

煤矿岩石与油气突出机理及预测的探讨

孟贤正¹, 靳 全², 周建民², 王君得²

(1.煤炭科学研究总院重庆分院,重庆 400037; 2.海石湾矿有限公司,甘肃 兰州 730084)

摘 要:综合分析了砂岩与油气突出是地应力、油气压力及岩石物理力学性质等因素综合作用的结果,并介绍了海石湾矿风井岩芯法及其突出预兆法预测突出危险的试验情况。

关键词:砂岩与油气突出;机理;预测

中图分类号:TD713⁺7.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-4495(2003)04-0022-03

我国是世界上煤与瓦斯突出(含煤、岩与二氧化碳突出)灾害最严重的国家之一,近年来煤矿井下又出现了岩石与油气突出的新自然灾害。由于突出物为砂岩、油、气三相介质,其岩石与油气突出机理与煤与瓦斯突出机理有共性,但又存在明显的差异。因此,探讨岩石与油气突出机理及其工作面突出危险性预测十分重要。

1 我国煤系地层油气及突出情况

我国甘肃窑街矿区海石湾井田、陕西铜川焦平矿区(陈家山、下石节及崔家沟等)煤系地层煤、油、气共生,油气储量不具备工业开采价值。油气分布具有明显的区域性,表现在钻孔岩芯有油渗、油斑、油臭;在不同地点,原油与气体含量也不同,有的区域以气体为主,有的区域则以原油为主。油气赋存受岩性控制,主要赋存于中粗砂岩层,页岩层含量较少。油砂岩层孔隙较发育、渗透率低,油砂岩层平

面分布不连续,呈透镜状。海石湾、陈家山两矿油砂岩孔隙度分别为3.81%~16.9%、5.2%~16.0%,平均值分别为9.02%、14%;渗透率分别为(0.1~1.5)×10⁻³、(0.05~24)×10⁻³ mD。

油砂岩原油为沥青质、水与正构烷烃碳氢化合物C₁₁H₂₂~C₃₆H₇₆,正构烷烃气体分布基本上正态分布,峰值为C₂₁H₄₂;也有少量异构烷烃。油气体主要为饱和碳氢化合物的烷烃类,各组份之间的比例关系及所含浓度,随时间和地点变化而不同,见表1。

海石湾、陈家山两矿先后多次发生岩石与油气突出、油气喷出、油气燃烧与爆炸等事故。

2 岩石与油气突出的力学机理探讨^[1]

岩石与油气突出是煤矿井下罕见的一种复杂动力现象,是地应力、油气压力和岩石力学性质综合作用的结果。作者从突出所需的能量源泉——地应力、油气压力来探讨激发岩石与油气突出的力学机理。

表1 海石湾、陈家山及下石矿油气成分

采样地点	甲烷/%	乙烷/%	丙烷/%	异丁烷/%	正丁烷/%	异戊烷/%	正戊烷/%	乙烯/%	氮气/%	二氧化碳/%
下石节	13.83	6.03	24.85	11.54	20.37	7.5	6.09			
+1230	14.86	3.13	27.76	10.64	22.99	9.8	7.35			3.39
大巷*	58.05	6.67	19.28	4.11	5.82	1.09	0.96		1.74	1.86
杏树坪29*钻孔	86.05	0.92	6.44	1.48	2.59	0.43	0.32		1.30	0.45
海石湾96-G442*	70.70	4.20	3.30					3.1		
陈家山矿轨四下山	67.00	7.00	3.12	0.389	0.282					

* 下石节1230大巷不同时间取3个油气样的分析结果; ** 海石湾96-G442气样空气含量为18.61%。

2.1 地应力对突出的作用

含油气岩层在上覆岩层重力作用下,固、液、气三相介质耦合,它们之间相互作用、相互影响,是一

复杂的矛盾体。

岩石与油气突出,首先是岩石的破坏,突出部分岩石所受的载荷必须达到强度极限。岩石发生破坏时,其应力环境的不同,其破坏形态一般有两种,即稳定破坏和非稳定破坏。根据岩石三轴压缩试验条

件下不同应力环境下的破坏形态;如果试验机的卸载刚度(应力—应变曲线峰值后的斜率)高于试件的卸载刚度,则试件保持稳定破坏;反之,岩石试件则发生非稳定破坏(突然破坏)。即使岩石在超载应力作用下发生非稳定破坏,还必须具有足够的能量来抛掷破碎岩块,才能形成一次完整的突出,即突出时应当具有相当高的能量释放水平。储存在突出岩石及其相邻岩体中的能量越多,能量释放水平也越高。

在地应力作用下,突出岩石中积聚的弹性应变能 W_s 为

$$W_s = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (1)$$

式中 E 、 ν ——岩石的弹性模量和泊松比;

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——岩石单元体上的主应力。

积聚在突出岩石的围岩加载系统中的潜能 W_m 为

$$W_m = \frac{p^2}{2k} \quad (2)$$

式中 p 、 k 为围岩加载系统的压力和刚度。

上述表明,含油岩层距地表越深、构造越复杂,积聚在突出岩石及其围岩的潜能越多,突出危险越大。岩体中应力的强弱是相对于岩石强度而言,含油岩石强度低,意味着其破坏需要的能量小,容易发生突出。

2.2 油气对突出的作用

2.2.1 油气对岩体强度的影响

含油气岩石主要是孔隙发育的中粗砂岩,由于砂岩几乎没有吸附能力,因此,油气主要以液态原油和气态天然气物质游离形式储存与砂岩孔隙及裂隙中形成油气压力。油气压力对孔隙壁所有方向均产生张应力,对岩体承受的压力起着抵消作用;当岩体承受的压力突然解除时,由于岩石的抗拉强度远小于抗压强度,其油气压力膨胀产生的张应力破坏效应是十分显著的。

原油(水)影响岩石强度,含水越多,岩石的强度越低。实验室测得砂岩、泥岩、页岩、石英岩的软化系数分别为 0.6~0.97、0.1~0.50、0.55~0.70、0.80~0.98。另外,油气体则主要是饱和碳氢化合物的烷烃类气体,与甲烷有许多类似的物理化学特性,对岩石骨架有损伤作用。

显然,油砂岩、油页岩抵抗破坏的能力差;现场发现岩石与油气突出前岩石变软,出现片状、粉状与碎屑状,开挖超进尺等突出预兆。

2.2.2 油气相态变化的力学作用

油气随着温度升高、压力降低,液态原油就会逸出大量的烷烃气体。另外,根据 Litwiniszyn^[2] 的观点,

含油气岩体是由固体骨架、凝聚的液体和气体物质组成的三相介质,这种介质的状态方程允许稀疏冲击波在该介质传播,在这种冲击波作用下,将发生从液体到气体的变相。油气相态变化所产生的气体压力梯度将使多孔介质骨架损伤、破坏。

工作面含油气岩层在偏应力(非等轴三向应力)作用下发生扩容,围岩体积增加,产生新裂纹,使得水、气体更容易进入围岩内部,导致更大程度的软化或膨胀。同时由于水严重损失了含油气岩层的强度,势必使含油气岩层在更小的偏应力作用下就会产生扩容。由于扩容,岩层孔隙体积增加,油气压力降低,则原油会逸出更多的烷烃气体参与对岩石的破坏。可见,含油气岩层扩容与软化及膨胀是相互作用,结果会使含油气岩层受到更大程度的劣化,体积进一步增加,最终导致其破坏。

对于某一具体的工程技术地质条件下,工作面附近油气向自由面渗流形成的压力梯度会对岩石形成冲刷、破坏作用。油气储量越大、渗透率越低、掘进速度越快,油气压力梯度 G 越大,当油气压力梯度 G 大于某一临界值时,就会发生油气突出。

2.2.3 油气能量

含油气岩体储存着较高的气体压缩能,压缩能在突出过程中起着岩体破碎、搬移突出物并使突出不断向岩体深部发展的作用。油气中气体的膨胀能与岩体中的气体含量和膨胀前后的压力变化有关。在绝热条件下,气体体积由 V_0 膨胀至 V_1 ,压力由 p_0 降低到 p_1 的膨胀做功为:

$$w = \frac{p_1 v_1}{1-n} \left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中 w ——参与突出做功的单位岩体油气膨胀能 J/m^3 ;

n ——绝热指数,一般取 1.3;

p_0 、 p_1 ——气体原始压力及自然状态压力 MPa 。

显然,油气压力对突出的作用以气体为主的比原油为主的更重要。

2.3 放炮的诱导作用

岩石破碎主要是炸药爆破的冲击应力波的动作与爆生气体的静作用综合作用的结果。爆破应力在含油气岩层的扰动一方面使油气相态变化,使油气逸出大量气体形成的气体压力梯度,增加膨胀能参与突出;另一方面,爆落岩石突然解除工作面前方岩体所受约束力,原来承受三向压力的岩体转变双向甚至单向应力状态,岩石强度降低,提高了岩石突然破坏的可能性。因此,爆破方式对岩石与油气突出强度、频率等有影响,一般爆破进尺越大,突出危险大,浅眼光面爆破突出危险小。<http://www.cnki.net>

3 工作面突出危险性预测^[3]

3.1 预测方法及指标

岩石与油气突出是地应力、油气压力及其岩石的力学性质等综合因素作用的结果。钻孔岩芯、油气压力与流量等指标反映了影响突出因素，均可以用来预测突出危险。

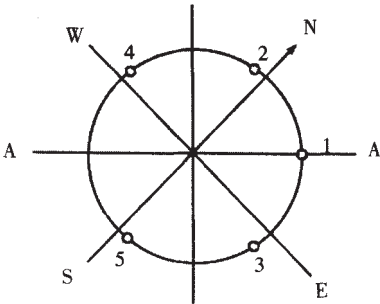
钻孔岩芯预测方法是：在有油气突出危险的砂岩层掘进巷道或揭穿该岩层时，沿掘进方向的轴心施工直径 $\Phi 50\sim 75$ mm、孔深不少于10 m(揭穿有油气突出危险的砂岩层应打穿全厚度)钻孔，提取全部岩芯，并从孔深2 m处开始，观测、记录岩芯中的圆片数。

根据所探测钻孔时的突出预兆、1 m长岩芯内的岩芯片数量及环状裂纹发育情况来预测工作面突出危险性。岩芯反映了岩石抗扭、抗剪的强度及所受地应力等情况，单位长度岩芯圆片数量越多，岩石强度越低，地应力相对越大，突出危险越大。

3.2 海石湾矿立井揭穿油气岩层突出危险预测试验

海石湾井田煤系地层为侏罗系中统窑街群，其中第一、二、三组分别为砂泥岩段、含煤段、泥灰岩段，位于主采煤二层上覆第四岩组为油页岩油砂岩

段，实测油气压力为4.6 MPa。风井穿过第四岩组油页岩进入油砂岩岩层时发生了特大型突出，在处理完突出孔洞后，共施工5个探孔，直径为75 mm，考察下覆岩层的突出危险性，布置见图1所示。



A-A为1995年3月9日突出孔洞方位线

图1 钻探孔布置俯视图

1#、2#、3#、4#、5#孔俯角90°布置，孔深分别为49.50、51.32、32、31.20、53.20、56.50 m，钻孔用光学瓦斯检测钻孔口瓦斯浓度均在7%以上；其中3#孔钻至25.3~31.2 m段，发生间歇性喷孔，油气携带着钻孔水喷出孔外，喷高5~10 m，并测得油气体流量为17.23 m³/min。另外，钻孔变形严重，其中1#孔在终孔3 d时孔深26.5 m处完全闭孔。5#孔岩芯情况见表2。

表2 海石湾矿风井钻探岩芯情况

层序	孔深 /m	层厚 /m	岩芯长度 /m	取芯率 /%	岩芯描述	标高 /m
1	16.30	16.3	3.78	27	粉砂岩 中下部夹有多层灰黄色含油气石英细砂岩 其厚度为0.3~0.9m 粉砂岩圆片25个/m 细砂岩37个/m。	1 423.60/1407.30
2	19.50	3.20	0.82	26	油页岩：局部夹植物化石或煤线，地层倾角为16°。	1 404.10
3	23.60	4.10	2.7	66	细砂岩：局部夹粉砂岩，岩芯圆片28个/m。	1 400.00
4	24.60	1.00	0.7	70	中细砂岩：岩芯圆片37个/m。	1 399.00
5	25.85	1.25	0.85	68	细砂岩：致密块状，局部含白云母，岩芯圆片33个/m。	1 397.75
6	36.08	10.23	3.83	37	中砂岩：有油斑，局部为油浸、油臭味，岩芯圆片31~37个/m，最多达58个/m。	1 387.50
7	41.50	5.42	4.80	89	粉砂岩：局部含白云母，岩芯圆片26个/m。	1 382.08
8	42.73	1.23	0.90	73	中砂岩：含有少量油斑，岩芯圆片多达43个/m。	1 380.87
9	51.39	8.66	4.47	52	粉砂岩：平坦断口，局部含白云母，未见明显岩芯圆片	1 372.21
10	56.46	5.07	4.75	90	泥灰岩：深灰色，局部含植物化石。	1 367.14

钻探考察结果表明，从考察孔开钻标高+1 423.60 m以下22 m施工较正常，岩芯饼为25~37个/m，但岩芯饼断面与环状裂隙截面无规律性。该段尚处于突出孔洞(长轴为8 m、短轴为6.5 m的平椭圆柱体)的卸压、排放油气影响范围，无突出危险，留不少于5 m的安全岩柱可直接掘进17 m。考察孔从标高+1 400.60 m以下20.73 m，钻孔有突出预兆，岩石呈薄片或松软碎屑状，喷孔、变形严重，油气涌出增加等。岩芯饼为26~58个/m，部分岩芯有孔眼流油现象，该段井巷具有突出危险性。

经掘进实践初步表明，突出危险油砂岩层钻孔岩芯被分割成凹凸形圆饼(凸面朝孔底)、岩芯上有环状裂隙，其圆饼与环状裂隙与在非突出危险砂岩层打钻方式和岩体结构特征影响所形成的圆饼与环

状裂隙有所不同；突出危险油砂岩层的圆饼断面与环状裂隙截面与钻孔轴线相垂直。油砂岩岩芯凹凸片越多或存在环状裂隙、岩芯孔眼流油冒气时，为突出危险油砂岩层，1 m岩芯有凹凸片的小于35 h，则无突出危险；反之，大于35 h，有突出危险。

在有突出危险区段，采取超前钻孔措施，钻孔直径 $\Phi 91$ mm，间距2.5~3.0 m，排放钻孔终孔控制巷道轮廓线外2.5~3.0 m。经巷道前方和周围的突出岩层均匀卸压和排放油气后，在两措施孔之间布置的检验孔岩芯片下降幅度达25%左右，且打钻正常，基本消除了突出危险，然后采用浅眼光面爆破，在相关安全防护措施下安全穿过了突出危险油砂岩层。

层的重量通过它形成的力学平衡结构大部分转嫁到工作面前方煤体上,所以不可控岩层的运动对矿山压力显现影响极大,特别是对工作面前方的支承压力起着决定性作用。

2) 上位岩层被支架工作阻力控制的厚度决定顶板下沉量及支架活柱缩量的设计,也对下位岩层的完整性及稳定性起决定作用。采场上覆岩层运动的幅度随其离开煤层上层面距离的增加而减少。在可控岩层中被支架控制使之相对不产生运动的岩层厚度越大,产生运动的岩层离煤层上层面的距离越远,顶板下沉量及支架活柱被压缩量也就越小,下位岩层也就越完整稳定。反之,下位岩层遭到破坏也就越大,其完整性、稳定性也越差。当上位岩层全厚都被支架工作阻力控制时,工作面顶板下沉量最小(即为不可控下沉量),所以上位岩层的下沉量受支架工作阻力所控制。在上位岩层内,支架工作阻力越高,被支架控制的上位岩层的厚度就越高,顶板下沉量也就越小,因此支架设计缩量应小些,反之应该大一些。

3) 上位岩层被支架工作阻力控制的厚度还决定着砌体岩梁离层裂隙带岩层的离层层数(或厚度)及离层间隙,也决定着回采工作面周期来压的强度。上位岩层被支架工作阻力控制的厚度越大,其未被支架控制的可控让岩层就薄且离开煤层上层面距离就越远,当然产生离层的岩层数就少,层与层间的离层间隙也就越小,周期来压强度也就越小;反之,离层的层数就越多,层间离层间隙也就越大,周期来压强度就越大;当可控岩层全厚都被支架工作阻力所

控制时就实现了可控岩层与不可控岩层的同步弯沉运动,离层现象随即消失,相应的周期来压现象也就消失了。

4) 支架额定工作阻力的设计范围应该在上极限工作阻力和下极限工作阻力这个范围内。对于必控岩层必须用具有足够工作阻力的支架去控制其运动,该让的岩层则一定要以支架的缩量来适应它的弯沉运动,让开它的压力。支架的额定工作阻力设计成大于上极限工作阻力是不必要的,因为大于部分并不能起到控制该阻力所对应的顶板岩层运动的作用,反而造成支架笨重,增加了材料消耗量和支架制造工艺上的复杂性,降低经济效益;如果支架额定工作阻力设计得小于下极限工作阻力,则下位岩层得不到完全被控制而造成下沉量增大,台阶下沉、压死支架、局部冒顶甚至垮面,给安全工作带来威胁。

参考文献:

- [1] 钱鸣高.采场矿山压力与控制[M].北京:煤炭工业出版社,1983
- [2] 张可斌.采场上覆岩层运动规律及支架工作阻力、初撑力的探讨[C].第二届采场矿山压力与理论实践讨论会论文集汇编,1983
- [3] 毕华照,宋振骥,乔福祥,等.煤矿顶板事故的防治[M].北京:煤炭工业出版社,1991
- [4] 周冰,王守安.回采工作面的矿压和顶板管理[J].煤炭技术,2003(2)

(责任编辑:吴自立)

(上接第24页)

4 结论

1) 岩石与油气突出是地应力、油气压力及岩石物理力学性质等因素综合作用的结果,影响突出的因素是相互联系、相互制约的。地应力达到一定数量级及其变化是岩石与油气突出的前提;油气压力是突出发展的主要动力,油气对岩石有腐蚀、软化等作用,尤其是原油液态向油气气态的转化所产生的气体压力梯度对岩石的破坏、搬运作用更明显,含油气砂岩具有弱化、损伤的性质,抵抗破坏的能力低,为突出创造了有利条件。放炮诱导突出是外因,合理的放炮掘进方式能降低突出强度与频率。

2) 钻孔岩芯法及突出预兆法能较好地预测出工

作面岩石与油气突出危险。海石湾矿初步试验表明,1 m岩芯有凹凸片小于35个时,一般无突出危险;反之,大于35个时,有突出危险。

3) 岩石与油气突出的机理与综合防治技术有待于针对具体工程地质条件进一步研究完善。

参考文献:

- [1] 于不凡.煤和瓦斯突出机理[M].北京:煤炭工业出版社,1985
- [2] Litwiniszyn J. A Model for the Initiation of Coal—Gas outbursts. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr. 1985, 22 (1):39–46
- [3] 中华人民共和国煤炭工业部.防治煤与瓦斯突出细则[M].北京:煤炭工业出版社,1995

English Abstracts of This Issue

Research on Waste Gas Desulfurization in Non-ferrous Metal Smelting (1)— This paper analyzed the present state of waste gas pollution in the process of non-ferrous metal melting and study was made on the application of pneumatic emulsion technology in control and treatment of sulfur-containing waster gas discharged in non-ferrous metal melting. The application of this technology in the treatment of waster gas from zinc oxide ring kiln in Huize Lead-zinc Mine showed that this technology has the functions of good gas-liquid turbulence effect, high desulfurization efficiency, small system resistance and high utilization efficiency of sulfur fixative. This technology has marked desulfurization and dust removal effect under circumstance of high waste gas pollutant concentration and large air volume in the process of non-ferrous metal melting.

Research on Mechanism and Reasonable Parameters of Gas Drainage by Pressure Relief of Overlying Roof Rock in a Working Face (3)— On the basis of theoretical analysis and on-the-spot tests, the paper analyzed the dynamic variation law of overlying roof rock caving and deformation in the working face during coal extraction, and the influence of the key rock layer position and its characteristics of the overlying roof rock on the extension of roof caving and fractured zone of roof rock strata after coal extraction. In addition, the paper put forward the gas drainage technique by pressure relief of the overlying roof rock according to the site engineering practice, analyzed the factors affecting gas drainage volume and obtained the reasonable arrangement parameters of draining holes in roof rock, thus providing a new way for gas drainage in a gassy coal field.

Experimental Study of Hydrogen Source Determination in Gob of Xinji Coal Mine (7)— Based on the desorption and pyrolytic test of 21 coal samples taken from Xinji Mine, the author drew up the relation curve of the variation of hydrogen concentration with coal temperature, made analysis and study on the hydrogen source in the gob in Xinji Mine and reached the conclusions that hydrogen is absorbed in Xinji, it can desorbed from coal at normal temperature and the hydrogen generation increased with the rise of coal temperature.

Mine Safety Evaluation Based on Grey System Theory (10)— Mine safety system is a non-linear dynamic system, of which the relation of its structure is not fully clear and the connotation can't be expressed by a specified mathematics function. Based on above characteristics, the gray interconnected model in gray system theory was used in this paper for the quantized analysis on many non-linear, discrete and dynamic factors affecting mine safety, integrated evaluation on mine safety was conducted and practical results were obtained, which thus provide the basis for safety management of mines.

Review of Exploitation and Utilization Techniques for Subsidence Area of Coal Mine (16) —To counter the specified ecological environment in subsidence area of a coal mine, this paper probed into the reconstruction of agro-ecological environment in the subsidence area of a coal mine as well as the way and measures for the full exploitation and utilization of the subsidence area.

Pollution and Hazard of Motor Vehicle Exhaust Emission and Its Control (19)— The paper expounded the pollutant exhausted by motor vehicles and its harmfulness, analyzed the influence of motor vehicle exhaust emission on atmospheric environmental quality and the pollution cause, and put forward some measures and proposals for the pollution control of motor vehicle exhaust emission according to the actual conditions in Liupanshui City.

Probing into Mechanism of Rock and Oil Gas Outburst and Their Prediction in Coal Face (22) — The comprehensive analysis showed that the burst of sandstone and oil gas was resulted in the combined action of the factors such as strata stress, oil gas pressure and the physico-mechanical properties of rock. This paper gives a description of the use of core method and outburst omen method to predict outburst hazard in airshaft of Haishiwan Coal Mine.

Probing into Caving Method of Roadway in Steep Seam (35)— The test of caving mining of roadway in steep seam has got better effect in Jiahe mine. This mining method has the feature of high recovery rate, low labor strength, low production cost, ventilation under full negative pressure and better safety conditions and can be used as a new method for the extraction of steep medium-thick coal seams.

Prevention and Control of Shock Bump in Inflammable Extra-thick Seam (40)— Shock bump is one the major disasters threatening safe production in coal mines. This paper, based on the analysis of the geological conditions in Qianqiu Mine, put forward appropriate preventive and control measures for the shock bump, good engineering results and considerable economic benefits were obtained, which can be useful in the mining of inflammable extra-thick coal seam with shock bump.

Comprehensive Gas Control in Extraction of Lower Protective Seam (45)— The extraction of protective coal seams is an effective measure for the prevention and control of regional gas outburst used in the mining of group of seams in outburst mines. However, gas still needs to be comprehensively controlled during the extraction of protective seams, this includes the prevention and control of the gas emission from the protective seam to be mined and the relief gas from the protected seam. This paper describes some technical measures for the comprehensive gas prevention and control during the extraction of lower protective seam, including interception bore-holes, highly-located bore-holes and gas drainage from "P" type tail gate.

Application of False-incline Flexible Shield Mining System in Coal Face with Seam Pitch Less than Rest Angle of Waste (47) — This paper describes the application of false-inclined flexible shield mining system in coal face with seam pitch less than rest angle of waste. Reliability demonstration of this mining system was conducted, the measures for the advance of shield support were put forward and the support structure suitable for false-inclined flexible shield mining system in coal face with seam pitch less than rest angle of waste was summarized. The economic benefit obtained by using this method is much better than that by longwall mining.