

无井式煤炭地下气化技术大有作为

——访问乌兹别克斯坦安格连煤炭地下气化站体会

汤凤林, 段隆臣

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:无井式煤炭地下气化是一种新的采煤技术,对我国具有重要意义。介绍了乌兹别克斯坦安格连煤炭地下气化站的开采技术。

关键词:煤炭地下气化;乌兹别克斯坦安格连煤炭地下气化站;钻孔

中图分类号:TD823;P634 **文献标识码:**C **文章编号:**1672-7428(2007)06-0001-05

1 概述

煤炭地下气化,又称气化采煤,是一种直接把煤在地下进行气化成煤气,把煤气送到地上的一种采煤方法。无井式煤炭地下气化就是不用打矿井、坑道,而是用打钻的方法,通过钻孔对煤炭进行地下气化的。

无井煤炭地下气化过程由下列阶段组成:首先从地表向煤层钻进垂直(或倾斜)钻孔。在煤层上方(地表上)按照一定网络布置并钻进的钻孔(包括供给压缩空气的进气孔和排出生成煤气的出气孔)形成的空间,称为地下气化炉。然后对钻孔在煤层中实行孔底火力贯通,形成气化通道。通过气化通道将煤层点燃,使煤炭经过燃烧(氧化作用)发生气化,产生煤气,并通过出气孔将煤气送往地上,供客户使用。

20世纪50年代,苏联在煤炭地下气化方面做了大量的工作,取得了丰富的经验,建立了许多煤炭地下气化站(如乌兹别克斯坦塔什干附近的安格连地下气化站、莫斯科郊外地下气化站、图拉市附近的沙特地下气化站、库兹巴斯的南阿宾气气化站、顿巴斯的利西昌气化站等),在技术和工艺方面处于世界领先地位。其它国家如法国、瑞典、比利时、波兰、意大利、南非、澳大利亚等国所采用的技术和工艺,基本上也是前苏联所采用的技术和工艺。

随着我国国民经济的发展和人民生活水平的提高,能源需求大量增加,所需供应日趋紧张,到2010年石油天然气进口量要达到80%左右。中国是世界

上第一产煤大国,煤炭资源丰富,能源消耗的70%左右来自煤炭。无井煤炭地下气化是我国解决未来能源紧张的一个重要出路,可以代替部分石油天然气,是减少当前大气污染的重要途径,而且投资少、见效快。此外,这也是改变我国煤矿生产安全事故不断发生现状的重要措施,可以大大降低百万吨煤炭生产人口死亡率。

最近,笔者和新奥集团公司专家一起考察了乌兹别克斯坦安格连煤炭地下气化站。现将有关情况 & 体会总结如下,供读者们参考。

2 乌兹别克斯坦安格连煤炭地下气化站概况

乌兹别克斯坦安格连煤炭地下气化站建于1961年,是世界上目前最大的煤炭地下气化站。该气化站的主要目的是把该地的地下褐煤气化成为动力煤气,供给安格连热力发电站发电使用。这个气化站开采的是安格连煤田中,按照技术经济论证和矿地质条件来说都不适于用露天开采和地下开采的那部分采煤区。这个气化站45年来一直正常生产,非常难能可贵,是独联体国家中最有代表性的煤炭地下气化站之一。多年的气化采煤经验表明,利用地下气化采煤的方法保证了获得工业规模的动力煤气,稳定地连续供给当地用户(安格连热电站和新安格连热电站,因为乌兹别克斯坦天然气比较多,所以主要用来发电)使用,为当地经济的发展做出了非常重要的贡献。

收稿日期:2007-05-22

作者简介:汤凤林(1933-),男(汉族),辽宁义县人,中国地质大学(武汉)教授、博士生导师,探矿工程专业,从事钻探工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,(027)67884207,fltang@cug.edu.cn;段隆臣(1967-),男(汉族),江西南昌人,中国地质大学(武汉)工程学院勘察与基础工程系主任、教授、博士生导师,探矿工程专业,从事钻探工程和金刚石制品方面的教学和科研工作,(027)87517041,duanlongchen@163.com。

3 无井式煤炭地下气化流程

图1为煤炭地下气化的工艺流程图。

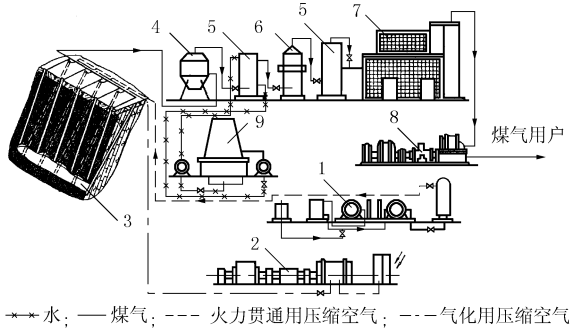


图1 地下气化站工艺流程图

1—压风机;2—涡轮鼓风机;3—地下气化炉;4—旋风除尘器;5—煤气洗涤器;6—电动过滤器;7—除硫车间;8—涡轮式鼓风机

钻孔间火力贯通用的高压压缩空气和气化用的低压压缩空气,从装有压风机和涡轮鼓风机的鼓风机车间供给。利用地下气化站用的压风机,可以得到压力为5~7个大气压(1个大气压=0.1 MPa,下同)和流量为5000~6000 m³/h的压缩空气。涡轮鼓风机可以生产地下气化炉进行气化过程需要的低压空气,流量可以达到50000~60000 m³/h,压力为2个大气压左右。从压风机和涡轮鼓风机到地下气化炉高压空气管道和低压空气管道,把压缩空气送到工艺钻孔中。在工艺钻孔的井头上装有阀门,可以调节压入压缩空气和排出煤气的数量和压力。由于地下气化炉内的气化过程,通常是在高于大气压力0.3~0.4个大气压的压力下进行的,所以气化炉中产生的煤气是在这个压力下进入煤气排出管道的。与煤气一起从生气空间排出去的还有一些胶质物和不同的机械杂质:灰分、煤渣、砂子和其它岩石等。出气孔口煤气的温度达到200~350℃,因此得到的煤气需要进行净化和冷却循环。净化并冷却的煤气通过直径2 m、长5 km的输气管道送往安格连热力发电站,供发电使用。

4 煤炭气化的物理化学基础

煤炭地下气化过程参见图2。从图2可见,气化过程分为氧化区、还原区和一氧化碳转化区。

压缩空气中的氧气和煤的主要成分(碳)发生化学反应是煤炭气化过程的化学基础。在一定的温度条件下,当氧和碳的表面接触时,就发生这种化学反应。碳和氧的反应可以如下表示:

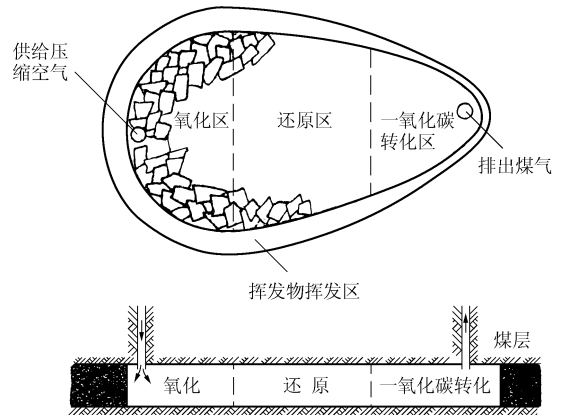
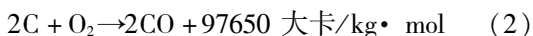
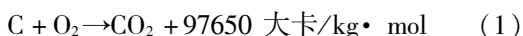
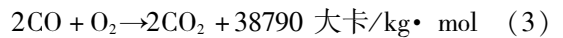


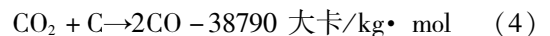
图2 煤炭地下气化过程示意图

在有氧气存在条件下,CO可以按(3)式变成CO₂:



可见,在碳和氧反应区内的最终结果基本上是CO₂,是放热反应,因此煤和氧化产物的温度升高了。

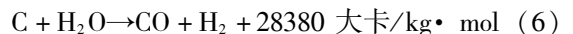
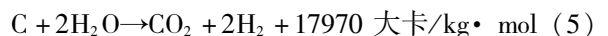
在高温条件下,CO₂和C也发生化学作用(吸热还原反应):



在(4)式反应区内,如果没有大量的自由氧的话,则产生的CO是不燃烧的。

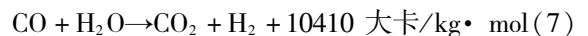
所以,不燃的CO₂依靠反应(1)、(2)、(3)式放出的热能,和C反应,可以产生煤气的可燃成分CO。

煤热分解产生的水蒸气在高温条件下也参加煤的气化过程,其结果是形成按下式反应的煤气中的可燃成分(CO和H₂):



依靠上述放热反应的热能,煤的温度升高,从中分离出挥发物。这种挥发物中含有可燃成分CO、H₂、CH₄等。

当水蒸气含量很大时,CO发生转化:



气化通道形成煤气的主要成分为:二氧化碳、氢气、一氧化碳(压缩空气中氧气、二氧化碳和水蒸气与煤层表面还原反应的产物,以及固相热分解的产物)、甲烷(煤热分解的产物)、不饱和烃(煤热分解的产物)、硫化氢(煤热分解的产物)和氮(压缩空气的产物)等。

安格连地下气化站煤气的组成见表1。

表 1 安格连地下气化站煤气的组成

煤气成分	体积比/%	煤气成分	体积比/%
CO ₂	20~22	H ₂	22.0~22.4
CO	4.0~6.0	CH ₄	2.2~4.0
O ₂	0.3~0.5	C _m H _n	0.2~0.3
H ₂ S	0.5~0.6	N ₂	50.6~44.4

5 气化通道内的煤炭气化过程

通道内气化过程发生在气相、固相和固、气相界的表面上。气相主要是指压入的压缩空气(进气)、水蒸气和煤气。固相是指煤层、顶底板和气化时形成的灰渣。岩石、灰渣、煤层与气体接触的表面都是固相和气相的界面。通道中各相位置见图 3。

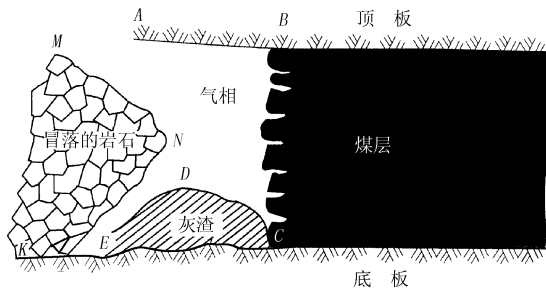


图 3 气化通道中相位示意图
注:ABCDE 和 MNK 是相位界面

气化通道长度内煤层表面上的温度分区情况,主要取决于气相的成分和温度,见图 4。OA 是通道的首端,此段煤层表面温度大致等于煤层的自然温度。AB 是煤层干燥区,可以形成煤层点火区,但其温度仅仅可以保证煤炭处于干燥过程。BB 段,温度由 T_1 升到 T_2 ,是燃烧准备区。在 AE 长度内,煤层表面上的温度由煤层自然温度 T_n 急剧上升到 T_3 。BE 长度段占有重要位置,是放热(氧化)反应区。EI 是吸热(还原)反应区。IM 段是热分解(干馏)区,

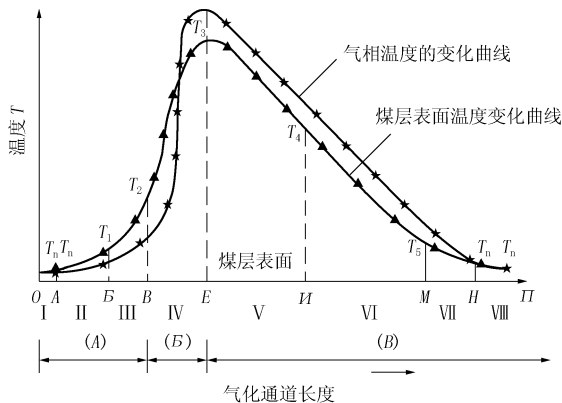


图 4 温度变化特性与煤层表面分区关系示意图

OA—进气区;AB—进气干燥区;BB—燃烧准备区;BE—放热反应区;EI—吸热反应区;IM—热分解区;MH—煤气干燥区;HP—煤气区

由于周围环境和热分解过程的消耗,温度由 T_4 降到 T_5 。MH 为煤气干燥区。H 点以后,气化通道长度上的煤层表面温度保持在略高于煤层自然温度的水平 T_n 上。

可以把气化通道中的热量变化情况分为 5 个阶段,见图 5。

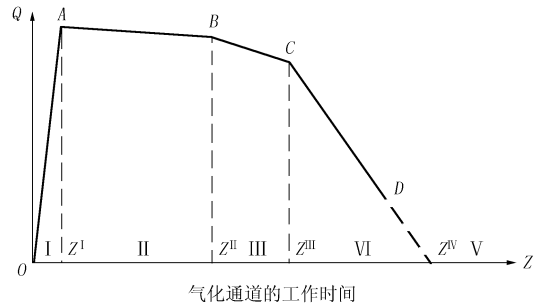


图 5 气化通道内气体燃烧热量 Q 与工作时间的关系

第一个阶段 OZ^I 是通道点火和燃烧工作面形成时间。在这一段时间内,气体燃烧产生的热量在暂短时间内达到最大值(OA)。

在第二个阶段 $Z^I Z^II$,煤层表面长度上有 3 个过程:放热过程、吸热过程和低温干馏过程,气体燃烧产生的热量维持在一定的水平上(AB)。气体产生热量的小幅下降是由于压缩空气中的氧气和燃烧工作面的反应强度平均值有些下降所引起的。

第三阶段 $Z^II Z^III$,由于高热量挥发物进入气体的数量减少,所以气体燃烧热量降低了(BC)。

第四阶段 $Z^III Z^IV$ 还原区被置换,气体燃烧热量急剧下降,主要是由于在煤层表面范围内,不能发生二氧化碳的还原反应和水蒸气的分解反应了(CD)。

第五阶段 $Z^IV Z$,通道内仅有氧化区,得不到高燃烧热量的气体。而且,随着煤层气化的进行,气体中的自由氧气越来越多。

图 6 上给出了煤气成分与气化通道长度的关系。从图 6 可见,气化通道长度以不超过 30 m 为宜。

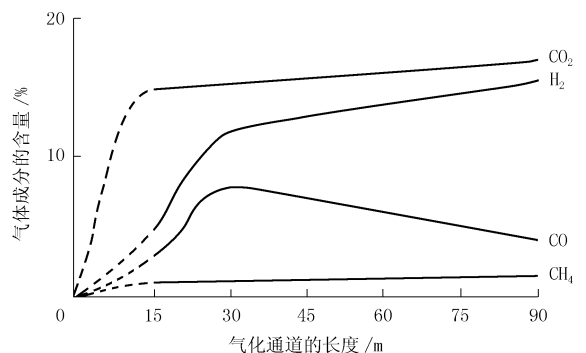


图 6 煤气成分与气化通道长度的关系曲线

6 煤炭气化的准备工作

地下煤气的生产是在地下气化炉中通过压送压缩空气完成的。地下气化炉是一个从地表按照一定次序、向煤层钻进的压送压缩空气钻孔和排出煤气钻孔的系统。无井煤炭气化的准备工作从打钻开始。根据煤层倾角和采用气化方法的不同,钻孔可以打成垂直孔或与煤层成一定倾斜角度的斜孔。在某些气化方法中,要求使用弯曲钻孔,即倾斜-水平钻孔。钻孔完成后,下入直径 200~250 mm 的套管柱固孔。套管外空间灌注水泥浆。灌注水泥浆的目的是为了保证向地下气化炉供给压缩空气或排出煤气时的密封性,以及隔绝上覆岩石中的含水层。

在地表上,把钻孔中的套管与地上的管道连接起来,地上管道是随着钻孔的钻进和根据供给压缩空气和排出煤气的需要而铺设的。地上管道设计中,要考虑到既能向地下气化炉供应压缩空气,又能从中排出煤气。

继钻孔、下套管和接通地上管道之后的下一个阶段是钻孔的火力贯通,即在煤层中把两个钻孔火力贯通起来,建立起可以进行气化的初始通道。这个阶段是非常重要的一个阶段。通道应该具有一定的方向性和足够的断面面积,以便可以通过必要数量的压缩空气和煤气。因为钻孔的直径不大,所以建立这样的气化通道是很困难的。但是,到目前为止已经研究成功了許多适用于各种不同矿山地质条件和不同物理化学性质煤层的建立这种通道的方法。

渗透式火力贯通方法(见图7)是一个可以实际应用于无井式煤炭地下气化中建立通道的方法。这种方法已经成功地用于自然透气性非常好的褐煤中。其实质是:在一个拟贯通工艺孔的孔底,对煤层进行点火。为此,向这个钻孔中投放炽热的焦炭或者下入专门的点火装置,短时间供给压缩空气。当在孔底形成初步的火源后,向邻近的拟贯通工艺孔的孔底开始供应压力为 3~3.5 个大气压的压缩空气。压缩空气渗透通过煤层中的孔隙和自然裂隙,到达气化的初始火源,在此与煤发生化学反应。同时,气化火源迎着压缩空气气流方向,即向邻近的钻孔方向移动。于是,在煤层中的两个钻孔之间形成了贯通的火力通道。煤炭沿着火力通道可以燃烧到很高的温度。通过这种通道可以压送大量的压缩空气,足以使煤炭发生气化。莫斯科郊外煤田用此方法贯通了 1200 多个钻孔。这种贯通方法的主要缺点是贯通速度比较慢,一般为 0.6~0.7 m/天。

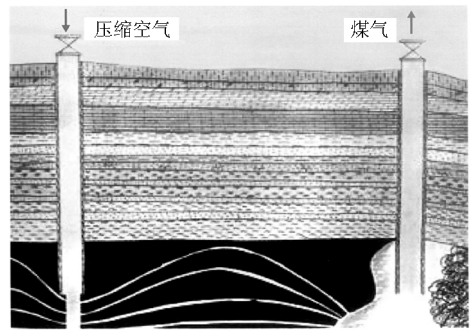


图7 渗透式火力贯通示意图

7 煤层地下气化方法

在地下气化炉准备工作完成后,就可以进行煤层地下气化过程本身的工作了。

莫斯科郊外褐煤煤田的煤层埋深为 40 m 左右,使用如下气化方法(见图8)。在拟进行气化的采区,确定钻孔间距为 25 m 的正方形网络。在每一排上布置 8~10 个工艺钻孔,有时多一点。在地表上确定好气化炉的孔位后,开始钻进头 3 排钻孔。钻完孔后,下套管。套管下到煤层厚度的 2/3 部位,以便火力贯通通道能够在煤层底部形成。一边钻进、下套管、灌水泥,一边把钻孔连接到为给定地下气化炉准备好的压缩空气管道和煤气管道上。地下气化炉进行渗透式火力贯通时,铺有 3 个管道:一个管道供给用于钻孔火力贯通的压缩空气,另一个管道用于供给气化过程本身需要的压缩空气,第三个管道用于排出产生的煤气。

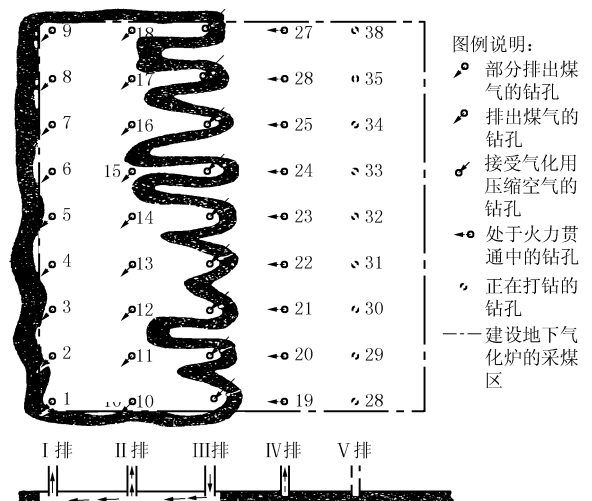


图8 莫斯科郊外地下气化站采用的煤炭气化示意图

在钻完前面 3 排钻孔并接通管道后,进行钻孔间的火力贯通。同时进行下一排钻孔的钻进工作。火力贯通工作的开始阶段是建立点火线,即建立称

之为点火通道的第一排钻孔间的气化通道。通常点火从位于点火(线)排中心的钻孔(如图 8 中的 5 号钻孔)开始。然后向其邻近钻孔(4 和 6 号钻孔)供给火力贯通的压缩空气。这两个钻孔火力贯通后,对 3 和 7 号钻孔进行火力贯通,如此贯通整个点火(线)排上的钻孔。

在建立点火线(排)之后,从低压空气管道开始向点火排上的钻孔供给数量不大的气化用压缩空气。向所有第二排上的钻孔供给中等压力的压缩空气,对其进行火力贯通。在第二排钻孔火力贯通结束后,开始进行正常的气化过程。此时,向第二排钻孔供应气化用的压缩空气,一般为向每个钻孔供应 $2000 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。通过第一排钻孔排出得到的煤气(通过改变进、出气阀门,进气孔和出气孔可以换位)。此时,从中等压力的压缩空气干线管道向第三排钻孔供应火力贯通用的压缩空气。在此期间,钻进第四排钻孔,下套管,与管道连接。

当第一排和第二排钻孔之间的煤层气化采空后,对第三排钻孔和第二排钻孔进行火力贯通,此后向第三排钻孔供给气化用的压缩空气,以此类推。

图 8 上给出的是气化过程在第三排和第二排钻孔之间进行,向第四排钻孔供给火力贯通用压缩空气,获得的煤气通过第二排钻孔排出,部分通过第一排钻孔排出的情况。

在任何两排钻孔之间的煤形成煤气并停止利用该排钻孔作为排出煤气孔后,拆除管道,搬往新的地下气化炉采区,为下排钻孔气化进行准备工作。可以利用振动式钻机把用过钻孔内的套管起拔出来,以备后来继续使用。

这种气化方法的优点有:(1)保证生产煤气工作面的宽度不变;(2)工艺过程施工比较简单,不要求常常改变钻孔工作的性质(进气、出气);(3)地上管道简单;(4)可以调整一些钻孔工作类型的变化。缺点是所产生煤气的物理热能利用不够。

安格连煤层厚度达到 20 m,埋深较大(200 m 左右),地下气化炉的准备工作使用另一种气化方法(见图 9)。这种方法与上面的方法有两点不同:第一是除了点火排的钻孔外,所有其它钻孔都不是垂直孔,而是与地表成 $50^\circ \sim 55^\circ$ 的斜孔,其目的是为了防止由于产生煤气空间上方的岩石发生位移和变形而使工艺钻孔可能遭到破坏;第二是安排所谓的煤气“侧向”排出通道,即沿着气化炉两翼打两排专用钻孔 3,用来在气化炉整个工作期间排出获得的煤气,这种钻孔可以使用较长时间,直径比进气孔

大($\text{Ø}350 \text{ mm}$)。

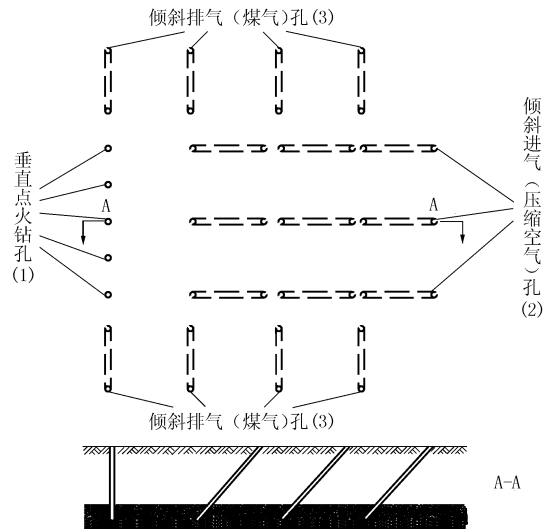


图 9 安格连煤田平缓水平厚煤层条件下地下气化施工示意图

利用这种方法进行气化的过程与前面谈到的方法基本一样,即随着两排钻孔之间煤层的采区生成煤气,压缩空气开始送向下一排斜孔,等等。

8 技术经济效益

安格连热力发电站于 1989 年和 1990 年对使用煤和煤炭地下气化煤气发电进行过经济核算,见图 10。

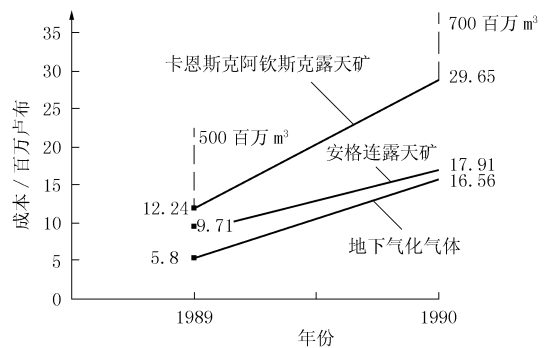


图 10 安格连热力发电站采用煤炭地下气化的经济效益图

从图 10 可见,这两年使用的地下气化煤气分别为 5 亿 m^3 和 7 亿 m^3 ,煤气的发热量为 3.2 MJ/m^3 ,对比的对象是卡恩斯克阿钦斯克露天矿采的煤和安格连露天矿采的煤。1989 年这两个露天矿采的煤的成本分别为 12.24 卢布/t 和 9.71 卢布/t,煤气折合为煤的成本为 5.8 卢布/t。1990 年这两个露天矿采的煤的成本分别为 29.65 卢布/t 和 17.91 卢布/t,煤气折合为煤的成本为 16.56 卢布/t。可见,安格连热力发电站这两年由于使用煤炭地下气化煤气发电

(下转第 13 页)

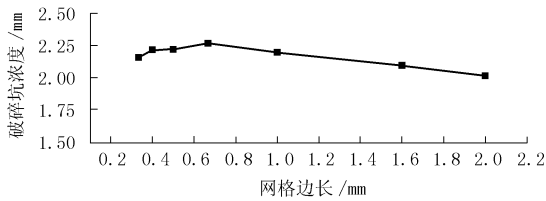


图9 混凝土板的破碎坑深度(不同网格边长)

从图 10 中可以看出,网格厚度对应的破碎坑深度趋势与网格边长的结果的一致。当网格厚度较小时,破碎深度的误差很小,如方案 C 与方案 D 计算的破碎坑深度分别为 2.218 mm、2.216 mm,误差仅为 0.09%。

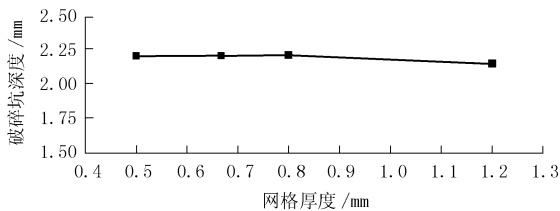


图10 混凝土板的破碎坑深度(不同网格厚度)

综上所述,要对整个潜孔锤钻头(球齿直径 16 mm)的冲击过程进行仿真模拟,在建立数值模型时混凝土板(或岩石板)与球齿接触区域的网格尺寸选为 0.4 mm × 0.4 mm × 0.667 mm 即可满足计算精度要求。

3 结语

利用非线性显式三维有限元程序 LS - DYNA3D 对潜孔锤钻头球齿冲击混凝土板的过程进行

了数值模拟。通过对混凝土板划分不同单元尺寸网格进行仿真,发现不同尺寸的单元网格对球齿的冲击力、冲击侵入速度及混凝土的破碎坑深度均有影响。较粗的网格会导致较大的误差,然而过细的网格也并不能大幅度地提升计算精度。因此,利用有限元法研究钻头冲击破碎岩石、混凝土的问题时,需要充分考虑计算结果的精度与硬件配置的计算能力问题。

参考文献:

- [1] Akihiko Kumano. An Analytical and Experimental Investigation of the Effect of Impact on Coarse Granular Rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1982, (1).
- [2] F. E. Heuzu. An Overview of Projectile Penetration into Geological Materials with Emphasis on Rocks [J]. Internal Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1990, (1).
- [3] Behzad M H, Rohani R S. Analysis of Projectile Penetration into Concrete and Rock Targets[R]. AD/A, 016909, 1994.
- [4] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures [Z]. Defense Systems Division, Hopkins, Mimescta 55343, USA, 1985.
- [5] Johanson M. Structural Behavior in Concrete Frame Corners of Civil Defence Shelter. Non - liner Finite Element Analyses and Experiments [D]. Golehora, Sweden: Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, 2000.
- [6] 曹菊珍,李恩征,王政. 高速碰撞中有关混凝土与砂岩的破坏问题的数值研究[J]. 计算物理, 2002, 19(2): 137 - 140.
- [7] T. J Holmquist, et al. A Computational Constitutive Model for Subject to Large Strains, High Strain Rate, and High Pressures [C]. 14th International Symposium on Ballistics. 1993, 9: 591 - 600.

(上接第 5 页)

电而得到的经济效益是相当可观的(当时卢布同美元的比价是比较高的)。

9 结语

我国人口众多,资源有限,石油天然气缺口较大,但是煤炭资源比较丰富,煤炭地下气化是个新技术,很有实际意义。煤炭地下气化研究工作起步较晚,气化采煤生产工作至今没有开展起来,应该加强研究,努力探索,通过试验,早日推广才是。新奥集团公司正在计划开展这方面的工作。可以相信,他

们的气化采煤试验一定能够取得成功并在中国推广应用。钻探工程在煤炭地下气化方面是大有作为的。

参考文献:

- [1] Underground coal gasification in the Republic of Usbekistan [DB/OL]. WWW. EROSTIGAS. UZ.
- [2] Wakyub Г. Д. Подземная газификация углей в СССР и за рубежом[M]. Углетехиздат, 1957.
- [3] Скафа П. В. Подземная газификация углей [M]. Госгортехиздат, 1960.
- [4] Тучанинов И. А. Подземная газификация углей [M]. Госгортехиздат, 1961.