

文章编号: 0253-9993(2009)01-0001-08

卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系

袁 亮

(煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 针对低透气性、高吸附性、高瓦斯煤层群安全高效开采技术难题, 以淮南矿区为主要试验研究基地, 应用岩石力学、岩层移动、“O”形圈、瓦斯流动等理论, 研究卸压开采采场内岩层移动及应力场分布规律、裂隙场演化及分布规律、卸压瓦斯富集区及运移规律等科学规律。针对不同煤(岩)层和瓦斯地质条件, 探索出卸压开采抽采瓦斯理论, 建立了卸压开采抽采瓦斯、煤与瓦斯共采技术体系。创新了低透气性、高瓦斯煤层群安全高效开采矿井设计理论, 解决了煤与瓦斯共采重大工程技术难题。

关键词: 煤与瓦斯共采; 低透气性煤层; 复杂地质条件

中图分类号: TD712.6 **文献标识码:** A

Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction

YUAN Liang

(National Engineering Research Center for Coal Mine Gas Controlling, Huainan 232001, China)

Abstract: To resolve the problems of safe and high-efficient mining of gassy multi-seam of low permeability and high absorbability, based on the theories of rock mechanics, strata movement, O-type circle and gas movement, and taken Huainan mining area as main research base and studied rock movement and stress field distributing theory, cranny field evolvment and distributing theory, abundant zone of pressure-relieved gas and movement theory. Discovered pressure-relieved mining and gas extraction theory, built the technical system of pressure-relieved gas extraction and integrated coal production and gas extraction for different geological conditions of coal seam (rock strata) and gas. It innovated the mine designing theory for safe and high-efficient mining of gassy multi-seam of low permeability and resolved the technical problem of integrated coal production and gas extraction.

Key words: coal mining and gas extraction; low-permeability coal seams; complicated geological condition

制约淮南矿区安全高效开采的科学技术难题, 主要是瓦斯治理、巷道支护和矿井设计理论与技术。瓦斯治理是矿区安全高效开采的前提和基础, 松软低透气性煤层条件下的煤矿瓦斯治理和煤层气地面开发, 是世界性技术难题, 20世纪80年代以来, 淮南矿区采用传统的瓦斯抽放技术和方法, 不能解决松软低透气性煤层群开采的瓦斯治理难题, 因此, 必须创新瓦斯治理技术; 松软煤岩巷道支护和围岩控制同样是制约淮南矿区安全高效开采的关键技术难题, 传统方法巷道变形率达50%, 通风阻力高达5.1 kPa, 无法满足矿井安全要求, 必须通过巷道支护技术创新为复杂地质条件下的瓦斯治理和安全高效开采提供良好的空间条件。传统矿井设计的井筒服务半径为5~6 km, 煤层开采程序自上而下不能实现卸压开采, 矿井通风

阻力高, 抗灾能力差, 必须创新设计理念, 实现安全高效开采矿井设计技术的突破。

1 卸压开采抽采瓦斯理论

应用岩石力学、岩层移动“O”形圈、瓦斯流动^[1-4]等理论, 结合多次煤矿井下瓦斯事故抢险经验, 总结分析事故的原因和教训, 提出必须采取卸压开采增加煤层透气性、“抽采”瓦斯的原理, 变传统瓦斯自然排放为集中“抽采”, 实现卸压开采抽采瓦斯、煤与瓦斯共采的科学构想; 提出了在煤层群中选择安全层首先开采, 形成岩层移动、煤层膨胀卸压, 使邻近煤层中 80% 以上的瓦斯由吸附状态解吸为游离状态, 在被卸压煤层顶底板设计巷道、钻孔抽采卸压瓦斯的技术路线, 进行了几十种模拟研究: 探索揭示出卸压开采采场内应力场分布规律; 首采层开采后顶板存在环形裂隙区、顶底板被卸压煤层膨胀变形区的裂隙场分布及演化规律; 瓦斯富集区分布及运移规律, 在百余个工作面的现场工业性试验中, 研究成功首采层开采之后, 大量解吸瓦斯在抽采负压作用下沿卸压张裂隙径向流动的卸压开采抽采瓦斯原理(图 1)。

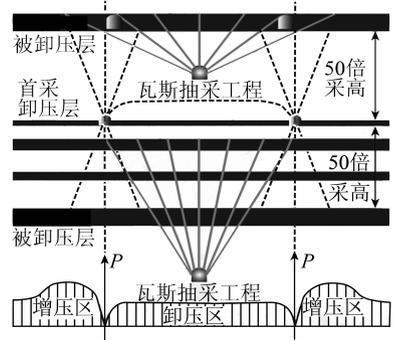


图 1 卸压开采抽采瓦斯原理

Fig. 1 The principle of pressure-relieved gas extraction

在成功研究卸压开采抽采瓦斯技术的基础上, 发现了该研究成果存在瓦斯抽采巷道、钻孔工程量大的新的技术问题, 2004 年又提出了无煤柱煤与瓦斯共采的科学构想: 走采煤工作面无煤柱沿空留巷, 替代顶底板瓦斯抽采岩巷、变传统“U”型为“Y”型通风方式、在留巷内设计钻孔连续抽采采空区瓦斯的技术路线。揭示了首采层开采后, 无煤柱沿空留巷采场内增压区、卸压区、应力恢复区的应力场分布规律; 在沿空留巷顶板岩层移动存在竖向裂隙发育区、被卸压煤层膨胀变形区的裂隙场分布及演化规律; 首采层在“Y”型通风流场下卸压瓦斯分布规律。工程实践取得了成功, 实现了无煤柱煤与瓦斯共采技术的重大突破(图 2)。

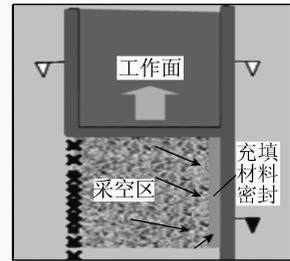


图 2 “Y”型通风系统

Fig. 2 Y-type ventilation system

卸压开采抽采瓦斯、无煤柱煤与瓦斯共采理论研究在淮南矿区取得成功, 实现了卸压层间距达 50 倍采高, 突破了 30 倍采高的传统理论。将瓦斯集中抽采到地面并加以综合利用, 建成一批发电、民用、锅炉燃烧等国际先进的瓦斯利用示范工程。

2 卸压开采抽采瓦斯、煤与瓦斯共采工程技术体系

2.1 卸压开采抽采瓦斯技术

2.1.1 首采煤层顶板瓦斯抽采技术

首采煤层工作面的瓦斯主要来源于本煤层、采空区和邻近层的卸压解吸瓦斯。由于煤层松软, 透气性低, 顺层钻孔施工困难, 抽采效果极差, 若对采空区实施大面积抽采, 工程难度大, 而且抽不出高浓度瓦斯, 因此, 寻找瓦斯运移的裂隙通道和瓦斯富集区是实施有效瓦斯抽采的技术关键。顶板瓦斯抽采同时需要获得高瓦斯浓度和大瓦斯流量, 根据矿山岩层移动理论, 煤层在开采过程中, 顶底板岩层垮落、移动, 产生裂隙, 开采煤层和卸压煤层内的瓦斯卸压、解吸。由于瓦斯具有升浮移动和渗流特性, 来自于大面积的卸压瓦斯沿裂隙通道汇集到裂隙充分发育区, 即汇集到环形裂隙圈内, 在环形裂隙圈内形成瓦斯积存库。将抽采钻孔和巷道布置在环形裂隙圈内, 能够获得理想的抽采效果, 从而避免采空区瓦斯大量涌入到

回采空间. 通过数值模拟研究, 揭示了首采层瓦斯富集区位于两巷采空侧上方 (宽 0~30 m, 高 8~15 m) 的环形裂隙区 (图 3), 在裂隙区内预先布置顶板巷道或钻孔抽采卸压瓦斯, 抽采率达 65% 以上.

工程实例: 将抽采瓦斯钻孔或者巷道沿煤层走向布置在顶板岩层的环形裂隙圈内, 其抽采布置如图 4 所示. 现场试验研究表明, 抽采钻孔的数量与抽采瓦斯量关系密切, 由于抽采负压与抽采钻孔数量有关, 抽采钻孔太多就会降低孔口负压, 而抽采孔口负压太高又将导致抽采管道交接处和封孔处漏气增大. 因此, 对于开采瓦斯含量 12~22 m³/t, 厚度 3 m 以上的煤层, 以防治回采工作面瓦斯浓度超限为目标, 同时考虑钻孔工程量与经济效益的问题, 经反复试验得出了最佳钻孔数量为 1 个钻场内 8~10 个孔, 最佳抽采负压 16~20 kPa. 用顶板巷道抽采瓦斯, 其抽采负压以 8~12 kPa 为宜. 施工方法: 在原始煤层顶板岩层中开挖一个钻场, 打钻的开孔位置应在采动卸压形成的环形裂隙圈内. 为了减少工程量, 抽采钻孔应尽可能的深一些, 一般在 100 m 以上 (图 4).

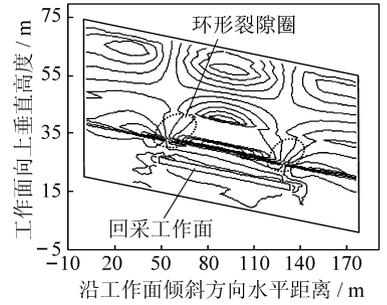


图 3 顶板裂隙区数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulating result of fracture zone of roof

环形裂隙圈位置: 垂直煤层顶板向上 8~15 m; 倾斜方向 0~30 m

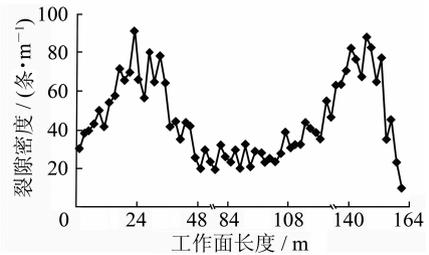
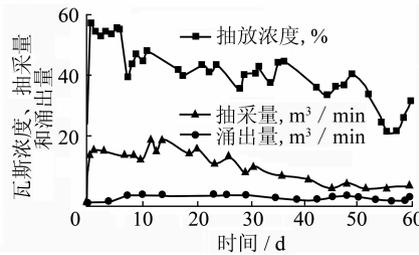
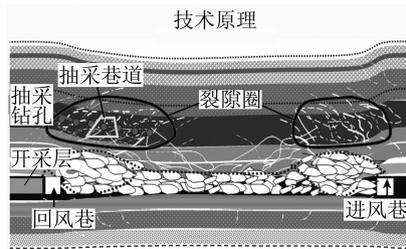


图 4 首采煤层顶板瓦斯抽采试验效果

Fig. 4 Gas extraction effect of first-mined seam

2.1.2 大间距上部煤层膨胀卸压开采顶板瓦斯抽采技术

利用首采煤层的远程采动卸压和使顶板卸压煤岩层下沉变形破裂, 使透气性成千倍增加, 在首采层开采过程中, 在顶板破裂弯曲下沉带, 首创“卸压煤层底板岩巷和网格式上向穿层钻孔瓦斯抽采方法”, 将顶板弯曲下沉带卸压煤层和底板膨起卸压膨胀带内的解吸瓦斯, 通过顺层张裂隙汇集到网格式抽采钻孔, 进行及时有效的抽采. 针对淮南矿区主采煤层 (C₁₃) 有近 50% 的区域具有远程开采卸压的条件, 研究与掌握区域性大幅度提高主采煤层透气性与卸压瓦斯流动规律并有效地抽采其卸压瓦斯的方法与参数是实现主采煤层根治瓦斯灾害并实现安全、高效集约化生产的技术关键. 距主采煤层近 70 m 的下部煤层 (B₁₁) 瓦斯含量较小. 首先对其进行开采煤层的回采, 利用远程采动卸压和煤岩层弯曲下沉变形破裂使透气性成千倍增加的作用, 使主采煤层瓦斯大量解吸. 但由于层间距较远, 层间岩性致密, 主采煤层及其下部 30 m 范围内的煤岩层处在开采煤层回采形成的弯曲下沉带内. 该带内形成的裂隙多为顺层张裂隙, 瓦斯穿层流动困难. 为此在主采煤层底板 10~20 m 的花斑黏土岩和砂岩中布置了一条底板抽采巷, 在抽采巷内向主采煤层打网格式上向穿层钻孔, 使解吸瓦斯沿顺层张裂隙向抽采钻孔流动, 即“卸压煤层底板岩巷和网格式上向穿层钻孔远程卸压法”抽采瓦斯, 如图 5 所示.

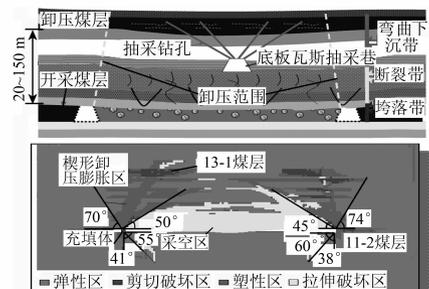


图 5 远程卸压开采模拟

Fig. 5 Long distance pressure-relieved mining

在卸压区域内, 钻孔瓦斯涌出初速度最大值均低于临界值 4 L/min, 钻屑量的最大值均低于 6 kg/m. 说明开采煤层卸压及瓦斯抽采彻底消除了卸压煤层的突出危险性. 被卸压的在 2121(3) 工作面采用综放开采, 安全回采 840 m, 原煤产量近 100 万 t. 与未采取卸压瓦斯抽采的综采开采工作面相比, 工作面平均产量由原来的 1 700 t/d 提高到 5 100 t/d, 达到以前的 3 倍; 相对瓦斯涌出量由以前的 25 m³/t 降低到 5.0 m³/t, 降低了 4/5. 按试验工作面的瓦斯抽采能力和通风能力计算, 工作面平均生产能力可达 7 000 t/d (图 6).

2.1.3 煤层群多层开采底板卸压瓦斯抽采技术

煤层开采后, 周围的煤岩层向采空区移动, 采空区下方岩体向采空区膨胀开裂成裂隙, 使得采空区下方煤岩体应力释放产生位移、透气性增加、瓦斯压力减小, 煤体中瓦斯解吸. 利用煤层群多层开采后对底板煤岩层重复卸压膨胀增透效应, 在膨胀断裂带的底板岩层内布置巷道和网格式穿层钻孔实现多重高效瓦斯抽采. 淮南矿区 B₈ ~ B₄ 煤层属于煤层群开采, B₈, B_{7b}, B_{7a} 不是突出危险煤层, B₆ 和 B₄ 为突出危险煤层. 因此, 首先以非突出煤层 B₈ 作为首采保护层, 然后依次开采非突的 B_{7b}, B_{7a} 煤层, 最后开采受到上保护层采动卸压保护的 B₆, B₄ 突出危险煤层. 当 B₈ 采动后, B₇, B₆ 煤层处在膨胀断裂带内, 在此断裂带的底板岩层内布置巷道和网格式穿层钻孔实现多重高效瓦斯抽采, 如图 7 所示.

B₈ 煤层开采后, 由于 B₄ 煤层与之距离达 62.3 m, 卸压效果不够充分, 钻孔流量虽有提高, 但提高幅度远不如距离较近的 B₆ 等煤层, 再加上开采过程中的卸压时间较短, 使得 B₈ 煤层开采时, B₄ 煤层含有的瓦斯并没有得到充分的释放, 以致残余瓦斯压力仍达 1.5 ~ 2.0 MPa. 当然, 其上部较近的 B₇, B₆ 煤层的陆续开采, 将使 B₄ 煤层有一个多次卸压的过程, 但距 B₄ 煤层最近的上部 B₆ 煤层也与之相距达 37.3 m. 则按关系式, 有

$$P_c = 0.000 5S^2 - 0.005 5S + 0.063 5, \quad (1)$$

计算, B₆ 煤层开采后, B₄ 煤层的残余瓦斯压力仍有 0.554 MPa, 瓦斯含量仍有 6.0 m³/t. 这一瓦斯含量仍可能使回采时的相对瓦斯涌出量超过 10 m³/t, 对安全生产仍有一定的威胁.

B₇, B₆ 煤层的陆续开采, 使 B₄ 煤层有一个多次卸压的过程. 通过对几个上部煤层多重开采的理论分析, 发现当多重开采上部煤层时, 下部的煤层经过多次卸压 (尽管卸压并不一定充分), 瓦斯得到多次释放, 煤层的残余瓦斯压力将比开采单一上部煤层时的常规情况要低, 即多重开采上部煤层时, 下部卸压层的残余瓦斯压力 P_c 与层间距 S 之间将不再满足式 (1). 实际的考察数据表明, 在上部 B₈, B₇, B₆ 煤层回采后, B₄ 煤层瓦斯压力降低了 50%, 煤层透气性系数增大了 300 倍以上, 煤层钻孔瓦斯流量由原来的 0.008 ~ 0.009 m³/min 提高到 0.145 5 m³/min, 增大了 16.1 倍.

实际上在多重开采上保护层之后, 即在与 B₄ 煤层距离分别是 62.30, 52.58, 37.30 m 的 B₈, B₇, B₆ 煤层开采后, B₄ 煤层的残余瓦斯压力实际为 0.2 MPa, 比按 B₆ 与 B₄ 煤层间距 37.30 m, 按式 (1) 计算

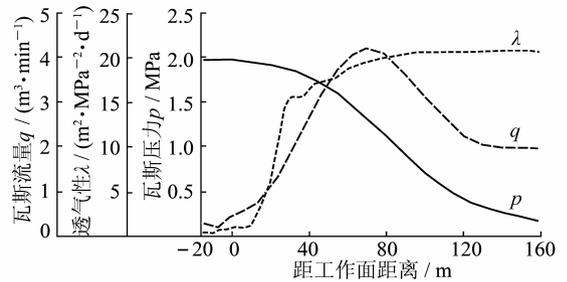


图 6 瓦斯流动活跃期与瓦斯抽采的效果

Fig. 6 Active period of gas flowing and gas extr action effect

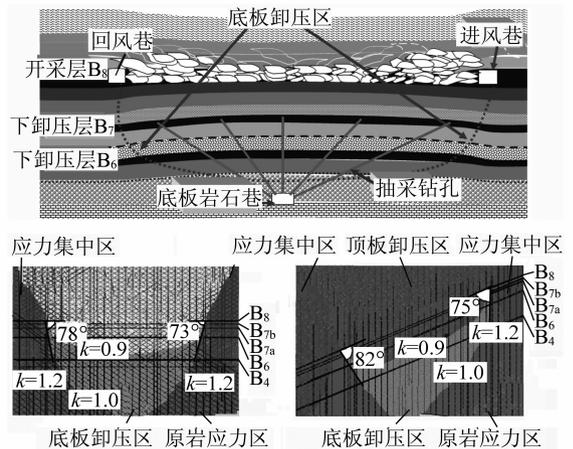


图 7 煤层群多层开采底板卸压瓦斯抽采模拟

Fig. 7 Pressure-relieved gas extraction of floor of multi-seam

出的 0.554 MPa 低了很多. 相应地, 按照关系式 $n = 38.198e^{-0.01315}$ 计算, B_6 煤层开采后 B_4 煤层钻孔瓦斯流量增大到的倍数将是 23.4 倍, 而实际平均是 50.5 倍, 证明多重开采上部煤层比开采单一煤层卸压效果更好 (图 8).

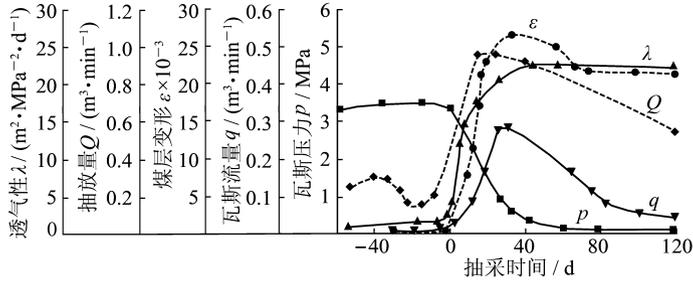


图 8 多重开采上部煤层卸压效果

Fig. 8 Pressure-relieved effect of upper seam

2.1.4 卸压开采裂隙发育区地面钻孔管抽瓦斯技术

(1) 地面钻孔设计. 地面采空区钻孔的设计目的在于得到一个高效的地面采空区钻孔抽采系统, 该系统能更多地抽采高浓度的瓦斯, 并使采空区自燃的风险最小. 这需要依据设计规范对地面钻孔进行优化设计, 并对钻孔进行精心施工和优化处理. 地面钻孔结构如图 9 所示, 为了达到较好的抽采效果, 地面钻孔的设计应符合如下要求: ① 依据数值模拟结果, 采空区钻孔需布置在已发生卸压 (提高透气性) 且瓦斯丰富的区域, 从而能从卸压覆岩中截获更多释放的瓦斯, 并使抽采率达到 70% 以上. ② 需要合理控制地面钻孔抽采采空区瓦斯的流量和负压, 以得到一个稳定的流量和浓度, 并且使得回采工作面进入采空区的氧气量最小, 从而降低工作面自然发火的危险. ③ 钻孔结构设计. 设计表土层厚 284 m, 钻孔总计深度为 680.3 m, 其中, 地表到基岩 (坚硬岩层止) 深 324 m, 采用 $\phi 349$ mm 钻头钻进, 下 $\phi 299$ mm \times 10 mm 套管, 并注水泥砂浆固井, 以防第四纪含水层的水、砂涌入井下; 基岩段用 $\phi 241$ mm 钻头钻进到 13-1 煤层顶板以上 40 m (15 煤以上 5 m) 为止, 下 $\phi 177.8$ mm \times 10 mm 的套管至地面, 并注水泥砂浆固井; 再往下改用 $\phi 152.4$ mm 钻头钻进, 穿过 13-1 煤到 11-2 煤层顶板以上 5~8 m 止, 此段下 $\phi 139.7$ mm \times 10 mm 的筛管, 不固井. 其目的: ① 防止 13-1 煤层受采动后塌孔; ② 使 13-1, 13-2, 12, 15 煤层卸压瓦斯和 11-2 煤采空区瓦斯均具备通过管道周边间隙和筛管孔进入钻孔, 以此达到全层同时预抽目的; ③ 由于筛管周边间隙存在, 使筛管与周边岩层脱离接触, 减轻岩移对筛管的影响. 终孔改用 $\phi 91$ mm 钻头钻到 11-2 煤层底板, 并用木柱塞实, 其设计构想: ① 在 11-2 回采面过钻孔时, 防止钻孔内的积水突然涌入工作面; ② 检查钻孔偏斜程度.

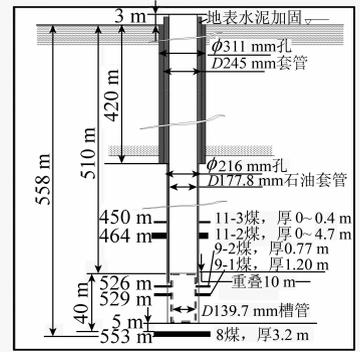


图 9 地面钻孔结构

Fig. 9 Structure of the surface extraction borehole

(2) 地面钻孔抽采采空区瓦斯技术效果. 通过对地面采空区瓦斯抽采数据资料的分析, 可以看出, 采空区瓦斯抽采对减小回风流及其它抽采方法 (如顶板钻孔、上隅角抽采管道) 的瓦斯浓度有很大影响. 尽管在钻孔工作的早期阶段并不明显, 但随着工作面离开钻孔位置, 钻孔的瓦斯流量和浓度都随之增加, 回风流及顶板钻孔或巷道内的瓦斯浓度也开始下降, 典型情况下降低 0.2%~0.3% (图 9). 可以预期, 采空区地面钻孔的应用, 将减轻工作面回风流或减少井下其它抽采方法, 且可以取得较好的效果.

现场考察结果表明, 地面钻孔单孔抽采瓦斯最高达 22 190 m^3/d , 平均 14 943 m^3/d . 单孔年抽采瓦斯

300 m、顶板向上 5~40 m 环形竖向裂隙场内瓦斯浓度为 10%~40%。卸压瓦斯分布规律: 首采层采空区顶板瓦斯富集区, 现场钻孔 (1 号) 验证, 抽采瓦斯浓度 10%~30%, 单孔抽采流量 0.2~1.3 m³/min, 钻孔有效抽采区域为垂直煤层顶板向上 4.0~12.2 倍采高 (8.0~36.6 m), 倾斜方向 0~40 m, 留巷内钻孔有效抽采长度 500~600 m; 远程上向卸压煤层有效抽采瓦斯区, 现场钻孔 (2, 3 号) 验证, 抽采瓦斯浓度 60%~95%, 单孔抽采流量 0.25~1.50 m³/min; 钻场有效抽采卸压瓦斯的走向长度超过 200 m (约 40 d), 相当于 3 倍的层间距, 钻孔有效抽采区域为左边角小于 75°, 顶板方向发展高度超过 130 m。远程下向卸压煤层有效抽采瓦斯区, 现场钻孔 (4, 5 号) 验证, 抽采瓦斯浓度 85%~100%, 单孔抽采流量 0.12~0.98 m³/min; 留巷下向钻孔有效抽采卸压瓦斯的走向长度 120~150 m (40~50 d), 钻孔有效抽采区域为左边角小于 85°, 底板方向发展深度达到 100 m。

经过现场试验考察得到, 上向被卸压煤层通过 1, 2, 3 号。钻孔连续抽采 (采煤工作面后方 0~300 m) 顾桥矿 13-1 实现单面日产气 30 946 m³, 日产煤 16 426 t, 抽采率达 72%; 新庄孜矿 B_{11b} 煤层瓦斯预抽率达 72.4%, 下向被卸压煤层通过 4, 5 号钻孔连续抽采新庄孜矿 B₈ 煤层瓦斯预抽率达 56%。

2.3 卸压开采采动区松软煤岩巷道围岩控制理论与技术

为实现卸压开采抽采瓦斯, 必须控制卸压开采采动区松软煤岩巷道围岩变形, 保证足够的巷道断面实施抽采工程, 研究了“锚注一体化, 锚封一体化”围岩整体主动控制技术, 并获得成功, 保证瓦斯抽采正常化。针对极易离层破碎型顶板煤层巷道支护与控制技术难题, 成功研究了煤矿极易离层破碎型顶板预应力控制技术^[9]: 提出楔形加固区顶板控制理论, 成功解决了淮南矿区煤层巷道、瓦斯抽采巷道设计及支护技术难题, 使矿井巷道断面、通风阻力满足了矿井安全高效开采要求 (图 12)。

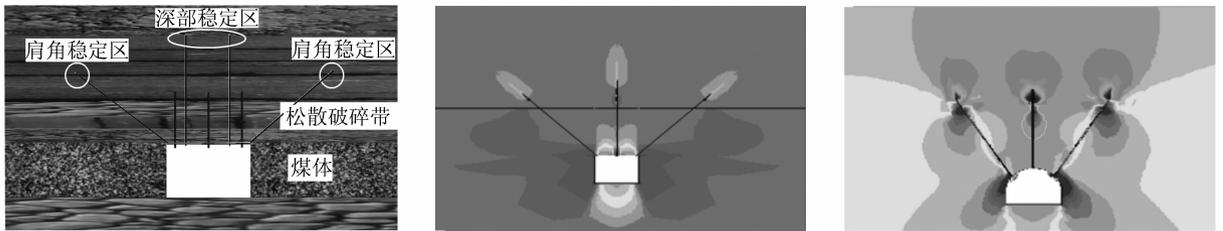


图 12 巷道围岩模拟

Fig. 12 Simulation of roadway strata

针对离层型顶板提出高强预应力支护概念, 不仅强调支护材料本身的强度、锚杆与围岩的锚固强度, 同时注重支护能够实现的初始支护力, 即支护的预应力水平。离层破碎型煤巷掘进时, 复合顶板通常有厚 0.5~1.5 m 的松动层 (顶板煤岩互层) 随掘随冒, 有时受端头效应影响处于潜在垮落状态, 打眼等微小的施工扰动都可能诱发垮冒。其负荷大致为 15~25 kN/m², 采用人工拧紧螺母的方式安装的普通高强锚杆初始径向支护力一般低于 10 kN, 这种低初锚力的支护尚不足以平衡松动岩体自重, 更谈不上有效加固顶板, 控制弱面离层, 因而不能形成有效的主动支护, 常常难以避免锚固区整体垮冒的失稳形式。高强预应力支护则针对复合顶板的渐进离层垮冒过程, 充分调动围岩自身的稳定性和巷道特殊的结构效应, 控制顶板的两类离层和垮冒, 支护效果和安全状况随之大大改善 (图 13)。

3 创新高瓦斯矿井设计理论, 建成安全高效示范矿井

应用卸压开采抽采瓦斯研究成果, 分析安全开采存在的问题, 提出高瓦斯矿井井筒安全开采半径的新概念^[10]; 淮南矿区要满足安全开采要求, 半径应不大于 4 km; 安全开采、多层卸压开采的开采程序的设计原则; 高瓦斯煤层群全面实施卸压开采后, 实现高瓦斯煤层在低瓦斯状态下安全高效开采; 解除了瓦斯及巷道松软围岩制约后, 矿井采场能力提高 80% 以上; 提出了高瓦斯矿井安全生产系统应预留富裕能力的设计理念; 主持建成张集、顾桥等国家命名的示范矿井。



图 13 巷道围岩支护效果

Fig. 13 Supporting effect of roadway strata

4 结 语

淮南矿区应用上述成果, 实现了安全高效开采. 2008 年与 1998 年以前相比, 采煤机械化程度由 30% 提高到 85%, 采煤工作面由 70 个减少为 35 个, 煤炭产量由 1 000 万 t 增加到近 6 000 万 t; 综采工作面最高年产由 60 万 t 增加到 500 万 t; 矿井、采区、工作面资源回收率分别达到 70%, 85%, 95%. 瓦斯抽采量由 1 000 万 m³ 增加到 2.5 亿 m³, 抽采率由 5% 提高到 48%, 百万吨死亡率由 4.01 降低到 0.10 左右.

随着矿井开采深度的增加, 煤层和岩层的性质都会发生变化, 笔者将继续关注埋深 -1 000 m 及以下煤层开采过程中的高瓦斯、高地温、高地压等科学技术问题, 继续研究、探索煤矿深井开采面临的许多新的技术难题.

参考文献:

- [1] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力及其控制 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [2] 谢和平. 深部高地应力下资源开采与地下工程——机遇与挑战 [R]. 北京: 第 175 次香山科学会议报告, 2002: 179 - 191.
Xie Heping. Resources exploitation and underground engineering under the condition of high ground stress in deep depth——chance and challenge [R]. Reports of 175th Xiangshan Scientific Conference, 2002: 179 - 191.
- [3] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997.
- [4] 张铁岗. 煤矿安全技术基础管理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [5] 袁 亮. 低透气性煤层群无煤柱煤与瓦斯共采理论与实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.
- [6] 袁 亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (8): 898 - 902.
Yuan Liang. Technology of simultaneous extraction of coal and gas with boreholes drilled in retained roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (8): 898 - 902.
- [7] 袁 亮. 低透气性高瓦斯煤层群无煤柱快速留巷 Y 型通风煤与瓦斯共采关键技术 [J]. 中国煤炭, 2008 (6): 9 - 13.
Yuan Liang. Key technology for simultaneous extraction of coal/gas in low permeable high gas content coal seam cluster under pillarless gob-side entry retained with Y type ventilation [J]. China Coal, 2008 (6): 9 - 13.
- [8] 袁 亮. 低透气煤层群首采关键层卸压开采采空侧瓦斯分布特征与抽采技术 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (12): 1 362 - 1 367.
Yuan Liang. Gas distribution of the mined-out side and extraction technology of first mined key seam relief-mining in gassy multi-seams of low permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (12): 1 362 - 1 367.
- [9] 袁 亮. 深井巷道围岩控制理论及淮南矿区工程实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [10] 袁 亮. 高瓦斯矿区复杂地质条件安全高效开采关键技术 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (2): 174 - 178.
Yuan Liang. Key technique of safe and high efficiency mining in highly gassy mining area with complex geologic conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31 (2): 174 - 178.