

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(矿业与安全工程) ·

遗留煤炭资源开采岩层控制研究进展与发展前景

冯国瑞^{1, 2†} 张玉江^{1, 2†} 白锦文^{1, 2, 3*} 戚庭野^{1, 2}
郭军^{1, 2, 3} 杜献杰^{1, 2} 李振^{2, 4}

1. 太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024
2. 矿山岩层控制与灾害防控山西省重点实验室, 太原 030024
3. 山西焦煤集团有限责任公司 博士后工作站, 太原 030024
4. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 太原 030024

[摘要] 基于十余年关于遗留煤炭资源(以下简称“遗煤”)开采矿压与岩层控制基础研究的学术成果,本文分析了遗煤开采的战略意义,理清了遗煤开采的主要挑战,凝练出遗煤安全高效开采的关键科学问题;从遗煤开采矿压显现规律与岩体结构、遗煤开采煤柱群链式失稳机理、遗煤开采可行性定量判别方法、遗煤开采岩层运移预测模型、遗煤开采矿压与岩层控制技术、遗煤高回收率开采技术方法等六个方面,系统梳理了遗煤开采矿压与岩层控制的最新研究进展。遗煤开采矿压与岩层控制基础理论的研究仍然任重道远,亟需在未来5~10年围绕“区域化—多相化—多场化—时效化—分源化—智能化”等开展进一步地深入研究,以期为遗煤的安全绿色高回收率开采提供更多的理论和技术支撑。

[关键词] 遗煤开采;岩体结构;失稳机理;预测模型;矿压控制;岩层控制

1 遗煤开采的战略意义与主要挑战

浅部遗煤开采和深部资源开采均是保障我国资源枯竭型矿井能源持续供给的重要举措^[1]。与深部资源开采相比,浅部遗煤开采具有地应力小、地温低、掘进量少和成本较低等诸多优势(如图1所示)。浅部遗煤长期滞留在地下采空区,会受到邻近采动区的漏风影响,加剧遗煤的自然发火。一方面,产生CO和SO₂等会污染环境的有害气体;另一方面,释放出具有温室效应的CO₂气体,加剧“碳”排放,影



冯国瑞 太原理工大学教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者、国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金获得者、国家“万人计划”科技创新领军人才。主要从事难采煤炭资源安全绿色开采与灾害防控等方面的理论与技术研究,创新成果为难采煤炭资源高回收率开采提供理论与技术指导。承担国家级科研项目7项、省部级项目30余项,发表SCI/EI收录论文140

余篇,授权国家发明专利100余项,获省部级一等奖以上科研成果奖8项、二等奖多项。曾获得国家有突出贡献中青年专家国务院特殊津贴专家等荣誉称号。

张**张玉江** 太原理工大学副教授、硕士生导师。主要从事遗留煤炭资源开采、矿山压力及岩层控制、锚杆支护参数量化控制及矿山岩体力学等方面的理论和技术研究。主持国家自然科学基金项目、山西省自然科学基金等国家级、省部级以及企业科技攻关项目10余项;以第一或通讯作者发表高水平学术论文10余篇,以第一发明人授权国家发明专利6项、计算机软件著作权3项,获省部级奖励6项。



白锦文 太原理工大学副研究员、硕士生导师。主要从事采岩石力学与岩层控制等方面的理论与技术研究。主持国家自然科学基金面上项目、山西省重大专项子课题等国家级、省部级科研项目6项,以第一或通讯作者在国内外知名学术期刊上发表论文13篇,授权国家发明专利20余项,荣获山西省技术发明一等奖、中国煤炭工业科学技术一等奖等奖励。



收稿日期: 2021-05-26;修回日期: 2021-12-27
* 通信作者, Email: baijinwen629@sina.com
† 共同第一作者

响我国“碳达峰”和“碳中和”目标的实现。此外，许多浅部遗煤的品质优良，若能实现安全绿色高回收率开采，必将促进资源枯竭型矿井的可持续发展，满足区域经济对优质煤炭资源的迫切需求，推动煤炭行业科学技术的进步^[2, 3]。

然而，在先期多重采动的叠加影响下，遗煤开采的采场应力环境、煤岩介质属性、围岩结构形式和水体分布特征等发生了显著变化，极易引发动载矿压、覆岩垮落、地表塌陷等动力灾害，并进一步可能导致瓦斯外逸、涌水溃砂等联动灾害。遗煤开采表现出明显的多元致灾效应。

遗煤开采的矿压显现规律和岩体结构机理是遗煤安全高效开采的关键科学问题。它是解决“遗煤开采矿压显现异常和岩层控制精准性差”技术瓶颈的核心支撑，为进一步“认清遗煤开采水—气运移规律”和“研发遗煤开采水—气共采技术”等提供理论指导。基于此，以太原理工大学十余年关于“遗煤开采岩层控制基础研究”的学术成果为基础，笔者拟全面阐述遗煤开采矿压与岩层控制的研究进展，并展望相关理论与技术的发展前景。

2 遗煤开采矿压与岩层控制研究进展

针对不同类型的遗煤，采用相似模拟、数值模拟、理论分析和现场实测相结合的研究方法，笔者所在课题组系统分析了遗煤开采的矿压显现规律，发现了多种遗煤开采岩体结构，揭示了岩体结构的失稳机理；研究了遗煤开采煤柱群链式失稳的特征与机理，形成了遗煤开采煤柱群链式失稳的关键柱理论；研发了基于岩体结构的遗煤开采可行性定量判别方法，提出了遗煤开采岩层运移的预测模型；研发了一系列遗煤开采岩层控制的关键技术，并发明了多种遗煤高回收率开采方法。

2.1 遗煤开采矿压显现规律与岩体结构

聚焦具体的赋存状况与开采条件，分别研究了垮落式残采区上行开采、刀柱式残采区上行开采、复

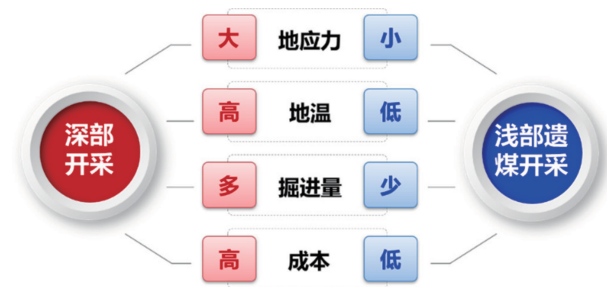


图 1 遗煤开采优势性

合残采区中层遗煤开采的矿压显现规律，发现了：面接触块体梁半拱岩体结构、受压弹性直杆支撑的控制层岩体结构、扰动块体梁半拱岩体结构、“上控制层+下承载层”岩体结构等，如图 2 所示。

2.1.1 垮落式残采区上行开采矿压显现规律与岩体结构

掌握了垮落式残采区上行开采支撑压力的演变规律，再现了垮落式残采区上行开采层间岩层移动变形的全过程，发现层间岩层会在剪胀破断影响下形成“整齐排列—相互挤压”的岩体结构——面接触块体梁半拱结构^[4]。该结构的“拱”部分为采空区上方四周面接触块体半拱结构，“梁”部分为采空区上方中部断裂块体相互挤压形成的虽有裂隙却不失整体性的类梁结构。面接触块体梁半拱结构在垂直方向由冒矸支撑，在水平方向上面面挤压，属于在竖向载荷作用下能够产生水平推力且传递合力的半拱结构^[5, 6]。分析了垮落式残采区上行开采面接触块体梁半拱结构的力学特性，确定了面接触块体梁半拱结构的平衡条件与关键接触面，获得了相邻块体接触面之间挤压力和摩擦力的关系，并揭示了其失稳临界条件^[7, 8]。

2.1.2 刀柱式残采区上行开采矿压显现规律与岩体结构

研究了刀柱式残采区上行开采围岩应力场的演变规律，发现了刀柱式残采区上行开采围岩中的“内应力拱”和“外压力拱”，揭示了刀柱式采空区煤柱分担覆岩载荷的非均衡性——“强柱弱载”和“强载弱柱”现象，即承载能力弱的煤柱承受岩梁的载荷强，承载能力强的煤柱承受岩梁的载荷弱，导致弱煤柱先压缩变形后压剪破坏，且强柱端的岩梁也会发生拉伸破坏，最终形成冒落带，并在其上方形成宏观完整的梁/板式控制层岩体结构^[9]。该结构由下位残采区中的煤柱支撑，可以视为受压弹性直杆支撑的弹性矩形平板，进而来承担覆岩传递的载荷和采动影响引起的附加载荷。在此基础上，引入叠合破断距的概念，运用弹性力学的平板弯曲理论，解析了刀柱式残采区上行开采岩体结构，发现控制层需要的

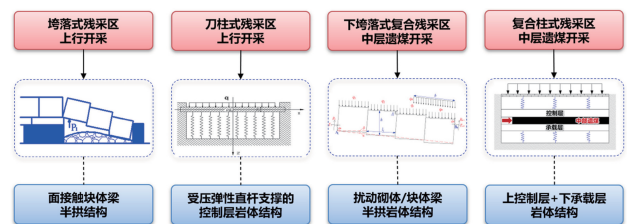


图 2 遗煤开采岩体结构

临界支撑强度与煤柱的抗压强度相等时,会达到极限状态而产生内部破裂破坏^[10]。

2.1.3 复合残采区中层遗煤开采矿压显现规律与岩体结构

提出了复合残采区的基本概念——近/极近距离煤层群赋存时,上(下)部煤层开采以后,越过中间煤层而下(上)行开采下(上)部煤层形成的“采空区—遗煤—采空区”的立体区域。系统研究了多重采动对中层遗煤采场煤岩体应力分布、裂隙发育、移动变形和结构演化的影响,分析了复合垮落式残采区、复合刀柱式残采区、“上柱一下垮”复合残采区和“上垮一下柱”复合残采区中层遗煤开采应力场、裂隙场、变形场和结构场的时空演化规律,揭示了中层遗煤开采“强弱不一、复杂多变”的矿压显现特征^[11-13]。发现了下垮落式复合残采区中层遗煤开采的“扰动砌体梁”和“扰动块体梁半拱”岩体结构,构建了相应的力学模型,揭示了回转变形失稳和滑落失稳的机理,认为:在岩层结构强度、块度一致的情况下,扰动载荷系数和扰动载荷分布系数达到相应的临界值时,岩体结构发生失稳^[11]。发现了复合刀柱式残采区中层遗煤开采“上控制层+下承载层”的岩体结构,将遗留煤柱(群)简化为复合弹性受压直杆(群),将“上控制层+下承载层”岩体结构简化为四周边界固定复合受压直杆(群)间的弹性矩形平板。在此基础上,分别揭示了控制层和承载层的失稳机理^[14, 15]。

2.2 遗煤开采煤柱群链式失稳机理

残采区遗留煤柱在空间上密集分布、形态各异、相互影响、错综复杂且尺寸不一,以群落的形式组合形成遗留煤柱群。遗留煤柱群留设的初衷是为了承载覆岩载荷,且保障采场的长期稳定性。然而,在覆岩载荷、扰动载荷、积水浸蚀和自然风化等耦合作用下,残采区遗留煤柱会发生由表及里地破裂,进而使得承载能力逐渐减弱,可能引发煤柱群体系的瞬时破坏或“多米诺骨牌”失稳,威胁邻近区域遗煤的安全高效开采^[16]。针对上述技术难题,分析了柱式残采区承载体系失稳致灾的诱因,研究了残采区遗留煤柱群的失稳致灾特征,揭示了残采区遗留煤柱群的失稳致灾机理,凝练出残采区遗留煤柱群失稳致灾的关键柱理论,如图3所示。

2.2.1 残采区承载体系失稳致灾的诱因

基于柱式残采区煤岩体的承载特性,提出了多元煤岩结构体的基本概念——残采区遗留煤柱群及其顶板岩层、底板岩层或层间岩层所共同组成的具

有耦合作用关系的承载结构体^[16, 17]。多元煤岩结构体中煤体元件内部更容易且更早产生破裂与损伤,岩体元件内部的损伤破坏相对滞后,且主要由煤体元件的初始破裂所诱发;同时,煤体元件比岩体元件的损伤破坏程度更严重;煤体元件的初始破坏和岩体元件的联动破坏在加载过程中相互作用,最终导致多元煤岩结构体发生失稳破坏。残采区遗留煤柱及其围岩的耦合作用关系体现在:一方面,遗留煤柱的初始失稳诱发采场围岩的联动破坏;另一方面,采场围岩的卸压释能加剧遗留煤柱的失稳破坏。遗留煤柱为残采区承载体系失稳致灾的诱因。

2.2.2 残采区遗留煤柱群的失稳致灾特征

根据遗留煤柱群的分布层位和空间差异性,将复合残采区遗留煤柱群分为串联遗留煤柱群和并联遗留煤柱群^[16]。串联遗留煤柱群是指复合残采区不同层位分布的重叠遗留煤柱群,并联遗留煤柱群是指复合残采区特定层位分布的平行遗留煤柱群。单轴抗压强度和弹性模量均是串联/并联遗留煤柱群失稳破坏的影响因素,串联遗留煤柱群通常会随着低强度或低模量煤柱的局部破坏发生系统失稳,并联煤柱群的破坏通常由低强度或高模量煤柱的局部破坏而引发,并随着高强度或低模量煤柱的破坏发生系统失稳。串联遗留煤柱群在失稳破坏过程中表现出明显的非均衡变形特性,并联遗留煤柱群在失稳破坏过程中表现出明显的非均衡承载特性。串联煤柱群体系失稳致灾的临界条件为:上部煤柱和下部煤柱的切线刚度之和等于0。并联煤柱群体系失稳致灾的临界条件为:左边煤柱和右边煤柱的切线刚度之和等于0。在此基础上,凝练出残采区遗留煤柱群的“最弱失稳致灾模式”——遗留煤柱群体系的整体失稳最先发生在稳定性最弱的遗留煤柱中。残采区中稳定性最弱的遗留煤柱发生局部失稳



图3 遗留煤柱群失稳致灾的关键柱理论

是遗留煤柱群体体系发生整体破坏的基本前提。

2.2.3 残采区遗留煤柱群的失稳致灾机理

从失稳源头出发,界定了遗留煤柱群失稳致灾关键柱的基本概念:残采区最先可能发生局部失稳的遗留煤柱。“关键柱”之所以“关键”,是因为唯有残采区“关键柱”发生局部失稳,邻近区域稳定性稍强遗留煤柱的失稳破坏才可能被活化,残采区遗留煤柱群的整体失稳也才可能发生^[18, 19]。基于关键柱的最小等效宽度和载荷扩散最大距离,提出了关键柱判别的主要步骤与技术流程,开发了基于 Python 语言的关键柱判别 KPDS 软件;探讨了关键柱局部失稳引发的载荷响应特征,发现关键柱局部失稳会引发载荷向最邻近遗留煤柱中转移与扩散,进而引发进一步的失稳破坏,并最终可能导致遗留煤柱群体体系的多米诺链式失稳与破坏。在此基础上,形成了残采区遗留煤柱群失稳致灾的关键柱理论,并初步提出了关键柱柱旁充填岩层控制的技术思路。

2.3 遗煤开采可行性定量判别方法

在经验判别法、比值判别法、“三带”判别法和围岩平衡判别法的基础上,提出了遗煤开采可行性定量判别的技术方法,克服了传统判别方法经验成分偏重、准确程度不高等瓶颈。具体地,主要包括:

(1) 垮落式残采区蹬空遗煤开采可行性定量判别方法:1) 当层间岩层在下部垮落矸石支撑作用下形成块体梁半拱结构时,其能为上行开采引起的扰动载荷提供安全保障,进而维护蹬空遗煤的连续完整性或准连续完整性,可以进行上行开采。2) 当层间岩层中没有形成块体梁半拱结构时,蹬空遗煤的连续完整性或准连续完整性难以保证;此时,唯有层间岩层不发生纵向台阶错动或最大纵向台阶错动量小于 0.2 倍的蹬空遗煤厚度时,才能进行上行开采。在此基础上,形成了基于“块体梁半拱”结构稳定性的垮落式残采区蹬空遗煤上行开采可行性定量判别理论^[5]。

(2) 刀柱式残采区蹬空遗煤开采可行性定量判别方法:1) 当蹬空遗煤下方最顶部控制层的叠合破断距大于采空区的悬空跨距时,可以进行上行开采;2) 当蹬空遗煤下方最顶部控制层的叠合破断距小于等于采空区的悬空跨距时,需要把这一层位控制层破断后作为载荷施加到下一层位的控制层上,重新计算其叠合破断距,并依此类推直至叠合破断距大于采空区的悬空跨距时,可以进行上行开采。在此基础上,形成了基于“控制层”结构稳定性的刀柱

式残采区蹬空遗煤上行开采可行性定量判别理论^[9]。

此外,基于“扰动块体梁”结构稳定性、“扰动砌体梁”结构稳定性和“上控制层+下承载层”结构稳定性,还提出了不同类型复合残采区中层遗煤开采可行性定量判别方法,形成了复合残采区中层遗煤开采可行性定量判别理论^[11, 15]。

2.4 遗煤开采岩层运移预测模型

垮落式残采区上行开采层间岩层中会形成明显的变形盆地,中央区域的移动变形大,在一定区域范围内层间岩层的下沉移动变形相等;四周区域呈现一定的坡度,且相邻岩块下沉移动变形值不尽相同。构建了垮落式残采区上行开采层间岩层运移的力学模型——黏弹性基础上的黏弹性悬臂梁,分别建立了同步移动区和离层区岩梁下沉的偏微分方程,得到了垮落式残采区上行开采层间岩层运移规律的预测模型^[4, 20]。

刀柱式残采区上行开采层间岩层不会出现变形盆地,起始压缩变形并不相等;随着蹬空遗煤的逐渐推进,层间岩层受影响后会出现愈来愈相同的压缩变形与下沉移动量。构建了刀柱式残采区上行开采层间岩层运移的力学模型——两端固定的悬梁,建立了不同区域控制层的挠曲方程,得到了刀柱式残采区上行开采层间岩层运移的预测模型^[20]。

在此基础上,发明了基于数字全景成像的遗煤开采覆岩运移监测技术,实测了不同类型残采区上行开采层间岩层的移动变形规律,验证了上述预测模型的准确性。

2.5 遗煤开采矿压与岩层控制技术

基于不同类型遗煤的赋存状况与开采条件,制定了遗煤开采异常矿压显现的常规控制技术方案,提出了遗煤开采厚硬难垮顶板强矿压防控技术,研发了关键柱柱旁充填防控遗留煤柱群链式失稳的技术,并发明了固废资源化结构充填岩移控制协同开发地下空间的技术方法,如图 4 所示。

2.5.1 遗煤开采异常矿压显现的常规控制技术

确定了不同类型遗煤开采的“三机”配套技术方案和工艺参数,归纳出遗煤开采过程中可能出现的特殊矿压显现特征——底板弯曲下沉、底板台阶错动、煤壁片帮等,导致采煤机、液压支架和刮板输送机的窜动、歪斜、倾倒或低头等现象。在此基础上,提出了遗煤开采异常矿压显现的常规控制技术^[20, 21]:(1) 增加支架的稳定性;(2) 加强顶板管理;(3) 采煤机、支架和输送机防倒抗滑措施;(4) 工

作面调斜和过断层技术措施等。

2.5.2 遗煤开采厚硬难垮顶板强矿压控制技术

遗煤开采厚硬难垮顶板瞬间破断会引发剧烈的冲击动力灾害,破坏巷道围岩和采场设备,甚至可能造成人员伤亡。研发了基于“低温液氮—高压强酸—加热微波”三位一体的厚硬难垮顶板强矿压消减技术^[22-24],实现了采场集中应力的有效调控与厚硬难垮顶板的超前预裂,保障了遗煤开采的安全性。

2.5.3 遗煤开采煤柱群链式失稳防控技术

运用关键柱理论,提出遗煤开采煤柱群链式失稳防控需遵循“均匀化”和“动态化”两大原则,开发了关键柱柱旁充填失稳防控的技术方法,揭示了关键柱柱旁充填失稳防控的核心机理:(1)关键柱与柱旁充填体的耦合承载;(2)柱旁充填体对关键柱产生侧向约束;(3)关键柱的受力状态转变为应力强化;(4)减弱了关键柱强度的长期劣化。分别确定了柱旁充填后“关键柱—柱旁充填体”耦合承载体所承担的载荷及柱旁充填体对关键柱产生的侧向约束力,确定了关键柱柱旁充填体的主要材料、抗压强度、临界宽度和基本形态等,从“关键柱—柱旁充填体”的应力分布特征和塑性区分布两个方面评价了关键柱柱旁充填的效果^[16, 19]。此外,还提出了注浆改性优化关键柱的强度、卸压释能弱化关键柱的载荷、FRP外裹强化关键柱的约束和薄层喷涂减少关键柱外露等失稳防控技术措施。

2.5.4 遗煤开采岩移控制与地下空间开发技术

遗煤开采岩层移动的有效控制是保障安全开采的重要举措。提出了遗煤开采结构充填控制岩层运移的技术方法——通过采前合理规划与固废资源化,在残采区“关键域”安装充填模板(包),开展结构充填工序,形成具有高承载性能的柱(墩)状、条带(墙)状、十字形、箱形、梯式或台阶式等结构充填体,随采随充形成“结构充填体—覆岩”或“结构充填体—煤柱—覆岩”复合承载结构,有效控制遗煤开采采场岩层的移动变形^[25]。该方法解决了全部充填

开采“材料不足、成本高、效率低”的技术瓶颈,还可以协同开发残采区地下空间,能够最大化地控制岩移和沉陷。开发了以废弃混凝土、煤矸石、粉煤灰、分选垃圾、生物质、生物质灰渣等为原料的多种固废结构充填材料,良好地解决了充填材料来源不足和充填成本较高的技术难题。系统研究了结构充填材料的物理、力学、电学和流变性质,分别探究了减水剂、早强剂和膨胀剂等对结构充填材料微观结构与宏观性能的影响规律,采用响应面法研究了不同因素对结构充填体工作性能的交互影响,确定了结构充填材料的优化配比^[26-29]。分析了不同尺度和形态的结构充填体在加卸载条件下的力学行为与“声—电—波—光”响应特征,并揭示了结构充填体的失稳破坏机理;构建了结构充填温克尔弹性地基上长梁/厚板的力学模型,分析了结构充填开采覆岩的变形特征,揭示了结构充填岩移控制的核心机制,初步形成了遗煤开采结构充填岩移控制的基础理论^[30, 31]。发明了结构充填料浆流变性能的测试装置、结构充填膏体输送阻力的测试装置、结构充填骨料沉降的测试装置、结构充填垛柱充填模板和结构充填折叠式充填模板等^[32],研发了结构充填料浆流变性能的测试工艺、结构充填膏体输送阻力的模拟工艺、结构充填骨料沉降的测试工艺等^[33],提出了基于内部应力变化的结构充填体稳定性监测方法,开发了柱式结构充填开采和条带结构充填开采覆岩移动变形监测的新手段,构建了基于电阻率法的遗煤开采结构充填岩移控制效果监测与评价技术体系^[34]。

2.6 遗煤高回收率开采技术方法

基于不同区域遗煤开采的时空分布、技术特征与开采趋势等,创新发明了上行复采、露天复采、充填复采和综放复采等高回收率开采技术方法,实现了“蹬空区—浅埋深—旧采区—极近距”等赋存条件下遗煤开采方法的革新,完善和丰富了煤炭资源开采的技术方法体系,如图5所示。

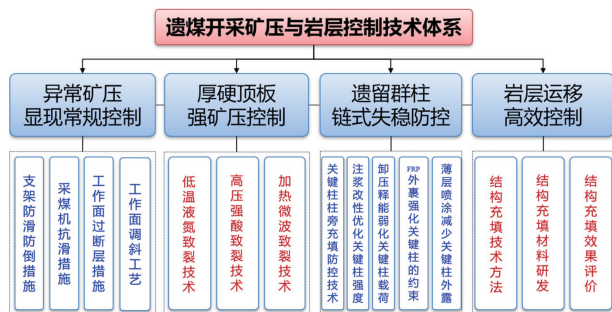


图4 遗煤开采矿压与岩层控制技术体系

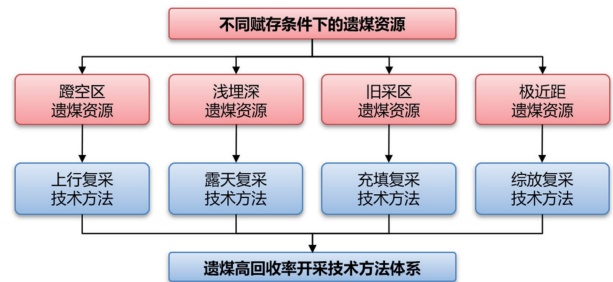


图5 遗煤高回收率开采技术方法体系

2.6.1 蹬空区遗煤上行复采技术方法

在判别蹬空区遗煤上行开采可行性、查清下伏残采区煤柱群和空区群分布状况的基础上,通过掘进蹬空遗煤的回采巷道、布置上行复采工作面和膏体充填的输送管路等,采用分段柱旁双侧全部充填、柱旁双侧部分充填、柱旁单侧全部充填或柱旁单侧部分充填的方法,依次将充填膏(浆)体均匀注入下伏残采区空区的特定位置,使其凝固硬化对柱式残采区遗留煤柱群产生侧护作用,增强其稳定性,逐渐采出蹬空区遗煤^[35]。该技术方法中所述的柱旁充填体不仅能对残采区遗留煤柱群起到侧护作用,还能形成“遗留煤柱—柱旁充填体”的协同承载结构体,进而实现残采区遗留煤柱稳定性的强化,从源头遏制住采空区遗留煤柱群的链式失稳,进而保障蹬空区遗留难采煤炭资源及其底板岩体的连续性与稳定性,并保障煤炭资源的安全高效绿色开采。

2.6.2 浅埋深遗煤露天复采技术方法

充分利用原有地质和技术资料,采用钻探、探地雷达及三维扫描技术等,探查浅埋遗煤的赋存情况、小煤窑破坏区地下巷道和老空区的分布状况,通过地面注浆的方式,使浆液在先期采动破坏区域内扩散、充实、凝固和硬化,并采用钻孔录像实时监测采动破坏空间的充实效果,待检查充实后再开展露天复采;在剥离浅埋遗煤上覆岩土体过程中,通过控制爆破强度、三维不接触测量系统实测松散岩体裂隙间距、边坡稳定性预警监测、锚杆(索)加固劣质岩体等技术措施,来增强露天复采形成的台阶和边坡的稳定性;同时,实时对露天矿坑边帮和底部进行堵水和防渗处理,通过预埋防渗结构,建立配套的排水和水位监测系统来保障安全生产^[36]。该技术方法不仅解决了浅埋深遗煤无法沿用原有地下采掘系统的技术难题,还减弱了先期小煤窑开采破坏空间内积水水害和煤层自燃等威胁,避免了露天复采时遇到的重型剥采设备倾覆与陷落等问题,保障了浅埋深遗煤开采的安全性,提高了开采效率与经济效益。

2.6.3 旧采区遗煤充填复采技术方法

设计了合理的充填参数、构筑安装了充填模板(包),采用分段柱旁双侧全部和部分充填的方法,通过实施梯式充填、台阶式和多级梯式充填等手段依次侧护遗留煤柱,在柱旁双侧充填体中掘进运输顺槽和回风顺槽,布置了短壁机械化复采工作面回收旧采区遗煤(或减小旧采区中遗留煤柱的留设尺寸)^[37]。该技术方法不仅提高了煤炭资源的回收率,还避免了旧采区中遗留煤柱瞬时失稳引发的动

力灾害。充填复采旧采区遗煤的技术方法体系主要包括三大类:膏体充填、砌筑充填和注浆充填。

2.6.4 极近距遗煤综放复采技术方法

利用采高、煤岩力学指标及层间距等参数,判别极近距遗煤的可回收性;通过判别遗煤赋存空间内瓦斯和水的富集状况,评价具备可回收性遗煤复采的安全性;对于可安全回收的近距离遗煤,在保证下部厚煤层综放开采的前提下,充分利用采动垮落的响应特征,将上覆遗煤及层间岩体从液压支架落煤口放出,利用井下光学式分选装置对煤矸进行初步分选,并在地面选煤厂进行二次分选,实现对极近距遗煤的高效回收。为了保障下伏综放采场的稳定性,在综放复采过程中需要采用注浆来加固层间破碎岩体,且严格控制开采厚度与放煤(岩)高度的比值不大于 3^[38]。该技术方法巧妙地在下伏煤层开采的过程中实现了上覆遗留底煤、煤柱或整层遗煤及层间岩层的冒放,运用井下煤矸分选装置实现了极近距离遗煤的高效回收。综放复采技术方法避免了因独立布置遗煤资源复采工作面造成的投入成本高、开采效率低和安全隐患多等技术难题。

3 遗煤开采矿压与岩层控制的发展前景

按照《国务院关于煤炭行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》(国发〔2016〕7号)要求,我国将会关闭更多安全生产条件差、资源枯竭、产能落后、布局不合理或不符合国家产业政策的煤矿。此类待关闭/废弃矿井中必然存在储量可观且可开发利用的遗煤。在关闭或废弃前,利用已有巷道、硐室或系统等,实现遗煤的安全绿色高回收率开采,可以规避关闭或废弃后资源复采的新规划与再开发,极大地节约经济成本并回收资源。遗煤开采将是我国煤炭行业的发展趋势与必然选择。遗煤开采岩层控制也将成为我国采矿工程领域重要的研究方向之一。针对遗煤开采岩层控制仍然存在的技术问题,建议未来 5~10 年围绕以下六个方面开展原创性基础研究(如图 6 所示):

3.1 “区域化”矿压与岩层控制

一方面,遗煤的赋存形式具有显著的差异性:(1) 根据赋存连续状态的差异性,可以分为整层遗煤和块段遗煤;(2) 根据采动影响程度的差异性,可以分为单一采动遗煤、双重采动遗煤或三重采动遗煤;(3) 根据采动影响层位的差异性,分为采动影响区上位遗煤、采动影响区下位遗煤、采动影响区中层遗煤和采动影响区同层邻近遗煤等;(4) 根据先期

开采方法的差异性,可以分为条带遗煤、刀柱遗煤、房柱遗煤、房式遗煤和巷柱遗煤等。

另一方面,即便赋存形式相同的遗煤,由于扰动载荷、地质构造、积水浸蚀或自然风化等的差异性,也会导致其赋存条件的差异化。这势必导致差异性较为明显的矿压显现规律与特征,进而要求因地制宜的开采工艺,并采取针对性的矿压与岩层控制技术方法与措施。

因此,后续的研究中需要关注遗煤自身的分布禀赋与外界的赋存条件,关注遗煤开采矿压与岩层控制的“区域化”,进而形成区域适用性较强的矿压与岩层控制理论与技术体系。

3.2 “多相化”矿压与岩层控制

残采区并非只有煤岩固相介质存在^[39]。先期采掘扰动影响会形成大量的渗流通道,使得大多数情形下残采区煤岩固体介质周围存在液相介质(矿井水)和气相介质(瓦斯、一氧化碳、硫化氢等)。也就是说,遗煤采场处于“固—液—气”共存的多相环境中。这势必要求关注遗煤采场“固—液—气”三相之间的交互影响,并针对性指导遗煤开采的矿压与岩层控制。

3.3 “多场化”矿压与岩层控制

先期采动影响下,遗煤采场煤岩体的赋存环境比较复杂:(1) 遗煤采场煤岩体处于“覆岩载荷+扰动载荷”叠加的复杂应力环境中;(2) 遗煤采场煤岩体的渗透特性发生了较为明显的改变,处于复杂的渗流环境中;(3) 遗煤采场煤岩体受“自燃发火”的影响处于复杂的温度环境中;(4) 遗煤采场煤岩体受酸碱矿井水及腐蚀体的影响处于复杂的水化学环

境中。也就是说,遗煤采场煤岩体在复杂温度、渗流、应力及水化学环境中会发生 THMC 多场耦合作用。这就势必要求:在遗煤开采矿压与岩层控制的时候,考虑 THMC 的多场耦合影响,并形成具有“多场化”的遗煤开采矿压与岩层控制理论与技术体系。

3.4 “时效化”矿压与岩层控制

遗煤复采实践通常在先期采动几年后开展,有时也可能在先期采动几十年后进行。也就是说,与先期开采相比,遗煤开采通常具有一定的时间滞后性。这就使得遗煤采场煤岩体的失稳破坏表现出明显的时效特性。因此,在遗煤开采时需要考虑“时间滞后性”,即关注遗煤采场煤岩体的流变失稳特性与机理,并将其应用于遗煤开采的矿压与岩层控制中。

3.5 “分源化”矿压与岩层控制

一方面,覆岩应力、扰动应力和构造应力等的差异性使得遗煤开采的“应力源”不尽相同。另一方面,先期开采方法的差异性使得遗煤采场形成的结构形式不同,即其“结构源”差异性较大。此外,采动影响的差异性会导致遗煤采场不同区域煤岩体的介质属性也不尽相同,呈现出散体、块裂、层裂或完整等特性,即采场煤岩体的“物性源”有所差异。因此,需要在遗煤开采时,系统判别采场煤岩体失稳的主控“源头”,进而采取针对性较强的分源联动防控技术,实现采场矿压与岩层的良好控制。具体地,分别从应力源、结构源和物性源三个方面出发,实施应力调控、结构增稳和物性改良等联动控制技术,来提高遗煤开采矿压与岩层控制的精准度。

3.6 “智能化”矿压与岩层控制

智能化开采是我国煤炭工业高质量发展的核心技术支撑^[40]。遗煤采场的赋存环境复杂且灾害多样化,亟需通过智能化改造来提升遗煤开采的效率与安全性。后续研究中,需要借鉴当前智能化开采的最新进展与成果,根据遗煤开采的矿压显现特征,提出“智能化”的遗煤开采矿压与岩层控制技术。

4 结 语

笔者所在团队在遗煤开采矿压与岩层控制研究方面取得了一定的研究进展,能够科学指导特定赋存条件下遗煤的安全绿色高回收率开采。国内外其他科研团队围绕遗煤开采矿压与岩层控制也取得了较好的研究成果,却整体处于初级阶段。同时,由于

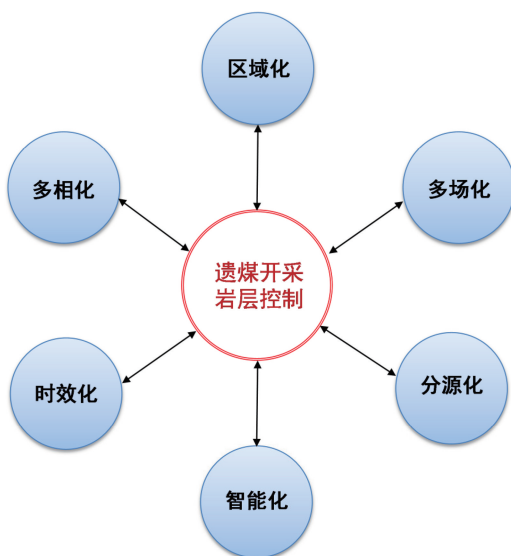


图6 遗煤开采矿压与岩层控制的发展前景

内在赋存环境与外在采动影响的差异性, 遗煤开采矿压与岩层控制基础理论的研究仍然任重道远, 需要进一步深入系统地探索与研究。这一研究领域涉及到矿业工程、安全工程、地质工程、岩土工程、机械工程与智能控制等交叉性学科, 需要坚持目标导向和问题导向, 及时关注国内外煤炭资源开采矿压与岩层控制的前沿与趋势, 从区域化、多相化、多场化、时效化、分源化和智能化等方面出发, 不断创新研究遗煤开采矿压与岩层控制的新理论、新技术和新方法, 以期遗煤的安全高效开采提供更多的科学和技术支撑, 力争进一步支撑我国煤炭工业的转型升级和高质量发展, 并努力为我国“碳达峰”和“碳中和”目标的实现贡献力量。

致谢 本文是太原理工大学“遗煤开采与灾害防控”团队围绕遗留煤炭资源开采矿压与岩层控制研究成果的初步总结, 向所有参研人员的辛勤付出表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1—15.
- [2] Zhang YJ, Feng GR, Zhang M, et al. Residual coal exploitation and its impact on sustainable development of the coal industry in China. Energy Policy, 2016, 96: 534—541.
- [3] 冯国瑞, 张玉江, 戚庭野, 等. 中国遗煤开采现状与研究进展. 煤炭学报, 2020, 45(1): 151—159.
- [4] 冯国瑞, 任亚峰, 王鲜霞, 等. 白家庄煤矿垮落法残采区上行开采相似模拟实验研究. 煤炭学报, 2011, 36(4): 544—550.
- [5] 张玉江, 冯国瑞, 戚庭野, 等. 保水开采相似模拟高精度位移测量方法研究. 煤炭学报, 2017, 42(1): 112—117.
- [6] 冯国瑞, 任亚峰, 王鲜霞, 等. 采空区上覆煤层开采层间岩层移动变形实验研究. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 430—435.
- [7] 冯国瑞, 郑婧, 任亚峰, 等. 垮落法残采区上行综采技术条件判定理论及方法. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1863—1867.
- [8] 冯国瑞, 闫旭, 王鲜霞, 等. 上行开采层间岩层控制的关键位置判定. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(s2): 3721—3726.
- [9] 冯国瑞, 杨创前, 张玉江, 等. 刀柱残采区上行长壁开采支承压力的时空演化规律研究. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 857—866.
- [10] 冯国瑞, 张绪言, 李建军, 等. 刀柱采空区上方遗弃煤层上行开采可行性判定. 煤炭学报, 2009, 34(6): 726—730.
- [11] 张玉江. 下垮落式复合残采区中部整层弃煤开采岩层控制理论基础研究. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [12] 冯国瑞, 郭峰, 白锦文, 等. “上柱一下垮”复合残采区中部残煤开采可行性评价. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2245—2253.
- [13] 白锦文, 冯国瑞, 章敏, 等. 上下柱式开采对中部残煤采场岩层应力分布时空演化的影响. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1896—1904.
- [14] 冯国瑞, 白锦文, 杨文博, 等. 复合采动损伤对层间隔水控制层稳定性的影响. 煤炭学报, 2019, 44(3): 777—785.
- [15] 白锦文. 复合刀柱式残采区中部整层弃煤开采岩层控制理论基础研究. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [16] 白锦文. 复合残采区遗留群柱失稳致灾机理与防控研究. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [17] Bai JW, Feng GR, Wang ZH, et al. Experimental investigations on the progressive failure characteristics of a sandwiched coal-rock system under uniaxial compression. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1195.
- [18] 冯国瑞, 白锦文, 史旭东, 等. 遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论及其应用展望. 煤炭学报, 2021, 46(1): 164—179.
- [19] 白锦文, 崔博强, 戚庭野, 等. 关键柱柱旁充填岩层控制基础理论. 煤炭学报, 2021, 46(2): 424—438.
- [20] 冯国瑞. 残采区上行开采基础理论及应用研究. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [21] 冯国瑞, 侯水云, 梁春豪, 等. 复杂条件下遗煤开采岩层控制理论与关键技术研究. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 144—149.
- [22] 冯国瑞, 白锦文, 郭育霞, 等. 一种液氮低温预裂煤矿厚硬难垮顶板的方法: 中国, ZL201510076521.X. 2017-01-25.
- [23] 冯国瑞, 郭军, 申辰, 等. 一种预裂和软化火成岩坚硬顶板的方法: 中国, ZL201610659540.X. 2018-07-10.
- [24] 白锦文, 冯国瑞, 毋皓田, 等. 微波加热弱化下伏煤层开采厚硬顶板强矿压的方法和装置: 中国, ZL201910511238.3. 2019-10-25.
- [25] 冯国瑞, 杜献杰, 郭育霞, 等. 结构充填开采基础理论与地下空间利用构想. 煤炭学报, 2019, 44(1): 74—84.
- [26] 冯国瑞, 任亚峰, 张绪言, 等. 塔山矿充填开采的粉煤灰活性激发实验研究. 煤炭学报, 2011, 36(5): 732—737.
- [27] 冯国瑞, 贾学强, 郭育霞, 等. 矸石—废弃混凝土胶结充填材料配比的试验研究. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1072—1079.
- [28] 李典, 冯国瑞, 郭育霞, 等. 基于响应面法的充填体强度增长规律分析. 煤炭学报, 2016, 41(2): 392—398.
- [29] 冯国瑞, 贾学强, 郭育霞, 等. 废弃混凝土粗骨料对充填膏体性能的影响. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1320—1325.
- [30] Du XI, Feng GR, Zhang YJ, et al. Bearing mechanism and stability monitoring of cemented gangue-fly ash backfill column with stirrups in partial backfill engineering. Engineering Structures, 2019, 188: 603—612.

- [31] 杜献杰. 煤矿结构充填开采“充填体—直接顶”复合承载结构稳定性研究. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [32] 戚庭野, 冯国瑞, 张新军, 等. 电阻率膏体充填效果评价方法在新阳煤矿的应用研究. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 302—309.
- [33] 董慧珍, 冯国瑞, 郭育霞, 等. 新阳矿充填料浆管道输送特性的试验研究. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 880—885.
- [34] 戚庭野. 煤矿膏体充填材料不同条件下的电阻率特性及应用研究. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [35] 冯国瑞, 王鲜霞, 康立勋, 等. 一种蹬空开采可行性的定量判别方法: 中国, ZL200710139265. X. 2013-04-03.
- [36] 冯国瑞, 白锦文, 张玉江, 等. 一种防止露天复采残煤时重型剥离设备倾倒和陷落的方法: 中国, ZL201410141610. 3. 2016-03-23.
- [37] 冯国瑞, 白锦文, 郭军, 等. 一种梯式构造充填复采残采区遗留煤柱群的方法: 中国, ZL201610468088. 9. 2018-05-04.
- [38] 冯国瑞, 张玉江, 白锦文, 等. 一种综放复采残留底煤的方法: 中国, ZL201410029095. X. 2015-10-28.
- [39] 李振. 老空区破碎煤岩体变形与渗流特性研究及在煤层气抽采中的应用. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [40] 王国法, 赵国瑞, 任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析. 煤炭学报, 2019, 44(1): 34—41.

Research Progress and Development Prospects of Rock Strata Control in the Mining of Residual Coal Resources

Feng Guorui^{1, 2†} Zhang Yujiang^{1, 2†} Bai Jinwen^{1, 2, 3*} Qi Tingye^{1, 2}
Guo Jun^{1, 2, 3} Du Xianjie^{1, 2} Li Zhen^{2, 4}

1. College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024
2. Key Laboratory of Shanxi Province for Mine Rock Strata Control and Disaster Prevention, Taiyuan 030024
3. Postdoctoral Workstation, Shanxi Cooking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030024
4. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024

Abstract Based on the basic academic researches on the mine pressure and strata control in the mining of residual coal resources, the mining strategic significance is firstly analyzed. Main challenges to the mining of residual coal resources are clarified. The key scientific issues for safe and efficient mining residual coal resources are also condensed. From the mine pressure behavior and rock mass structure, chain failure mechanism of residual coal pillars, the quantitative judging method of mining feasibility, the rock strata movement prediction model, the control technology of mine pressure and rock strata, as well as the high recovery mining methods, the latest research progress of mine pressure and strata control in the mining of residual coal resources are systematically reviewed. There is still a long way to go for the basic research on mine pressure and strata control. It is urgent to carry out further research on regionalization, multiphaseization, multifieldization, timing, source-separation and intelligentization in the next 5 ~ 10 years. It is expected to provide more theoretical and technical supports for the safe, green, and high-recovery mining of residual coal resources.

Keywords residual coal mining; rock mass structure; instability mechanism; predictive model; rock pressure control; rock strata control

(责任编辑 刘敏)

* Corresponding Author, Email: baijinwen629@sina.com

† Contributed equally as co-first authors.