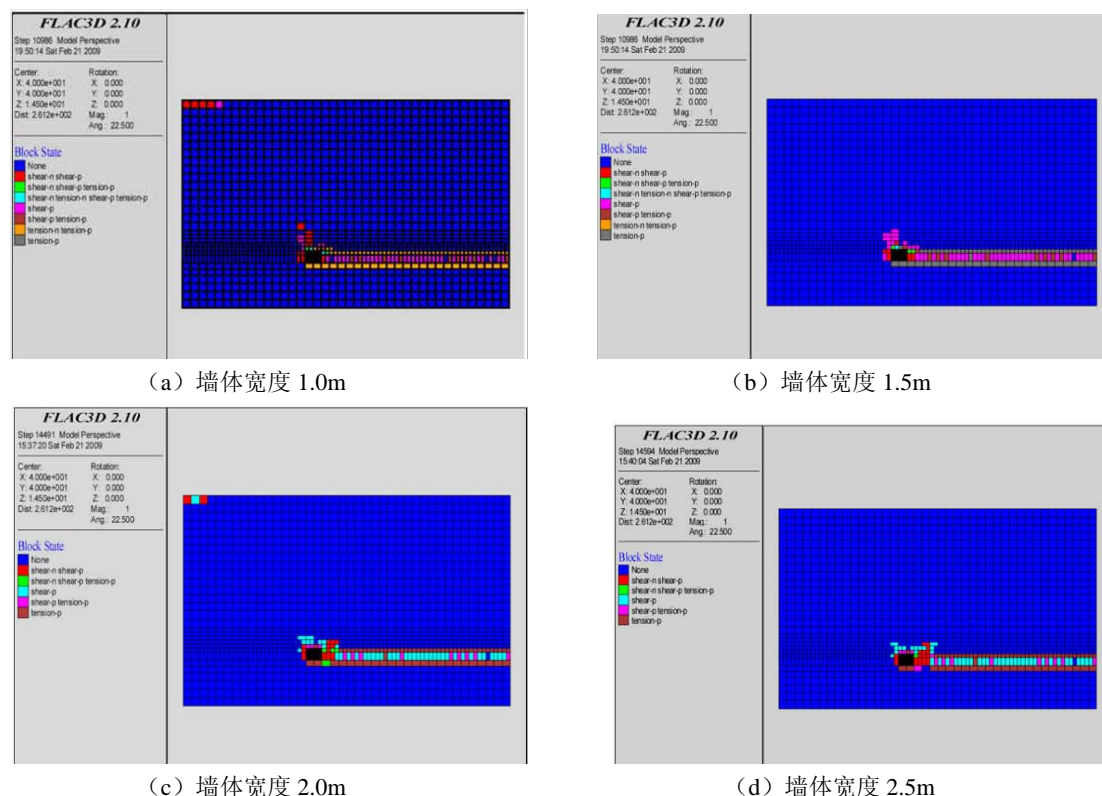


图 2 不同宽度巷旁墙体围岩塑性区分布情况

Fig. 2 The distribution of surrounding rock plastic zone of roadside wall in different width

根据图 2 可以得到，随着墙体宽度的增加，工作面回采后围岩稳定时的塑性区范围减小。充填墙体主要受到剪切和拉伸破坏，墙体宽度为 1.0m~1.5m 时巷道上方顶板严重破坏，充填墙体宽度大于 2.0m 时，巷道塑性区范围明显减小，巷旁墙体应力也随之减小，且随着墙体宽度增加塑性区范围变化不明显。根据结合工作面实际情况，其采高为 2.0m，同时模拟结果分析可知巷旁墙体宽度为 2.0m 时效果最好，此时宽高比为 1，其维护效果及经济性也最为合理。综观研究成果，从稳定性来说，巷旁充填墙体宽度存在一个最优值。一般说来，在采高一定的情况下，随着宽度增加其稳定性也增加，但是宽度的增加是有限的，当巷旁墙体的宽度达到最优宽度时，随着宽度的增加其对墙体稳定性产生的影响会很小，同时造成巷旁护巷成本增加，降低经济效益。力学分析^[9]、数值模拟^[10]及现场的实践经验研究表明薄及中厚煤层工作面沿空留巷，充填墙体尺寸符合宽高比（墙体宽度与采高的比值）为 0.8~1.2 时，维护效果与经济效益可达最佳结合，而大于此数值时，充填墙体宽度的增加对留巷结构稳定的提高便不再明显。

2.3 顶板结构的影响

李化敏^[11]均将沿空留巷顶板简化为矩形叠加层板受弯折破坏的力学模型, 提出了顶板
140 载荷的条带分割法。王飞^[12]从直接顶和老顶的分类组合入手, 根据在坚硬的直接顶和老顶
来压显现极强烈的顶板条件下不宜采用沿空留巷, 所以不研究直接顶分类中的直接顶非常稳
定和老顶分级中的老顶来压非常强烈这两类, 然后将直接顶老顶组合为 9 个类别, 再到最后
缩分、重新组合为以悬伸于采空区上方为主要依据的 4 种类型, 并经过分析最终依次给出了
145 这四类顶板条件下沿空留巷巷旁支护的载荷推算方法。阚甲广^[13]将工程实践中接触到的典
型顶板分为厚层直接顶、薄层直接顶和无直接顶三种类型, 并且利用叠加连续层板模型, 考
虑巷帮煤体承载作用和导致顶板垮落诱因, 得出了三种顶板条件下的巷旁支护阻力计算公
式。根据公式分析认为, 巷帮煤体、充填区域顶板承载性能的提高有助于降低巷旁充填体支
护阻力。随侧向顶板直接顶厚度的减小, 巷旁充填墙体支护阻力会越来越大, 也就是说在巷
旁充填墙体材料和宽度等因素不变的情况下随侧向顶板直接顶厚度的减小充填墙体内部应
150 力会越来越大, 稳定性会越来越差。

2.4 其它因素的影响

(1) 工作面推进速度

随着工作面的推进, 工作面上覆岩层经历了“平衡—不平衡—再平衡”的过程。加快工作
面推进速度, 事实上缩短了工作面割煤与放顶的时间间隔, 其结果必然能减少由于时间影响
155 所造成的顶板下沉量, 从而减少巷旁墙体的支撑压力, 提高墙体的稳定性。但随着工作面推
进速度的加快, 可能出现充填墙体还未发挥其强度就承受很大的顶板压力造成墙体破坏的情
况。因此针对不同的巷旁充填材料和地质条件, 每种情况下工作面推进速度都存在一个最优
值, 在最优的推进速度下充填墙体可以最大程度的发挥其强度, 使墙体保持稳定。

(2) 巷内加强支护

巷旁墙体支护、巷内支护和巷帮煤体共同组成了巷道围岩控制的支护体系, 它们之间相
辅相成。充填墙体附近采用密集支柱加强支护, 可以减小刚充填完的墙体承受的荷载, 延长
对充填体的保护时间, 对于充填墙体强度生成起重要的作用。另外可以在巷道顶板添加锚索
布置对留巷顶板加强支护, 增加顶板的自稳能力, 从而减少巷旁墙体承受的压力, 有利于巷
旁墙体的稳定。

(3) 巷旁锚杆锚索加强支护^[14]

锚杆锚索作为巷旁加强支护时, 在撕帮顶板超前施工锚杆锚索支护, 可发挥围岩的自我
承载能力, 形成支护—围岩的共同承载体系, 充分发挥锚杆锚索的主动支护作用, 把煤体、
支护物与巷道顶板联系起来, 不仅可减轻巷旁支护的压力, 同时又提高了巷道顶板的自稳能
力, 有利于巷旁墙体的稳定。

(4) 施工方式与质量

施工方式与质量的好坏也是沿空留巷巷旁墙体稳定性的影响因素之一。在我国, 沿空留
巷巷旁充填过程中缺乏一套完善、合理的工程质量检验方法, 并且施工过程中存在执行规范
不力和工程技术管理松懈的问题^[15]。充填体质量不稳定的原因, 一方面是人为造成的, 如
加料配比不准确, 搅拌时间太少; 另一方面是充填系统存在缺陷, 一些国产设备在技术上还
175 不够成熟, 在生产过程中可能会存在一些问题或者在现场安装与运行过程中不按照规范操作
等情况。沿空留巷巷旁充填是一项综合性的系统工程, 涉及地质、设计、施工各个方面并与
人员素质、管理水平有密切关系, 因此, 施工方式与质量显得尤为重要。当前技术管理薄弱,

工程质量不高,在一定程度上影响了充填墙体的稳定性。

3 结论

180 (1) 新型的巷旁充填材料尤其是高水速凝材料具有强度高,初凝快、增阻速度快、适度可缩量等优良性能,能够承受来自上部顶板很大的荷载,并且很好地保持沿空留巷巷旁墙体的稳定性。

(2) 当采高一定时,沿空留巷巷旁充填墙体的宽度存在一个最优值,充填墙体宽度小于这个最优值时,随着宽度的增加其稳定性越来越高,当大于这个宽度时,随着宽度的增加
185 其对墙体稳定性产生的影响会很小,同时会造成巷旁护巷成本增加,降低经济效益。

(3) 巷旁墙体支护、巷内支护和巷帮煤体共同组成了巷道围岩控制的支护体系,它们之间相辅相成,采取巷内加强支护措施,提高围岩的自稳能力可以减少巷旁墙体承受的荷载,提高墙体稳定性。

(4) 不同顶板结构条件下,巷旁充填墙体的内部的应力大小不同,因此要结合不同的
190 地质条件采用最合适的巷旁充填方式,从而保证巷旁充填墙体的稳定性。

(5) 沿空留巷的巷旁充填是一项综合性的系统工程,在施工过程中,要考虑施工方式与质量等因素的影响,综合权衡影响巷旁墙体稳定性的各个因素,充分利用有利因素避开不利因素,有效减小留巷巷道的围岩变形,改善留巷的维护效果。

[参考文献] (References)

- 195 [1] 孙恒虎,赵炳利.沿空留巷的理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
[2] 钱鸣高,石平五主编.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
[3] 郭育光,柏建彪,侯朝炯.沿空留巷巷旁充填体主要参数研究[J].中国矿业大学学报,1992,21(4):1-11.
[4] 布铁勇,冯光明,贾凯军.大采高综采沿空留巷巷旁充填支护技术[J].煤炭科学技术,2010,38(11):
200 41-44.
[5] 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.
[6] 孙春东,冯光明.新型高水材料巷旁充填沿空留巷技术[J].煤矿开采,2010,15(1):58-61.
[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):183-186.
205 [8] 谢宗保,黄艳利,巨峰.复合顶板巷旁充填沿空留巷技术实践[J].煤炭科技,2008,(2):34-37.
[9] 柏建彪.综放沿空掘巷围岩稳定性原理及控制技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2002.
[10] 杨百顺,谢洪.综采沿空留巷充填墙体合理宽度的数值模拟研究[J].煤炭工程,2011,(4):72-75.
[11] 李化敏.沿空留巷顶板岩层控制设计[J].岩石力学与工程学报,2000,(5):651-654.
[12] 王飞,黄伟健.沿空留巷巷旁支护载荷的确定[J].矿山压力与顶板控制,1997,4(3):146-149.
210 [13] 阚甲广.典型顶板条件沿空留巷围岩结构分析及控制技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.
[14] 华心祝,马俊枫,许庭教.锚索加强支护沿空留巷围岩控制机理研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2107-2112.
[15] 李迎富,华心祝.沿空留巷围岩变形破坏影响因素分析及其稳定性控制[J].矿业安全与环保,2010,37(6):80-83.