

煤矿瓦斯抽排井套管强度校核计算方法探讨

耿建国, 彭桂湘, 袁志坚, 李云峰, 熊亮

(河南省煤田地质局, 河南 郑州 450018)

摘要:近年来在煤矿安全生产中瓦斯抽排井得到越来越广泛的应用。这类井施工周期长、难度大、要求高,再加上套管直径大、总质量大、施工和套管的成本费用也很高,据所掌握的工程资料,国内已有数口井在施工过程的不同环节发生了不同形式的套管挤毁事故,造成整井报废,损失惨重。以某瓦斯抽排井下套管过程中工作套管发生严重挤毁事故为例,对其受力情况进行了深入分析,并在此基础上对大直径套管三轴应力强度校核计算方法作了详细论述。通过与传统单轴应力强度计算方法进行对比分析认为,套管三轴应力强度计算结果更准确科学,采用三轴应力强度计算方法指导前期套管设计,工程质量更加安全可靠,值得推广应用。

关键词:瓦斯抽排井;大直径套管;三轴应力;强度校核

中图分类号:TD7;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)10-0078-04

Discussion on Checking Calculation Method for Casing Strength of Mine Gas Pumping-exhaust Well/GENG Jian-guo, PENG Gui-xiang, YUAN Zhi-jian, LI Yun-feng, XIONG Liang (Coal Geology Bureau of Henan Province, Zhengzhou Henan 450046, China)

Abstract: Gas pumping-exhaust well is applied more and more widely in coalmine safety production in recent years, but its construction period is long with difficulty. Take the example of serious collapsing accident, analysis was made on the case stress; based on the analysis, the checking calculation method for tri-axial stress of large diameter case was discussed in detail. By the comparative analysis, the tri-axial stress calculation results are more accurate than the ones by traditional uniaxial stress calculation method.

Key words: gas pumping-exhaust well; large diameter casing; tri-axial stress; strength checking

煤矿瓦斯抽排井是以钻井方法在煤矿地面和井下工作场所之间建造的一种用于输送井下抽采的瓦斯,并集中回收利用的特殊工程通道,近年来在煤矿安全生产中得到越来越广泛的应用。目前,瓦斯抽排井的钻孔直径一般为600~1200 mm,钻孔深度在300~1000 m不等,入井的表层套管和工作套管直径一般在450~1000 mm之间。由于井眼直径和套管直径都比较大,井深接近1000 m,这给钻井和成井施工带来诸多困难。针对这些技术难点,有关专业技术人员通过理论研究和攻关,成功地完成了一批大直径瓦斯抽排井的施工,取得了良好的社会效益和经济效益。尽管如此,大直径瓦斯抽排井套管损毁事故仍时有发生。由于这类井施工周期长、难度大、要求高,再加上套管直径大、总质量大、作业费用高,一旦发生套管损毁事故修复和处理难度极大,成功率非常低,极有可能造成整个工程报废,经济损失巨大。因此进一步深入研究和分析套管损毁事故的原因是非常必要的,只有找出导致事故发生的根本原因才能有针对性地采取科学有效的

防范措施将事故风险降到最低。本文以某瓦斯抽排井下套管过程中工作套管发生严重挤毁事故为例,对大直径套管三轴应力强度校核计算方法作了初步探讨。

1 某瓦斯抽排井套管事故简介

某瓦斯抽排井设计井深850 m,井径750 mm。钻井作业结束后采用底部浮板法下入 $\varnothing 630 \times 14$ mm工作套管,套管连接采用井口焊接法。下入套管距离井底近60 m发现异常。此时套管总质量170 t,空管段高度170.00 m,拉力表指重为80 t,计算出浮力约90 t。其事故现象是:当套管下到距井底近60 m时管外环状间隙内的泥浆快速下降,同时井管发生抖动,拉力表指重下降为零,但是井管却不下降。发现问题后,施工人员及时进行了现场处理,下 $\varnothing 311$ 牙轮钻头试孔在473.80 m时遇阻,说明此处井管已经发生变形;冲孔发现泥浆从管外上返,说明井管已经出现破裂(后通过清水替换套管中的泥浆,清水条件下采用井下摄像证实套管已被挤毁,深

收稿日期:2010-09-10

作者简介:耿建国(1956-),男(汉族),河南焦作人,河南省煤田地质局总工程师、教授级高级工程师,探矿工程专业,从事矿产资源勘查及钻井工程技术管理工作,河南省郑州市郑东新区正光北街19号, gengjianguo-369@126.com。

度在 477 m 两根井管之间的焊接处),事故后采取各种方法处理,均未能奏效。

2 事故套管受力分析

套管的强度关系到瓦斯抽排井的工程质量和使用寿命,而套管的破坏与其受力状况密切相关。套管在下井、固井、完井以至至瓦斯排放全过程中将会受到各种外力作用,而且各种工况条件下套管的受力情况也并不相同;同时,套管在不同时期、不同地层受力情况也有所差别,如在表土层、卵砾石层、泥岩层、砂岩层、煤层等套管的受力情况是不相同的,在倾斜地层和非倾斜地层以及在断层附近和远离断层的情况下,套管的受力也会有很大差别。但是在各种外力作用下,均要求套管不发生破坏或不发生严重变形,也就是要求套管有足够的强度。套管的强度实质上就是指套管抵抗破坏的能力,强度决定了套管所能承受的最大外载荷即许可载荷的大小,也就是套管所受外载荷不能超过套管的许可载荷,否则,套管就会发生严重变形甚至破坏,从而影响到工程质量甚至造成工程报废。虽然套管在井下的受力比较复杂,但均可归结为轴向拉(压)力、外挤压力和内压力 3 种,相应地套管强度也有抗拉(压)强度、抗外挤强度和抗内压强度。由于类似煤矿瓦斯抽排这类井设计井深一般都在 1000 m 以内,遇到高压工业流(气)体地层的概率较小,所以套管受到的内外压力通常以静液柱压力为计算依据,相对来说轴向力作用较为复杂,必须进行详细受力分析求解。

事故案例已知条件有:井深 850 m,直径 750 mm,工作套管 $\varnothing 630 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$,管材 Q345b,管材屈服强度近似值 345 MPa,密度 7.85 g/cm^3 ,套管全长 795.70 m,入井深度 791.70 m,井内外钻井液密度均为 1.20 g/cm^3 ,管内液柱高 625.70 m。

对事故套管进行详细受力分析(见图 1),计算公式如下:

$$G = [\sigma_{\text{钢}} \times 3.1416 \times (D_o^2 - D_i^2)/4 \times h_c] \times 10^{-6} \quad (\text{t})$$

$$F_{\text{浮}} = [\sigma_{\text{泥浆}} \times 3.1416 \times (D_o^2 - D_i^2)/4 \times h_o + \sigma_{\text{泥浆}} \times 3.1416 \times D_i^2/4 \times (h_o - h_i)] \times 10^{-6} \quad (\text{t})$$

$$F_{\text{拉}} = G - F_{\text{浮}}$$

$$= G - [\sigma_{\text{泥浆}} \times 3.1416 \times (D_o^2 - D_i^2)/4 \times h_o + \sigma_{\text{泥浆}} \times 3.1416 \times D_i^2/4 \times (h_o - h_i)] \times 10^{-6} \quad (\text{t})$$

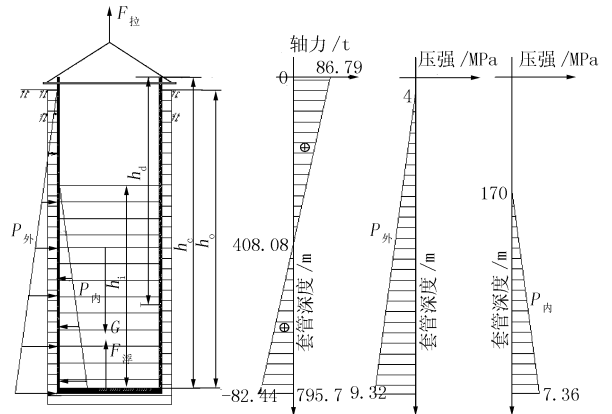


图 1 套管受力图

$$N = F_{\text{拉}} - [\sigma_{\text{钢}} \times 3.1416 \times (D_o^2 - D_i^2)/4 \times h_d] \times 10^{-6} \quad (\text{t})$$

$$P_{\text{外}} = \sigma_{\text{泥浆}} \times 9.80665 \times (h_o - h_c + h_d) \times 10^{-3} \quad (\text{MPa})$$

$(h_d \leq h_c - h_o \text{ 时 } P_o = 0)$

$$P_{\text{内}} = \sigma_{\text{泥浆}} \times 9.80665 \times (h_i - h_c + h_d) \times 10^{-3} \quad (\text{MPa})$$

$(h_d \leq h_c - h_i \text{ 时 } P_i = 0)$

式中: G ——套管自重; $F_{\text{浮}}$ ——套管受到的浮力; $F_{\text{拉}}$ ——钻机拉力; N ——套管轴向应力; $P_{\text{外}}$ ——套管外挤压力; $P_{\text{内}}$ ——套管内压力; $\sigma_{\text{钢}}$ ——套管钢材密度; $\sigma_{\text{泥浆}}$ ——泥浆密度; D_o ——套管外径; D_i ——套管内径; h_o ——管外液柱高度; h_i ——管内液柱高度; h_c ——套管总长; h_d ——套管深度。

轴向力:

$$G = [7.85 \times 3.1416 \times (630^2 - 602^2)/4 \times 795.7] \times 10^{-6}$$

$$= 169.23 \quad (\text{t})$$

$$F_{\text{拉}} = 169.23 - [1.20 \times 3.1416 \times (630^2 - 602^2)/4 \times 791.7 + 1.20 \times 3.1416 \times 602^2/4 \times (791.7 - 625.7)] \times 10^{-6}$$

$$= 86.79 \quad (\text{t})$$

$$N = 86.79 - 7.85 \times 3.1416 \times (630^2 - 602^2)/4 \times 10^{-6} \times h_d$$

$$= 86.79 - 0.21268 h_d \quad (\text{t})$$

内外压力:

$$P_{\text{外}} = 1.20 \times 9.80665 \times (791.7 - 795.7 + h_d) \times 10^{-3}$$

$$= (11.768 h_d - 47.072) \times 10^{-3} \quad (\text{MPa})$$

$(h_d \geq 4 \text{ 时})$

$$P_{\text{内}} = 1.20 \times 9.80665 \times (625.7 - 795.7 + h_d) \times 10^{-3}$$

$$= (11.768 h_d - 2000.56) \times 10^{-3} \quad (\text{MPa})$$

$(h_d \geq 170 \text{ 时})$

3 大直径套管三轴应力强度校核

目前国内外对套管损毁事故的研究绝大多数是基于油田用 API 标准系列套管,包括表层套管、技术套管、生产套管等。现行的套管强度设计方法也是依据 API/ISO Collapse Sub - Team(美国石油学会/国际标准化组织套管挤毁工作组)于1994年发布的 API - 5C3 标准,该标准属于石油产品标准化委员会,系推荐性标准,自愿使用。

API - 5C3 标准提出的套管强度计算公式是在若干年前大量套管挤毁试验数据基础上,采用数学回归方法最终得出的经验公式或修正的理论公式。近年来我国及国外许多油田公司发现,有些套管强度设计虽然符合 API 标准但仍然还是发生了不同形式的损毁;另一方面,该标准给出的数值是基于单轴应力条件下计算所得(即计算抗外挤强度时忽略轴向力和内压力,计算抗内压强度时忽略轴向力和外挤力)。众所周知,套管在实际工作条件下受到三轴应力作用,即轴向拉(压)应力、外挤压应力、内压应力作用。大量研究表明,轴向拉应力作用下,套管抗挤强度降低抗内压强度提高,轴向压应力作用下,套管抗挤强度提高而抗内压强度降低,所以要得到精确度尽可能高的强度值需要根据套管实际工作条件进行综合分析计算。

由于强度计算公式较多,计算量庞大,工程人员应用起来多有不便,依照有关公式要求,运用 EX-

CEL 编制了一套简易的套管强度校核程序。程序中红色区为原始数据录入区,黄色区数据录入需要根据相关条件手动选择(注意事项程序中已作详细说明),橙色区为结果显示区。事实证明该程序操作简便,计算可靠,值得继续完善后推广使用。该程序应用效果如图2所示。



图2 套管三轴应力强度校核计算程序界面

以事故案例套管深度分别为 $h_d = 0$ m(套管顶面),170 m(内液柱上表面),408.08 m(套管轴向应力为0的截面)及795.7 m(套管底面)处各典型截面为研究对象,应用“套管三轴应力强度校核”程序对其各组强度值进行计算,所得的结果见表1,数据对比效果见图3、图4、图5所示。

表1 套管各典型截面强度数据对比

套管深度 /m	轴向应力 /MPa	单轴抗外挤强度/MPa	单轴抗内压强度/MPa	套管外压力 /MPa	套管内压力 /MPa	有效外压力 /MPa	三轴抗外挤强度/MPa	三轴抗内压强度/MPa	抗外挤强度富余值/MPa
0	32.035	3.716	13.417	0	0	0	3.531	13.952	3.531
170	18.69	3.716	13.417	1.953	0	1.953	3.611	13.772	1.658
408.16	0	3.716	13.417	4.755	2.802	1.953	3.7	13.502	1.747
795.7	-30.428	3.716	13.417	9.317	7.363	1.953	3.834	13.014	1.881

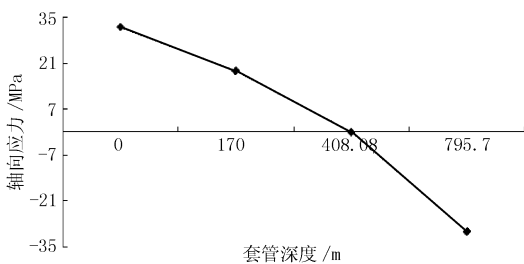


图3 套管各典型截面处轴向应力

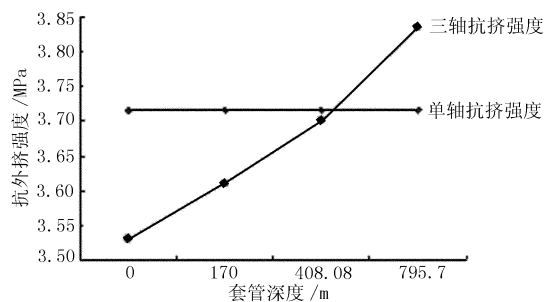


图4 套管各典型截面处抗外挤强度

从表1不难看出:

(1)一般情况下,套管抗内压强度均有较大富余(相对有效内压力),反而抗外挤强度相对来说比较欠缺(相对有效外压力),因此对于大直径套管强度校核应以抗外挤强度值为主要对象。

(2)以上分析可知,事故套管在该受力情况下,三轴抗外挤强度最小值出现在套管顶面处,这是由于该处所受拉应力最大,三轴抗外挤强度降低最多所致。

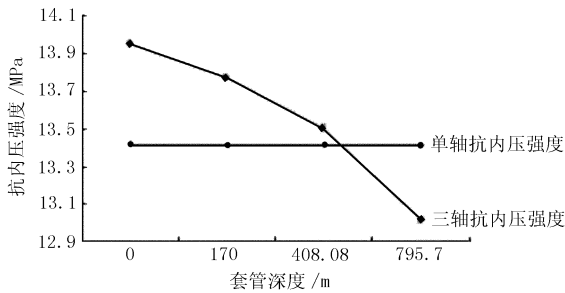


图 5 套管各典型截面处抗内压强度

(3) 套管在内液柱上表面所在截面处, 三轴抗外挤强度较有效外挤压力富余值最小, 因此该处将是三轴抗外挤强度校核的重要部位。

由图 3、4、5 可知:

(1) 图 3 说明, 采用底部浮板法, 套管轴向应力分布情况为: 上部受拉应力 ($\sigma_a > 0$) 作用, 随套管深度增加, 拉应力逐渐减小, 在套管中部某一截面处轴向应力为 0, 随深度继续增加套管下部轴向受压 ($\sigma_a < 0$)。

(2) 图 4、5 说明, 随套管轴向应力的减小, 套管三轴抗外挤强度提高, 三轴抗内压强度降低。传统的套管强度计算方法仅考虑单轴应力作用, 忽略了轴向应力等对套管强度值的影响, 为一固定不变值, 显然三轴应力强度计算结果更为准确可靠。

4 结论

通过与传统单轴应力强度计算方法进行对比分析认为, 套管三轴应力强度计算结果更准确科学, 采

(上接第 73 页)

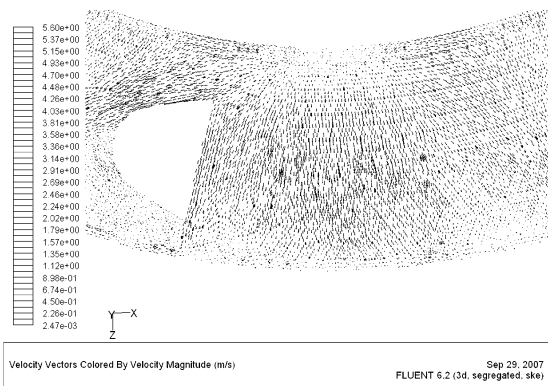


图 11 91 mm 高效复合片地质钻头改进水路后的井底流场速度矢量图

6 结论

(1) 依据岩石性质, 设计出创新的钻头结构是

用三轴应力强度计算方法指导前期套管设计, 工程质量更加安全可靠, 值得推广应用。但是, 由于这种大直径套管并非标准化生产, 套管本身即存在着厚薄不均、圆度低、焊接垂直度和同心度差等缺陷, 加之井眼不规则、存在井斜等问题, 不可避免井眼会对套管产生一定的横向附加应力, 这种横向附加应力无法准确预知却极具破坏性, 所以实际套管设计时, 其强度设计值须留有一定余地, 以确保工程质量安全。

参考文献:

- [1] MT/T 1076-2008, 煤炭地质钻探规程[S].
- [2] SYT 5724-2008, 套管柱结构与强度设计[S].
- [3] SYT 5412-2005, 下套管作业规程[S].
- [4] GBJ 213-90, 矿山井巷工程施工及验收规范[S].
- [5] 周开吉, 等. 钻井工程设计[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 1996.
- [6] 沈季良, 崔云龙, 王介峰, 等. 建井工程手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986.
- [7] 编写组. 钻井手册(甲方)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [8] 陈平, 等. 钻井完井工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [9] 高德利, 等. 复杂地质条件下深井超深井钻井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [10] 袁志坚. 提吊加浮力塞下管法在大口径瓦斯抽排孔的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(1): 27-29.
- [11] 李云峰. 淮南丁集矿瓦斯排放井施工技术[J]. 中国煤田地质, 2007, (8): 31-34.
- [12] 袁志坚, 白领国. 大口径瓦斯抽排孔钻探施工[J]. 西部探矿工程, 2007, (10): 82-85.
- [13] 彭桂湘. 大口径工程井常见事故原因探讨及防范技术措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(8): 38-41.

提高钻头钻速和寿命的主要途径;

(2) 针对地层研磨性能设计胎体耐磨性, 可降低钻头磨损, 并且保持高的效率;

(3) 坚硬致密“打滑”地层、研制低耐磨性、低金刚石浓度和高品质金刚石的钻头, 是提高钻速的主要思路;

(4) 针对钻头水口部分流场的研究, 设计钻头水路结构是科学和合理的。

参考文献:

- [1] 王达. 地质岩心钻探标准化的若干技术要点[A]. 深部地质钻探技术培训交流会材料[C]. 安徽黄山: 2010. 1-15.
- [2] 刘广志. 金刚石钻探手册[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [3] 孙友宏. JBD-75S 仿生非光滑绳索取心金刚石钻头的研制[J]. 探矿工程, 2007, 34(S1): 291-294.