

973计划前期研究专项课题 (2012CB723104) 资助

国家自然科学基金 (51304126) 资助

霍英东青年教师基金 (基础性研究) (141046) 资助

高等学校博士学科点专项科研基金 (20123718120009) 资助

山东省优秀中青年科学家科研奖励基金 (BS2013NJ007) 资助

中国博士后基金二等 (2013M541918) 资助

山东省优秀中青年骨干教师国际合作培养项目经费资助

山东科技大学杰出青年科技人才支持计划 (2014JQJH105) 资助



WUMEI ZHU KAICAI DONGLIXUE
JICHU JI GUANJIAN JISHU

无煤柱开采动力学

基础及关键技术



文志杰 蒋宇静 韩作振 石永奎 苗素军 著



煤炭工业出版社

无煤柱开采动力学基础及 关键技术

文志杰 蒋宇静 韩作振 石永奎 苗素军 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

无煤柱开采动力学基础及关键技术/文志杰等著. --北京: 煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4545 - 6

I. ①无… II. ①文… III. ①无煤柱—采煤方法 IV. ①TD823.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 108820 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京市郑庄宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 880mm × 1230mm ¹/₃₂ 印张 7
字数 187 千字

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷
社内编号 7410 定价 22.00 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

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了无煤柱开采动力学基础及其相关的新型无煤柱开采技术。内容主要包括：采场结构力学模型组成及其形成发展规律，采场支承压力形成机理及其分布规律研究，采场力学结构稳定状态预测，无煤柱围岩结构力学模型研究，新型无煤柱开采关键技术初探等。

本书可供采矿、地下工程、冶金、土木工程等科技工作者、现场工程技术人员，以及高等院校相关师生参考使用。

前 言

煤炭是我国的基础能源,在我国能源结构中所占比重超过60%的现状将长期存在。煤炭资源开发是我国能源安全保障体系建设的重中之重。为了满足国民经济高速增长的需求,今后相当长的时期内必须保证煤炭的高产稳产和安全开采。然而,我国煤炭资源回收率较低,损失浪费严重,全国煤矿资源回收率仅在40%左右。经过长期大规模的开采,我国中东部产煤区的浅部煤炭资源已经枯竭,随着开采深度的不断增加,岩体力学灾害日益增加。推行无煤柱开采是煤炭资源可持续发展的重要方向,不仅对生产矿井进行技术改造、缓和采掘关系和延长矿井寿命具有现实意义,而且也是使煤炭企业改善安全条件和技术经济指标,增产、增盈减亏的主要途径之一,也能够落实国家有关煤炭开采法规相关规定,保证回采率。

采场结构力学模型组成及结构特征、采场支承压力形成机理及分布规律、采场动态力学结构状态预测、无煤柱围岩结构力学模型建立等问题的研究进展,对于无煤柱开采动力学理论基础研究具有重要指导意义。

本书共分为6章:第一章为绪论,介绍了无煤柱开采的必要性和发展方向;第二章为采场结构力学模型组成及其形成发展规律,重点介绍采场结构力学模型发展规律;第三章为采场支承压力形成机理及分布规律研究,重点介绍采场支承压力发展演化机理;第四章为采场力学结构稳定状态预测,重点分析采场动态结构力学模型“时空”效应;第五章为无煤柱围岩结构力学模型

研究，重点建立无煤柱开采围岩结构力学模型，确定力学参数；第六章为新型无煤柱开采关键技术研究，重点介绍几种新型无煤柱开采方法。本书从采场结构力学模型发展规律、支承压力分布、预测技术等方面出发，形成一个较为系统和完整的无煤柱开采体系。

在本书编写过程中，参阅了众多专家学者的论著，借出版之际，编者一并致以衷心的感谢。同时还要感谢贾传洋、文金浩为本书奉献的辛勤劳动。

由于作者在编写过程参阅的资料有限，书中不妥之处在所难免，欢迎有关专家、学者和广大读者批评指正。

编 者

2014 年 5 月

目次

1 绪论	1
1.1 无煤柱开采技术国内外发展现状	1
1.2 无煤柱开采技术存在的问题	5
1.3 无煤柱开采技术研究的背景和意义	9
1.4 无煤柱开采技术的发展方向	13
1.5 有关的科学名词	15
2 采场结构力学模型组成及其形成发展规律	16
2.1 采场结构力学模型组成及其结构特征	16
2.2 采场结构力学模型形成发展规律	40
2.3 本章小结	74
3 采场支承压力的形成机理及分布规律研究	76
3.1 采场支承压力的形成机理	76
3.2 采场支承压力的分布范围理论分析	111
3.3 本章小结	120
4 采场力学结构稳定状态预测	121
4.1 采场动态结构力学模型稳定状态预测	121
4.2 采场动态结构力学模型“时空”效应	127
4.3 本章小结	146
5 无煤柱围岩结构力学模型研究	147
5.1 无煤柱开采围岩结构力学模型建立及参数 确定	147
5.2 无煤柱开采灾变系统	154
5.3 沿空留巷围岩稳定性分类	159
5.4 沿空掘巷围岩稳定性分析——裂断点和煤柱 宽度对围岩应力环境与应变特征数值模拟	167

5.5	本章小结	188
6	新型无煤柱开采关键技术初探	190
6.1	“预留变形量巷旁充填沿空留巷技术” 结构模型	191
6.2	充填体力学结构参数确定	191
6.3	新型沿空掘巷技术	206
6.4	本章小结	208
	参考文献	209

1 绪 论

1.1 无煤柱开采技术国内外发展现状

为了保证矿山工作的安全,长期以来,绝大部分矿山井下施工多在工作面之间留设一定宽度的煤柱,留设的煤柱可以有效地防止生产或准备工作面与相邻采空区通透或漏风而引起采空区的自然发火,同时也兼顾了工作面压力显现,这样虽然对矿山的安全起到了保护作用,却造成了煤炭资源的浪费,随着煤炭开采技术的发展及锚杆支护技术的推广应用,宽煤柱已逐步被无煤柱沿空掘巷或者沿空留巷所取代。

早在20世纪50年代初期,世界上许多国家如原联邦德国、美国、法国、波兰、苏联等十几个国家就开始试验和应用无煤柱开采技术。无煤柱开采技术目前流行的方法有沿空留巷和沿空掘巷两种。巷旁充填留巷开始是从减少巷道的掘进维护工作量的角度出发的,没有明确和突出重大事故控制的目标。工程实践首先于20世纪60年代在英国、原联邦德国开始。我国于20世纪70年代引进使用,但因“高水材料”成本过高,强度和耐久性不足,充填工艺落后,特别是没有掌握矿山压力规律,没有从根本上扭转巷道维护困难的局面,而没有得到推广。进入21世纪,“淮煤集团”从20世纪90年代瓦斯事故多发、安全威胁严重的阴影中走了出来,成为全国煤矿安全生产的典范。“淮煤集团”坚持技术创新,在实现充填材料更新、充填工艺及装备机械化的基础上,成功地采用了沿空留巷,实现了煤与瓦斯同采。在较好地解决采煤工作面推进上隅角瓦斯积聚以及在高应力区掘巷引发的瓦斯突出和瓦斯爆炸事故的同时,将沿空留巷无煤柱开采推进到了一个新的发展阶段。

无煤柱护巷的优越性早已众所周知, 仅以资源回收为例, 1991 年的调查证明, 采用无煤柱护巷时, 每沿空掘巷和沿空留巷 1 m, 多采出的煤量分别为 33.1 t 和 16.1 t。据初步统计, 我国由于推广应用无煤柱护巷而多采出的煤量累计已达 1×10^8 t 以上。可见推广无煤柱护巷对合理开发地下资源, 提高煤炭采出率, 延长矿井寿命都有重要意义。因此近些年来出现的我国无煤柱护巷的应用比重减小和无煤柱开采的产量有所降低的状况是值得引起重视的。

国外应用长壁开采系统的国家推行无煤柱护巷较早, 不仅应用相当普遍, 而且坚持得较好, 似乎已形成传统习惯。1991 年有学者曾访问过莫斯科近郊煤田一个年产 140×10^4 t 的矿井, 了解到该矿的每个采区除第一个工作面外, 其余均采用无煤柱护巷, 因顶板随采随垮, 故均采用沿空掘巷。巷道采用金属支架进行支护, 采出率达 85%, 回撤出的支架就地在井下硐室中整形, 修复后重新加以利用。

据报道, 至 1993 年俄罗斯无煤柱开采产量占 80%, 对不同矿区变动在 60% ~ 90% 之间。在各种无煤柱护巷方式中, 应用最广的是沿空留巷, 占 65%, 沿空掘巷占 30%, 另有 5% ~ 10% 是在生产工作面后方的采空区中成巷。在英国、德国、波兰等国家, 推行无煤柱护巷是以沿空留巷为主, 或所占比重较大。所以, 扩大沿空留巷的使用范围和增加其应用比重是长壁开采系统产煤国家的共同趋势。

近年来我国通过理论研究、现场观测和实验室研究, 在无煤柱护巷的机理、无煤柱护巷条件下的矿压显现规律及“支架—围岩”关系等方面进行了一系列基础研究工作, 取得的主要进展如下:

(1) 进行了与采空区相邻煤体内应力分布理论研究。

为了查明无煤柱护巷的机理必须了解开采后巷旁煤体边缘区内形成卸载带和支承压力带的基本规律。早从 20 世纪 70 年代后期开始, 我国部分煤炭高校和科研单位就从理论上研究了与采

空区相邻煤体内的应力分布规律,分析了支承压力的各种影响因素,通过建立力学模型得出了求解煤体内弹性区应力、塑性区应力、塑性区宽度及支承压力影响范围等的数学表达式。由于寻求问题的解析解时均需在不同程度上作一定的简化,这就使研究结果的可靠性受到影响,使研究成果仍难以满足工程实用的需要。尽管如此,这些理论工作取得的成果为问题的进一步解决打下了基础,仍具有较高的学术意义和一定的参考价值。

(2) 研究了沿倾斜方向巷旁煤体内不同应力带的特征及分布规律。

20 世纪 80 年代末期以来,一些研究单位通过数值分析、实验研究和不同矿区的三四十个矿井进行井下实测,查明了不同矿井中沿倾斜方向巷旁煤体边缘卸载带的宽度,侧支承压力峰值的应力集中系数和峰值区离巷道的距离,以及侧支承压力影响的总范围。

(3) 开展了对无煤柱护巷全过程的矿压显现规律研究。

通过大量井下观测和实验,研究了无煤柱护巷全过程所经历的 5 个不同矿压显现阶段(掘进影响、无采掘影响、一次采动影响、一次采动后稳定及二次采动影响阶段)中的巷道围岩移动和支架受载特点,查明了不同阶段对无煤柱护巷的影响程度。大量研究资料证实,一次采动对巷道的影响是最严重的,尤其是沿空留巷时工作面后方 5~40 m 范围内形成的顶底板移近量可占全过程中总移近量的 60%~70%,占煤层采高的比重在 5%~10% 之间,说明这个阶段的巷道围岩控制是沿空留巷成败的关键。

通过研究还提出了预计沿空巷道围岩移近量的经验公式,包括沿空掘巷时的顶底板移近量和沿空留巷时一次采动引起的顶底板移近量及留巷全过程的移近量等。

(4) 进行了无煤柱护巷条件下“支架—围岩”相互作用关系研究。

通过理论分析及实验研究,已认识到无煤柱护巷条件下支架

的作用与一般巷道支架的作用原理的一致性,即支架的作用不是也不可能改变开采后岩层运动的基本规律,而在于抑制巷道周边附近岩石尤其是离散、松动岩块的过量位移。因此,合理的“支架—围岩”关系是使支架在工作过程中所形成的阻力与围岩发生的位移能始终处于受控条件下的动平衡状态。实践表明,能较好地满足此要求的就是采用具有可缩结构的各种支架。为了使这类支架能更好地适应沿空巷道支护的要求,应当根据无煤柱护巷条件下巷道围岩变形及支架受载的特点进行支架设计和选用。根据我国大量实测资料,已初步查明沿空巷道周边位移及支架受载有以下基本规律:

①沿空巷道顶底板移近量较大,且靠采空区侧顶底板移近量可达靠煤体侧的1.5~2.7倍。

②底鼓在沿空巷道顶底板移近量中所占比重也较大,少数沿空巷道底鼓所占比重可达75%~90%。

③沿空巷道两帮水平移动也有普遍性,且沿空掘巷时引起的两帮水平移近量要比沿空留巷时大。

④沿空巷道支架受载并不如一般想象的那么大,井下实测的沿空掘巷和沿空留巷支架载荷分别在30~170 kN/架和30~300 kN/架之间,因此没有必要为沿空巷道设计面制造工作阻力过高的支架。

⑤沿空巷道两侧顶压也有不均衡的特征,对沿空掘巷和沿空留巷靠采空区侧顶压可分别达靠煤体侧的1.4~3.6倍和2.7~5.1倍。

⑥沿空巷道两帮侧压有明显的不均衡性,多数矿井是靠煤体侧大于靠采空区侧,因此会较普遍地出现靠煤体侧立柱损坏率大于靠采空区侧的现象。

上述这些研究成果均在不同程度上为改善无煤柱巷道的维护及设计和选用合理的沿空巷道支护提供了理论方向和实践依据。

1.2 无煤柱开采技术存在的问题

沿空留巷当前存在的主要问题是完全没有掌握采场推进过程中上覆岩层运动和支承压力发展变化的规律,特别是没有认识到充填体不可能完全承担支承压力高峰实施转移过程和采场上覆岩层(“裂断拱”内岩层)沉降过程中的强大压力。其结果往往是充填宽度很大(3~5 m),充填成本很高,出现严重的巷道底鼓(这是巷道底板岩层在两帮强大的支承压力作用下屈曲破坏的结果),整修巷道工作量大,工艺复杂,影响生产,甚至Y型通风系统遭到严重破坏;而当充填材料宽度小、强度不足时,巷旁充填体将在上覆岩层沉降压力作用下迅速破坏,失去支承能力,出现采空区漏风,引发采空区火灾和瓦斯爆炸事故。

到目前为止,我国在沿空留巷技术的应用方面进行了许多的探索,积累了丰富的经验,从薄煤层到厚煤层,从缓倾斜煤层到急倾斜煤层,都已有沿空留巷的成功经验。但是,由于我国煤矿地质条件多样,沿空留巷围岩变形机理复杂,巷旁支护技术、施工工艺还不完善,在沿空留巷技术研究与应用中仍存在着不足之处,目前在支护设计思路、巷内支护、巷旁支护及理论研究方面还存在一定问题。

(1) 支护设计思路问题。以往采用沿空留巷技术,支护设计思路不合理,大多将工作面回采前的巷道掘进与回采后的留巷相互独立考虑,没有统筹考虑,没有将沿空留巷视为一项系统工程,如在对需要保留的巷道掘进前,进行巷道支护形式选择和支护参数设计时,没有预先考虑后期沿空留巷技术的需要,从而导致沿空留巷后巷内支护体强度不能满足两次采动影响的要求、巷内支护与巷旁支护不匹配,使留巷效果达不到预期目标,甚至失败。

(2) 巷内支护问题。大量理论研究和生产实践表明,如何提高巷道围岩强度,并正确选择合适的巷内支护方式是保证所留巷道在留巷后巷道稳定的关键。随着综采、综放采煤技术的发

展,工作面采高逐渐加大,工作面一次采出的煤层厚度增大,上覆岩层活动程度及波及的范围相应增加,回采巷道压力随采高的增加而增加,以及已采区和工作面采动引起的支承压力的叠加作用,使巷道围岩应力增加,使得工作面超前支承压力影响距离加大,矿压显现剧烈,沿空留巷的顶板下沉量随开采厚度增加而增大,在工作面前方附近,巷道断面收缩率较大,若不采取合理的巷内支护方式将所留巷道的变形控制在一定的范围内,则很难保证所留巷道在下区段回采时能正常使用。以前国内沿空留巷巷内支护多采用金属支架,属被动支护,即使加大型钢型号、减小棚距仍难以维护所留巷道的稳定,因此有必要采用一种能主动提供支护阻力的巷内支护方式。

(3) 巷旁支护问题。巷旁支护作为沿空留巷的一个技术难点,在我国一直没有得到很好的解决。传统的巷旁支护存在支护阻力、可缩性等力学性能与沿空留巷围岩变形不相适应、密闭性能差和机械化程度低等缺点,不利于巷道维护和防止采空区漏风与自然发火。所以,长期以来我国沿空留巷基本上只是应用在条件较好的薄及中厚煤层,条件困难或厚煤层中采用这种方式留巷成功率不高,大部分留巷需要多次翻修方可复用。传统的巷旁支护方式只适用于中厚以下煤层的低瓦斯矿井和无自然发火倾向的煤层。而高水速凝材料与高水灰渣材料巷旁充填、硬石膏等风力充填,都需要建立一套较为复杂的充填系统,而且充填设备性能不佳、充填材料成本较高。

(4) 沿空留巷理论研究问题。沿空留巷与一般的回采巷道不同,其巷道的一侧为煤体,另一侧为巷旁支护体,属大变形围岩。同时,还必须承受掘进和两次强烈的采动产生的叠加应力的影响,矿压显现剧烈。它是一项极其复杂的工程技术,但到目前为止,对沿空留巷围岩控制机理研究不够深入,对沿空留巷所处的应力环境及其矿压显现规律掌握不够,构建的沿空留巷受力模型还不完善,还没有一套行之有效的沿空留巷支护参数设计方法,不能很好地指导沿空留巷工程实践,从而带来以下两种后

果：一是因缺乏理论上的正确指导，在沿空留巷支护设计时，认为安全系数越高越好，造成不必要的经济损失；二是在沿空留巷设计时，常因巷内支护和巷旁支护参数选择不合理而导致留巷失败，影响正常生产和煤矿安全，并造成重大的经济损失。

沿空掘巷无煤柱开采方案从减少煤柱损失的需求和采用放顶煤开采技术开始，在两个应力场的理论和采掘工作面正确的时空关系指导下逐步完善，目前已进入全面推广应用的阶段。

目前存在的问题仍然是一些矿井没有掌握两个应力场理论，特别是由于不清楚“内应力场”范围和现场确定方法，不了解煤壁受压破坏发展过程与上覆岩层运动关系，以及不清楚采掘工作面推进时空关系而造成选择不当、决策失误等，致使巷道出现难以维护、通风不畅的局面。煤柱受压破坏引起的采空区漏风问题没有得到根本解决，煤柱自燃和瓦斯爆炸事故时有发生。

(1) 无煤柱开采仍然存在采空区大量遗煤自燃威胁。我国一半以上的矿井开采的都是易自燃煤层，矿井火灾是威胁煤矿安全生产、危害职工生命安全的重大灾害和突出灾害之一。据统计，我国 72.05% 的大中型煤矿、煤层自然发火严重或较严重，51.3% 的国有重点煤矿存在自然发火危险，几乎所有产煤区都存在自然发火危险，重点产煤区尤为严重。

而当前少有实现完全沿空掘巷的，其原因主要在于留设小煤柱可以实现巷道与采空区的隔离，防止采空区的水与有害气体进入巷道，并能起到阻止新鲜风流将氧气带入采空区引发遗煤自燃的作用，而这些留设的煤柱成为采空区遗煤的重要来源。

(2) 沿空掘巷护巷煤柱宽度确定以及巷旁煤体与围岩作用机理尚不完善。如果留设煤柱过小，则沿空侧煤柱受支撑力的影响呈塑形后容易出现失稳片帮现象；如果留设煤柱过大，则回采巷道布置在压力增高区内，将使巷道压力大，支护困难。因此，合理地确定煤柱宽度对于矿井安全生产具有重要意义。

另外，目前大部分力学模型更多地考虑到了巷旁煤体的刚性支座作用，而忽略了其对整个支护体系支护效果的贡献，因此对

“煤体—围岩”甚至是“支护体”的相互作用机理仍有待进一步研究。

(3) 沿空巷道因变形而产生的裂隙沟通了巷道和采空区，创造了漏风的良好条件。无煤柱开采大量的工程和实践观测表明，护巷煤柱受矿压影响将会出现大量裂隙和微孔，煤柱基本上都是带裂隙工作的，只是有些裂隙很细，甚至肉眼无法分辨，这些裂隙在上覆岩层运动或外界物理及化学因素作用下，不断产生和发展引起小煤柱塑性变形，裂隙不断扩展为可以形成与采空区充分贯通的漏风通道，为采空区提供了供氧条件，极易引发煤柱和采空区遗煤自燃，威胁矿井安全生产。

沿空掘巷（图 1-1）技术应用中存在的问题之一是煤柱（包括人工护巷体）产生裂隙后形成的漏风，导致煤柱本身和采空区遗煤具备良好的供氧条件，经过吸氧、氧化、发热，热量逐渐积聚达到着火温度而最终形成火灾。同时这种矿井漏风不但会引起煤炭自燃，而且会使通风系统复杂化，减少了矿井有效风量，增加了主要通风机耗电，容易造成瓦斯积聚，降低了矿井的防灾、抗灾能力，因而解决护巷煤柱易在上覆岩层运动的作用和影响下压酥、压裂，并形成漏风通道的问题成为实现“降低留设煤柱宽度”这一“绿色开采”目标的重大课题。

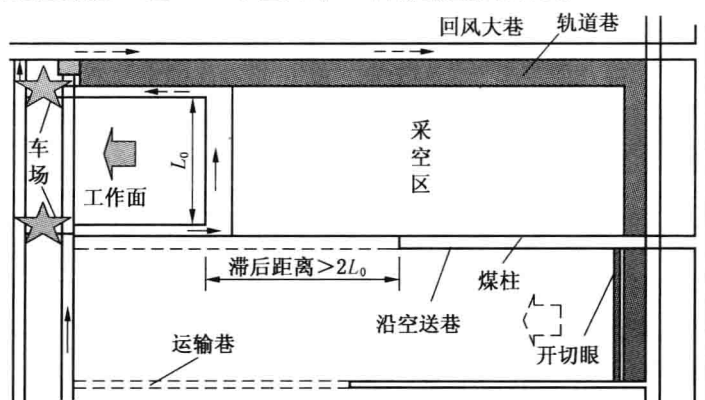


图 1-1 沿空掘巷示意图

实践证明,无煤柱开采方案实践可有效地控制瓦斯爆炸、冲击地压等相关事故的发生。通过对岩层运动和矿山压力发展变化规律的研究,正确地进行巷道矿压控制设计以及解决好巷道掘进和维护期间采空区透风问题,完全能够控制原煤柱护巷方案产生的重大事故。

1.3 无煤柱开采技术研究的背景和意义

煤炭是我国的基础能源,在我国能源结构中所占比重超过60%的现状将长期存在。煤炭资源开发是我国能源安全保障体系建设的重中之重,《能源中长期发展规划纲要(2004—2020年)》中明确提出煤炭资源发展目标,即“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”。2008年我国煤炭产量达到 32×10^8 t,占世界煤炭产量的38.8%,在我国一次能源构成中占70%左右。为了满足国民经济高速增长的需求,今后相当长的时期内必须保证煤炭的高产稳产和安全开采。

(1) 深部煤炭资源开发是国家能源持续有效供应的重要保障。我国的煤炭资源赋存条件比较差,地下开采煤炭产量占90%以上。经过近几十年大规模开采,我国中东部主要产煤区的浅部煤炭资源已经逐渐开采殆尽,目前主要开采矿区平均开采深度已达700 m左右,并且以每年8~12 m的速度向下延深。例如:山东塘口煤矿开采深度为1100 m、徐州张集煤矿开采深度为1200 m、新汶孙村煤矿开采深度为1100 m、新汶华丰煤矿开采深度为1350 m、抚顺老虎台矿开采深度为900 m、兖州矿业集团赵楼煤矿开采深度为1000 m、长广矿开采深度为1000 m、北票冠山矿开采深度为1059 m、阜新王营子矿开采深度为1100 m、开滦赵各庄矿开采深度为1159 m、沈阳彩屯矿开采深度为1197 m,预计在未来20年我国很多煤矿将进入1000~1500 m的开采深度。资源储量与开采深度关系如图1-2所示。

21世纪我国主体能源的后备储量是深部煤炭资源。假如东部老矿区因浅部资源采完而关井停产,造成的巨大煤炭产量缺口