

非常规油气井用套管抗挤毁性能有限元分析*

汪 强^{1,2}, 晁利宁^{1,2}, 白天娇³, 焦 炜^{1,2},
苑清英^{1,2}, 杨晓龙^{1,2}, 郭 鹏²

- (1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安710018;
2. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡721008;
3. 中石油煤层气有限责任公司北京物资分公司, 北京 102206)

摘要: 针对实物套管的几何尺寸缺欠、屈服强度变化、屈服强度周向分布不均等因素, 建立了含缺欠的套管有限元模型, 并基于弧长法进行了套管抗挤毁性能分析, 研究了均匀外压作用下, 几何尺寸缺欠、屈服强度变化对套管的抗挤毁性能影响规律。通过有限元分析得出, 套管尺寸公差在要求范围内时, 当管体几何形状存在椭圆度和壁厚不均度缺欠时, 椭圆度对套管抗挤毁性能的影响程度大于壁厚不均度; 在套管椭圆度和壁厚不均度一定的情况下, 管体的抗挤毁结果随着屈服强度的升高而增加, 模拟计算结果与理论计算结果差值不断减小; 平均屈服强度一定时, 管体屈服强度沿周向分布越均匀, 套管的抗挤毁性能越好; 周向屈服强度越均匀, 管体的抗挤毁强度越好。结合有限元分析与实物试验结果可以得出, 通过测量套管实物最小壁厚和最大椭圆度等几何尺寸缺欠, 可更精准地预测套管外压挤毁性能。

关键词: 套管; 外压挤毁; 有限元分析; 几何尺寸; 屈服强度

中图分类号: TE375

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.03.004

Finite Element Analysis of Anti-collapse Performance of Casing for Unconventional Oil and Gas Wells

WANG Qiang^{1,2}, CHAO Lining^{1,2}, BAI Tianjiao³, JIAO Wei^{1,2},
YUAN Qingying^{1,2}, YANG Xiaolong^{1,2}, GUO Peng²

- (1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 3. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing Material Branch, Beijing 102206, China)

Abstract: A finite element model of casing with defects was established to address the geometric size deficiencies, the yield strength variations, and the uneven circumferential distribution of yield strength. Based on the arc length method, the anti-collapse performance of the casing was analyzed, and the influence of the geometric dimension deficiencies and the yield strength changes on the anti-collapse performance of the casing under uniform external pressure was studied. Through finite element analysis, it is found that when the dimensional tolerance of the casing is within the required range, the influence of ovality on the anti-collapse performance of the casing is greater than that of wall thickness unevenness when there are imperfection such as ovality and wall thickness unevenness in the geometric shape of the casing. When the ovality and wall thickness unevenness of the casing are constant, the anti-collapse result of the pipe body increases with the increase of yield strength, and the difference between the simulated calculation results and the theoretical calculation results continuously decreases. When the average yield strength is constant, the more uniform the circumferential distribution of the yield

*基金项目: 陕西省重点研发项目“多段体积压裂井用高性能SEW管材及螺纹连接关键技术研究”(项目编号2023-YBGY-309)。

strength of the pipe body, the better the anti collapse performance of the casing. When the circumferential yield strength of the pipe body is uniform, the yield strength and anti collapse resistance are the highest. By comparing finite element analysis with physical experiments, it can be concluded that the external pressure anti collapse performance of the casing can be more accurately predicted by measuring the geometric size imperfections of the casing, such as minimum wall thickness and maximum ovality.

Key words: casing; external pressure collapse; finite element analysis; geometric dimensions; yield strength

0 前 言

随着我国石油勘探水平的不断提高,深井、超深井、热采井以及高温高压气井的数量逐年增加,地层环境愈来愈复杂,对套管的性能提出了更高的要求。在页岩气、致密气等非常规油气井开采中,套管的抗外挤性能已成为管柱设计最重要的依据^[1-3]。引起套管挤扁、缩径、错段、损坏的原因是复杂的,但根本原因是在地层应力作用下套管所受外部载荷超过了套管的抗外压载荷强度^[4]。

通常影响套管抗挤性能的因素主要包括几何精度、屈服强度、狗腿度等。国内外针对套管抗挤毁强度问题开展了大量的有限元分析^[5-8],但在分析过程中,通常假定钢级一定且屈服强度均一^[9],未充分考虑屈服强度在管体周向的不均匀对套管抗挤毁强度的影响,且在众多变化因素中未得出影响抗挤毁强度的主要因素及次要因素。

本研究在国内外有限元分析研究的基础上,在规格和钢级确定的条件下,充分考虑套管本体和井下受力情况,针对几何尺寸欠缺、屈服强度变化等因素,建立有限元模型,并基于弧长法进行套管抗挤毁性能分析,研究均匀外压作用下,外径椭圆度、壁厚不均度、屈服强度不均匀分布等因素对套管抗挤毁性能的影响规律。

1 分析方法及模型建立

1.1 数值分析计算

API SPEC 5C3 标准^[10]规定,无轴向载荷和内压作用下,管体最小抗挤毁强度由材料最小屈服应力 f_{ymn} 和管体横截面几何尺寸确定。可分为屈

服强度挤毁压力 P_{Yp} 、塑性挤毁压力 P_p 、过渡挤毁压力 P_T 和塑弹性挤毁压力 P_E 。

$$P_{Yp} = 2f_{ymn} [D/t - 1] / [(D/t)^2] \quad (1)$$

$$P_p = f_{ymn} [A_c / (D/t) - B_c] - C_c \quad (2)$$

$$P_T = f_{ymn} [F_c / (D/t) - G_c] \quad (3)$$

$$P_E = 46.95 \times 10^6 / [(D/t) / (D/t - 1)^2] \quad (4)$$

式中: A_c 、 B_c 、 C_c 、 F_c 、 G_c ——计算管体挤毁压力的经验系数;

D ——管体直径, mm;

t ——管体壁厚, mm。

最小屈服强度挤毁压力公式(1)适用范围为 $(D/t) \leq (D/t)_{yp}$,最小塑性挤毁压力公式(2)适用范围为 $(D/t)_{yp} \leq (D/t) \leq (D/t)_{pt}$,过渡挤毁压力公式(3)适用范围为 $(D/t)_{yp} \leq (D/t) \leq (D/t)_{te}$,弹性挤毁压力公式(4)适用范围为 $(D/t)_{te} \leq (D/t)$ 。以P110钢级 $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 10.54 \text{ mm}$ 套管为例, $D/t=13.25$,依照API SPEC 5C3标准相关规定,确定采用公式(2)进行套管抗挤毁强度计算,此时 A_c 取值3.181, B_c 取值0.081 9, C_c 取值2 852。

1.2 产品条件及因素分析

针对API套管,开展套管抗挤毁性能分析。为确保套管具有优异的抗挤毁性能,通常需对套管的椭圆度、壁厚不均度进行控制。API SPEC 5CT—2018标准规定了套管的外径、壁厚及屈服强度范围,但未对管材的椭圆度和壁厚不均度范围进行明确规定^[11]。本研究在标准要求的基础上,结合P110钢级 $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 10.54 \text{ mm}$ 套管实际情况,确定了几何尺寸范围和力学性能。在有限元计算过程中,屈服强度在API SPEC 5CT—2018标准要求范围内间隔取值。几何尺寸要求见表1,力学性能参数见表2。

表1 P110钢级 $\phi 139.7 \text{ mm} \times 10.54 \text{ mm}$ 套管几何尺寸

名义外径/mm	椭圆度/%	名义壁厚/mm	壁厚不均度/%
139.7	≤ 0.8	10.54	≤ 8

表2 P110钢级材料性能参数

项目	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度 $R_{10.6}$ /MPa
计算取值	210	0.3	800、820、840、880、 920、960
API SPEC SCT—2018	—	—	758~965

1.3 有限元分析方法及基本假设

针对表1和表2中的外径椭圆度、壁厚不均度和屈服强度3个变量因素，进行P110钢级套管抗挤毁非线性有限元屈曲模拟分析。通过引入弧长因子 ΔL ，将载荷因子 λ 和位移增量 $\{\Delta U\}$ 相联系，弥补了Newton-Raphson方法极值点发散的缺点，可以精确求解屈曲载荷^[12]。以此分析在API标准要求范围内，椭圆度、壁厚不均度和屈服强度不均匀分布3个因素对套管抗挤毁强度的影响情况。

1.4 建立模型

根据以上分析条件，假设套管所受外压沿周向分布均匀，不考虑套管残余应力影响。建立外径椭圆度、壁厚不均度和屈服强度变化的二维有限元分析模型。通过转换公式将试验所得工程应力-应变曲线转换为材料的真实应力-应变曲线，相邻屈服强度对应的材料参数等比例放大缩小。采用二维平面弹塑性非线性模型进行套管抗挤毁性能分析，利用4节点单元进行网格划分。建立的有限元几何模型及网格如图1所示，网格单元数4400个。

在设定约束时，将平面沿坐标轴划分为四个象限，在每个象限边界处设置约束，确保套管不平移的前提下能够在外压作用下沿径向发生弹性

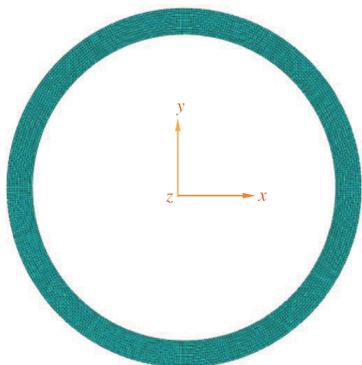


图1 有限元几何模型及网格

及塑性变形。在管体外径上施加外压载荷，载荷线性增加，直至管体发生外压挤毁。边界条件及载荷施加情况如图2所示。

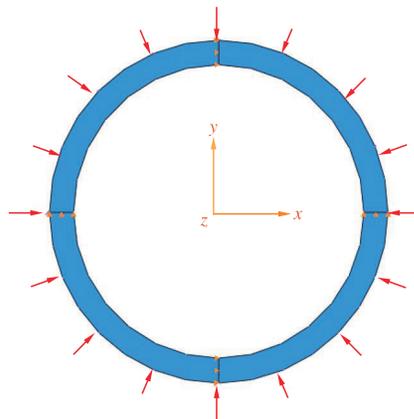


图2 边界条件及载荷施加

2 计算结果及分析

套管几何缺欠主要包括椭圆度和壁厚不均度两个方面，椭圆度及壁厚不均度又分别由最大外径、最小外径、最大壁厚、最小壁厚引起，因而其组合形式多样，考虑极限情况，通常有8种组合形式，其中壁厚偏差与椭圆外形大径方向一致时，大外径+小壁厚组合的抗外压挤毁强度相对最差，用于抗挤毁性能分析最为稳妥。故在多因素分析过程中，假设几何缺欠组合形式为壁厚偏差与椭圆外形大径方向一致，即为大外径+小壁厚组合^[13]。组合形式如图3所示。

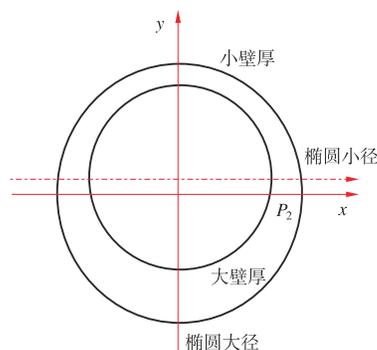


图3 壁厚偏差与椭圆外径组合示意图

2.1 几何尺寸对抗外压挤毁强度的影响分析

2.1.1 管体外径椭圆度对抗外压挤毁强度的影响

针对椭圆度变化进行套管抗外压挤毁强度有限元模拟，假设屈服强度沿周向均匀分布。椭圆

度依次为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%，壁厚不均度设定为2%。椭圆度0.4%时模拟获得的套管抗挤毁应力云图如图4所示，从图4可以看出，在外压作用初始阶段，套管应力就出现不均匀分布。套管椭圆大径方向上，套管内侧应力高于外侧；椭圆小径方向上，套管外侧应力高于内侧。外压作用至挤毁状态时，套管沿椭圆小径方向被压扁。最终，套管完全挤毁，套管内侧贴合。模拟过程中，套管承受外压初期压力逐渐升高，到达峰值后，迅速降低。三个阶段分别对应图4中的三种应力状态，峰值压力即为模拟得到的套管抗挤毁强度。

模拟获得的套管抗挤毁强度与椭圆度变化

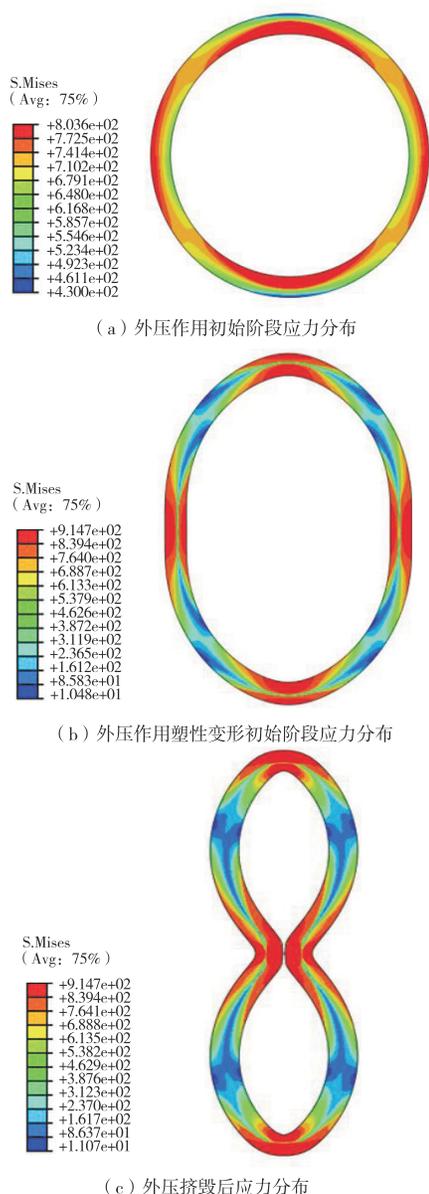


图4 壁厚不均度2%、椭圆度0.4%套管抗挤毁应力云图

关系如图5所示。从图5可以得出，随着椭圆度的增大，套管抗外压挤毁强度模拟结果逐渐降低。与理论计算结果对比发现，椭圆度较小时的模拟结果远高于理论计算结果，随着椭圆度的增大，模拟结果与理论计算结果差值逐渐减小。

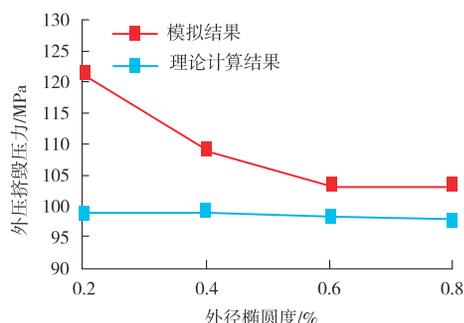


图5 椭圆度变化时模拟结果与理论计算结果对比

2.1.2 管体壁厚不均度对抗外压挤毁强度的影响

在模拟分析壁厚不均度变化对套管外压挤毁强度的影响时，假设屈服强度沿周向均匀分布且套管椭圆度为0.4%。最小壁厚不变，通过最大壁厚增加调整壁厚不均度，壁厚不均度分别为2%、4%、6%、8%。模拟获得的壁厚不均度变化与套管抗挤毁强度的关系如图6所示。从图6可以得出，随着壁厚不均度的增加，套管的抗外压挤毁值模拟结果逐渐增大，且均高于理论计算结果。

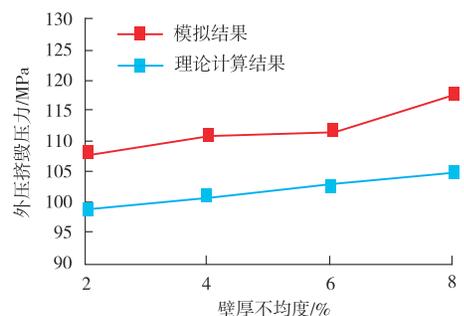


图6 壁厚不均度变化时外压挤毁的模拟结果与理论计算结果对比

通常情况下，套管的椭圆度及壁厚不均度会叠加在一起，影响套管的抗挤毁性能。为了研究影响套管抗挤毁性能的几何缺欠（椭圆度和壁厚不均度）的主次关系，对图5和图6进行对比分析，可以得出，变化范围一定时，在相同的变化梯度下，椭圆度对外压挤毁结果的影响高于壁厚不均度，即椭圆度对套管抗挤毁性能的影响更大。

2.2 屈服强度变化对抗外压挤毁性能影响分析

2.2.1 屈服强度均匀整体变化

按照 API SPEC 5CT 标准，当钢级一定时套管的屈服强度并不是固定值，而是在一个区间内。为此，研究分析钢级一定时，屈服强度变化对套管的外压抗挤毁性能的影响规律。屈服强度分别取 800 MPa、820 MPa、840 MPa、880 MPa、920 MPa 和 960 MPa，椭圆度为 0.4%，壁厚不均度为 2%，模拟及理论计算结果如图 7 所示。从图 7 可以得出，随着屈服强度的升高，外压挤毁模拟结果和理论计算结果均不断升高，且模拟结果始终高于理论计算结果，但二者间的差值逐渐减小。

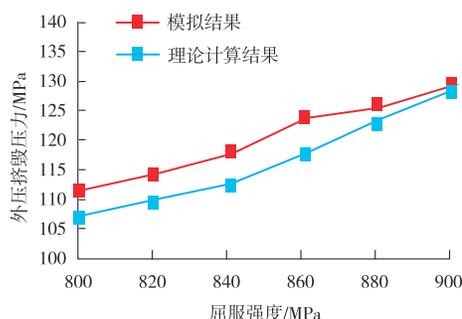


图7 屈服强度均匀变化时的外压挤毁模拟及理论计算结果对比

2.2.2 屈服强度分布变化

以上外压挤毁模拟分析时，均假设管体的屈服强度沿管体周向均匀分布，而实物管体的屈服强度通常沿管体周向是有差异的。为进一步分析屈服强度沿管体周向的不均匀变化对管体外压挤毁性能的影响规律，将管体沿周向划分为四个象限，每个象限分别赋予不同的屈服强度，建模时设定椭圆度 0.4%、壁厚不均度 2%，屈服强度分布见表 3（屈服强度分布方案按均匀性优劣依次为：方案 4>方案 3>方案 2>方案 1>方案 5），四个象限的平均屈服强度相同，建模象限划分如图 8 所示。

模拟获得的屈服强度沿周向变化时的外压挤毁分析结果如图 9 所示，结合表 3 分析发现，当平均屈服强度一定时，屈服强度沿管体周向分布越均匀（方案 4），套管的抗外压挤毁强度越高；屈服强度越分散（方案 5），抗外压挤毁强度越低。

表3 沿圆周方向四个象限屈服强度分布情况

方案	屈服强度/MPa				均值
	第1象限	第2象限	第3象限	第4象限	
1	800	880	880	960	840
2	820	880	880	940	
3	840	880	880	920	
4	880	880	880	880	
5	800	840	920	960	

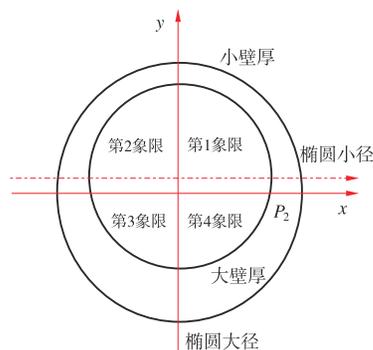


图8 沿圆周方向四个象限划分情况

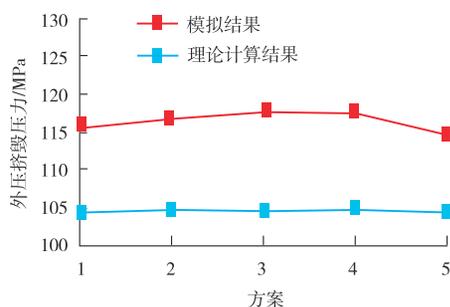


图9 屈服强度分布变化时的外压挤毁分析结果

3 实物外压试验与有限元分析结果对比

为了验证模拟分析得出的几何尺寸缺欠参数对套管外压挤毁结果影响规律的有效性，对 P110 钢级 $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 10.54 \text{ mm}$ 套管进行抗外压挤毁实物试验验证。经测量，该套管实物缺欠几何尺寸见表 4。在此基础上，试验检测了套管实物的屈服强度。检测屈服强度时，将管体沿横截面化分为四个象限^[4]，在每个象限内取一组拉伸试样进行试验，确定每个象限的屈服强度和抗拉强度，屈服强度检测结果见表 5。取样后，剩余管样进行外压挤毁试验。外压挤毁试验方法按照 SY/T 6238.1 《油井管全尺寸试验方法 套管挤毁试验》执行，

试样长度为3.8 m,超过8倍的外径长度^[15],试验过程中以不超过35 MPa/min的加压速度升压,直至套管压溃。套管实物挤毁试验曲线如图10所示,通过实物试验得出的套管抗外压挤毁强度为116.7 MPa,外压挤毁形貌如图11所示。

表4 套管外压挤毁实物试验缺欠几何尺寸

几何参数 测量截面	壁厚不均度/%		椭圆度/%	
	截面最大处	环向位置	截面最大处	环向位置
截面1	2.51	2象限	0.26	1-3象限
截面2	3.18	1象限	0.58	1-3象限
截面3	1.35	2象限	0.60	1-3象限
截面4	2.39	2象限	0.11	1-3象限
截面5	1.62	1象限	0.13	2-4象限
截面6	2.49	4象限	0.28	2-4象限
截面7	2.69	4象限	0.23	2-4象限
截面8	2.3	2象限	0.14	1-3象限

表5 套管实物沿圆周方向屈服强度 ($R_{0.6}$) MPa

第1象限	第2象限	第3象限	第4象限
884	875	850	890

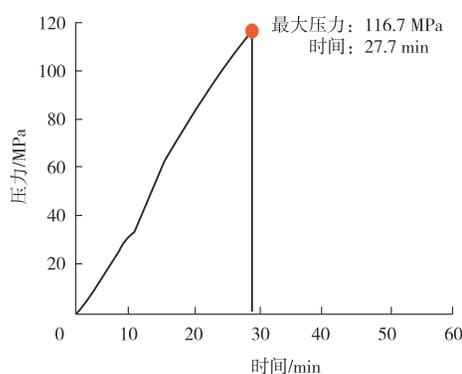


图10 套管外压挤毁试验曲线



图11 套管外压挤毁后实物形貌

根据模拟得到的几何尺寸缺欠影响结果可知,椭圆度比壁厚不均度对套管抗挤毁性能影响更大。截面3位置实测壁厚不均度1.35%是样管中最小的,对应的椭圆度0.6%是样管中最大的。截面3位置先出现变形失效,外压挤毁强度最小,是最薄弱截面。因此,根据截面3实测的几何尺寸参数进行套管抗外压挤毁性能建模和理论计算,模拟结果得出套管实物挤毁压力为116.3 MPa,理论计算得出的实物抗外压挤毁结果为111.6 MPa。

将有限元分析得出的管体抗外压挤毁强度值与实际试验套管抗外压挤毁强度值进行对比,发现通过划分象限获取的屈服强度和实测几何尺寸建模方式模拟得出的外压挤毁结果与实物试验结果十分接近,并优于API理论公式计算的结果,可以更加精确地预测套管实物的外压挤毁强度。

4 结 论

(1) 在尺寸公差要求范围内,当套管管体几何形状存在椭圆度和壁厚不均度缺欠时,椭圆度对套管外压挤毁性能的影响大于壁厚不均度的影响。

(2) 在套管椭圆度和壁厚不均度一定的情况下,随着屈服强度的均匀升高,外压挤毁模拟结果和理论计算结果均不断升高,且模拟得出的外压挤毁结果始终高于理论计算结果,但二者间的差值逐渐减小。另外,平均屈服强度一定时,管体屈服强度沿周向分布越均匀,套管的抗挤毁性能越好,但均不超过屈服强度均匀时的外压挤毁结果。

(3) 根据模拟得出的几何尺寸缺欠对套管外压挤毁试验结果的影响规律,实测套管横截面的椭圆度、壁厚不均度两种几何尺寸缺欠,找出套管实物最薄弱截面。通过分象限实测屈服强度和实测几何尺寸相结合的建模方式,可以更加精确地预测套管实物的外压挤毁强度,通过开展验证试验,对比理论分析的数值模拟结果与试验测试结果,进一步验证了数值建模方法的合理性。

参考文献:

- [1] 孙连坡,陈卓,霍宏博,等.非均匀地应力作用下套管柱挤毁风险分析[J].石油工业技术监督,2020,36(4):37-39,44.
- [2] 张旭,陈玉鹏,周家祥,等.页岩气开采用套管抗外压挤毁性能试验研究[J].钢管,2020,49(6):18-21.
- [3] 林元华,邓宽海,曾德智,等.非均匀挤毁测试研究C110套管的变形规律[J].机械科学与技术,2015,34(2):315-319.
- [4] 张睿栋.椭圆度对套管挤毁强度的影响分析[D].西安:西安石油大学,2015.
- [5] 邢卫峰,熊青山,殷亚琼.API套管抗外挤强度在弯曲井眼中适用情况的ANSYS分析[J].广州化工,2014,42(5):115-116.
- [6] 李周波,芦琳,鲁碧为,等.J55膨胀套管抗挤毁强度的计算与模拟[J].焊管,2014,37(7):23-26.
- [7] 郭克星,袁雪婷,董超,等.复合加载下油井管管柱的挤毁模型[J].焊管,2021,44(4):47-52,57.
- [8] 娄琦,张广路,张丹,等.套管抗挤毁强度主要影响因素试验研究[J].石油矿场机械,2012,41(6):38-42.
- [9] 刘洪涛,徐蔼彦,赵密锋,等.套管极限挤毁强度的计算及有限元模拟[J].机械工程材料,2021,45(9):79-82.
- [10] American Petroleum Institute. Calculating performance properties of pipe used as casing or tubing: API TR 5C3—2018 [S]. 7th ed. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2018.
- [11] American Petroleum Institute. Specification for casing and tubing: API SPEC 5CT—2018[S]. 10th ed. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2018.
- [12] 张旭,张哲平,杨尚谕,等.基于特征值和弧长法计算套管抗挤强度[J].钻采工艺,2022,45(1):35-40.
- [13] 黎新春,王洪兵.P110套管抗外压挤毁强度的有限元分析验证[J].钢管,2017,46(6):16-21.
- [14] 焦炜,汪强,田小江,等.P110钢级 $\Phi 139.7\text{ mm}\times 10.54\text{ mm}$ 高抗挤套管抗挤毁性能分析及挤毁强度预测[J].焊管,2017,40(6):20-24.
- [15] 张学智,李振坤.浅谈弯曲条件下评价套管抗挤毁强度的试验方法[J].石化技术,2019,26(1):58-59.
- 作者简介:汪强(1989—),男,硕士,主要从事石油井管材研发、特殊螺纹开发及检测评价工作。
- 收稿日期:2023-06-30
修改返回日期:2023-12-12
编辑:袁雪婷
-
- (上接第15页)
- [33] ASKARI M, ALIOFKHAZRAEI M, AFROUKHTEH S. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 71: 102971.
- [34] JACKSON M S, HOWELL D A, BAILEY J R, et al. Wear resistant, friction reducing coatings reduce tubing wear in sucker rod couplings application: lab testing and field trial results [C]/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 2018: SPE-191617-MS.
- [35] HUANG S M, SUN D Q, WANG W Q, et al. Microstructures and properties of in-situ TiC particles reinforced Ni-based composite coatings prepared by plasma spray welding [J]. Ceramics International, 2015, 41(9, Part B): 12202-12210.
- [36] HONG C, GU D D, DAI D H, et al. Laser additive manufacturing of ultrafine TiC particle reinforced Inconel 625 based composite parts: tailored microstructures and enhanced performance [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 635: 118-128.
- [37] HUANG B S, GAO Y X, CHEN P, et al. Microstructure and properties of Ni+B4C/Ti coatings by high-frequency induction cladding [J]. Surface Innovations, 2019, 7(1): 59-67.
- [38] BAI L L, LI J, CHEN J L, et al. Effect of the content of B4C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 76: 33-45.
- [39] JIA L, LI S F, IMAI H, et al. Size effect of B₄C powders on metallurgical reaction and resulting tensile properties of Ti matrix composites by insitu reaction from Ti-B4C system under a relatively low temperature [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 614: 129-135.
- 作者简介:奚运涛(1978—),山东巨野人,工学博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为油气田腐蚀和结垢机理及防治、材料表面处理技术、油气田新材料和新工具研发与应用。
- 通讯作者:王雷(1988—),陕西西安人,工学博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为石油管材力学性能分析以及石油设备腐蚀与防护。
- 收稿日期:2023-09-03
修改返回日期:2024-01-11
编辑:黄蔚莉