

薄壁管材特殊螺纹接头密封性能研究*

杨晓龙^{1,2}, 汪 强^{1,2}, 黄德全³, 晁利宁^{1,2},
苑清英^{1,2}, 李远征^{1,2}, 麻文昌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. 中国石油宝鸡石油钢管资阳石油钢管有限公司, 四川 资阳 641300)

摘 要: 为了解决薄壁管材特殊螺纹接头在油田频繁出现高压泄漏的问题, 采用有限元和实物试验相结合的方式, 研究分析了薄壁管材特殊螺纹接头台肩厚度、螺纹过盈量和密封面结构等关键参数对接头密封性能的影响。结果表明, 增大台肩厚度、降低螺纹过盈、设计锥/锥密封结构可大幅提高接头密封接触压力积分值, 能够较好解决薄壁特殊螺纹油套管密封性能不足而导致的高压泄漏问题。根据该思路设计出常用规格的薄壁特殊螺纹套管, 经实物试验验证, 薄壁套管接头抗粘扣性能优异, 密封性能达到了100%等管体, 能够有效解决薄壁特殊螺纹接头上扣不稳定及高压漏失问题。

关键词: 薄壁套管; 特殊螺纹; 结构设计; 密封性能

中图分类号: TE931;TG62

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.05.007

Sealing Performance of Special Thread Joint of Thin-walled Pipe

YANG Xiaolong^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}, HUANG Dequan³, CHAO Lining^{1,2},
YUAN Qingying^{1,2}, LI Yuanzheng^{1,2}, MA Wenchang²

(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. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Ziyang Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Ziyang 641300, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the of high pressure leakage of the special threaded joints for thin-walled pipes applied in oil fields, adopting a combination of finite element analysis and full-scale test to analyse the influence of key parameters such as shoulder thickness, thread interference and sealing surface structure on the sealing performance of special threaded joints in thin-walled pipes. The results show that by increasing shoulder thickness, reducing thread interference and designing cone/cone sealing structure, the integral value of contact pressure of joint seal can be greatly improved, and the problem of high pressure leakage caused by insufficient sealing performance of thin-walled special thread oil casing can be better solved. According to this idea, two kinds of thin-walled special thread casing with common specifications are designed. The full-scale test proves that the two kinds of thin-walled special thread joints have excellent anti-sticking properties, and the sealing performance reaches 100% equal pipe body, which can effectively solve the problems of unstable screw-on and high pressure leakage of thin-walled special thread joints.

Key words: thin-walled casing; special thread; structural design; sealing property

0 前 言

近年来, 越来越多的油田企业采用薄壁特殊

螺纹产品进行油气资源开发, 但薄壁特殊螺纹产品在油田使用过程中出现了新的问题。据调研, 在国内某油田, 薄壁特殊螺纹套管频频发生通井

*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)。

遇阻及高压漏失问题,这使得薄壁特殊螺纹管柱接头的密封性成为了油田企业关注的焦点。

薄壁特殊螺纹管柱接头发生失效的主要原因有两方面,一是井况越来越复杂,随着高产油气井的不断减少,石油开采逐渐向低渗甚至致密油气藏转移,在非常规油气开发过程中,井况越来越苛刻,对油气管柱接头的密封性能提出了更高的要求^[1];二是油田采油工艺技术的进步,近年来,油田采油采用了更多的新技术新工艺,这对管柱接头的性能要求也越来越高。例如在长水平井中采用多段大体积压裂工艺,压裂压力会达到100 MPa以上,压裂次数会达30次以上^[2],因此,长水平井高压多次压裂对套管管柱,尤其是接头的抗内压能力提出了更高的要求。目前国内对薄壁管材的特殊螺纹研究较少,为解决薄壁管材接头高压泄漏问题,为我国非常规油气开采提供接头性能稳定可靠的薄壁套管产品,本研究结合薄壁管材特点,对特殊螺纹接头结构密封性能进行研究,设计了常用规格薄壁特殊螺纹套管,并对套管接头密封性能进行验证。

1 薄壁管材特殊螺纹接头密封性分析

1.1 设计方案

接箍式特殊螺纹结构一般包括螺纹、密封面和止扭矩台肩三部分,其结构如图1所示。对于外径相同的管材,管壁变薄后,如果螺纹及密封结构不调整,台肩厚度会急剧减小,从而影响密封性能。台肩厚度的变化会导致螺纹及密封参数发生变化,而螺纹及密封参数的调整也会影响接头的结构完整性和密封完整性;对于特殊螺纹接头,决定密封性能最关键的部位是密封面,密封面的结构形式直接影响密封压力和密封稳定性。为此,本研究采用有限元模拟的方式对薄壁管材

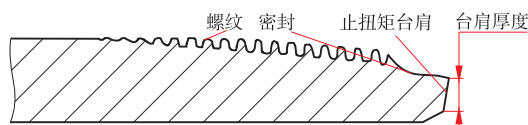


图1 特殊螺纹结构示意图

特殊螺纹接头的台肩厚度、螺纹参数、密封参数及密封面形式进行综合分析研究。

1.2 有限元模拟分析

对薄壁管材进行有限元分析,在建模过程中,根据有限元软件特点及特殊螺纹实际情况,对有限元模型进行假设和简化^[3-5]:①管体和接箍材料均为各向同性;②螺纹升角小,其影响忽略不计;③接箍和管体在配合前几何尺寸为理想状态。基于上述假设,分析模型可按二维轴对称问题处理,采用弹塑性非线性有限元方法进行分析。本研究以P110钢级管材为例,其管体弹性模量为210 GPa,泊松比为0.3,摩擦系数为0.025^[6-8]。

1.2.1 不同壁厚特殊螺纹密封性能研究

薄壁管材特殊螺纹失效的主要原因之一是台肩厚度较薄。对国内某油田采用的P110钢级 $\Phi 139.7\text{ mm}\times 9.17\text{ mm}$ 规格及 $\Phi 139.7\text{ mm}\times 7.72\text{ mm}$ 规格的管材进行对比,结果发现,在相同设计下,前者的特殊螺纹台肩厚度可达到3.95 mm,而后的台肩厚度只有2.2 mm。

对以上两种不同壁厚的管材特殊螺纹接头进行有限元模拟分析,上扣后应力应变情况如图2所示,可以发现,壁厚为7.72 mm的管材特殊螺纹接头台肩处应力较大,容易发生塑性变形。对两种规格密封面接触压力按接触长度进行积分值计算,结果表明,壁厚为9.17 mm的管材特殊螺纹接头密封面接触压力积分值为831.754 1 MPa,而壁厚为7.72 mm的管材特殊螺纹接头密封面接触压力积分值为538.165 9,按管体内屈服压力(9.17 mm壁厚管材屈服压力为87.2 MPa,7.72 mm壁厚管材屈服压力为73.4 MPa)计算,9.17 mm壁厚特殊螺纹接头密封面接触压力积分值是管体内屈服压力9.54倍,7.72 mm壁厚特殊螺纹接头密封面接触压力积分值是管体内屈服压力7.33倍。从模拟结果可以看出9.17 mm壁厚特殊螺纹接头密封面整体接触压力较大,密封接触压力积分值高出管体内屈服压力值较多,说明9.17 mm壁厚的管体特殊螺纹接头整体密封性能较好。不同壁厚的特殊螺纹接头密封面接触压力积分值对比如图3所示。这也印证了Sugino等^[9]的观点:在一定范围内,随着管材壁厚的增加,台肩壁厚也逐渐增加,接头的密封接触压力逐渐增加。

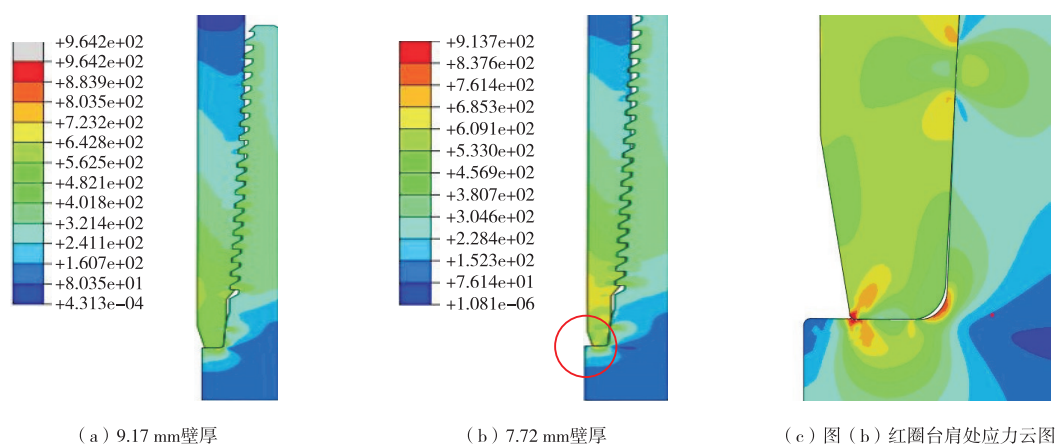


图2 上扣后密封面接触压力云图

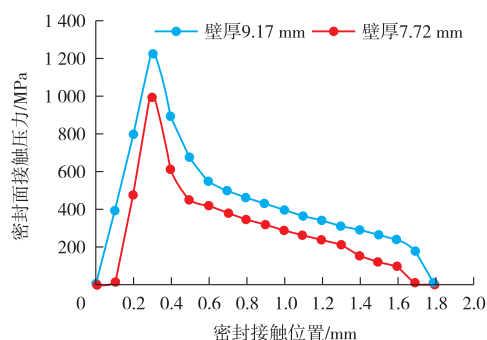


图3 不同壁厚管材特殊螺纹接头密封面接触压力变化曲线

1.2.2 不同台肩厚度特殊螺纹密封性能研究

管材壁厚越大,成本越高。采用大壁厚管

材会显著增大油气开采成本,因此,考虑通过不增加管材壁厚、只增加接头台肩处的厚度的方法来提高管材的密封性能。对同一规格管材不同台肩厚度特殊螺纹性能进行研究。对 $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 7.72 \text{ mm}$ 管材特殊螺纹不同台肩厚度进行有限元仿真分析,方案1为正常台肩,方案2为加厚台肩,结果发现,上扣后方案1台肩处应力较大,台肩局部发生塑性应变;方案2台肩处应力小,台肩处未发现明显塑性变形。不同台肩厚度应力应变云图如图4所示。

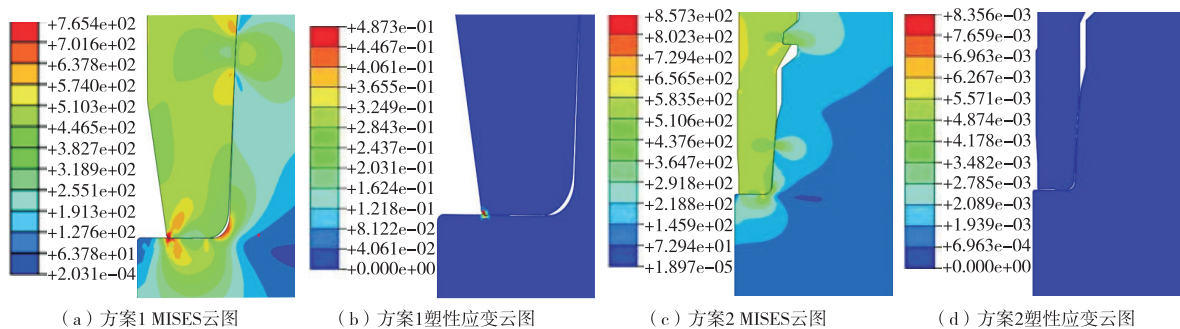


图4 不同台肩厚度应力应变云图

通过对比可知,增加台肩厚度可以有效提升接头性能及管柱性能,建议台肩厚度在3.9 mm以上可以有效保证接头具有良好的密封性能。

1.2.3 螺纹参数研究

针对薄壁特殊螺纹接头高压漏失情况,对不同螺纹参数下的接头密封能力进行研究,设计合理螺纹参数。油气钻采管柱接头都会设计螺纹过盈,API螺纹为了保证接头的连接强度和一定的密封性能,螺纹过盈量设计较大^[10]。特殊螺纹接

头有独立的密封结构设计,用以保证接头密封能力,螺纹设计只是为了保证接头连接强度,螺纹过盈量设计可以适当减小,但螺纹过盈设计量对接头密封能力有一定的影响^[11],因此,有必要研究不同螺纹过盈量对密封性能的影响。

根据螺纹过盈量设计制定两种方案:方案1的螺纹过盈量设计为0.39 mm,方案2的螺纹过盈量设计为0.31 mm。对两种方案在API 5C5:2017同一载荷点^[12]下的密封面接触长度及接触压

力进行有限元模拟及分析,模拟结果如图5所示,不同过盈量下密封接触压力变化曲线如图6

所示,不同过盈量下密封接触长度及密封接触压力积分值见表1。

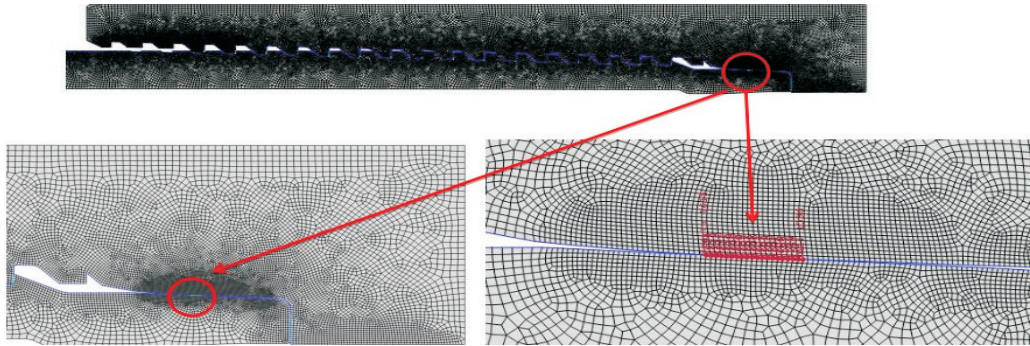


图5 密封面接触长度及接触压力模拟结果

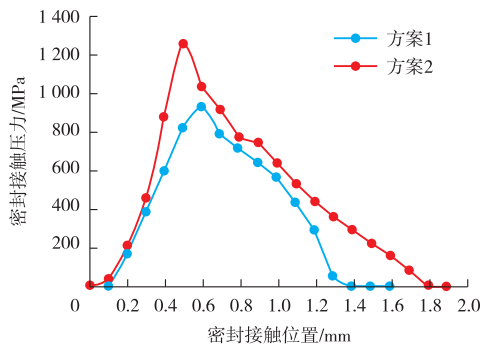


图6 不同过盈量下密封接触压力变化曲线

表1 不同过盈量下密封接触长度及密封接触压力积分值

设计方案	密封长度/mm	密封接触压力积分值/MPa
方案1	1.289 620	639.750 2
方案2	1.693 492	907.747 3

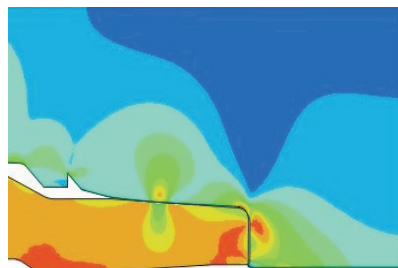
从图6和表1可以看出,方案2整体密封接触情况优于方案1,方案2密封接触长度增大约

0.4 mm,密封面接触压力明显增大。

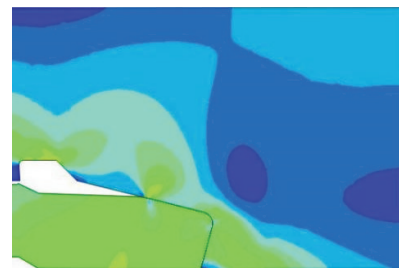
在保证螺纹连接强度的基础上,适当减小螺纹设计过盈量可有效提升接头密封能力。但是目前油套管厂家的特殊螺纹产品在相同外径规格下的螺纹参数完全一致,未针对薄壁特殊螺纹参数进行专门研究,导致薄壁特殊螺纹发生高压漏失现象,因此建议薄壁规格特殊螺纹适当减小螺纹过盈量,其中直径为114.3~177.8 mm规格的套管建议过盈量不要超过0.31 mm。

1.2.4 密封形式研究

密封设计是特殊螺纹接头的特有设计,目的就是提高管柱的耐高压能力。对两种主流的密封设计方案进行对比分析:方案1为球面/锥面密封结构设计,一般配合直角台肩或小角度台肩;方案2为锥面/锥面密封结构设计,一般配合负角度台肩。两种方案密封结构设计分别如图7所示。



(a) 方案1



(b) 方案2

图7 两种方案密封结构设计

以 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 7.72\text{ mm}$ 特殊螺纹为例,API 5C5:2017同一载荷点下^[12]对两种方案的密封接触压力进行对比分析,不同密封结构密封接触压力变化曲线如图8所示,不同密封

结构密封面长度和接触压力积分值见表2。结果发现,方案2锥面/锥面密封设计虽然密封长度缩短了0.000 58 mm,但密封接触压力明显提高,整体密封接触压力积分值明显高于

方案1。这是因为球面/锥面密封设计密封面一般都较长，不适用薄壁接头，而锥面/锥面密封设计密封面较短，台肩为负角度设计，可增大台肩接触面积增强密封能力，增强接头整体抗压缩及抗扭矩能力。

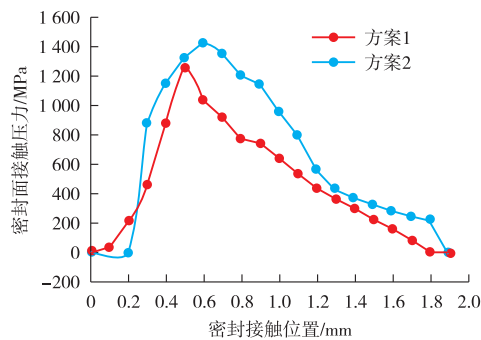


图8 不同密封结构密封接触压力变化曲线

表2 不同密封结构密封面长度和接触压力积分值

密封结构	密封长度/mm	密封接触压力积分值/MPa
球面/锥面	1.693 492	907.747 3
锥面/锥面	1.692 909	1 271.607 3

通过以上分析可以看出，薄壁特殊螺纹整体结构可采用台肩加厚、螺纹低过盈、锥/锥密封结构设计，从而提高管材接头的密封能力，解决因高压导致的管材接头漏失问题。

2 试验验证

根据上述分析，设计出P110钢级 $\Phi 114.3\text{ mm}\times 7.37\text{ mm}$ 规格的薄壁套管特殊螺纹接头^[13]，分别按照设计的螺纹结构进行试样试制，并进行密封性能评价试验，验证薄壁钢管特殊螺纹接头设计思路。依据API RP 5C5：2017 IV级特殊螺纹评价验证标准，选取最容易泄露的1#极限公差样进行试验，台肩刻槽，消除台肩密封辅助作用，检验密封面的高压密封性能。1#极限公差样内外螺纹配合情况见表3，可以看出此配合情况对接头密封性能要求最为极限。

表3 1#极限公差试样内外螺纹配合情况

密封过盈	螺纹过盈	内螺纹锥度	外螺纹锥度	台肩过盈
最小	最大	最陡	最缓	较小

2.1 上卸扣试验

对1#极限公差试样A端按最小扭矩进行1次上扣，B端按前两次最大扭矩、最后一次最小扭矩进行三上两卸试验，具体试验扭矩见表4。两上两卸后外螺纹及内螺纹形貌如图9所示，通过图9可以看出，上卸扣过程中，密封面和螺纹均未出现粘扣现象。

表4 1#极限公差试样上扣扭矩

试样组合	上扣次数	上扣扭矩/(N·m)	台肩扭矩/(N·m)	卸扣扭矩/(N·m)	备注
PA→CA	1	7 057	2 954	未卸扣	—
PB→CB	1	8 577	3 195	7 706	未粘扣
PB→CB	2	8 436	2 898	7 866	未粘扣
PB→CB	3	6 831	2 634	未卸扣	—

注：PA代表管体A端，PB代表管体B端，CA代表接箍A端，CB代表接箍B端。

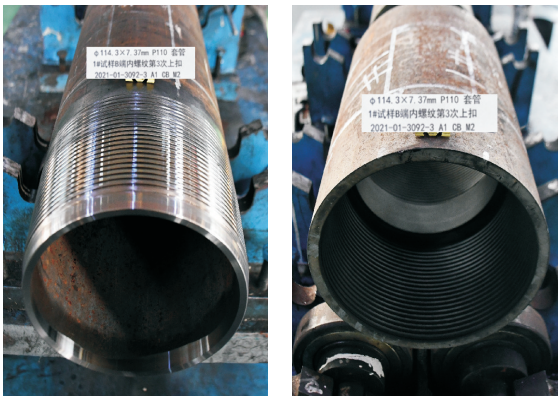


图9 两上两卸后内、外螺纹形貌图

2.2 气密封试验

根据API RP 5C5：2017 IV对完成上扣的1#极限公差试样进行A系试验。A系试验集中了拉伸、压缩、内压、外压、常温、高温等复合载荷，是对接头性能最严苛的检验^[14-15]，A系高温载荷包络线如图10所示。1#极限公差试样在A系试验过程中未出现密封失效和结构失效，表明该薄壁特殊螺纹具有良好的抗高压漏失性能。

根据薄壁特殊螺纹的设计思路研制出的 $\Phi 114.3\text{ mm}\times 7.37\text{ mm}$ 薄壁特殊螺纹产品，成功通过了第三方实物评价试验，且接头密封性能达到了100%等管体，表明该设计思路合理，并可应用至更多薄壁管材特殊螺纹的结构设计之中。

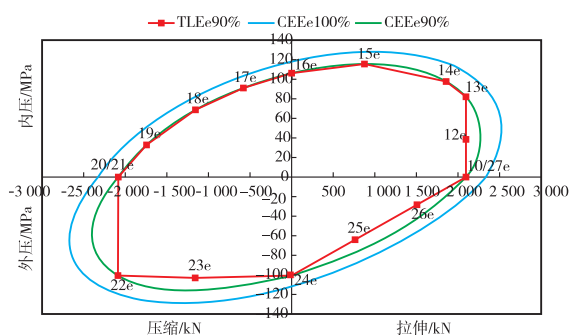


图10 1#样高温A系载荷包络线

3 结 论

(1) 薄壁管材特殊螺纹宜采用加厚台肩、降低螺纹过盈、锥/锥密封结构的思路进行结构设计。

(2) 薄壁特殊螺纹套管接头建议管体台肩厚度设计大于3.9 mm，螺纹直径过盈量小于0.31 mm。

(3) 采用台肩加厚、螺纹低过盈、锥/锥密封结构设计的规格为 $\Phi 114.3 \text{ mm} \times 7.37 \text{ mm}$ 薄壁特殊螺纹接头具有良好的抗粘扣性能，密封性能达到100%等管体，可有效解决薄壁特殊螺纹接头上扣不稳定及高压漏失问题。

参考文献:

- [1] 曹博涵. 全球油气勘探开发趋势及对我国油气行业的启示[J]. 当代石油石化, 2023, 31(1): 31-37.
- [2] 刘炜, 王小军, 张峰, 等. 页岩气长水平井重复压裂技术研究及应用[J]. 中国科技论文, 2023, 18(5): 562-566.
- [3] 杨智春, 李斌, 史交齐. 特殊扣套管接头的应力及密封特性分析[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(7): 771-773, 776.
- [4] 吴稀勇, 闫龙, 陈涛, 等. 弯曲载荷下特殊螺纹接头密封性能的有限元分析[J]. 钢管, 2010, 39(6): 70-73.
- [5] 王建东, 冯耀荣, 林凯, 等. 特殊螺纹接头密封结构比分析

[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 126-130.

- [6] 白鹤, 鲁碧为, 何石磊, 等. 拉伸载荷下承载面角度对特殊螺纹接头连接强度影响的有限元分析[J]. 焊管, 2015, 38(9): 26-31.
- [7] KWON Y W, KLEMENTICH E F, KO K I. An efficient and accurate model for the structural analysis of threaded tubular connections [J]. SPE Production Engineering, 1990, 5(3): 261-264.
- [8] JELLISON M J, DAVILA M A. How to evaluate and select premium casing connectors [C]//IADC/SPE Drilling Conference. Tulsa; Society of Petroleum Engineers, 1996: SPE-35037-MS.
- [9] SUGINO M, YAMAGUCHI S, UGAI S, et al. VAM®21, an innovative high-performance premium threaded connection for OCTG [J]. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, 2015, 107(2): 10-17.
- [10] American Petroleum Institute. Specification for threading, gauging and thread inspection of casing, tubing, and line pipe threads: API SPEC 5B-2008 [S]. Washington, D.C.: API, 2008.
- [11] 鲁碧为, 白鹤, 袁芳兰, 等. 螺纹过盈量对特殊螺纹接头性能的影响[J]. 钢管, 2015, 44(4): 49-53.
- [12] American Petroleum Institute. Procedures for testing casing and tubing connections: API RP 5C5 -2017 [S]. Washington, D.C.: API, 2017.
- [13] American Petroleum Institute. Specification for casing and tubing: API SPEC 5CT-2011 [S]. Washington, D. C.: API, 2011.
- [14] 王建东, 林元华, 李玉飞, 等. 基于特殊螺纹密封完整性的三轴设计系数研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 165-173.
- [15] 李远征, 苑清英, 周新义, 等. BJC-II型气密封特殊螺纹开发[J]. 焊管, 2021, 44(5): 1-8, 13.

作者简介: 杨晓龙(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事油套管关键技术及特殊螺纹接头研究工作。

收稿日期: 2023-09-13

修改返回日期: 2024-01-21

编辑: 董 超

欢迎投稿 欢迎订阅