

水泥环弹性模量和厚度对套管 外挤载荷影响的理论研究

高孝巧, 吕建国, 吕 健, 王 鹏

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘 要:针对水泥环弹性模量变化对套管强度是否有帮助的讨论,采用弹性力学分析方法研究了水泥环弹性模量对不同性质地层内套管外挤载荷的影响规律。研究认为,在岩性较软的地层,应选用刚度较大的水泥环,可帮助套管抵卸一部分载荷;在地层岩性较硬时,选用刚度小的水泥环有助于提高套管抵抗外挤载荷能力。理想的水泥环特性应为高强度、低刚度。其机理是利用高强度抵御地层载荷、低刚度降低载荷传递系数,从而达到保护套管目的;单纯增加水泥环的厚度不一定能够改善套管的受力情况,只有当水泥环弹性模量大于一定值后,加大其厚度可改善套管的受力状况。因此,在实际现场中,应根据具体的地层情况,调整水泥浆特性,达到最好的固井效果。

关键词:水泥环;弹性模量;套管强度;载荷;厚度;水泥优选

中图分类号:P634 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2013)03-0017-04

Theoretical Study on Effects of Cement Sheath Elastic Modulus and Thickness on Casing Load/GAO Xiao-qiao, LV Jian-guo, LV Jian, WANG Peng (School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering the change of cement sheath elastic modulus on casing strength, whether is helpful or not, by the elastic mechanics mathematical method, the effect of cement sheath elastic modulus on casing external collapse load was researched on the conditions of uniform in-situ stress on different properties in formation. The study shows that in a formation with soft lithology, the cement sheath shall have higher stiffness to help casing withstand a part of load; while in a formation with hard lithology, the stiffness of the cement sheath shall be reduced in order to protect casing. The ideal property of concrete sheath should be of high strength and low stiffness. The high strength of concrete sheath could resist higher loads of formation stress. At the same time, the low stiffness of that could reduce the transfer coefficient of stress greatly. Increasing the thickness of the cement sheath is not always reducing the stress of the casing. When the elastic modulus of cement sheath achieves some value, increasing the thickness of cement sheath could decrease the casing stress. From this point, the property of cement slurry shall be adjusted according to formation conditions in the process of cementing to reduce casing load and achieve the best cementation.

Key words: cement sheath; elastic modulus; casing strength; casing load; thickness; cement preference

0 引言

深井、超深井中易因盐岩层塑形流动挤坏套管。研究表明,良好的水泥环封固井能使套管受到均匀的外挤荷载。随着深井、超深井钻井技术的发展,应用高强、厚壁套管成为必要。但是,高强、壁厚套管有明显的弊端:高钢级套管的强韧性指标不易保证,而且价格很贵。低级钢级套管加水泥环的固井作用能否满足深井、超深井的应用要求及水泥环的性能对套管的载荷影响多大,成为现场很关心的问题。

地层、水泥环、套管的组合体中,套管的力学术

能参数随套管钢级的不同而不同,理论上套管的强度还能有部分的提升,但其研发成本昂贵。相比之下,固井水泥环则是在现场调配灌注而成的,因此其性能可以在一定程度上为人所控制。水泥环可以减小井壁围岩对套管的作用,改善套管的载荷能力,因而对水泥环性能的控制,以发挥其更优的作用,具有重大的意义。当前国内外对于水泥环对套管外挤载荷的影响进行了大量的研究^[1~4],Evans 和 Harriman 在实验室进行的套管抗挤实验表明:套管外水泥环使套管的抗挤强度提高 23%;林凯等人采用全尺寸

收稿日期:2012-11-17

基金项目:“深部大陆科学钻探装备研制-深孔井壁稳定研究”(201011082);大学生创新创业训练计划国家级项目(201211415016);中央高校基本科研业务资助

作者简介:高孝巧(1991-),男(汉族),福建三明人,中国地质大学(北京)在校学生,勘查技术与工程专业,从事地质构造、岩石力学方向研究,北京市海淀区学院路 29 号,xiaoqiaogao@gmail.com。

实物实验方法对套管有无水泥环情况下的抗挤能力做了对比实验^[5],在水泥环封固均匀完好的情况下,水泥环对提高套管抗挤强度不超过5%。前人大多的研究忽视了地层载荷的传递问题,都把地层载荷作为常量叠加在水泥环上,没有考虑水泥环厚度变化所带来的后果。实际上,钻探工程中,近井应力场会因各部分弹性参数的变化发生变化,而只有远场地应力可作为不变载荷。同时,套管与井眼之间一般都有特定的匹配关系,理想情况下水泥环的厚度可视为常数,但实际上井眼可能出现扩径等现象,水泥环的厚度发生变化。本文利用套管-水泥环-井壁围岩组合体的数学模型,借助弹性力学的方法,分析水泥环弹性模量及其厚度对套管外挤载荷的影响规律,以期得到全面的认识,为现场提供指导意见。

1 套管-水泥环-井壁围岩组合体力学模型

钻进示意图见图1。根据套管、水泥环、围岩组合体的受力状态及其几何特征,可将组合体三维受力问题简化为平面应变问题。组合体力学模型示意图简化为如图2所示。

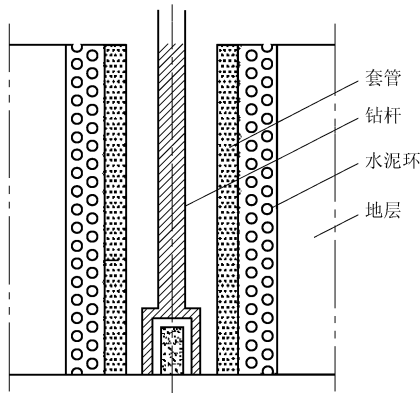


图1 钻进示意图

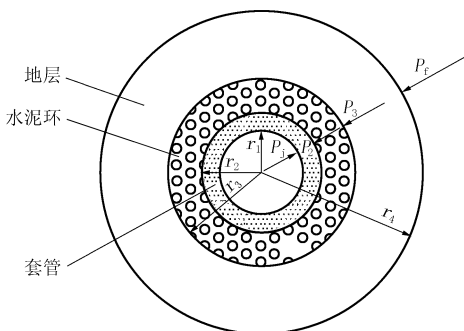


图2 套管-水泥环-地层组合体示意图

其中, r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 分别表示套管内径、套管外径、水泥环外径和近围岩外边界。组合体承受的内、外

压力用 P_j 、 P_f 表示,层间压力用 P_2 、 P_3 表示。

进行理论分析时对该模型进行如下假设:

- (1) 水泥环和围岩物性条件一致;
- (2) 套管无缺陷,水泥环厚度均匀;
- (3) 地应力均匀。

组合体各层间连接紧密,层间不发生滑动,则各层间交界处应满足径向位移、径向应力连续的条件,根据弹性力学理论,可得到远场地层载荷与套管外挤载荷间的关系如下^[6]。

$$P_2 = \frac{f_1(f_6 + f_7)P_j + f_4f_8P_f}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4f_5} \quad (1)$$

$$P_3 = \frac{f_1f_5P_j + f_8(f_2 + f_3)P_j}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4f_5} \quad (2)$$

其中:

$$f_1 = \frac{1 + \mu_c}{E_s} \cdot \frac{2(1 - \mu_c)r_2}{t_{12}^2 - 1}$$

$$f_2 = \frac{1 + \mu_c}{E_s} \cdot \frac{r_2 + (1 - 2\mu_c)r_2t_{12}^2}{t_{12}^2 - 1}$$

$$f_3 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_2t_{23}^2 + (1 - 2\mu_c)r_2}{t_{23}^2 - 1}$$

$$f_4 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{2(1 - \mu_c)r_2t_{23}^2}{t_{23}^2 - 1}$$

$$f_5 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{2(1 - \mu_c)r_3}{t_{23}^2 - 1}$$

$$f_6 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_3 + (1 - 2\mu_c)r_3t_{23}^2}{t_{23}^2 - 1}$$

$$f_7 = \frac{1 + \mu_f}{E_f} \cdot \frac{r_3t_{34}^2 + (1 - 2\mu_f)r_3}{t_{34}^2 - 1}$$

$$f_8 = \frac{1 + \mu_f}{E_f} \cdot \frac{2(1 - \mu_f)r_3t_{34}^2}{t_{34}^2 - 1}$$

$$t_{12} = r_2/r_1, t_{23} = r_3/r_2, t_{34} = r_4/r_3$$

式中: f_1 、 f_2 、 \dots 、 f_8 ——系数; μ_c 、 μ_c 、 μ_f ——分别为套管、水泥环、井壁围岩的泊松比; E_s 、 E_c 、 E_f ——分别为套管、水泥环、井壁围岩的弹性模量。

因此,若已知套管、水泥环及井壁围岩的弹性参数和几何参数,以及远场地应力和套管内液柱压力,就可确定套管、水泥环的应力状态。对于加入不同成分的水泥,套管整体的弹塑性条件发生改变,不同成分的水泥对其弹塑性的影响不同,应力公式也就会有所变化。

特别地,当式(1)、(2)中的 $P_j = 0$ 时,有:

$$P_2 = \frac{f_4f_8P_f}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4f_5} \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{f_8(f_2 + f_3)P_f}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4f_5} \quad (4)$$

$$\text{设: } H = \frac{f_4 f_8}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4 f_5} \quad (5)$$

$$h = \frac{(f_2 + f_3) f_8}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4 f_5} \quad (6)$$

式中: H ——地层至套管的压力传递系数; h ——地层至水泥环的压力传递系数,显然 H 越小套管承受的外挤载荷越小。

2 水泥环弹性模量对套管的影响

均匀地应力条件下,套管受到的作用力是由地应力传递到水泥环上,使套管外壁和水泥环内壁产生接触应力,挤压套管。对于套管、水泥环、地层组合体,水泥环的应力为组合体中最小的应力,组合体最大应力是在套管内壁产生^[7],这是造成套管变形损坏的主要原因。根据式(3)可看出,套管、水泥环、井壁围岩的几何尺寸、弹性模量及泊松比对 H 值有影响。由于工程上的井身结构设计,套管、水泥环的几何尺寸很难改变,只有井壁围岩的外径是人为取值。而根据岩石力学理论^[8],地层边界超过井眼半径的 5~6 倍后,对井周应力的影响以很小,可取 $r_4 = nr_1$ ($n > 5$)。组合体中,地层的弹性参数是确定的,套管的弹性参数也不易改变,因而,只有水泥环的参数容易改变。水泥的泊松比变化范围一般较小,为获得优选参数,可以使水泥环其他条件固定,水泥环的弹性模量从 1~70 GPa 变化。以 M 井为例,讨论水泥环弹性模量对套管外挤载荷能力影响情况。套管、水泥环材料、地层具体参数见表 1。

表 1 M 井材料性能参数

材料	半径 r/mm	弹性模量 E/GPa	泊松比
套管	$r_1 = 157.1, r_2 = 177.8$	206	0.30
水泥环	$r_2 = 177.8, r_3 = 215.9$	1~70	0.18
地层	$r_3 = 215.9, r_4 = 2159$	18(软)、55(硬)	0.27

利用表 1 数据并根据式(5)、式(6)可得到压力传递系数 H 、 h 随水泥环弹性模量的变化情况,如图 3、图 4 所示。

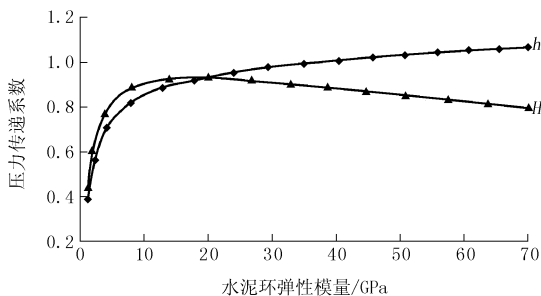


图 3 水泥环弹性模量与压力传递系数关系($E_r = 18 \text{ GPa}$)

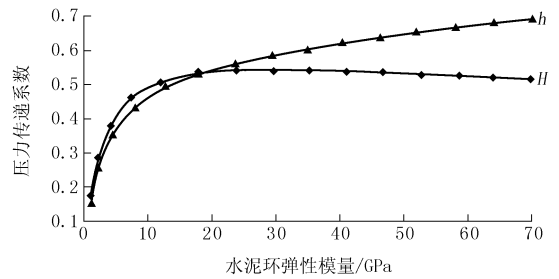


图 4 水泥环弹性模量与压力传递系数关系($E_r = 55 \text{ GPa}$)

由图 3、图 4 可知,水泥环弹性模量对套管外挤荷载有着重要的影响。当水泥环弹性模量与地层弹性模量相近时, H 值最大,说明套管受到的外挤荷载最大。当水泥环弹性模量继续增大时, H 值则呈逐渐下降趋势,而 h 值则逐渐上升,说明套管外挤荷载减小,而水泥环由于刚度增大则承担了更多的载荷。当水泥环的弹性模量远远低于地层弹性模量时,高刚度的地层就会承受大部分远场应力,近井地层的应力值就会升高,而低刚度的水泥环就可以承受较小的应力,进而降低载荷传递系数。易知,若水泥环的弹性模量大幅度的降低,套管的受力情况会发生大的变化。对比图 3 和图 4 还可看出,对于软地层增大水泥环的弹性模量对减小套管外挤荷载作用较明显;对于硬地层,增大水泥环的弹性模量对套管外挤荷载大小的变化影响不大,但减小水泥环弹性模量时其效果较为明显。换言之,水泥环的塑形越好,即弹性模量越小对套管承压能力越有利。然而,水泥为脆性材料,降低其弹性模量较为困难。因此在实际工程中应该针对具体的工程地质情况优选水泥环的弹性参数,以达到最好固井效果。

综上,在套管强度和地层强度固定的情况下,要想有效地延长套管寿命,减少损坏,在提高套管的抗挤强度的同时,更要充分利用水泥环这一道最后屏障,尽可能提高水泥环的强度,以提高组合体的承载能力。对于目前套管强度提升接近极限,且其成本昂贵,所以控制水泥环进而提高组合体的承载能力显得尤为重要。在评价固井工作时,不能以简单的固井合格率 100% 作为追求目标,而应以套管寿命最佳为目的来优化固井的设计与施工。

3 水泥环厚度对套管寿命的影响

钻探工程中,井眼可能出现扩径现象。井眼直径的大小影响水泥环的厚度,即均匀水泥环的厚度可能有多种状态。这里设多个水泥环厚度:5、10、15、20、25、30、35 mm。取地层的弹性模量 $E_r = 18$

MPa,均匀地应力 $P_i = 50$ MPa,套管内压 $P_j = 18$ MPa,水泥环的弹性模量取 $20 \sim 70$ GPa。根据式(2)可求得不同水泥环弹性模量下套管外挤压力的大小(见图5)。

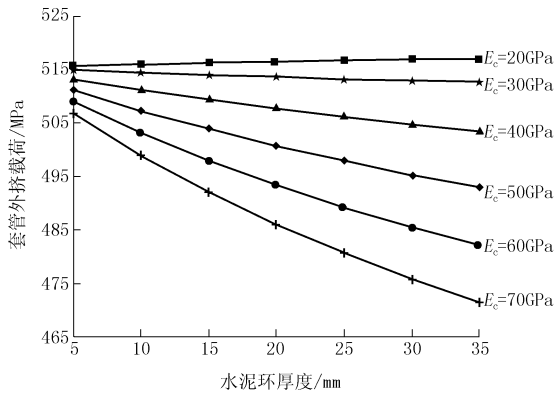


图5 水泥环的厚度与套管外挤压力关系

由图5可以看出,水泥环的弹性模量 $E_c = 20$ 和 30 GPa时,套管所受的外挤载荷随水泥环厚度的增大而增大,但增大的幅度小,即增大水泥环厚度对套管外挤载荷能力影响作用不明显。水泥环的弹性模量在 $E_c = 40、50、60、70$ GPa时,套管承受的外挤载荷随水泥环厚度的增大而减小。同时,水泥环的厚度对套管外挤载荷的影响与水泥环的弹性模量有关。当水泥环的弹性模量 $E_c \leq 30$ GPa时,水泥环的厚度增加套管的外挤载荷增大;当水泥环的弹性模量 $E_c > 30$ GPa时,增加水泥环的厚度能有效降低套管受到的最大应力。特别地,当水泥环厚度 > 20 mm后套管的外挤载荷减小梯度变小。可见,单纯增加水泥环的厚度,不一定能有效改善套管的受力状况。这里水泥环厚度取 20 mm时为最佳厚度。

综上所述,单纯的增加水泥环的厚度不一定能增强套管的载荷能力,还需综合考虑水泥环的厚度、弹性模量、地层的弹性模量等多重因素。

4 结论

(1)对套管、水泥环、井壁围岩组合体进行了应力分析,得出水泥环的应力为组合体中最小的应力,组合体最大应力是在套管内壁产生。

(2)水泥环弹性模量对套管的外挤荷载影响重大,但增大水泥环弹性模量对减小套管外载的作用远没减小水泥环弹性模量时的效果明显。在水泥环厚度一定时,其弹性模量存在一个中间值,水泥环的弹性模量等于该值时,套管的外挤荷载达到峰值,设计时水泥环弹性模量应避免这个峰值。

(3)实际工程中,对于硬地层中固井采用弹性模量小的水泥,软地层则采用弹性模量大的水泥

(4)单纯增加水泥环厚度不一定能增大套管的外挤荷载能力,应同时考虑弹性模量大小,只有水泥环弹性模量取合适值时(本文取 20 mm为最佳),增加水泥环的厚度可提高套管外挤荷载能力。实际工程设计,应综合考虑水泥环的厚度、弹性模量、地层的弹性模量等多重因素。

参考文献:

- [1] 宋明,杨凤香,宋胜利,等.固井水泥环对套管承载能力的影响规律[J].石油钻采工艺,2002,24(4):7-9.
- [2] 郭文才,刘绘新.水泥石性能对套管外挤荷载的影响[J].天然气工业,2001,21(4):15-18.
- [3] EI-SAYED A A H, KHALAF F, CAIRO U. Resistance of cemented concentric casing under nonuniform loading [J]. SPE 17927, 1992.
- [4] 徐守余,李茂华,牛卫东.水泥环性质对套管外挤强度影响的有限元分析[J].石油钻探技术,2007,35(3):5-8.
- [5] 林凯,杨龙,廖凌,等.水泥环对套管强度影响的理论和实验研究[J].石油机械,2004,32(5):13-16.
- [6] 郝俊芳,龚伟安.套管强度设计与计算[M].北京:石油工业出版社,1987.76-84.
- [7] 李茂华,徐守余,牛卫东.水泥环厚度和弹性模量对套管抗挤强度的影响[J].石油地质与工程,2007,21(3):84-88.
- [8] 肖树芳,杨淑碧.岩体力学[M].北京:地质出版社,1987.97-98.

中国启动可燃冰勘探开发新一轮技术研究

光明网消息(2013-03-19) 从国土资源部广州海洋地质调查局获悉,中国启动了对战略替代能源可燃冰勘探开发技术的新一轮系统性研究。目前,该专项被科技部批准纳入国家863计划重点项目实施,执行期为4年。

可燃冰是天然气水合物的俗称,是近20年来在海洋和冻土带发现的新型洁净能源,可以作为传统能源如石油、碳等的替代品。据估算,世界上可燃冰所含有有机碳的总资源量相当于全球已知煤、石油和天然气的2倍。

该项目首席科学家王宏斌介绍说,中国从1999年起开始对海洋可燃冰开展实质性的调查和研究。近几年来,中国科学家围绕可燃冰开发技术及环境控制等方面的技术难题,已展开对可燃冰成矿地质条件和富集特征等的相关研究。

该项目执行年度为2013~2016年,下设“可燃冰地球物理立体探测技术”、“可燃冰流体地球化学精密探测技术”和“可燃冰样品保压转移及处理技术”等三个课题。