

◀ 学术争鸣 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2014.03.003

蠕变性地层中套管有效外挤压力的计算方法探讨

李子丰¹, 杨海军², 陈 飞²

(1. 燕山大学石油工程研究所, 河北秦皇岛 066004; 2. 中国石油西气东输管道公司储气库管理处, 江苏金坛 213251)

摘 要:在套管柱设计中,套管外挤压力的计算十分重要。在《钻井手册(甲方)》中,蠕变性地层段的套管外挤压力取为上覆岩层压力,而 SY/T 5724—2008《套管柱结构与强度设计》中却将蠕变性地层段套管的外挤压力与岩石的泊松比联系起来,二者不相容。结合钻井施工过程的岩石力学理论,对蠕变性地层段的套管有效外挤压力进行分析。结果表明,SY/T 5724—2008《套管柱结构与强度设计》中关于蠕变性地层段的套管有效外挤压力的计算公式是错误的。建议采用《钻井手册(甲方)》中的蠕变性地层段的套管有效外挤压力计算公式进行套管柱结构设计。

关键词:套管柱设计 外挤压力 蠕变 泊松比

中图分类号:TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2014)03-0013-03

The Calculation of the Effective External Pressure on Casing in Creep Formation

Li Zifeng¹, Yang Haijun², Chen Fei²

(1. Petroleum Engineering Institute, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China; 2. Gas Storage Project Department, West-to-East Gas Pipeline Company, PetroChina, Jintan, Jiangsu, 213251, China)

Abstract: In the design of casing string, the calculation of external pressure on casing is very important. In the *Drilling Manual (Party A)*, the overburden pressure of the formations is taken as the external pressure on casing in the creep formation section, while the standards of *The Structure and Strength of the Casing String Design (SY/T 5724-2008)* sets the external pressure of casing as a function of rock Poisson's ratio. Combining drilling process and rock mechanics theory, the external pressure on casing in the creep formation section is analyzed. The result shows that the formula for effective external pressure on casing in creep formation section in the standards of *The Structure and Strength of the Casing String Design (SY/T 5724-2008)* is incorrect. It is recommended that the formula for effective external pressure on casing in creep formation section in *Drilling Manual (Party A)* be used in casing design.

Key words: casing string design; external pressure; creep; Poisson's ratio

在套管柱设计中,套管外挤压力(外挤压强)、尤其是蠕变性地层段的套管外挤压力的计算十分重要。蠕变性地层段的套管外挤压力为上覆岩层压力^[1],《钻井手册(甲方)》也推荐了这种算法^[2],并作为设计规范。SY/T 5724—2008《套管柱结构与强度设计》却将蠕变性地层段套管的外挤压力与岩石的泊松比联系起来^[3]。两者产生机理不同,数值不同,哪个对?

1 问题分析

在文献[3]13页,套管有效外挤压力计算公式表达为:

$$p_{ce} = \left[\frac{\nu}{1-\nu} G_v - 0.00981(1-k_m)\rho_w \right] h \quad (1)$$

式中: p_{ce} 为套管外挤压力, MPa; ν 为地层岩石的泊松比, 一般取 0.3~0.5; G_v 为上覆岩层压力梯度,

收稿日期: 2013-02-28; 改回日期: 2013-11-05。

作者简介: 李子丰(1962—), 男, 河北迁安人, 1983年毕业于大庆石油学院钻井工程专业, 1992年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 1992—1994年为哈尔滨工业大学力学博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事油气井杆管柱力学的研究。系本刊编委。

联系方式: (0335)8079211, zfli@ysu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目“考虑钻井液动力润滑作用的旋转钻柱涡动状态研究(No. 51244004)”和“基于最小功耗率原理和钻井液动力润滑作用的钻柱涡动理论与实验研究(No. 51374183)”资助。

MPa/m; k_m 为掏空系数; ρ_w 为完井液密度, g/cm³; h 为计算点垂深, m。

首先,看 ν 代表什么物理意义? ν 是材料的一个弹性参数,是横向变形量与纵向变形量的比值。 $\nu=0.5$ 时,说明材料不可压缩。 ν 与材料的蠕变性无关,不能代表材料的蠕变性。

其次,看式(1)中的右边第一项 $\frac{\nu}{1-\nu} G_v h$ 是什么?它是将一块自由岩石放在一个水平放置四周刚性的盒子里,然后在垂直方向加上 $G_v h$ 的压强,岩石与刚性盒子的接触压强,也是岩石水平方向应力。虽然 $\nu=0.5$ 时,水平应力等于垂向应力,与钻井手册的数值相同,但是产生机理不同。一个是瞬时弹性应变加上去的,一个是长时间蠕变加上去的。

式(1)用到的物理模型是:在自由的、完全弹性的地层中钻一个孔,然后放入套管,固上水泥,待凝结后,再施加覆岩层压力。而实际的物理模型是:在已经具有了上覆岩层压力、黏弹性的地层中钻一个孔,然后放入套管,固上水泥;凝结后,上覆岩层压力会逐渐传到套管上^[1,4]。以上分析表明,该物理模型和根据该物理模型推导得到的式(1)都是错误的。文献[5-11]都采用先在没有施加地应力的地层上钻孔、下套管固井,然后再施加地应力的物理模型,也都是错误的。一切采用弹性地层假设,将套管的外挤力与地层的弹性参数联系起来的模型都是错误的。

除此之外,SY/T 5724—2008 没有采用法定计量单位。

文献[12]对该问题也作了讨论,该文存在如下问题:

1) 采用的是先在没有施加地应力的地层上钻孔、下套管固井,然后再施加地应力的物理模型。

2) “当蠕变稳定之后,套管的应力载荷等于套管—地层弹性模型的套管载荷”的论述是错误的。如果地层是弹性的,则地应力永远也施加不到套管上。如果地层是黏弹性固体,则最终加在套管上的外挤压力与地层的弹性模量、地层的泊松比、套管的弹性模量、套管的泊松比、套管的厚度、套管内的压力、钻井时液柱压力、井眼裸露时间、固井水泥浆压力有关;如果钻完井长时间空井后再下套管固井,则地应力也永远也加不到套管上。如果地层是流变的,则最终加在套管上的外挤压力是上覆岩层压力。

3) “实际算例表明,套管地应力载荷等于上覆岩层压力并不足以使套管变形,套管变形要求套管

地应力载荷大于上覆岩层压力”这句话中,大于上覆岩层压力的套管地应力载荷从何而来?

4) “随着地层流变,套管地应力载荷逐渐增大,在某些情况下,套管地应力载荷可能大于上覆岩层压力,甚至达到上覆岩层压力的 1.4 倍”这句话中,这多出的 0.4 倍的压力从何而来?因此,文献[12]关于套管地应力载荷的分析也是错误的。

2 正确的计算方法

在蠕变性地层段,套管所受的外挤压力^[1,4]具体表现为:1)注水泥前,为钻井液柱压力;2)注水泥后但没有凝结时,为钻井液柱压力+水泥浆液柱压力;3)水泥浆凝固完,为钻井液柱压力+水泥石内清水液柱压力;4)固井一段时间后,逐渐变为上覆岩层压力。

在套管设计中,蠕变性地层段的套管外挤压力应该取全过程的最大值,即上覆岩层压力^{[2]148}:

$$p_{ee} = zG_o \quad (2)$$

式中: p_{ee} 为套管外挤压力, kPa; z 为计算点垂深, m; G_o 为上覆岩层压力梯度, kPa/m。

3 结 论

1) 钻井施工过程中的岩石力学理论分析表明,蠕变性地层段的套管有效外挤压力等于地层的上覆岩层压力。

2) SY/T 5724—2008《套管柱结构与强度设计》中,关于蠕变性地层段的套管有效外挤压力的计算公式是错误的。

3) 《钻井手册(甲方)》中关于蠕变性地层段的套管外挤压力的计算公式是正确的,建议采用《钻井手册(甲方)》中的蠕变性地层段的套管有效外挤压力计算公式进行套管柱结构设计。

参 考 文 献

References

- [1] 李子丰,杨敏嘉,李邦达. 油田套管损害机理分析[J]. 石油钻采工艺, 1985, 7(4): 47-53.
Li Zifeng, Yang Minjia, Li Bangda. Analysis of mechanism on production casing failure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1985, 7(4): 47-53.
- [2] 《钻井手册(甲方)》编写组. 钻井手册: 甲方: 上册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 148, 229, 313.
Writing Group of Drilling Manual (Part A). Drilling manual:

- part A: I [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 148, 229, 313.
- [3] SY/T 5724—2008 套管柱结构与强度设计[S].
SY/T 5724—2008 Design for casing string structure and strength[S].
- [4] 李子丰, 张永贵, 阳鑫军. 蠕变地层与油井套管相互作用模型[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 129-131.
Li Zifeng, Zhang Yonggui, Yang Xinjun. Interaction model between creep formation and oil well casing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 129-131.
- [5] 殷有泉, 陈朝伟, 李平恩. 套管-水泥环-地层应力分布的理论解[J]. 力学学报, 2006, 38(6): 835-842.
Yin Youquan, Chen Zhaowei, Li ping'en. Theoretical solutions of stress distribution in casing-cement and stratum system[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(6): 835-842.
- [6] 殷有泉, 李志明, 张广清. 蠕变地层套管载荷分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 24(14): 2381-2384.
Yin Youquan, Li Zhiming, Zhang Guangqing. Study on casing loading in creep formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2381-2384.
- [7] 陈朝伟, 殷有泉, 蔡永恩, 等. 利用套管变形测井资料反演储层应力场[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 734-739.
Chen Zhaowei, Yin Youquan, Cai Yongen, et al. Back analysis of reservoir stress field with logging data of casing deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 734-739.
- [8] 李平恩, 殷有泉, 苏先樾. 流变地层中套管载荷的理论解[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 11-16.
Li Ping'en, Yin Youquan, Su Xianyue. Theoretical solution of casing loads in rheological formation in tectonic stress field[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(1): 11-16.
- [9] 殷有泉, 蔡永恩, 陈朝伟. 非均匀地应力场中套管载荷的理论解[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 133-138.
Yin Youquan, Cai Yongen, Chen Zhaowei. Theoretical solution of casing loading under nonuniform tectonic stress field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 133-138.
- [10] 房军, 赵怀文, 岳伯谦. 非均匀地应力作用下套管与水泥环的受力分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1995, 19(6): 52-57.
Fang Jun, Zhao Huaiwen, Yue Boqian. Analysis of loading property of casing and cement sheath under nonuniform geologic stress[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1995, 19(6): 52-57.
- [11] 房军, 岳伯谦, 赵怀文. 非均匀地应力作用下套管与水泥环表面受力特征分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21(1): 46-48.
Fang Jun, Yue Boqian, Zhao Huaiwen. Analysis of surface loading on casing and cement sheath under nonuniform geologic stress[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1997, 21(1): 46-48.
- [12] 陈朝伟. 流变性地层套管等效外挤压力[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 702-704.
Chen Zhaowei. Equivalent external casing pressure in rheological strata[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 702-704.

[编辑 滕春鸣]

3D 打印技术用于 PDC 钻头设计制造

3D 打印技术也称增材制造技术, 是通过添加材料直接从三维数学模型获得三维物理模型的综合制造技术, 集机械工程、计算机辅助设计、逆向工程技术、分层制造技术、数控技术、材料科学、激光技术于一体, 可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造零件。3D 打印技术主要分为以下几种: 光敏聚合物固化技术(SLA), 利用紫外激光快速扫描液态光敏树脂, 使之快速固化成型; 材料挤出成型技术(FDM), 在一定压力作用下, 将丝状聚合物材料通过加热喷嘴软化后, 在成型过程中下移工作平台或上移喷嘴进行逐点、逐线、逐面、逐层熔化、堆积, 从而形成三维结构; 激光粉末烧结成型技术(SLS), 利用激光或电子束等热能将聚合物或金属粉末等材料粘接或熔合在一起, 形成所需的形状。

美国 BlueFire 设备公司尝试将 3D 打印技术用于 PDC 钻头的制造。该公司利用 SolidWorks 软件开发出一个高度复杂的钻头设计方案, 将其交给 3D 打印公司进行制造。为了使钻头在页岩、砂岩、石灰岩等地层中都具有较高的破岩效率, 采用了较大的 PDC 切削面; 同时, 为了提高钻头的清洁和冷却效率, 在钻头体上设计了横向水眼。试验证实, 这些设计使切削结构表面的温度降低了 30% 以上, 大大减少了切削片的热磨损, 延长了钻头寿命。另外, 该 PDC 钻头还采用了特殊设计的喷嘴排列方式, 不仅强化了高压喷射的效果, 还大幅提升了钻头的润滑及排屑能力。这些新颖的设计使钻头的制造难度大幅增加, 采用 3D 打印技术不仅可以完美地实现这些高复杂度的设计, 还能显著节约制造成本。另外, 通过一次成型的制造工艺, 能够大幅增强钻头应对极端环境的能力。

(供稿 亓东霞)