沙漠边缘煤矿风积砂膏体充填保水开采研究

崔 锋，张华兴，刘鹏亮，郭爱国
（天地科技股份有限公司 开采设计事业部，北京 100013）

摘 要： 为在毛乌素沙漠南缘脆弱生态环境下实现保水采煤，对该区域刀柱式采煤法、房式采煤法代表性矿井煤柱稳定性进行了分析，得出煤柱安全性系数分别为 1.12 和 0.89，不能保证煤柱长期稳定。基于沙漠边缘榆阳区煤层赋存条件，提出了刀柱式膏体充填开采方法。充填材料用风积砂占 60% ~75% 的膏体材料，其 28 d 单轴抗压强度 8 ~10 MPa，可满足充填开采需要。结果表明：采用刀柱式风积砂膏体充填开采，能将某矿井工作面实际采出率从 44% 提高至 85% 以上，可延长该矿服务年限 8 ~9 年。刀柱式风积砂充填开采能有效控制覆岩移动和变形，保护第四系含水层。

关键词： 榆阳区煤矿；保水开采；风积砂充填；刀柱式充填开采
中图分类号： TD23.7 **文献标志码：** A **文章编号：** 0253 -2336（2011）02 -0010 -04

Study on Water Conservation Mining with Aeolian Sand Paste Backfill in Coal Mine at Desert Border

CUI Feng，ZHANG Hua-xing，LIU Peng-liang，GUO Ai-guo
（*Coal Mining and Designing Department，Tiandi Science and Technology Company Ltd.，Beijing* 100013，*China*）

Abstract: In order to have a water conservation mining under the weak ecological environment at the south border of Mu Us Desert，the paper analyzed the coal pillar stability in the mines with the rib pillar mining method and the room and pillar mining method. The safety coefficient of the coal pillars was 1.12 and 0.89 individually and a long stability of the coal pillar could not be ensured. Based on the deposit conditions of Yangyu Mine at the border of the desert，a rib pillar backfill mining method was provided. The backfill material was the paste material with about 60% to 75% of the aeolian sand，the 28 days uniaxial compressive strength would be 8 ~ 10 MPa and could meet the requirements of the backfill mining. The results showed that with the rib pillar mining with the aeolian sand backfill，the actual mining rate of the coal mining face in a mine could be improved from 44% to over 85%，the mine service life could be expanded of 8 ~ 9 years. The rib pillar mining with aeolian sand backfilling could be effective to control the displacement and deformation of the overburden strata and to protect the integrality of the aquifer in the Quaternary System

Key words: Yuyang Coal Mine; water conservation mining; aeolian sand backfill; rib pillar backfill mining

位于毛乌素沙漠南缘的榆林市榆阳区是我国 13 个大型煤炭建设基地之一——陕北矿区的主要产煤区，煤炭地质储量约 270 亿 t。该区煤层多为近水平煤层，构造简单，埋深一般在 50 ~150 m，煤厚 5.0 ~11.0 m[1]。该矿区煤层上方基岩较薄，第四系较厚且含有丰富的水资源，该含水层是该地区主要的用水水源，对居民生活及工农业生产、预防沙漠化等具有重要的意义。随着煤炭资源的大规模开采，从环境及社会协调发展角度出发，保水开采迫在眉睫。

基金项目：天地科技股份有限公司科技创新基金资助项目（TZ -GY -2010 -KC -8）

1 榆阳区煤矿概况

1.1 榆阳区地表概况

榆林市榆阳区位于毛乌素沙漠南缘与黄土高原接壤地带，地表基本被第四系沉积物覆盖，地面多为风积砂、黄土丘陵。经过对风积砂试验发现，其加权平均粒径 0.12 ~0.28 mm，0.5 mm 以下粒径占 90% 以上[2]。

1.2 榆阳区煤层概况

榆阳区含煤地层主要为侏罗纪延安组，含煤 3 ~15 层，其中可采煤层 1—9 层，目前该区大部分煤矿主采 3 号煤层。该煤层厚度 5 ~11 m，一般不含夹矸，仅局部含 1 ~4 层夹矸，夹矸岩性主要

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

为泥岩、炭质泥岩。煤层顶底板岩性主要为泥岩、粉砂岩、细粒长石砂岩，次为炭质泥岩、粉砂质泥岩、中粒长石砂岩，多数矿井顶板属坚硬型顶板。3 号煤层煤岩以半光亮型煤为主，煤质较硬，普氏系数一般在 3 ~ 5。

1.3　区域水文地质概况

区域内 3 号煤层上方含水层主要为第四系松散岩类及风化带裂隙潜水含水层组及侏罗系中统砂岩裂隙层间承压水。据常乐堡 Y23 孔抽水试验资料，侏罗系层间承压水含水层厚度 52.95 m，降深 44.34 m 时，涌水量 15.90 m^3/d，渗透系数 0.007 m/d。第四系含水层又可分为第四系全新统河谷冲洪积层潜水、第四系中更新统黄土孔隙裂隙潜水及基岩风化带裂隙潜水，水量丰富，为居民及工农业主要用水来源。

1.4　榆阳区煤矿生产概况

生产矿井中除榆阳煤矿、榆树湾煤矿采用长壁综合机械化开采外，大多采用房式、刀柱式开采。榆阳区房式及刀柱式采煤法不仅浪费了大量的煤炭资源（矿井平均采出率低于 30%[3]），现行的采留宽度难以保证煤柱的稳定，煤柱的大规模失稳将发生顶板切冒，导致采空区大面积垮塌、矿井透水等事故。如 2004 年榆阳区某矿曾发生最大涌水量 600 m^3/h 的透水事故，2007 年榆阳区某矿约 8.4 万 m^2 大面积采空区突然垮塌，形成矿震。

本文就榆阳区刀柱式、房式采煤法选取代表性矿井，进行水体下采煤安全性分析。

2　刀柱式及房式采煤法保水开采分析

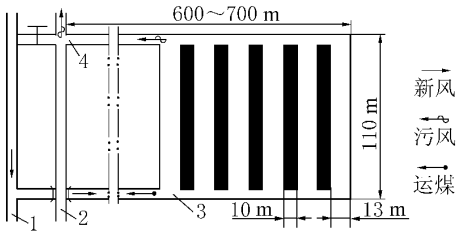
2.1　刀柱式采煤法煤柱稳定性分析

1）矿井概况。榆阳区某矿（以下简称Ⅰ矿）主采 3 号煤，埋深 112.49 ~ 164.31 m，煤层平均倾角小于 1°。煤厚 7.5 ~ 7.8 m，平均 7.63 m。基岩厚度为 60 ~ 70 m。目前该矿采高 6 m，使用采 13 m、留 10 m 的刀柱式回采，工作面实际采出率为 44%，如图 1 所示。目前年产量为 130 万 t，日产量约 4 000 t。该矿地质储量约 2 200 万 t，已回采 400 万 t。

2）煤柱稳定性分析。根据 A. H. 威尔逊理论，长条煤柱极限载荷 P_{jt} 计算公式如下：

$$P_{jt} = 4\gamma H(a - 4.92mH \times 10^{-3}) \times 10^{-4} \quad (1)$$

煤柱承受的实际载荷 P_{st} 计算公式如下：



1—运输大巷；2—回风大巷；3—工作面运输巷；4—工作面回风巷

图 1　Ⅰ矿刀柱式开采示意

$$P_{st} = \gamma\left[Ha + \frac{b}{2}\left(2H - \frac{b}{0.6}\right)\right] \times 10^{-4} \quad (2)$$

式中：a 为煤柱宽度，m；γ 为上覆岩层平均容重，取 25 kN/m^3；m 为采高，m；H 为采深，m；b 为煤房宽度，m。

要保证煤柱的长期稳定，一般要求安全系数 $K = P_{jt}/P_{st} = 1.5 \sim 2.0$。将各参数带入公式计算可得：$P_{jt} = 77.7$ MN，$P_{st} = 71.2$ MN，安全系数 K 为 1.12。可见该种采煤方法煤柱有一定的稳定性，但仍难以保证煤柱的长期稳定。煤柱的大规模垮塌，将引起顶板发生切冒，导通含水层。

要保证煤柱长期稳定，可改变采留比，或采用充填开采。经计算，采用采 13 m 留 14 m 刀柱开采时，$P_{jt}/P_{st} = 1.59$，基本能保证煤柱长期稳定，但工作面采出率极低，仅 38%，全矿井丢弃约 1 360 万 t 煤炭资源。

2.2　房式采煤法煤柱稳定性分析

1）矿井概况。榆阳区某矿（以下简称Ⅱ矿）主采 3 号煤，煤层埋深在 110 ~ 130 m，煤层平均厚度 6.7 m，煤层倾角小于 1°。

根据区内钻孔揭露，煤层底板主要为灰白色中砂岩，局部为粉砂岩，泥质胶结。直接顶为 0.85 m 深灰色泥岩，基本顶为厚层砂岩。第四系厚度为 62.7 m，基岩厚度为 47.26 m。目前采高 5.5 m，使用采 12 m、留 8 m 的房式采煤法开采，如图 2 所示。

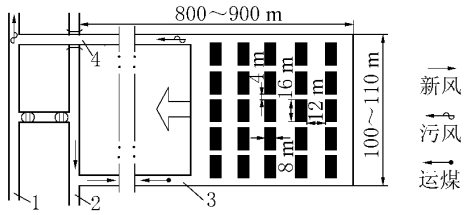
2）煤柱稳定性分析。根据 A. H. 威尔逊理论，矩形煤柱承受的极限载荷 P_{jj} 计算公式如下：

$$P_{jj} = 40\gamma H\left[aL - 4.92(a + L)mH \times 10^{-3} + 32.28m^2H^2 \times 10^{-6}\right] \quad (3)$$

煤柱承受的实际载荷 P_{sj} 计算公式如下：

$$P_{sj} = 10\gamma L\left[Ha + \frac{b}{2}\left(2H - \frac{b}{0.6}\right)\right] \quad (4)$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



1—回风大巷；2—运输大巷；3—工作面运输平巷；
4—工作面回风平巷

图 2　Ⅱ矿房式开采示意

式中，L 为矩形煤柱长度。

经计算，$P_{jj}/P_{sj}=0.89<1$，煤柱不稳定。随着开采范围的扩大，不排除顶板突然大规模垮落，形成切冒，导通第四系含水层的可能性。

3　刀柱式膏体充填开采

通过上述分析，采用刀柱式开采或房式开采，要实现保水采煤，均需留设大煤柱，浪费了大量煤炭资源。针对榆阳区煤层赋存情况，提出了适合该地区的开采方法，即刀柱式膏体充填开采方法。

3.1　充填材料选择

1）风积砂特性。榆阳区地表广泛分布有风积砂等，以风积砂为主料可以大幅降低充填成本。

风积砂是由风吹沉积而形成的砂土。由于长期受到风的吹扬、搬运、堆积，在流动风沙土中整个剖面以中砂和细砂占优势，使风积砂具有了独特的物理化学性质[2]，对取自Ⅰ矿地表的风积砂进行试验得出：风积砂最大粒径小于 1 mm，加权平均粒径为 0.272 mm，不均匀系数 1.5～2.5，为级配不良的均粒材料；表观密度为 2.646 g/cm^3，堆积密度为 1.517 g/cm^3，含水率为 2.45%；自然安息角为 35.7°。风积砂主要是由长石、石英、云母等轻矿物组成，SiO_2 含量最高，其次为 Al_2O_3、CaO。对取自毛乌素沙漠神朔线上的样本进行了分析[4]，得出各化学成分质量分数：$\omega(SiO_2)=76.6\%$，$\omega(CaO)=12.0\%$，$\omega(Al_2O_3)=2\%\sim8\%$，$\omega(Fe_2O_3)=3.1\%$，$\omega(MgO)=0.9\%$。可以看出风积砂中基本不含黏土，可溶盐亦很少。

2）煤矿用膏体充填材料。目前国内应用于煤矿的膏体充填主要有：太平煤矿利用泗河河砂、胶结材料、粉煤灰等制成膏体充填材料回采了 8309、8311 两工作面[5]；新汶孙村煤矿将煤矸石（经过陶化或破碎至 5 mm 以下的新鲜煤矸石）、水泥、粉煤灰、减水剂等按照一定配比制成膏体材料，安全回采了 21011 工作面[6]；峰峰小屯煤矿把煤矿附近的煤矸石、粉煤灰、炉渣、劣质土、城市垃圾等制成膏体，充填开采了 14259 顶分层工作面[7]；焦作朱村煤矿利用矸石（粒径小于 25 mm）、粉煤灰、胶结材料等制成膏体材料在 54001 及 54002 工作面进行了工业试验[8]；淄博岱庄煤矿利用煤矸石（粒径小于 25 mm）、粉煤灰、胶结材料、水等制成的膏体材料在 2300 工作面进行了工业试验。

根据以上煤矿膏体充填开采经验，膏体材料一般需要达到如下指标：①最大粒径≤25 mm；②新拌膏体坍落度 200～250 mm；③可泵时间 2～4 h；④静置泌水率≤3%～5%；⑤单轴抗压强度。1 d 强度大于 0.2 MPa，28 d 强度大于 1.0 MPa。

经反复试验，风积砂膏体充填材料由 60%～75% 风积砂、固化剂、粉煤灰、添加剂、水等组成，其满足以上指标，且其 28 d 的单轴抗压强度为 8～10 MPa。

3.2　刀柱式充填开采工艺

3.2.1　刀柱式充填开采工艺简介

刀柱式膏体充填开采工艺是针对浅埋深、薄基岩、厚冲积层条件下的厚煤层矿井，为保护含水层及控制地表沉陷而提出的。其具体工艺分为：第 1 次刀柱回采，按照刀柱式回采工艺回采煤房资源；第 1 次充填，对回采煤柱形成的采空区进行充填；第 2 次回采，在两侧充填体的支撑保护下，回采中间煤柱；第 2 次充填（根据需要，如不回采顶煤，可不进行第 2 次充填及第 3 次回采），充填回采煤柱形成的采空区；第 3 次回采，回采顶煤。

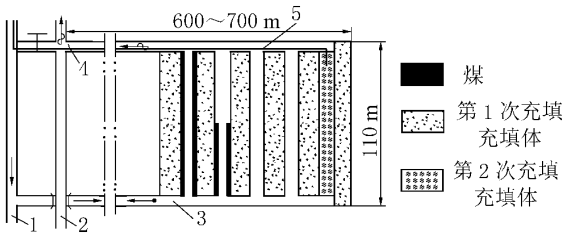
3.2.2　刀柱式充填开采设计实例

以Ⅰ矿为例进行刀柱式充填开采工作面设计如图 3 所示。具体工艺如下所述。

1）第 1 次掘进及采煤：经计算采 13 m 留 13 m 能保证煤柱稳定。掘进：从运输平巷向回风平巷掘进 7.0 m×3.5 m 巷道，并进行锚杆支护。采煤：对已掘 7.0 m×3.5 m 巷道，扩帮至 13 m，并向上打垂直炮眼回采顶煤。采煤和掘进同时进行。运输：将放炮落煤用放炮铲车装进防爆三轮车，运至运输平巷卸煤点，经带式输送机送至运输大巷。运输平巷中每隔 300～500 m 一个卸煤点。支护：采用锚杆支护，间排距均为 0.8 m。回风：掘进采用局部通风机回风，工作面中新鲜风流经运输平巷、

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

采煤面、回风平巷至回风大巷。



1—运输大巷；2—回风大巷；3—工作面运输平巷；
4—工作面回风平巷；5—充填管道

图 3　刀柱式充填开采示意

2）第 1 次充填：利用充填管路充填煤房采空区，至工作面内全部煤房充满，如图 4 所示。

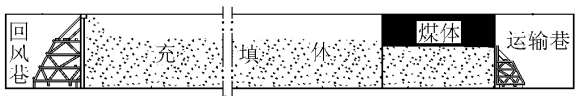


图 4　充填工艺示意

为实现年开采 130 万 t 煤，需充填约 100 万 m^3 采空区，每天按 20 h 充填，按 20 h/d，300 d/a 计算，每小时需充填 167 m^3，可选用流量 200 m^3/h 充填泵。

充填前工作面回风巷及运输巷利用挡墙密闭，充填膏体对密闭墙的侧压，按下式计算：

$$P = \gamma' h \qquad (5)$$

式中：γ'为充填体容重；h 为充填体高。

代入充填体容重 $\gamma' = 0.02$ MPa/m，$h = 6.0$ m，计算可得密闭墙侧压 $P = 0.12$ MPa。可采用木制密闭墙、混凝土密闭墙、红砖密闭墙、模板台车等实现密闭。

充填体固结后，如接顶效果不好，可在井下进行补充注浆充填实现接顶。

3）第 2 次掘进及采煤：采用后退式按原采煤工艺回采煤柱。

4）第 2 次充填：利用充填管路采用后退式充填回采煤柱形成的采空区。如不回采顶煤，可不进行第 2 次充填。第 2 次充填时将工作面不再使用的运输巷及回风巷充填，实现全部充填。如进行第 2 次充填，应及早进行，使充填体由单向受力状态变为三向受力状态。

5）第 3 次回采：采用长壁工作面回采 1.5 ～ 2.0 m 顶煤。按坚硬顶板计算导水裂缝带[9]高度为 36.6 ～ 54.4 m < 60 ～ 70 m，第四系水体较安全。

根据该矿实际情况粗略估算（按回收顶煤计算）充填开采能将工作面实际采出率从 44% 提高至 85% 以上，全矿井吨煤成本增加约 38.4 元，解放刀柱煤柱及顶煤约 1 000 万 t，延长矿井服务年限 8 ～ 9 年。

4　结　论

1）针对榆阳区采用刀柱开采的某矿，计算出煤柱安全性系数为 1.12，采用房式开采的另一矿其煤柱安全性系数为 0.89，安全性较差。

2）利用风积砂制成的膏体充填材料，风积砂含量为 60% ～ 75%，其 28 d 单轴抗压强度为 8 ～ 10 MPa。

3）在对 I 矿进行刀柱式充填开采设计的基础上，得出该方法能将该矿工作面实际采出率由 44% 提高到 85% 以上，解放约 1 000 万 t 煤炭资源，延长服务年限 8 ～ 9 年。该方法能有效控制覆岩移动和变形，保护第四系含水层。

参考文献：

[1] 崔　锋. 榆卜界矿房式充填开采的理论研究 [D]. 北京：煤炭科学研究总院，2009.
[2] 崔　锋，张华兴. 风积砂井下充填可行性分析 [J]. 煤矿开采，2009，14（3）：42 – 43.
[3] 闫少宏，刘全明，张华兴，等. 浅埋薄基岩含水层下巷柱式放顶煤充填开采技术 [J]. 煤炭科学技术，2008，36（1）：1 – 3.
[4] 任仓钰. 风积砂工程地质特征 [J]. 岩土工程技术，2002（3）：156 – 157.
[5] 周华强，侯朝炯，孙希奎，等. 固体废物膏体充填不迁村采煤 [J]. 中国矿业大学学报，2004，33（2）：154 – 158.
[6] 闫　斌，莫　技，李　涛，等. 似膏体充填工作面采煤与充填工艺 [J]. 煤矿开采，2009，14（6）：35 – 37.
[7] 史泽坡. 煤矸石膏体充填开采研究与应用 [C] //煤炭企业总工程师专题研讨会论文集. 北京：煤炭工业出版社，2009：279 – 286.
[8] 何志雷，郭明杰，孔祥辉，等. 朱村矿承压水体上煤层开采研究 [J]. 中州煤炭，2010（3）：1 – 3.
[9] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [M]. 北京：煤炭工业出版社，2000：228 – 230.

作者简介：崔　锋（1981—），男，河北新乐人，助理工程师，研究方向为“三下”采煤及充填开采。Tel：010 – 84263134，E – mail：cuifeng717@163.com

收稿日期：2010 – 09 – 11；责任编辑：曾康生

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net