

郭文兵,白二虎,杨达明. 煤矿厚煤层高强度开采技术特征及指标研究[J]. 煤炭学报,2018,43(8):2117-2125. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1573

GUO Wenbing, BAI Erhu, YANG Daming. Study on the technical characteristics and index of thick coal seam high-intensity mining in coalmine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2117-2125. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1573

煤矿厚煤层高强度开采技术特征及指标研究

郭文兵^{1,2}, 白二虎¹, 杨达明¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要:在分析煤矿高强度开采现状与定义的基础上,从地质采矿条件、工作面尺寸、技术装备、推进速度、产量效率高、深厚比、覆岩与地表破坏等方面系统研究了厚煤层高强度开采的主要技术特征。基于绿色开采理念,从地质采矿技术和采动影响破坏方面研究建立了高强度开采的主要技术指标和评价体系,并采用层次分析法对采动影响破坏指标进行了分析研究。研究表明,地质采矿技术因素和采动影响破坏因素均是描述厚煤层高强度开采的重要组成部分,采动影响破坏因素是厚煤层高强度开采不可忽略的特征。研究成果可为煤矿安全高效绿色生产、采动损害与保护等提供借鉴。

关键词:高强度开采;厚煤层开采;采动损害与保护;绿色开采

中图分类号:TD821

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2018)08-2117-09

Study on the technical characteristics and index of thick coal seam high-intensity mining in coalmine

GUO Wenbing^{1,2}, BAI Erhu¹, YANG Daming¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovative Center of Coal Safety Production in Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: On the basis of analyzing the current situation and definition of high-intensity mining in coalmine, the main technical characteristics of high-intensity mining in thick coal seam were systematically studied from the aspects of geological and mining condition, working face size, technical equipment, advance speed, high production and efficiency, ratio of depth to thickness, overburden strata and ground surface destruction. Based on the concept of green mining, the main technical indexes and evaluation system of high-intensity mining had been established from the aspects of geological and mining technology, and mining influence and failure. Meanwhile, the analytic hierarchy process (AHP) was used to analyze the mining influence and failure index. The results demonstrate that geological and mining technical factor and mining influence and failure factor are important parts of high-intensity mining of thick coal seam. Moreover, mining influence and failure factor is an important characteristic that cannot be ignored in high-intensity mining of thick coal seam. The research results provide a theoretical and technical basis for safe and efficient green production, mining damage and protection in coalmine.

Key words: high-intensity mining; thick coal seam mining; mining damage and protection; green mining

我国中东部地区煤炭资源逐渐枯竭,煤炭开采战略重心向西部地区转移。西北地区煤炭资源丰富,煤

层地质条件简单,适宜进行高强度开采,而神东矿区是我国首个亿吨级煤炭生产基地。同时,西北地区将

收稿日期:2017-11-10 修回日期:2018-01-18 责任编辑:常明然

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774111,51374092);河南省科技创新杰出人才资助项目(184200510003)

作者简介:郭文兵(1969—),男,河南商丘人,教授,博士生导师。Tel:0391-3987902, E-mail:guowb@hpu.edu.cn

成为我国能源供应的主要基地。

随着采煤技术不断发展、工作面机械装备制造水平的提高以及管理水平的不断提升,尺寸较大、推进速度较快、产量大、效率高的高强度开采已成为我国厚煤层开采的主要发展方向^[1-2],如神东上湾煤矿已顺利完成世界首个 8.8 m 大采高综采工作面的圈面工作,潞安王庄煤矿复杂条件 7.2 m 大采高工作面以及大同塔山煤矿一次采出厚度近 20 m 的大采高综放工作面等。在高强度开采技术装备方面,①对于综采来说,王国法^[3]于 2006 年首次提出了厚煤层阶梯式一次采全高采煤方法,并发明了超大采高液压支架及工作面端头大梯度过度配套方式,研制了国内外首台 7.2 m 超大采高液压支架、首套超大运力 SGZ1400/3×1500 中双链刮板输送机(输送能力 4 500 t/h,装机功率 4 500 kW)等成套技术装备;研制了大断面巷道组合式超前支护液压支架实现了巷道超前自动化支护;②对于综放来说,根据塔山煤矿地质采矿条件,研制了抗冲击、快速卸载防片帮的大采高综放液压支架(支撑高度 2.8~5.2 m,工作阻力 15 000 kN)、高效高可靠性电牵引采煤机(截割高度 2.8~5.5 m、功率 1 945 kW、截割功率 750 kW、最大牵引速度 15~25 m/min、最大牵引力 2×570 kN)以及大运量 SGZ1200/2×1000 型后部刮板输送机(装机功率为 2×1 000 kW、输送能力超过 3 000 t/h)的“三机”配套设备以及高强度、紧凑型端卸机头架。通过现场对工作面“三机”、带式输送机及供电系统等的监测表明,所研制的设备配套合理,可靠性高,首次实现了国产工作面装备特厚煤层大采高综放工作面年产 1 000 万 t 的目标^[4]。2017 年上半年,晋陕蒙累计煤炭总量占全国煤炭产量的 67%,但由于西北地区属于干旱半干旱区,其水分蒸发强烈、干旱少雨、植被覆盖率低、抗扰动能力差且生态环境极为脆弱,大规模高强度开采不仅造成覆岩的矿压显现更加剧烈,回采过程中引起工作面顶板切落压架、突水溃沙等矿井灾害,而且也引起了地下水资源流失、地表破坏、草地荒漠化以及生态环境污染^[5-8]。

近年来,高强度开采逐渐受到人们的关注,范立民指出煤炭开采强度与地质灾害发育程度具有明显关系,并从平面上开采面积、空间上工作面开采尺寸以及时间上开采速度方面对高强度开采进行了定义,按开采强度划分标准对高强度开采的分区进行了划分^[9]。郭文兵指出高强度开采不能仅看到地质采矿技术参数的提升或变化,还应考虑到采动影响破坏问题,在绿色开采理论的基础上,将高强度开采与地表破坏、环境影响相结合,提出了基于绿色开采理论的

高强度开采定义^[10]。在高强度开采定义的基础上,进一步研究了高强度开采的技术特征及其参数,并采用层次分析法确定了高强度开采各技术参数的权重值,为煤矿安全高效绿色生产、采动损害与保护等提供理论基础和技术依据。

1 高强度开采技术特征及其参数

通过对地质采矿技术因素及采动影响破坏因素研究可知,高强度开采的技术特征主要为:地质采矿条件简单、工作面尺寸大、工作面技术装备水平高、工作面推进速度快、工作面单产大,效率高、开采厚度大,深厚比小、上覆岩层破坏严重、地表移动变形剧烈等。表 1 为部分西北矿区厚煤层高强度长壁开采工作面的参数。现分别对高强度开采技术特征及其参数进行分析。

(1)地质采矿条件简单。地质采矿条件是矿井进行生产的基本条件,主要包括煤层赋存情况及覆岩性状。通过对西北各矿区及神东、蒙东、宁东等 25 个主力矿井的生产地质资料分析可知,在进行高强度开采时,地质采矿条件一般为简单类型,即煤层赋存稳定,结构简单;主要以近水平煤层为主;总体上埋深较小;覆岩结构稳定完整,受构造影响程度低等。同时在一般情况下,地质采矿条件简单的矿井,其设计生产能力一般较大。这是由于简单地质类型条件下的矿井对其生产系统的限制较少,更适宜进行大规模高强度开采。因此,地质采矿条件简单的矿井更适宜进行高强度开采。

(2)工作面尺寸大。为反映高强度开采工作面宽度及推进长度的相互关系,根据所搜集的样本数据,得出了高强度开采工作面宽度与推进长度分布如图 1 所示。

由图 1 可知,工作面宽度基本位于光滑的同心圆上,表明在高强度开采条件下,工作面宽度分布较集中、一致,普遍大于 200 m,且多集中分布于 200~300 m,少数可达 450 m(哈拉沟矿^[11]);而推进长度呈现出近似圆形,表明推进长度与工作面宽度具有协调一致性及同步性。由于工作面宽度大,所以其推进长度也比较长,一般介于 1~5 km,少数可达 6 km 以上(补连塔矿、大柳塔矿等)。工作面尺寸大可间接反映出工作面产量大,符合高强度开采在地质采矿技术因素的范畴。

(3)工作面技术装备水平高。由于高强度开采工作面尺寸大,对其配套技术装备要求也相应较高。高强度开采一般采用大采高综采或综放开采方法,且是特厚煤层开采的发展方向,具有产量高、机械化程

表 1 部分西北地区高强度开采工作面参数

Table 1 Part of the parameters of coal mine under high-intensity mining in Northwest China

名称	埋深/m	采高/m	倾角/(°)	工作面尺寸/m	日进尺/m	产量/万 t	采煤方法
补连塔煤矿 32301	183	6.10	1~3	301×5 220	9.20	1 248	大采高综采
布尔台煤矿 42105	261~394	6.70	1~9	230×5 231	5.20	1 050	综采放顶煤
昌汉沟煤矿 15106	94~136	5.20	1~3	300×2 800	17.20	569	大采高综采
大柳塔煤矿 52304	136~281	6.80	1~3	301×4 547	13.80	1 212	大采高综采
活鸡兔煤矿 12205	30~100	4.60	0~3	230×2 235	15.50	331	大采高综采
上湾煤矿 51102	85~170	5.20	1~3	240×3 500	8.38	569	大采高综采
寺河煤矿 2307	199~347	6.20	1~10	221.5×2 984	6.40	534	大采高综采
羊场湾煤矿 Y110206	330	6.20	15~20	299×1 976	13.38	476	大采高综采
红柳煤矿 1121	278	6.00	0~18	302×1 900	9.44	448	大采高综采
张家崮煤矿 15201	88~133	6.10	1~3	261×2 295	7.00	475	大采高综采
同忻煤矿 8101	411~486	14.13	0~4	200×1 678	9.75	617	综采放顶煤
榆树湾煤矿 20102	110~300	11.62	0~3	250×5 850	5.90	2 213	综采放顶煤
杭来湾煤矿 30101	230	5.00	1	299.5×4 252	14.40	829	综采放顶煤
万利一矿 42301	90~175	4.80	3~7	300×3 322	12.60	623	大采高综采
三道沟煤矿 85203	121.3	6.30	1~3	295×3 160	15.00	765	大采高综采
哈拉沟煤矿 22407	121.3	5.39	1~3	284×3 224	15.57	643	大采高综采
麻家梁煤矿 14101	574.5	9.15	3~4	250×2 309	13.60	686	综采放顶煤

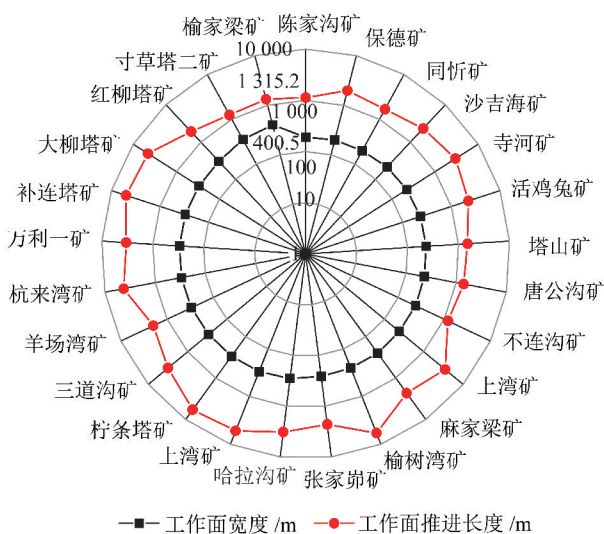


图 1 高强度开采工作面宽度与推进长度分布

Fig. 1 Width and length distribution of high-intensity mining

度高、工效高、能耗低等特点;而其技术装备是影响工作面安全高效生产、高采出率的关键。大采高综采技术自 1978 年引进我国以来,得到了较快发展。神东矿区于 1994 年从国外成套引进先进设备,实现了煤炭开采系统的全面机械化、现代化。通过对设备的使用、改进及重新选型,国内为提高煤炭资源的采出率也进行了自主研发,如:郑州煤矿机械集团股份有限公司于 2005 年为晋煤研制出 5.5 m 大采高液压支架的同时,开了高端液压支架国产化的先河,打破了国际煤机巨头对中国高端煤矿综采/综放装备的全面垄

断局面;伴随着大采高综采装备能力的提高,一次割煤高度不断增加。此外,2015 年研制出目前世界上工作阻力最大、支护高度最高、配套生产能力最大、智能化技术最先进的超大采高(8.8 m)支架。2016 年 4 月,兖州金鸡滩煤矿成功完成了 8.2 m 超大采高综采技术与成套装备地面联合试运转;2017 年 1 月,神东集团补连塔煤矿 12511 工作面成功装备 8.0 m 采高液压支架;同年 8 月,世界首个 8.8 m 大采高综采工作面(长 5 262 m,宽 299.2 m)在上湾煤矿顺利完成圈面工作;同年 11 月在西安煤矿机械有限公司召开的国产首台套高性能 8 m 大采高采煤机出厂评议会,专家评议委员会一致认为,该采煤机可满足 8 m 大采高工作面开采需求,同意出厂并进行井下工业性试验。

在综采放顶煤方面,塔山煤矿于 2010 年进行了平均厚度 18.44 m 工业性试验并获成功,2014 年由中煤科工集团有限公司研发的“特厚煤层大采高综放开采关键技术及装备”项目成功解决了 14~20 m 特厚煤层开采的难题。对于端头支护而言,当前的采煤工作面两端头和巷道超前支护主要以单体液压支柱配以金属铰接顶梁进行支护,无法实现超前支护的机械化。针对这一问题,王国法^[12]开发了综放工作面端头和巷道超前液压支架支护系统,克服了传统支护方式的局限性,能够保证工作面巷道的安全。

针对高强度开采高产能的特点,采用斜井、平硐

或斜硐开拓的矿井,一般采用大运力、高带速的强力带式输送机,立井提升设备由单绳缠绕的滚筒式绞车发展到多绳摩擦提升机。提升容器也不断加大,提煤箕斗由 3 t 发展到 40~50 t。在辅助运输方面,由于无轨胶轮车的运输速度快、灵活、适应性强、运输效率高特点,大型或特大型矿井一般都采用无轨胶轮辅助运输,不仅能实现地面至井下的直达运输,同时大大减少矿井辅助运输人员。由此可以看出,工作面技术装备水平高是厚煤层高强度开采的一个重要技术特征。

(4)工作面推进速度快。厚煤层高强度开采工作面普遍采用综合机械化一次采全高(大采高)或综采放顶煤开采技术,工作面推进速度一般较大。根据 25 个厚煤层高强度开采工作面的样本统计,推进速度最大的是榆家梁矿 45203 综采工作面,推进速度为 18.9 m/d。在煤层赋存条件较为理想的情况下,神东矿区多个煤矿甚至出现过 20 m/d 的推进速度。其中样本内工作面推进速度大于 5 m/d 的占 84%,大于 10 m/d 的占 40%,如图 2 所示。

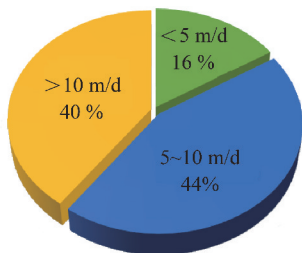


图 2 高强度开采矿井推进速度分布

Fig. 2 Velocity distribution of high-intensity mining

研究表明^[13-14],适当的提高工作面推进速度可有效地延长工作面周期来压步距,减小顶板的下沉,有利于巷道的稳定及工作面的安全生产。但随着推进速度的继续增大,作用于煤体的最大主应力加载速率和最小主应力卸载速率升高,顶板动力扰动使煤体同时承受动、静组合加载形式,且分布于浅部围岩中的应变能密度及煤层中的应变能峰值增大,导致围岩动力灾变的概率增大,危害程度升高^[15]。由于在高强度开采影响下,工作面会发生整体煤壁片帮事故或基本顶断裂造成的动载冲击引起的大范围切顶压架事故(神东矿区、王庄矿 8101 工作面等),导致岩层与地表移动更为剧烈。因此,工作面推进速度快可作为高强度开采的技术特征之一,也是诱发采场顶板灾害的一个因素。

(5)工作面单产大,效率高。工作面单产的直接影响因素为工作面尺寸、煤层开采厚度和推进速度。根据上述高强度开采的其他技术特征并结合高强度

开采定义可知,工作面尺寸大、煤层开采厚度大决定了工作面单产大;而工作面技术装备水平高及推进速度快决定了工作面效率高。通过对样本的统计,高强度开采矿井工作面单产分布如图 3 所示,年产 5 Mt 以上的达到 50% 以上。部分厚煤层高强度工作面的工效见表 2,最大回采工效达 890.9 t/工。

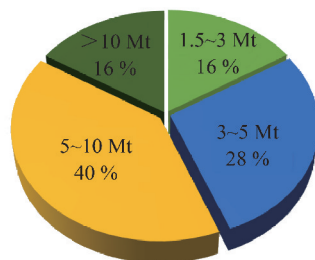


图 3 高强度开采工作面产量分布

Fig. 3 Production distribution of high-intensity mining

表 2 高强度开采工作面工效

Table 2 Efficiency distribution of high-intensity mining

矿名	工作面尺寸/m	采高/m	倾角/(°)	回采工效/(t·工 ⁻¹)	全员工效/(t·工 ⁻¹)
补连塔矿	301×5 220	6.10	1~3	890.9	150.5
上湾矿	240×3 500	5.20	1~3	859.0	158.0
哈拉沟矿	284×3 224	5.40	1~3	805.5	198.0
榆家梁矿	400.5×1 315	3.60	0~1	704.7	—
大柳塔矿	301×4 547	6.80	1~3	618.0	125.0
三道沟矿	295×3 160	6.30	1~3	541.7	—
布尔台矿	230×5 231	6.70	1~9	490.5	—
同忻矿	200×1 678	14.13	0~4	443.6	79.2
塔山矿	230×1 500	17.00	3~10	299.1	98.0

近年来,国家大力推进“两化融合”(以信息化带动工业化、以工业化促进信息化),促进“智慧矿山”技术的发展。采用信息化、数字化、物联网、人工智能、大数据等新技术提升和改造传统采矿模式,安全、高效、绿色的智能采矿、少(无)人工作面会大幅度提高工效。如:神华集团首创无人操作的智能采煤技术,建立“智能+远程干预”的采煤新方法,达到“有人巡视、无人操作”的可视化远程干预型智能采煤。智能化无人开采已在神华集团、陕煤化集团、冀中能源、阳煤集团等 15 个矿区进行了应用,已有 40 余个无(少)人工作面,其中黄陵一号煤矿 1001 工作面为我国首个无人开采中厚偏薄煤层工作面;红柳林煤矿首次采用人机智能融合混合控制的生产模式进行了最大采高 7.2 m 的厚煤层开采,年产量高达 1 009.72 万 t;新元煤矿采用采煤机速度与瓦斯浓

度的联动控制对高瓦斯工作面进行了开采;梅花井开采了 $9^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的煤层;石圪台煤矿实现了采煤机、支架、移动变电站等关键设备的远程控制等等。这些技术的成功应用不仅改善了工人的作业环境,降低工人的劳动强度,节省了 90% 以上的人工成本,而且对工作面生产效率及工作面安全系数的提升具有十分重要的意义。对于高强度开采矿井来说,综采装备的发展必将在行业整体环境影响下,向高智能、高信息化的方向发展,最终实现工作面无无人化开采^[16],此时工作面工效将会更高。

(6) 开采厚度大,深厚比小。煤层深厚比是煤层采深与采厚的比值,是衡量覆岩与地表移动变形程度的参数。在定性评价中,深厚比是判定采空区上方覆岩与地表变形强弱的指标。一般情况下,深厚比的大小与地表移动变形的强弱呈负相关性,即比值越大地表移动变形及破坏程度越小,这是由于地表点在时空演变上是连续平缓渐变的,具有规律性;比值越小时,地表点的移动变形越剧烈,具有突变性,对地表的破坏程度越大。图 4 为 25 个样本的深厚比分布,其中埋深以平均埋深计算。

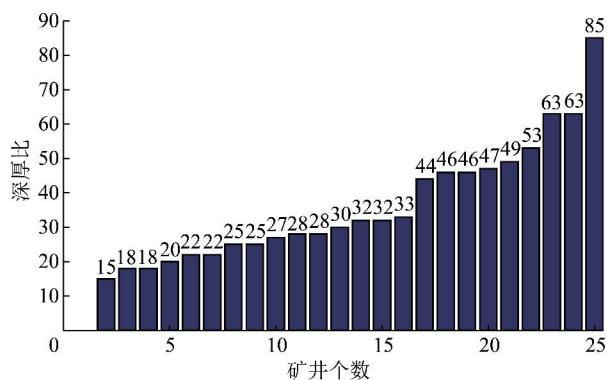


图 4 高强度开采样本工作面深厚比

Fig. 4 H/M distribution in high-intensity mining coal mines

由上图可知,高强度开采工作面的深厚比一般较小,主要由于煤层埋藏浅,开采厚度大所造成的;其中样本中深厚比最大值为 85,埋深小于 300 m 的占 80%。同时根据研究可知^[10],当深厚比 $H/M \leq 100$ 时,相应的地表水平变形值与倾斜值均大于《规范》^[17]中关于建(构)筑物损坏等级的 IV 级标准。考虑到高强度开采工作面的采动影响破坏因素,深厚比小是高强度开采工作面的普遍特征之一。

(7) 上覆岩层破坏严重。覆岩的断裂破坏是引起采空区动力失稳的内在原因,由于高强度开采工作面尺寸大、推进速度快,导致覆岩破坏剧烈。主要体现在两个方面,一是开采引起的“两带”高度大,引发地下水渗流场演化和地表生态环境的恶化,使得干旱

半干旱区的生态环境更加恶劣;二是部分样本覆岩的破坏模式由“三带”模式变成“两带”模式(图 5),易形成突水溃沙及漏风通道,威胁煤矿生产安全。同时现场观测、理论计算及相似模拟实验均对覆岩破坏的两个方面进行了验证^[18]。

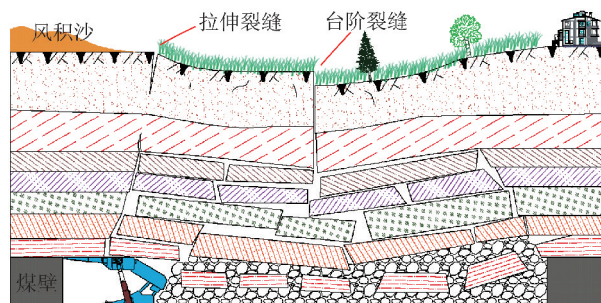


图 5 覆岩“两带”模式示意

Fig. 5 “Two zone” mode in overburden strata

根据相关文献^[19]对高强度开采覆岩破坏的现场探测,表明导水裂缝带发育非常充分,其高度与采厚近似呈正比,同时验证了覆岩破坏的“马鞍形”形态。在满足地质采矿技术因素的高强度开采时,工作面的“两带”高度计算公式大于《“三下”规范》中的传统经验公式,如图 6 所示。由此可知,高强度开采对上覆岩层破坏严重是高强度开采的主要特征之一。

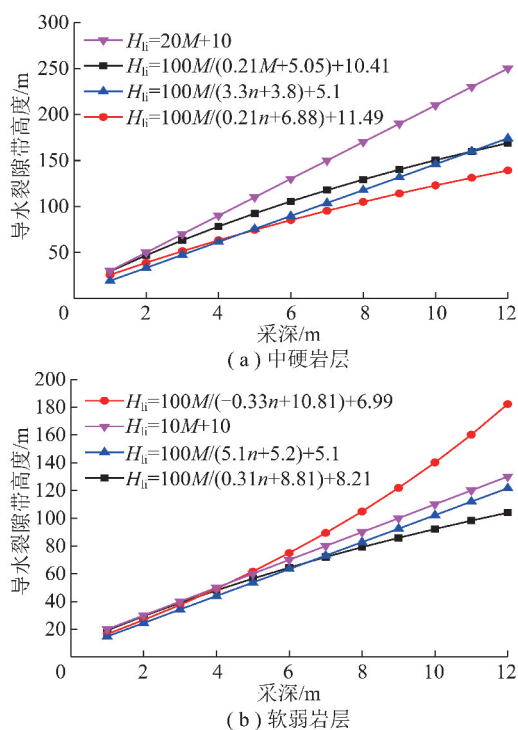


图 6 “两带”高度公式对比

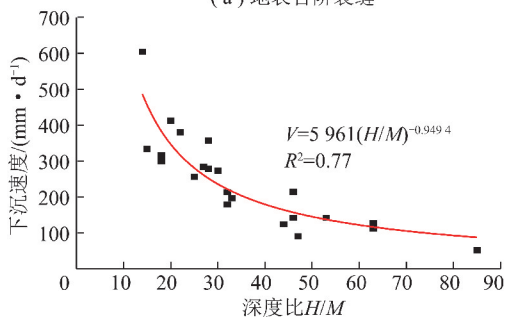
Fig. 6 Comparison of “Two zone” height formula

(8) 地表移动变形剧烈。基于高强度开采地质采矿技术方面的因素,高强度开采具有特殊的地表变形特征,开采引起地表移动变形具有地表非连续破

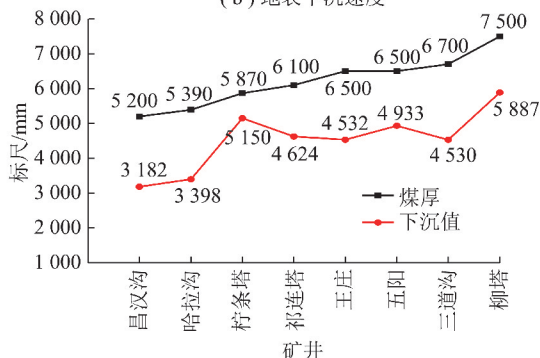
坏严重(图7(a))等特点。由于埋藏浅、采厚大、工作面推进速度快等常出现地表裂缝^[20],根据裂缝形成机理分为拉伸型裂缝、剪切(滑移)型裂缝和塌陷型裂缝。



(a) 地表台阶裂缝



(b) 地表下沉速度



(c) 地表下沉值

图7 地表移动变形剧烈

Fig.7 Severe surface movement and deformation

厚煤层高强度开采工作面地表下沉速度快(图7(b)),地表移动变形值大(图7(c))等特点,对地表建筑物破坏严重,对生态环境扰动显著。

通过对样本中最大深厚比的寸草塔二矿31101工作面进行分析可知,在工作面推进距开切眼41 m时,地表开始塌陷呈椭圆形,裂缝宽为100~600 mm,深度为1~7 m。通过对哈拉沟煤矿进行现场实测可知,①地表非连续破坏严重。高强度开采工作面地表裂缝密集、宽度大,且常伴有台阶落差,部分区域甚至出现塌陷坑,裂缝一般发育至离采空区边界较近的外侧,整体呈“C”或“O”型分布。②地表下沉速度快。地表下沉速度较大,最高达700.5 mm/d。开采后短期内地表产生明显的移动变形且持续时间短,活跃阶段下沉量较大,具有突变特征。③地表移动变形剧烈。移动变形影响范围相对较小,下沉曲线陡

峭,主要原因是主要影响半径较小;地表裂缝角(72°~90°)及最大下沉角(89°~90°)偏大,主要影响半径偏小,下沉系数与水平移动系数偏大。由于高强度开采的地质采矿技术特征普遍引起了地表的严重破坏,因此地表移动变形剧烈是高强度开采的主要特征。

综上所述,可确定高强度开采的技术特征包括以下8个方面,即地质采矿条件简单、工作面尺寸大、工作面技术装备水平高、工作面推进速度快、工作面单产大,效率高、开采厚度大,深厚比小、上覆岩层破坏严重、地表移动变形剧烈。

2 高强度开采的指标体系

基于对高强度开采技术特征的分析及绿色开采理念,从地质采矿技术方面及采动影响破坏方面研究给出了高强度开采的指标体系,共12项指标,如图8所示。

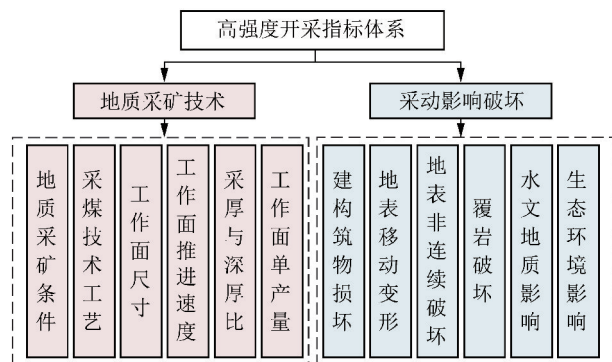


图8 高强度开采指标体系

Fig.8 Index system of high-intensity mining

地质采矿技术指标表明矿井具有高产高效的能力,而采动影响破坏指标是开采对生态系统造成的影响程度,地质采矿技术指标是采动影响破坏指标的基础,一般情况下两者是共生的。地质采矿技术因素和采动影响破坏因素均是描述厚煤层高强度开采的重要组成部分,采动影响破坏因素是厚煤层高强度开采不可忽略的重要特征。根据目前厚煤层高强度开采的发展现状,确定高强度开采的指标参数见表3。

3 高强度开采技术特征分析

西北地区为我国典型的高强度开采矿区,众多学者对高强度地质灾害发生机理及防治进行了大量研究,并取得了一定的成果^[21-23]。现以高强度开采的地质采矿技术因素与采动影响破坏因素进行分析,基于模糊数学的原理,采用层次分析法对高强度开采技术指标的权重进行分析。

表 3 高强度开采的指标体系参数
Table 3 Index system parameters of high-intensity mining

指标类型	序号	指标内容	指标特征	样本统计指标
地质采矿技术指标	1	地质采矿条件	简单	构造简单,煤层赋存稳定,覆岩结构完整
	2	采煤技术工艺	大采高、综放	大采高综采、综采放顶煤、综合机械化分层
	3	工作面尺寸/m	长 $\geq 1\ 000$,宽 ≥ 200	长:1 200 ~ 5 850,宽:198 ~ 400.5
	4	工作面推进速度/(m·d ⁻¹)	≥ 5	2.2 ~ 20
	5	采厚与深厚比	$M \geq 3.5$ m,深厚比 < 100	煤层 3.5 ~ 8.0 m,大采高 3.5 ~ 8.8 m,特厚煤层 > 8.0 m;实际深厚比:14 ~ 85
	6	工作面单产/Mt	≥ 300	176 ~ 2 212
采动影响破坏指标	7	建(构)筑物损坏	损坏程度达到Ⅳ级	依据《砖石结构建筑物损坏等级》
	8	地表移动变形	下沉及水平移动量大;倾斜 > 10 mm/m,曲率 > 0.6 mm/m ² ,水平变形 > 6 mm/m	实测值:下沉 2.55 ~ 11.90 m,倾斜 40.2 ~ 215 mm/m,曲率 0.27 ~ 8.40 mm/m ² ,水平移动 799 ~ 3 284 mm,水平变形 8 ~ 89.3 mm/m
	9	地表非连续破坏	裂缝,台阶裂缝,塌陷坑,边坡失稳,矿震	依据:现场调研、观测
	10	上覆岩层破坏	部分为“两带”模式,“两带”高度大,裂缝发育	依据:综合判断(现场监测、计算、钻孔等)
	11	水文地质影响	含水层破坏,地下水流失,潜水位下降,水体污染	依据:《地下水环境质量标准》、《煤炭工业污染物排放标准》及现场监测
	12	生态环境影响	植被退化,土地利用降低,生态破坏,生物多样性降低	依据:现场调研、观测

3.1 层次分析法

层次分析法是由 SAATY T L 于 1977 年提出的,是目前评价指标定权的主流方法。它实现了定量与定性分析的结合,将复杂的问题分解成不同的因素,通过两两相互比较确定各因素的重要程度。通过对各评价指标间进行层次化分析,建立多层次结构模型,采用 9 级标度方法进行比较、量化。根据两两比较结果构造判断矩阵,即可得到判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 及其对应的特征向量 ω ,并通过特征向量归一化求取各个元素的权重值。由于影响因素的复杂性和专家意见的不一致性,判断矩阵不一定满足完全一致性,必须对结果进行一致性检验,计算一致性比率 CR 可由如下公式进行计算:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - 1}{RI(n - 1)}$$

式中, CR 为判断矩阵的一致性比率; CI 为一一致性指标; RI 为随维数 n 变化的平均随机一致性指标,取值见表 4; n 为维数。

CR 的值与判断矩阵的一致性呈负相关关系,即 CR 越小,判断矩阵越满足一致性。规定当 $CR < 0.1$

时,认为判断矩阵满足一致性,所得模型评价指标权重合理,否则就需要重新调整判断矩阵。

表 4 平均随机一致性指标值
Table 4 Mean random consistency index

维数 n	3	4	5	6	7	8
RI	0.58	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41

3.2 高强度开采技术特征分析及权重计算

高强度开采的技术特征主要分为地质采矿技术因素和采动影响破坏因素。其中地质采矿技术因素主要包括地质类型简单、工作面尺寸大、工作面技术装备水平高、工作面推进速度快、工作面单产及效率高、开采厚度大且深厚比小等;采动影响破坏因素主要包括上覆岩层破坏严重和地表移动变形剧烈。现对以上各影响因素进行分析计算。

判断矩阵是根据两两因素间相互比较来确定各影响因素的重要性,通过对各影响因素进行量化并构建影响因素的判断矩阵。高强度开采各技术特征判断矩阵见表 5。

表 5 高强度开采技术特征的判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of technical characteristics of high-intensity mining

	地质类型	工作面尺寸	技术装备	推进速度	单产及效率	深厚比	覆岩破坏	地表变形
地质类型	1	1/2	1/5	1/3	1/4	1/6	1/5	1/6
工作面尺寸	2	1	1/2	1/3	1/3	1/4	1/3	1/4
技术装备	5	2	1	2	1/2	1/2	1/2	1/3
推进速度	3	3	1/2	1	1/2	1/3	1/3	1/4
单产及效率	4	3	2	2	1	1/2	1/2	1/3
深厚比	6	4	2	3	2	1	2	1
覆岩破坏	5	3	2	3	2	1/2	1	1/2
地表变形	6	4	3	4	3	1	2	1

由此判断矩阵可知该矩阵的特征向量(并进行归一化)与最大特征根为: $\omega = (0.028\ 6, 0.047\ 1, 0.098\ 5, 0.072\ 3, 0.119\ 8, 0.218\ 6, 0.161\ 4, 0.253\ 7)^T$, $\lambda_{\max} = 8.275\ 3$, 并对判断矩阵进行一致性检验,由式(1)及表3可得: $CI = 0.039$, $CR = 0.028 < 0.1$ 。因此,所得的判断矩阵符合一致性条件,即特征向量 ω 的各分量作为各技术特征权重的分配是合理的。

由技术特征的权重可知,采动影响破坏因素与地质采矿技术因素占据了同等重要地位,高强度开采的技术特征不能仅仅考虑地质采矿技术因素。同时研究表明^[24-25],在高强度开采矿区,开采引起的覆岩破坏及地表移动变形较严重,对生态环境的影响较恶劣。因此,权重系数在一定程度上反映了实际情况,具有可靠性;同时也验证了笔者基于绿色开采提出的高强度开采定义具有合理性。

在高强度开采的指标体系中,采动影响破坏指标占了6个,其主要用于判别煤矿长壁开采工作面是否为高强度开采,或对高强度开采工作面采后造成的建(构)筑物、覆岩与地表破坏及矿区生态环境进行评判和分析预警。

4 结 论

(1)在分析我国煤矿厚煤层高强度开采现状与定义的基础上,系统研究了厚煤层高强度开采的主要技术特征及其参数,包括8个方面:地质采矿条件简单,工作面尺寸大,工作面技术装备水平高,工作面推进速度快,工作面单产大效率高,开采厚度大深厚比小,上覆岩层破坏严重,地表移动变形剧烈。

(2)基于绿色开采理念,从地质采矿技术方面和采动影响破坏方面研究建立了厚煤层高强度开采的主要技术指标和评价体系,评价指标体系包含了地质采矿技术指标和采动影响破坏指标共计12个指标。

(3)采用层次分析法对厚煤层高强度开采的主要技术指标进行了分析。地质采矿技术因素和采动

影响破坏因素是描述厚煤层高强度开采的两个重要方面,其中采动影响破坏因素是厚煤层高强度开采不可忽略的特征。研究成果对于煤矿安全高效绿色生产、采动损害与保护等具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 王金华. 特厚煤层大采高综放开采关键技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2089-2098.
WANG Jinhua. Key technology for fully-mechanized top coal caving with large mining height in extra-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2089-2098.
- [2] 孙亚军, 张梦飞, 高尚, 等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 56-65.
SUN Yajun, ZHANG Mengfei, GAO Shang, et al. Water-preserved mining technology and practice in typical high intensity mining area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 56-65.
- [3] 王国法. 综采成套技术与装备系统集成[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [4] 王金华. 特厚煤层大采高综放工作面成套装备关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 1-5.
WANG Jinhua. Key technology of complete equipment for fully-mechanized top coal caving face with large mining height in extra-thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 1-5.
- [5] 杨登峰, 陈忠辉, 洪钦锋, 等. 浅埋煤层开采顶板切落压架灾害的突变分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 122-127.
YANG Dengfeng, CHEN Zhonghui, HONG Qinfeng, et al. Catastrophic analysis of support crushing disasters while roof cutting in shallow seam mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 122-127.
- [6] 张蓓, 张桂民, 张凯, 等. 钻孔导致突水溃沙事故机理及防治对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 219-226.
ZHANG Bei, ZHANG Guimin, ZHANG Kai, et al. Water and sands bursting mechanism induced by geological borehole and control measures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2): 219-226.
- [7] 雷少刚, 卞正富. 西部干旱区煤炭开采环境影响研究[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2837-2843.

- LEI Shaogang, BIAN Zhengfu. Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2837-2843.
- [8] 刘辉, 何春桂, 邓喀中, 等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 380-384.
- LIU Hui, HE Chungui, DENG Kazhong, et al. Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 380-384.
- [9] 范立民, 马雄德, 李永红, 等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 276-285.
- FAN Limin, MA Xiongde, LI Yonghong, et al. Geological disasters and control technology in high intensity mining area of western China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 276-285.
- [10] 郭文兵, 王云广. 基于绿色开采的高强度开采定义及其指标体系研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(4): 616-623.
- GUO Wenbing, WANG Yunguang. The definition of high-intensity mining based on green coal mining and its index system [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(4): 616-623.
- [11] 杨敬虎, 孙少龙, 孔德中. 高强度开采工作面矿压显现的面长和推进速度效应[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S2): 333-340.
- YANG Jinghu, SUN Shaolong, KONG Dezhong. Effect of working face length and advancing speed on strata behaviors in high-intensity mining [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S2): 333-340.
- [12] 王国法. 煤矿高效开采工作面成套装备技术创新与发展[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(1): 63-68.
- WANG Guofa. Innovation and development of completed set equipment and technology for high efficient coal mining face in underground mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(1): 63-68.
- [13] 王金安, 焦申华, 谢广祥. 综放工作面开采速度对围岩应力环境影响的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1118-1124.
- WANG Jin'an, JIAO Shenhua, XIE Guangxiang. Study on influence of mining rate on stress environment in surrounding rock of mechanized top caving mining face [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1118-1124.
- [14] 谢广祥, 常聚才, 华心祝. 开采速度对综放面围岩力学特征影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(7): 963-967.
- XIE Guangxiang, CHANG Jucui, HUA Xinzhu. Influence of mining velocity on mechanical characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(7): 963-967.
- [15] 杨胜利, 王兆会, 蒋威, 等. 高强度开采工作面煤岩灾变的推进速度效应分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 586-594.
- YANG Shengli, WANG Zhaohui, JIANG Wei, et al. Advancing rate effect on rock and coal failure format in high-intensity mining face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 586-594.
- [16] 王金华, 黄乐亭, 李首滨, 等. 综采工作面智能化技术与装备的发展[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1418-1423.
- WANG Jinhua, HUANG Leting, LI Shoubin, et al. Development of intelligent technology and equipment in fully-mechanized coal mining face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1418-1423.
- [17] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 2017.
- [18] 路学忠. 宁东煤田采煤沉陷地质灾害规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- LU Xuezhong. Laws of ground subsidence geology hazards during coal mining in Eastern Ningxia coalfield [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [19] 朱伟, 滕永海, 郑志刚. 厚黄土下综放高强度开采地表沉陷与覆岩破坏实测[J]. *金属矿山*, 2015(4): 123-126.
- ZHU Wei, TENG Yonghai, ZHENG Zhigang. Field measurement on ground subsidence and overburden failure by high intensity fully mechanized top-coal caving under thick loess [J]. *Metal Mine*, 2015(4): 123-126.
- [20] HU Zhenqi, CHEN Chao, XIAO Wu, et al. Surface movement and deformation characteristics due to high-intensive coal mining in the windy and sandy region [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2016, 3(3): 339-348.
- [21] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(5): 795-805.
- WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5): 795-805.
- [22] 王家臣, 王兆会. 高强度开采工作面顶板动载冲击效应分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 3987-3997.
- WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Impact effect of dynamic load induced by roof in high-intensity mining face [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 3987-3997.
- [23] 谭志祥, 王宗胜, 李运江, 等. 高强度综放开采地表沉陷规律实测研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2008, 25(1): 59-62.
- TAN Zhixiang, WANG Zongsheng, LI Yunjiang, et al. Field research on ground subsidence rules of intensive fully mechanized mining by sublevel caving [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(1): 59-62.
- [24] 来兴平. 西部矿山大尺度采空区衍生动力灾害控制[J]. *北京科技大学学报*, 2004, 26(1): 1-3.
- LAI Xingping. Derived dynamic disasters of large scale mined-out area for west coal mines [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2004, 26(1): 1-3.
- [25] 973 计划(2013CB227900)“西部煤炭高强度开采地质灾害防治与环境保护基础研究”项目组. 西部煤炭高强度开采地质灾害防治理论与方法研究进展[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 267-275.
- Research Group of National Key Basic Research Program of China (2013CB227900) (Basic Study on Geological Hazard Prevention and Environmental Protection in High Intensity Mining of Western Coal Area). Theory and method research of geological disaster prevention on high-intensity coal exploitation in the west areas [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 267-275.