

套管尺寸偏差与挤毁强度关系的新认识

张建兵¹ 刘 歆¹ 吕祥鸿² 邓贺景³

(1. 西安石油大学 机械工程学院,陕西 西安 710065;2. 西安石油大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710065;3. 中国石油川庆钻探长庆钻井总公司,陕西 西安 710021)

摘 要:为了探讨 API 5CT 规范规定的套管尺寸公差对套管挤毁强度的影响,选取了 J55 钢级 $\phi 139.7\text{ mm}\times 7.72\text{ mm}$ 、L80 钢级 $\phi 177.8\text{ mm}\times 10.36\text{ mm}$ 和 P110 钢级 $\phi 244.5\text{ mm}\times 13.84\text{ mm}$ 3 种有代表性的油田常用套管,采用有限元法对其在不同外径和壁厚偏差影响下的套管挤毁强度进行了非线性分析、计算,得到了单独考虑外径、壁厚及同时考虑外径和壁厚尺寸偏差下的套管挤毁强度及其变化规律。计算可知,在 API 5CT 规范规定的尺寸公差范围内,即使套管外径和壁厚的最不利偏差同时出现在同一横截面上,套管的挤毁强度仍然会在 API 额定值之上,椭圆度对套管挤毁强度的影响大于壁厚不均度的影响,套管圆周上壁厚最薄点决定着套管挤毁强度,壁厚不均度对套管挤毁强度的影响非常小,API 给出的大外径套管额定挤毁强度偏保守。对于尺寸公差符合 API 5CT 规范的套管,其挤毁强度一般会高于 API 额定值一定幅度。

关键词:套管;偏差;抗压强度;有限元法;API 标准
中图分类号:TE931⁺.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)03-0070-05

套管从工厂制造出来必然带有尺寸偏差,一味强调提高尺寸精度不仅有一定技术难度,也会大大增加套管的生产成本,最终会转嫁为油田的开发成本。所以,有必要对套管的尺寸偏差与挤毁强度的关系进行系统定量研究,摸索其规律,更有必要结合 API(美国石油学会)规范与套管应用工程实际,理清 API 规范允许的套管尺寸偏差与套管挤毁强度的关系,以供油气井工程设计人员及套管生产厂家参考。

1 采用有限元法计算套管挤毁强度

利用有限元模拟法进行带有外径和壁厚偏差的套管挤毁强度计算,是非规则尺寸形状下计算套管挤毁强度的主要手段之一^[1-3]。笔者以油田具有代表性的 3 种套管为例进行有限元分析计算,所选套管的规格及材料参数见表 1^[1-4]。

表 1 3 种套管的几何和材料性能参数							
套管编号	套管规格		API 挤毁强度/MPa	套管钢级	套管材料参数		
	外径/mm	壁厚/mm			屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
1	139.7	7.72	33.9	J55	379.00	2.06×10 ⁵	0.3
2	177.8	10.36	48.4	L80	551.58		
3	244.5	13.84	54.8	P110	758.42		

计算采用 Ansys Mechanical/Structure 模块,对所研究的套管做如下假设:1)套管材料具有各向同性;2)套管无限长,并忽略残余应力的影响;3)套管纵向各截面的尺寸参数相同。

根据上述假设,在 Ansys 静力分析中,可将该问题按平面应变问题处理。考虑套管结构的对称性,取套管横截面半圆环对套管进行几何建模,采用四节点四边形平面应变单元对模型进行有限元网格划分。模型结构如图 1 所示。

套管材料采用理想弹塑性模型,对套管施加

均匀外表面载荷,由于所采用的计算模型在总体 $O-xyz$ 坐标系下是对 x 轴对称的,对称面上各节点

收稿日期:2009-03-31;改回日期:2010-03-25
基金项目:国家自然科学基金项目“石油套管膨胀后的强度及其力学机理研究”(编号:50704026)、陕西省教育厅科技计划项目“膨胀套管技术主要力学参数计算研究”(编号:07JK369)资助
作者简介:张建兵(1974—),男,陕西宝鸡人,1997 年毕业于西南石油学院钻井工程专业,2003 年获西南石油学院油气井工程专业博士学位,副教授,主要从事石油井管技术研究与相关课程的教学工作。
联系方式:(029)88382603,zhjb@xsyu.edu.cn

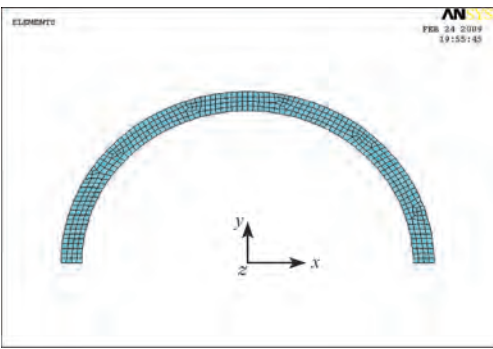


图 1 套管模型网格划

的 y 向位移及绕 z 轴的转动被约束。同时,为避免计算时由于所加载荷(理论上对称于 y 轴)的数值误差引起 x 方向的刚体位移,在套管内壁靠近 x 轴处的两个单元边上人为施加刚度系数为 1 N/mm 的弹性基础。施加的边界条件如图 2 所示。

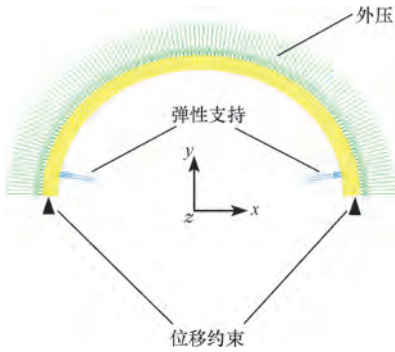


图 2 有限元分析边界条件设置示意

采用载荷/位移法^[5]作为判断套管失效的准则,等步长对套管施加载荷,当前后载荷产生的位移之比大于 20 时,套管即失效。即此时施加一微小载荷,套管就产生一很大位移,表明套管结构失稳。

2 按照外径偏差建模的计算结果

API Spec 5CT: 2005(套管和油管规范)^[4]对套管外径给出了上下偏差约定,对壁厚仅给出了下偏差约定。为探索外径和壁厚精度对套管挤毁强度的影响,笔者先分别计算单独考虑外径和壁厚偏差情况下的套管挤毁强度,最后计算同时考虑外径和壁厚偏差情况下的套管挤毁强度。

API Spec 5CT 对外径不小于 114.3 mm 的套管公差的规定为: $+1.0\%D \sim -0.5\%D$ (D 为套管的名义外径)。这一规定实际上规定了 API 套管的允许椭圆度大小。

经分析认为,需要考虑两种情况下套管外径对挤毁强度产生的不利影响:1)套管虽为理想的圆形,

但外径为最大正偏差,因为径厚比增大会使挤毁强度降低,所以这种情况应予以关注;2)套管横截面上存在椭圆度的情况。对于上述两种情况,哪种情况出现时套管的挤毁强度更低,需要进一步研究。

套管的椭圆度是指套管的内外径同心,形成壁厚相同的椭圆。设椭圆外径的最大尺寸为 d_{\max} 、最小尺寸为 d_{\min} ,则椭圆度 e 为:

$$e = \frac{2(d_{\max} - d_{\min})}{d_{\max} + d_{\min}} \times 100\% \tag{1}$$

根据 API 规定的套管外径公差和式(1),可计算得到 API 允许的最大套管椭圆度为 1.5%。

对表 1 中所列的 3 种套管,用有限元方法计算分析了上述两种情况下套管挤毁强度的大小。建模时固定套管壁厚为名义壁厚不变,且壁厚均匀。因为在套管外径的允许偏差范围内,对同一椭圆度可以对应多种长短轴外径组合,同时套管径厚比增大会使其挤毁强度降低,所以这里考虑最苛刻情况——在有限元几何建模时,套管椭圆截面的长轴设定为套管外径为最大上偏差所对应的外径值,即为 $+1.0\%D$ 。当外径处均为 $+1.0\%D$ 时,对应上述第一种情况,根据式(1),此时椭圆度为 0%,套管为理想圆形套管;对于上述第二种情况,需要计算不同椭圆度值下的套管挤毁强度,有限元建模时固定长轴外径为 $+1.0\%D$ 不变,逐渐减小椭圆短轴对应的外径值至 $-0.5\%D$,长短轴之间的外径均匀变化,这样就会得到椭圆度从 0%到 1.5%逐渐过渡的有限元计算几何模型。然后,按照有限元结构静力非线性分析方法对 3 种套管在不同椭圆度情况下的挤毁强度进行计算,结果见表 2。

表 2 3 种套管在不同椭圆度下的挤毁强度			
套管椭圆度, %	套管抗挤强度/MPa		
	1 号套管	2 号套管	3 号套管
0	44.2	68.8	90.5
0.1	43.4	67.5	87.7
0.2	42.3	66.2	85.4
0.3	41.2	64.5	83.3
0.4	40.5	63.0	81.6
0.5	40.0	61.7	79.9
0.6	39.2	60.5	78.7
0.7	38.6	59.1	76.6
0.8	37.9	57.9	75.0
0.9	37.1	56.2	73.9
1.0	36.7	55.1	72.5
1.1	36.4	54.0	71.5
1.2	35.8	53.1	69.9
1.3	35.2	52.3	68.8
1.4	34.7	51.4	67.7
1.5	34.2	50.5	66.4

由表 2 可知,套管的椭圆度会对挤毁强度产生明显影响,随着椭圆度的增加,套管的挤毁强度降低,且挤毁强度值与椭圆度之间基本上呈线性关系。对于计算的 3 种套管,当椭圆度从 0%增加到 1.5%时,套管的挤毁强度约降低 25%。

尽管对于给定的壁厚,外径增加会使套管的挤毁强度降低,但从计算结果可以看出,外径取最大允许值时,理想圆形套管的挤毁强度仍然大于外径为最大允许值但带有椭圆度的套管的挤毁强度。这说明,在 API 允许的外径偏差范围内,椭圆度对套管挤毁强度的影响大于理想圆形横截面套管的外径变化对套管挤毁强度的影响。

但值得注意的是,对于计算的 3 种套管,尽管椭圆度的存在使套管的挤毁强度下降,但下降后的挤毁强度仍然高于 API 额定挤毁强度^[6],套管的椭圆度越小,其挤毁强度高出 API 额定值的幅度越大,即使在最大为 1.5%的椭圆度情况下,3 种套管的挤毁强度依然分别高于 API 额定值 0.6%、4.3%和 21.2%。可见,在 API 允许的套管外径偏差范围内,椭圆度不会使套管的挤毁强度失去保障而低于 API 额定值。

3 按照壁厚偏差建模的计算结果

API Spec 5CT 对套管壁厚公差的规定为 $-12.5\%t$ (t 为套管名义壁厚)。API 没有规定套管壁厚的上偏差,但实际上套管通径大小和外径上偏差限制了最大壁厚值。经分析,认为在两种情况下壁厚对套管挤毁强度会产生不利影响:一是同一横截面上壁厚虽然均匀,但为负偏差,其极限情况是壁厚为 API 规定的最大负偏差,即 $-12.5\%t$;二是套管同一横截面上存在壁厚不均匀的情况,但最小壁厚仍然符合 API 规定的壁厚偏差。对于这两种情况,需要定量计算分析套管挤毁强度最低的壁厚情况。

设套管同一横截面上壁厚的最大值为 t_{\max} ,最小值为 t_{\min} ,则套管椭圆度 f 为:

$$f = \frac{2(t_{\max} - t_{\min})}{t_{\max} + t_{\min}} \times 100\%$$

(2)

用有限元法计算分析表 1 中所列 3 种套管在上述两种情况下套管挤毁强度的大小。建模时按照最苛刻条件考虑:固定套管的外径为 $+1.0\%D$,且外径均匀,当横截面上各处壁厚都为 $-12.5\%t$ 时,对应上述第一种情况,根据式(2),此时的壁厚不均度为 0%,套管壁厚均匀,外径为圆形;对于第二种情

况,需要分次计算不同壁厚不均度时的套管挤毁强度,有限元建模时固定套管横截面上一点的壁厚为 $-12.5\%t$ 不变,逐渐增加和该点在同一直径上的另一端的壁厚,直至达到套管的名义壁厚 t ,这两点之间的壁厚均匀变化,这样就会得到壁厚不均度从 0%到 13.3%逐渐过渡的有限元计算几何模型。计算得到的挤毁强度见表 3。

表 3 3 种套管在不同壁厚不均度下的挤毁强度

套管壁厚不均度,%	套管抗挤强度/MPa		
	1 号套管	2 号套管	3 号套管
0	39.10	59.75	80.25
1.3	39.12	59.86	80.27
2.3	39.13	59.89	80.30
3.2	39.22	59.91	80.31
4.2	39.15	59.90	80.31
5.1	39.14	59.96	80.32
6.1	39.17	60.03	80.34
7.0	39.16	60.04	80.36
8.0	39.19	60.05	80.40
8.9	39.21	60.06	80.45
9.8	39.32	60.06	80.55
10.7	39.38	60.09	80.56
11.6	39.33	60.08	80.69
12.5	39.35	60.10	80.72
13.3	39.34	60.10	80.85

从表 3 可以看出,壁厚不均度对套管挤毁强度的影响不明显,当套管的壁厚不均度由 0%增加到 13.3%时,套管挤毁强度的波动非常小。

从套管横截面上的米塞斯等效应力等值线图上可以看出,在外挤载荷作用下套管内的最大应力出现在圆周上壁厚最薄处的内壁上,材料的塑性变形由该点自内向外逐渐扩展直至在该处首先贯通整个管壁。由此可以分析得出,套管横截面圆周上最薄处的壁厚大小决定了套管的挤毁强度大小。由于笔者建模时对于不同壁厚不均度的情况设定为最小壁厚,壁厚不变,所以计算得到的套管挤毁值波动不大,之所以出现波动是由于有限元算法所决定的。如果建模时固定最大壁厚不变,取值为套管名义壁厚 t ,逐渐增加壁厚不均度直至 13.3%,此时模型中的最小壁厚为 $-12.5\%t$,计算结果和笔者计算的壁厚不均度为 13.3%的情况是完全一样的,按照这种方法建模会得到随着壁厚不均度增加套管挤毁强度下降的情况,但由于该建模方法绕过了最苛刻情况,即除了壁厚不均度为 13.3%的情况外,其他情况下建模的最小壁厚并不是一 $12.5\%t$,计算结果不能很好地说明问题,故笔者没有采取该建模方法。所以

说,笼统地说壁厚不均度的存在会降低套管的挤毁强度是不严谨的,就壁厚对套管挤毁强度的影响而言,挤毁强度主要取决于圆周上最薄处的壁厚大小。

根据表 3 中的数据可以计算得出,当套管出现壁厚最不利的情况时,套管的挤毁强度仍高于 API 额定挤毁强度,3 种套管分别高出 15.3%、23.5%和 46.4%。可见,尽管套管壁厚不均,但只要最薄处的壁厚不小于 API 规定下限,当其他部位壁厚变化导致出现壁厚不均时,套管的挤毁强度并不会明显降低,不会低于 API 额定值。在套管生产制造过程中严格控制套管的最小壁厚有利于套管挤毁强度的提高。

对比分析表 1 和表 3 中的数据还可看出,在 API 允许的套管尺寸偏差范围内,最不利外径情况下的套管挤毁强度小于最不利套管壁厚情况下的挤毁强度,这说明在 API 公差范围内椭圆度对套管挤毁强度的影响大于壁厚的影响。可见就椭圆度和壁厚而言,从套管挤毁强度角度考虑,应更加关注套管的椭圆度,这一点对高抗挤套管尤其重要,提高尺寸精度是提高高抗挤套管挤毁强度的一种主要手段^[7]。

4 同时考虑外径和壁厚偏差建模的计算结果

同时考虑外径和壁厚偏差时的情况比较复杂,从前面的分析结果可以看出,当套管椭圆度最大和圆周上出现最小壁厚时套管的挤毁强度最低,所以需要重点分析在 API 公差范围内,当外径和壁厚最不利偏差同时出现在套管同一横截面上时的情况。对表 1 中所列 3 种套管按照允许的最大椭圆度和壁厚最大下偏差进行建模,然后计算套管的挤毁强度,结果见表 4。

表 4 3 种套管在各种情况下建模时的挤毁强度				MPa
套管编号	有限元法计算值			API 额定值
	最大外径偏差	最大壁厚下偏差	外径和壁厚最不利偏差	
1	34.2	39.10	34.0	33.9
2	50.5	59.75	49.9	48.4
3	66.4	80.25	62.2	54.8

从表 4 可以看出,在 API 允许的套管尺寸偏差范围内,即使在同一横截面同时出现外径和壁厚两种最不利情况时,套管的挤毁强度仍然在 API 额定值之上。所以,只要套管的外径和壁厚偏差在 API

规定值以内,其挤毁强度是有保障的。这一点也可以从 ISO 10400/TR:2007(石油天然气工业-套管、油管、钻杆和用作套管和油管的管线管的性能计算公式)^[8-9]的新公式中得以体现,新的套管设计挤毁强度计算公式基于外径和壁厚偏差不会对套管挤毁强度造成大的不利影响的认识,所以并未引入外径和壁厚精度的表征参数。

以上计算结果的前提是假设套管尺寸偏差为最不利情况,实际上出厂的套管其尺寸偏差一般不会出现这样的极端情况,加之笔者用的是理想弹塑性材料模型,实际套管的材料屈服强度往往会高于 API 规范值,所以厂家的套管实际挤毁强度理应高于 API 额定值一定幅度。这一点得到了国家石油管材质检中心大量套管实物挤毁试验结果的证实^[10],该中心对近年来 $\phi 139.7\text{ mm}$ 、 $\phi 177.8\text{ mm}$ 和 $\phi 244.5\text{ mm}$ 套管进行的 170 次实物挤毁试验数据的统计分析表明,这些套管的挤毁强度平均值比 API 值约高 33%。另外,我国某大型钢铁公司研制的超高抗挤套管的挤毁强度已经超过 API 额定值的 80%^[11],控制尺寸精度是这种套管获得超高抗挤性能的主要手段。

从表 4 还可以分析得出,套管的外径越大,计算值高出 API 额定值的幅度也越大,这说明,相对于小尺寸套管而言,API 给出的大尺寸套管其挤毁强度额定值偏保守。在套管柱强度设计中可以考虑此情况,对大管径的套管可以考虑适当降低抗挤安全系数,当然如果存在蠕变性地层而产生非均匀载荷时则另当别论。

另外,按照 API 套管挤毁强度计算方法,表 1 中所列的 3 种常用套管均属于塑性挤毁,API 塑性挤毁公式是在套管实物挤毁试验结果统计基础上由回归分析方法得到的。实物挤毁试验用的套管是随机抽取的,必然带有外径和壁厚偏差,那么依据这样的套管的实物试验数据回归得到的公式实际上是包含了尺寸偏差对套管挤毁强度的影响因素的。所以在有限元分析时,如果按照理想尺寸建立几何模型,忽略残余应力等其他影响套管挤毁强度的因素,计算结果理应高于 API 额定值一定幅度,如果按照实际情况考虑外径和壁厚偏差建立套管的几何模型,则分析结果比按照理想尺寸建模更接近实际,由于没有施加残余应力,所以计算值应略高于 API 额定值。这与笔者的分析计算结果是一致的。

最后需要说明的是,目前各油田使用的套管大部分都属于塑性挤毁,笔者选择的 3 种套管均属于

API 塑性挤毁范围, 笔者的结论也是针对塑性挤毁套管而言的。

5 结 论

1) 即使外径和壁厚的最不利偏差同时出现在套管的同一横截面上, 只要偏差在 API 规定的尺寸公差范围内, 排除其他影响因素, 套管的挤毁强度仍然不会低于 API 额定值。

2) 在 API 套管尺寸公差范围内, 外径偏差对套管挤毁强度的影响大于壁厚偏差, 所以套管生产厂家应注意控制外径偏差以提高套管的抗挤强度性能。

3) 就壁厚对套管挤毁强度的影响来说, 壁厚不均度对套管的挤毁强度影响不大, 套管的挤毁强度主要由圆周上最薄处的壁厚大小决定, 严格控制套管的最小壁厚有利于套管挤毁强度的提高。

4) 随着套管尺寸精度控制水平的提高, 目前生产的套管其实际挤毁强度一般都高于 API 额定值。

5) 相对于小外径套管而言, API 对大尺寸套管给出的挤毁强度额定值偏保守, 在套管柱设计中可以适当考虑降低安全系数来有效利用套管的实际强度余量。

参 考 文 献

- [1] 练章华. 现代 CAE 技术与应用教程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 175-192.
- [2] 祝效华, 余志祥. ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 344-351.
- [3] 温玉焕, 王伯军. 非均匀载荷下预制孔参数对抗挤强度的影响[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(1): 23-25.
- [4] API Specification 5CT: 2005. Specification for casing and tubing[S].
- [5] 常龙, 高连新, 王为民. 套管挤毁试验研究与有限元分析[J]. 焊管, 2007, 30(5): 45-48.
- [6] API Bull 5C2: 1999. Bulletin on performance properties of casing, tubing, and drill pipe[S].
- [7] 李平全. 套管抗挤特性及高抗挤套管——《油套管标准研究、油套管失效分析及典型案例》(4)[J]. 钢管, 2007, 36(1): 57-60.
- [8] 孙永兴, 林元华, 舒玉春, 等. ISO 10400 油套管强度新模型[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 42-44.
- [9] ISO 10400: 2007. Petroleum and natural gas industries-equations 4 and calculations for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing[S].
- [10] 王建东, 林凯, 赵克枫, 等. 套管强度余量在油气井固井中的应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 75-77.
- [11] 宝钢 B110TT 超高抗挤套管通过评估[J]. 世界仪表与自动化, 2008, 12(1): 10.

[审稿 韩志勇]

New Understanding of the Relation between Casing Dimensional Variation and Collapse Resistance Strength

Zhang Jianbing¹ Liu Xin¹ Lv Xianghong² Deng Hejing³

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shanxi, 710065, China; 2. College of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shanxi, 710065, China; 3. Chuanqing Drilling and Exploration Engineering Co. Ltd., CNPC, Xi'an, Shanxi, 710021, China)

Abstract: Three commonly used casings, J55 139.7 mm×7.72 mm, L80 177.8 mm×10.36 mm and P110 244.5 mm×13.84 mm were used to investigate the effect of casing dimensional variation on its collapse resistance performance. The effects of variant external diameter and wall thickness deviation on casing collapse resistance strength were analyzed using finite element method. The relationship between collapse resistance strength and external diameter and wall thickness deviation were obtained. Results show that casing collapse resistance performance is still qualified even if maximum permissible external diameter deviation and maximum permissible wall thickness deviation appear on the casing at the same time. The effect of out-of-roundness of casing on casing collapse resistance is higher than that of wall thickness non-uniformity. The collapse resistance strength of casing is determined mainly by the thinnest wall thickness in the circumference direction of casing. The collapse resistance strength value of casing with large external diameter given by API is conservative, and the actual collapse resistance strength of casing is greater than the rated strength value given by API 5C2 if the dimensional deviation of casing agrees with the API 5CT.

Key words: casing; deviation; compressive strength; finite element method; API standard