



辛亚军◎著

基于屈服煤柱留设的 巷道围岩控制技术



煤炭工业出版社

煤炭安全生产河南省协同创新中心
河南省煤矿岩层控制国际联合实验室

联合资助

基于屈服煤柱留设的巷道围岩 控制 技术

辛亚军 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

基于屈服煤柱留设的巷道围岩控制技术/辛亚军

著. --北京:煤炭工业出版社, 2017

ISBN 978-7-5020-6032-9

I. ①基… II. ①辛… III. ①巷道—围岩—围岩
控制 IV. ①TD322

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 178823 号

基于屈服煤柱留设的巷道围岩控制技术

著 者 辛亚军
责任编辑 罗秀全 郭玉娟
责任校对 孔青青
封面设计 王 滨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京建宏印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 850mm×1168mm¹/₃₂ 印张 9³/₄ 字数 228 千字

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

社内编号 8912 定价 35.00 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,电话:010-84657880

内 容 提 要

本书是系统论述基于屈服煤柱留设的巷道围岩控制技术的专著，主要内容有：“三软”煤层巷道围岩变形破坏特征及失稳机制；周期性扰动巷道围岩流变能量演化规律；不同煤柱尺寸留设与巷道围岩稳定性关系；屈服煤柱承载的力学特性及合理尺寸留设；大变形巷道四位一体围岩控制体系与不同地段多方案围岩稳定机理；基于屈服煤柱留设的回采巷道围岩控制技术及其实现方法。

本书可供从事采矿、岩土工程的科研、生产、教学、设计等单位的工程技术人员、科研工作者和师生参考。

前 言

随着优越煤层的逐步枯竭与煤炭资源的减少,“三软”煤层(顶板、煤层与底板强度较低)越来越多地被开采,但“三软”煤层回采巷道围岩变形大、支护成本高与煤柱尺寸大等问题成为制约“三软”煤层开采的首要难题。

众所周知,在巷道围岩控制中是允许两帮煤柱产生屈服承载的,当煤柱受力产生塑性区和弹性区时,弹性区起承载作用,弹性区宽度决定了煤柱的承载能力。当弹性区不完整(两端塑性区出现局部贯通或全部贯通)时,煤柱处于屈服状态,而煤柱屈服后会出现二次承载。因此,煤柱不同屈服状态并不代表煤柱的破坏或失稳,不同的煤柱尺寸与锚固方式,其煤柱屈服特性不同,不同应力水平下的煤柱屈服特性更是迥异。当煤柱两端塑性区有局部贯通时,即表示煤柱开始屈服或称为初始屈服;当煤柱两端塑性区完全贯通而出现整体受力时,即表示煤柱完全屈服或称为终止屈服,此时全屈服煤柱受力均匀,承载能力稳定,即可确定为最小煤柱尺寸。因

此，开展基于屈服煤柱留设与巷道围岩协同控制技术研究，将节约巷道支护成本，减少煤炭资源浪费，加快工作面推进速度，缓解采掘接替紧张局面，为屈服煤柱合理留设与巷道围岩协同控制提供新的理论支撑与技术途径。

2014年，作者有幸参与了煤炭安全生产河南省协同创新中心与河南永华能源有限公司的研究课题“偃龙煤田‘三软’煤层巷道支护技术研究”，得以在河南永华能源有限公司所属矿井郭村煤矿进行长期调研与试验研究，获得了大量一手资料，为本书出版奠定了基础。“三软”煤层回采巷道围岩变形量大、支护困难，且由于煤柱尺寸留设不合理，也易造成煤炭资源的严重浪费。因此，如何实现煤柱尺寸的合理留设与巷道围岩稳定性控制的协同是本书研究精髓所在。本书力求从理论分析与实用技术上较全面反映目前的研究成果，使其具有科学性和可操作性。

本书是作者承担“偃龙煤田‘三软’煤层巷道支护技术研究”子课题“大采高工作面屈服煤柱留设与巷道围岩协同控制技术研究”的主要研究成果，感谢卜庆为、康继春、李梦远等为本书所作的贡献！感谢永华能源有限公司郭村煤矿领导与技术人员的合作！

书中包含了一些其他人的研究成果，对于引用的

前 言

文章和成果尽可能进行了注明，若有个别遗漏，还望谅解！

由于水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

著 者

2017 年 4 月

目 次

1	绪论	1
1.1	问题的提出	1
1.2	国内外研究现状	2
1.3	存在的问题	17
1.4	研究内容及创新点	18
1.5	研究方法及技术路线	20
2	“三软”煤巷围岩破坏特征及失稳机制	23
2.1	工程概况	23
2.2	巷道围岩破坏特征	31
2.3	巷道围岩失稳机制	42
2.4	巷道围岩稳定性分析	44
2.5	小结	46
3	周期性扰动巷道围岩流变能量演化规律	47
3.1	能量演化与岩石变形机制	47
3.2	岩样制作与试验方法	52
3.3	试验过程与结果	56
3.4	试验结果分析	69
3.5	小结	78

4	煤柱留设与巷道围岩稳定性相似模拟	80
4.1	相似材料确定	80
4.2	模型与材料	93
4.3	设计与装填	95
4.4	相似模拟结果分析	102
4.5	小结	116
5	煤柱留设与巷道围岩稳定性数值计算	118
5.1	锚杆支护基本特性	118
5.2	模型构建与参数确定	131
5.3	数值计算结果分析	136
5.4	煤柱尺寸与围岩稳定性关系	173
5.5	小结	178
6	煤柱屈服承载特性及合理尺寸留设	180
6.1	巷道围岩时变“三区”确定	180
6.2	煤柱屈服承载力学特性	186
6.3	煤柱尺寸计算公式确定	194
6.4	屈服煤柱合理尺寸留设	201
6.5	小结	205
7	“三软”煤巷围岩稳定机理与控制技术	207
7.1	锚杆-锚索支护稳定机理	207
7.2	可缩支架支护稳定机理	216
7.3	围岩注浆强化稳定机理	225

目 次

7.4 “三软”煤巷四位一体围岩控制技术.....	233
7.5 小结	248
8 工程分析	250
8.1 工程条件	250
8.2 煤柱尺寸确定与围岩控制关键技术	252
8.3 不同地段回采巷道支护设计	258
8.4 监测结果分析	263
8.5 小结	268
9 主要结论	269
参考文献	273
主要符号索引表	279
数值计算附图	283

1 绪 论

1.1 问题的提出

随着优越煤层的枯竭和煤炭资源的减少,“三软”煤层越来越多地被开采,但“三软”煤层回采巷道围岩变形大、支护成本高与煤柱尺寸留设不合理等问题成为制约“三软”煤层开采的技术难题。

众所周知,在巷道围岩控制中是允许两帮煤柱产生屈服承载的,当煤柱受力产生塑性区和弹性区时,弹性区起承载作用,弹性区宽度体现了煤柱的承载能力。当弹性核区不完整(两端塑性区出现局部贯通或全部贯通)时,煤柱处于屈服状态,而煤柱屈服后会出现二次承载。因此,煤柱不同屈服状态并不代表煤柱的破坏或失稳,不同的煤柱尺寸与锚固方式,其煤柱屈服特性不同,不同应力水平下的煤柱屈服特性更是迥异^[1,2]。当煤柱两端塑性区有局部贯通时,即表示煤柱开始屈服或称为初始屈服;当煤柱两端塑性区完全贯通而出现整体受力时,即表示煤柱完全屈服或称为终止屈服,此时全屈服煤柱受力均匀,承载能力稳定,即可确定为最小煤柱尺寸。

利用煤柱弹性区承载特性,强化巷道顶板重点部位锚固支护强度,将利于顶板长强锚固承载体向深部延伸与屈服煤柱弹性区搭接形成整体承载拱。本书以“三软”煤层回采巷道顶板围岩稳定为前提,以屈服煤柱最大承载为原则,合理留设屈服煤柱宽

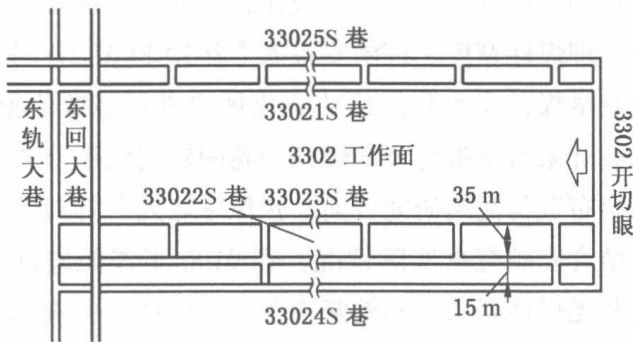
度,提高巷道围岩稳定性,实现屈服煤柱的最大承载与巷道围岩稳定性控制的协同。因此,开展基于屈服煤柱留设与巷道围岩协同控制技术研究,将节约巷道支护成本、减少煤炭资源浪费、加快工作面推进速度,缓解采掘接替紧张局面,为屈服煤柱合理留设与巷道围岩协同控制提供新的理论支撑与技术途径。

1.2 国内外研究现状

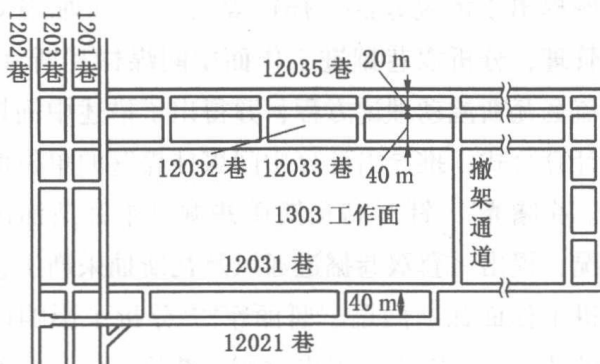
1.2.1 不同煤柱尺寸留设研究现状

近年来,由于大型综采工作面的出现及高瓦斯矿井的出现,工作面双巷布置已成为常规,且多巷布置已在一些矿井得到应用(图 1-1)。

在双巷布置围岩破坏特征研究方面,侯圣权等人^[3]通过物理模拟试验系统,并结合数字照相分析技术,分别研究沿空双巷无支护条件围岩破坏演化的全过程、围岩变形规律及巷道围岩破裂形式,得出巷间煤柱成为围岩承载结构中关键和薄弱部位,其压缩失稳是造成顶板较大下沉的直接原因,而顶板垮落会诱发巷道两帮产生大面积剪切破坏,并将失稳过程分为初期弹塑性变形阶段、稳定过渡阶段、失稳破坏阶段及二次稳定阶段。苏海^[4]针对高瓦斯厚煤层综放工作面双 U 型巷道布置,提出一种宽煤柱内沿空掘巷布置方式,通过对上覆岩层破断运动规律进行研究,发现沿空巷道顶板弧形三角块结构稳定对巷道围岩稳定至关重要,建立了小煤柱力学模型,并推导出小煤柱宽度计算公式,最终确定沿空侧护巷的煤柱合理宽度为 5 m。贾韶华^[5]通过数值模拟,探讨近距离煤层下层煤中的不同水平错距双巷围岩变形规律,下层煤双巷布置巷道围岩变形是两阶段的三因素作用最终结果,是上层煤开采后变形及下层煤开巷后围岩变形的相互叠加。



(a) 晋城寺河



(b) 晋城赵庄

图 1-1 采煤工作面多巷布置

马添虎^[6]针对双巷布置工作面回风巷在回采期间破坏较严重现象,结合数值模拟及现场观测,分析回风巷变形破坏特征,并得出对回风巷加强支护可有效控制巷道围岩变形及破坏失稳。侯海潮等人^[7]通过理论分析、数值计算,提出双巷掘进区段煤柱合理宽度确定原则与方法,首先结合改进的 Mark-Bieniawski 煤柱强度计算式,得出区段煤柱强度分布规律,之后采用 FLAC3D 数

值计算,得到区段煤柱应力分布规律,从而得出区段煤柱强度安全系数与合理煤柱宽度。许国安等人^[8]运用 FLAC3D 对采动影响下沿空双巷窄煤柱应力和位移的演化规律进行了数值模拟研究,为解决综放开采沿空掘巷及窄煤柱护巷问题提供了参考。

在双巷布置与瓦斯研究方面,张保东等人^[9]针对煤与瓦斯突出矿井,结合安顺煤矿实际情况,在 9106 工作面进行宽面掘进一次成双巷无煤柱开采,有效解决了受瓦斯抽采影响掘进速度及煤损增加等问题。宫延明^[10]针对软岩顶板留双巷问题进行论述,软岩顶板煤层采煤工作面留双巷可解决通风及瓦斯巷道难题,并对留双巷问题提出了解决办法。孙锐等人^[11]为了加强双巷掘进工作面通风管理,分析双巷掘进工作面中间煤柱瓦斯流动特点,建立了有限流场瓦斯流动理论方程,并得出了描述中间煤柱瓦斯压力分布的计算公式,推导出计算中间煤柱煤壁的单位面积瓦斯涌出量公式。崔曙光^[12]针对高瓦斯矿井掘进中瓦斯涌出量影响正常掘进情况,提出一套双巷掘进通风及瓦斯抽采新工艺,解决了长距离掘进工作面瓦斯问题。骈丽军^[13]分析了影响回风巷双巷掘进速度的若干关键因素,提出改变各部分支护方法及优化掘进工艺等措施,同时对工序进行标准时间制定,从而提高煤巷掘进速度。

在双巷布置煤柱尺寸研究方面,余学义等人^[14]通过对双巷掘进运输巷及瓦斯抽采巷之间煤柱的研究,发现一次采动后煤柱的应力分布呈不对称曲线形态,二次采动后煤柱的应力分布呈不对称的“马鞍状”,初步确定了巷间煤柱优化的范围在 5.2 ~ 13 m,此外通过数值模拟分别研究了二次采动影响下 5 种不同尺寸的巷间煤柱应力演化规律、弹塑性区变化规律及巷道变形规律,综合考虑其他因素,最终得出大采高双巷布置工作面的巷间

煤柱合理尺寸为 10 m。赵双全^[15]通过数值模拟和现场实测手段对双巷布置工作面宽煤柱留巷矿压规律进行研究。陈苏社等人^[16]通过数值模拟和现场实测,研究层间距小于 2 m 的极近煤层煤柱下双巷布置,研究了不同区段煤柱宽度所适应的双巷布置埋深,从而为工程实践提供了参考。杨健彬等人^[17]采用数值计算方法,分析双巷掘进时尾巷不同宽度和煤柱不同宽度时双巷围岩变形和应力分布,得出尾巷合理宽度、双巷掘进时煤柱的合理留设尺寸。司鑫炎等人^[18]为保证某矿综采工作面沿空双巷稳定,研究其沿空煤柱、巷间煤柱合理尺寸,采用 FLAC3D 分别对不同煤柱宽度条件下沿空双巷围岩应力、变形及塑性区分布规律进行模拟研究,并得出 4 m 沿空煤柱及 4 m 巷间煤柱条件下,煤柱内应力水平较低,煤柱与巷道稳定性较好且经济合理。

由于煤柱尺寸及承载特性是保证巷道围岩稳定的主要因素,对合理煤柱尺寸留设多集中在煤柱屈服区宽度计算^[19,20]、煤柱稳定性力学模型分析^[21]、煤柱失稳判别确定^[22]及煤柱在不同条件下应力、位移变化规律^[23-25]等方面。近年来,对不同条件下煤柱尺寸留设及稳定性控制的研究进一步深化,取得了明显成效。索永录等人^[26]通过对媒体极限强度和煤柱屈服区宽度的模型分析,推导了条带煤柱合理宽度留设计算公式,得出条带采宽是影响条带煤柱合理宽度留设的可控参数。朱建明等人^[27]基于主应力影响的黏性材料 SMP 屈服准则,分别考虑采空区侧和巷道围岩两种不同受力环境,得出了两种条件下煤柱宽度计算公式,同时采用极限平衡理论推出平面应变下煤柱塑性区宽度理论公式。张向阳等人^[28]基于采动支承应力在煤层底板及前方的传递规律,采用 FLAC 数值模拟软件对不同开采条件下深部集中动压巷道围岩进行了模拟分析。

焦志超等人^[29]采用煤柱屈服公式计算煤柱留设尺寸,通过与常规计算对比分析并用数值模拟进行验证,结果表明屈服公式计算尺寸更加合理且节约资源。徐晓惠等人^[30]利用经典弹塑性理论,对煤柱本构关系进行推导和简化,采用软化材料有限元对煤柱承载能力进行了模拟,得到了具有弹塑性软化特点的煤柱承载能力数值计算。张少杰等人^[31]研究了工作面回采时,煤体内的应力分布及迁移规律,揭示了工作面冲击矿压显现特征。王宏伟等人^[32]在地质探测基础上构建老窑破坏区相似模型,分析破坏区内煤柱应力状态受工作面回采动压影响的变化规律。刘金海等人^[33]确定出了深井特厚煤层综放工作面侧向支承压力分布特征,得出了低应力区、不完整区及合理煤柱的宽度。郑西贵等人^[34]研究了不同宽度护巷煤柱沿空掘巷掘采全过程的应力场分布规律,分析了煤柱宽度对沿空掘巷煤柱和实体帮应力演化的影响。宋义敏等人^[35]利用煤体试件单轴压缩加载试验与煤柱试样变形破坏监测,分析了煤柱变形局部化产生、演化及煤柱失稳的各阶段特征,进而获得了煤柱失稳过程的能量演化规律。王德超等人^[36]提出了一种新型侧向支承压力监测方法,通过现场应力监测和数值模拟相结合的研究方法确定了区段煤柱的合理留设宽度。冯吉成等人^[37]研究了深井大采高工作面开采条件下不同煤柱宽度时煤柱两侧塑性区分布和采掘扰动对巷道变形的影响,得到了窄煤柱的合理尺寸。

从上述研究中可以看出,对煤柱稳定性的研究主要是考虑到煤柱的尺寸与煤柱自身的可控力学参数,也涉及了煤柱的屈服特性,较合理地条带开采及房柱开采煤柱稳定性研究提供了参考。而对于双巷或相邻多煤柱巷道来说,上述研究缺乏煤柱屈服承载特性与巷道围岩稳定性之间的关系研究。因此,开展基于屈

服煤柱留设的巷道围岩控制具有重要的理论意义，研究结果将为“三软”煤层回采巷道围岩稳定性控制提供参考与依据。

1.2.2 巷道围岩控制理论研究现状

随着锚杆支护理论与技术的发展，锚杆支护具有成本低、运输方便、施工简单、控制围岩变形效果好等特点，在巷道支护中得到了广泛应用，现煤巷锚杆支护比例已接近 100%。毋庸置疑，锚杆支护已成为巷道围岩控制的重要手段。传统锚杆支护理论主要有悬吊理论、组合梁理论、组合拱理论及最大水平应力理论等。这些支护理论在一定时期内较好地指导了工程实践，但仅适用于特定条件。

悬吊理论认为：锚杆支护的作用是将巷道顶板较软弱岩层悬吊在上部稳定岩层上，增强较软弱岩层的稳定性。对回采巷道经常遇到的层状岩体，锚杆悬吊作用如图 1-2a 所示。如果巷道浅部围岩松软破碎，顶板出现松动破裂区，锚杆的悬吊作用是将这部分易垮落岩体锚固在深部未松动的岩层上，如图 1-2b 所示。

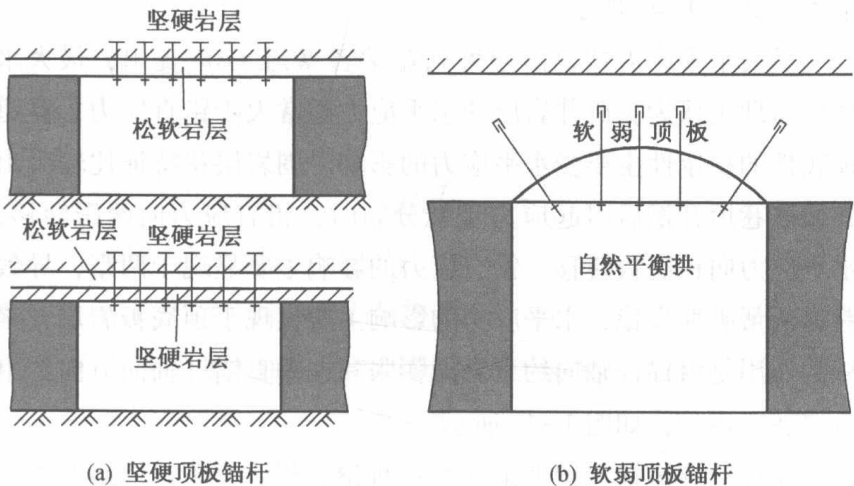


图 1-2 锚杆支护悬吊作用