

再论高压大口径管件的设计计算方法

张有渝 熊 皓 傅贺平

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:中国天然气长输管道工程阀室和站场用国产高压大口径管件,由于采用数学分析法导致大壁厚管件质量难于得到保证,而进口管件采用验证试验法计算得到的壁厚较小,不存在管件制造装备和制造工艺上的难题,管件质量和安全性得到了保证。通过工程实例中进口与国产管件的对比,说明应采用验证试验法进行管件设计计算,提出采用验证试验法需依据的标准应以国外标准为宜,并论述了采用管件验证试验法计算壁厚的相关技术问题,包括规范结构型式与尺寸,和规定制造工艺规范。

关键词:管件;工程实例;设计计算;验证试验法

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.02.020

0 前言

自西气东输管道工程建设以来,中国天然气高压大口径长输管道得到了迅速发展,管道设计压力已经达到12 MPa,管径从DN 1 000(Φ 1 016 mm)加大到DN 1 400(Φ 1 420 mm),干线钢管材质普遍采用X80。虽然干线管道的钢管制造、施工组焊技术得到较好的发展^[1-5],但干线管道阀室、站场上大量使用的管件,特别是三通、弯头的制造工艺、装备和质量问题却长期未能得到解决。这主要是由于管件在内压作用下的应力分布较复杂,非均匀分布^[6-7],与压力容器圆柱壳的薄膜理论^[8-9]完全不同,因此管件的计算在规范上就规定了两种设计方法。目前我国在管件的设计计算方法上,仍在采用与高压大口径长输管道不相匹配的,相对保守的数学分析法,导致高压大口径管件壁厚特别大。目前中国管件制造公司的装备和工艺无法保证管件质量,但是这个问题在国外高压大口径管件的设计计算和制造上却已经得到了很好的解决,这就是放弃管件计算的数学分析法,采用验证试验法进行管件的设计计算。笔者曾就此问题进行过专门论述^[10]。但是据了解,管件的设计计算方

法并未得到很好的改变,因此高压大口径管件,特别是拔制三通的质量尚有待进一步提高。现就此相关问题作进一步的探讨。

1 工程实例对比

在某长输管道工程中,曾经进口了国外某管件公司设计和制造的高压大口径管件,采用的技术标准为当时的美国管件标准MSS SP-75-1998《优质钢制对焊管件技术规范》^[11],管件材质为该标准规定的管件钢WPHY 70和WPHY 60,管件设计计算方法为验证试验法,当时主要进口的是三通、弯头。部分进口三通和弯头的设计参数、规格、壁厚与材质分别见表1和表2。

为了便于对比由于管件设计计算方法的不同所导致的管件壁厚差异,现将国内某长输管道工程用国产管件中部分规格的三通和弯头的规格、壁厚与材质分别列于表3和表4。管件设计执行的标准是该工程的技术规格书和MSS SP-75-1998《优质钢制对焊管件技术规范》^[11],管件材质为API Spec 5 L-2000《管线钢管规范》(第42版)^[12]规定的X70和X60,管件设计计算方法是数学分析

收稿日期:2016-02-19

基金项目:西气东输三线天然气管道工程(S 2011-270)

作者简介:张有渝(1941-),男,江苏连云港人,教授级高工,主要从事石油化工压力容器和石油天然气压力管道设备及管件、油罐设计、审核、审定及标准编制工作。

法,即三通采用等面积补强,弯头采用公式计算。

表1 进口三通设计参数、规格、壁厚与材质表

设计压力 /MPa	主管、支管公称直径 /mm	主管、支管外径 /mm	主管与支管肩部壁厚 /mm	材质
10	1 000 × 1 000	1 016 × 1 016	36.16	WPHY 70
10	1 000 × 600	1 016 × 610	30.65	WPHY 70
10	1 000 × 500	1 016 × 508	30.65	WPHY 70
10	1 000 × 350	1 016 × 323.9	29.87	WPHY 70
10	700 × 700	711 × 711	30.64	WPHY 60
10	700 × 300	711 × 323.9	25.97	WPHY 60
10	400 × 300	406 × 323.9	17.25	WPHY 60
6.3	800 × 500	813 × 508	18.72	WPHY 60

表2 进口弯头设计参数、规格、壁厚与材质表

设计压力 /MPa	公称直径 /mm	外径 /mm	弯曲角度 /(°)	壁厚 /mm	材质
10	1 000	1 016	90 /45	26.46	WPHY 70
10	900	914	90 /45	28.28	WPHY 60
10	700	711	90	22.42	WPHY 60
10	500	508	90 /45	16.48	WPHY 60
10	400	406.4	90	12.88	WPHY 60

表3 国产三通规格、壁厚与材质表

设计压力 /MPa	主管、支管公称直径 /mm	主管、支管外径 /mm	主管与支管肩部壁厚 /mm	材质
10	1 000 × 600	1 016 × 610	46.8	X 70
10	1 000 × 500	1 016 × 508	46.2	X 70
10	1 000 × 300	1 016 × 323.9	42.9	X 70
10	700 × 500	711 × 508	36.0	X 60
10	700 × 400	711 × 406.4	35.2	X 60
10	600 × 600	610 × 610	36.8	X 60
10	600 × 300	610 × 323.9	35.8	X 60
10	500 × 500	508 × 508	29.9	X 60
10	500 × 300	508 × 323.9	28.1	X 60

表4 国产弯头规格、壁厚与材质表

设计压力 /MPa	公称直径 /mm	外径 /mm	弯曲角度 /(°)	壁厚 /mm	材质
10	1 000	1 016	90 /45	32.8	X 70
10	700	711	90	24	X 70
10	600	610	90	26.3	X 60
10	500	508	90 /45	20	X 60
10	400	406.4	90 /45	18	X 60

表1~4至少可以说明以下问题:

1) 国产管件在选材上与国外管件是一致的,都是根据管件的设计压力和管件公称直径确定其材质,美国规范 MSS SP - 75 - 1998《优质钢制对焊管件技术规范》^[11]上规定的 WPHY 70 和 WPHY 60 的抗拉强度最小值分别为 82 000 psi (565 MPa) 和 75 000 psi (517 MPa),屈服强

度最小值分别为 70 000 psi (483 MPa) 和 60 000 psi (414 MPa),与 API Spec 5L - 2000《管线钢管规范》(第 42 版)^[12]对 X 70、X 60 的规定是完全一致的。

2) 由于采用同样的规范 MSS SP - 75 - 1998《优质钢制对焊管件技术规范》^[11],所以管件在主要结构尺寸上是相同的,实际上 MSS SP - 75 - 1998《优质钢制对焊管件技术规范》^[11]的管件尺寸与其它管件标准 ASME B 16.9 - 2001《工厂制造的锻轧制对焊管配件》^[13]以及国内管件标准 SY/T 0609 - 2006《优质钢制对焊管件规范》^[14]、SY/T 0510 - 2010《钢制对焊管件规范》^[15]在结构尺寸上都是相同的,可能存在不同的仅是由于设计或制造上模具结构、制造工艺造成的局部细小结构和尺寸上的差异。但是这些差异不会带来强度计算上的差别。

3) 由表1和表3可见,进口三通和国产三通由于不同工程需要的规格不同,较少有相同规格的三通可用于对比,但也可以看出以下的壁厚差别:

在相同设计压力(10 MPa)、材质(WPHY 70/X 70)和规格下,设计压力 10 MPa、DN 1 000 × 600 的进口三通肩部壁厚 30.65 mm,较国产三通肩部壁厚 46.8 mm 减薄了 34.5%。

在相同设计压力(10 MPa)和材质(WPHY 60/X 60)下,主管相同而支管不同的进口等径三通 DN 700 × 700 肩部壁厚 30.64 mm,反而比国产异径三通 DN 700 × 500 的肩部壁厚 36.0 mm 要薄 5.36 mm。

进口三通的肩部壁厚之所以要薄于国产三通的肩部壁厚,就在于三通设计计算方法的不同,进口三通计算采用验证试验法,而国产三通计算采用数学分析法的等面积补强法。

4) 从表2和表4的弯头壁厚也可以看出,由于进口弯头采用验证试验法而国产弯头采用数学分析法,因此进口弯头的壁厚比国产弯头的壁厚要薄,而且减薄的比例也较大。例如,设计压力 10 MPa、DN 1 000,弯曲半径 1.5 D,材质 WPHY 70/X 70,进口弯头壁厚 26.46 mm,比国产弯头 32.8 mm 减薄了 6.32 mm,减薄的厚度比例是 19.3%。

2 标准对管件计算方法的规定

2.1 管件计算方法依据的标准

国内外标准对管件的计算方法都有规定, MSS SP - 75 - 2008《优质钢制对焊管件规范》^[16]和 ASME B 16.9 - 2007《工厂制造的锻钢对焊管件》^[17]规定了管件计算采用数学分析法或验证试验法;国内管件标准 SY/T 0609 - 2006《优质钢制对焊管件规范》^[14]也是这样规定的, SY/T 0510 - 2010《钢制对焊管件规范》^[15]除了规定采用数学分析法或验证试验法外,还特别规定了对于拔制三通可采用等面积补强法计算,弯头则采用环管公式计

算。GB 50251-2015《输气管道工程设计规范》^[18]则明确规定三通采用等面积补强法计算。

2.2 标准的差异

管件标准虽然对其计算方法均作了类似的技术规定,但是仔细分析可知,管件标准在验证试验的要求上仍然存在差异,当采用验证试验法进行管件的验证试验时就会出现不同的问题,因此采用哪个标准更为恰当,就是首先要确定的问题。

我国的管件标准制订相对国外起步较迟,更重要的是我国很少为了制订标准而进行各种试验,包括应力分析试验和爆破试验,因此基本上是参照国外管件标准采标制订或相当的内容参照国外管件标准制订。因此国内管件标准在内容上与国外标准相比较,有时在细节上就会出现一些差异,这些差异有可能造成在试验中出现无法判定的问题甚至错误。例如SY/T 0510-2010《钢制对焊管件规范》^[15]第7.1.5条规定,设计验证试验的合格标准是:在进行液压试验时,当试验压力达到该标准下式计算压力的105%而未破裂,则认为试验合格。

$$p = \frac{2\sigma_b t}{D}$$

式中: p 为试验管件最小计算验证试验压力,MPa; σ_b 为试验管件的抗拉强度(在代表试验管件材料的试样上实测的抗拉强度),MPa; t 为管件上标志的公称壁厚,即与其连接同材质主管的公称壁厚,mm; D 为管件在工程使用中所连直管的外径,mm。

那么当试验时试验压力达到不低于该公式计算压力而爆破了,这样试验是否合格呢?实际上国外标准MSS SP-75-2008《优质钢制对焊管件规范》^[16]规定的合格标准首先是管件爆破前的试验压力不低于该公式计算压力即为合格,其次是如果不破裂,而试验压力达到了该公式计算压力的105%时也是试验合格。

2.3 推荐采用的管件标准

从上述分析可以看出,为了保证管件验证试验的顺利进行,直接采用国外管件标准进行试验是比较稳妥的,因此推荐管件特别是拔制三通进行验证试验时采用国外标准,例如MSS SP-75-2008《优质钢制对焊管件规范》^[16]。如果在更为苛刻的高压低温环境下输送油气的管道,则应采用ASTM A 860/A 860 M-00《高强度低合金锻钢对焊管件技术规范》^[19],该规范规定的管件冲击韧性试验温度为-46℃,且要求管件的硬度应为22 HRC。有文献指出X80大口径三通的低温断裂韧性必须考虑尺寸效应的影响^[20]。

3 采用验证试验法的相关问题

3.1 验证试验是验证试验法的基础

管件标准中规定了验证试验的方法、求取计算验证

试验压力的公式、合格的验证试验管件覆盖范围等,通过验证试验虽然不能直接给出管件经济合理的壁厚,但是有了验证试验的数据,管件壁厚的确定就有了强度安全优化的试验基础。

3.2 合格的验证试验适用范围

用于验证试验的样品管件的结构型式及尺寸必须符合标准规定。这样的样品管件在验证试验合格后,其结构型式及尺寸就成为覆盖同类型结构的管件及尺寸范围的基准。在这个前提下,才能采用验证试验法来确定其同类管件的壁厚。

3.3 验证试验的管件应有制造工艺规范

管件的性能,特别是保证其强度安全的力学性能、金相组织、冲击韧性等项指标很大程度上受到管件制造工艺的影响,特别是原材料的性能、热加工工艺和热处理工艺决定了管件的性能 and 安全性。因此验证试验合格的管件的制造工艺必然成为今后相同类型管件的制造工艺规范(MPS),并且也就相应规定了今后采用验证试验法确定壁厚的管件的制造工艺。在MSS SP-75-2008《优质钢制对焊管件规范》^[16]中对此也有相应规定,因此不同的管件公司应有各自的验证试验,以确定管件壁厚,而不能借用别家公司的验证试验成果。

3.4 管件的验证试验可能是多次的

采用验证试验法确定管件的壁厚相对于数学分析法是先进的,但是应用验证试验合格的管件所取得的数据并不一定是优化的,由此而确定的管件壁厚也不一定是优化的。在笔者与国外管件公司的技术交流中就获悉,不同的管件公司同样是采用验证试验法,确定得出的管件壁厚却是不同的。所以管件的验证试验可能要进行多次,从中筛选出优化的数据和制造工艺,并将其作为今后确定管件壁厚的优化数据和制造工艺的规范。

4 结论

1) 管件设计计算的验证试验法优于数学分析法,因此对管件壁厚的确定应该采用验证试验法。这不仅适用于高压大口径管件,也适用于中低压和中小口径的管件。

2) 由于采用验证试验法确定的管件壁厚大大减薄,因此管件公司制造高压大口径管件在材料和制造工艺、装备上存在的技术难题就自然得到了消除,保证了管件的性能和质量,管件和管道工程的安全性也得到了保证。

3) 采用验证试验法确定管件壁厚的基础是验证试验,管件的验证试验有可能要进行多次,包括对管件制造工艺的优化。

4) 经过优化的合格的验证试验的管件结构型式、尺寸和制造工艺,应成为今后所适用的覆盖范围内的管件的结构型式、尺寸标准和制造工艺规范(MPS)。

参考文献:

- [1] 江海涛,康永林,于浩. 国内外高钢级管线钢的开发与应用[J]. 管道技术与设备,2005,(5):21-24.
Jiang Haitao, Kang Yonglin, Yu Hao. Development and Application of High Grade Pipeline Steel at Home and Abroad [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2005, (5): 21-24.
- [2] 王茂堂,马彦昌. 油气干线用钢管质量指标确定方法[J]. 油气储运,1997,16(10):6-9.
Wang Maotang, Ma Yanchang. Determination Method of Steel Quality Index in Oil & Gas Trunk Line [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1997, 16 (10): 6-9.
- [3] 李为卫,刘迎来,王长安. 西气东输管道弯管的国内外生产工艺对比[J]. 油气储运,2003,22(12):21-24.
Li Weiwei, Liu Yinglai, Wang Chang'an. The Comparison of West-East Pipeline Project Domestic and Foreign Induction Bends Production Status [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22 (12): 21-24.
- [4] 熊林玉,杜则裕,陶勇寅. X80 钢管的焊接[J]. 油气储运,2003,22(10):53-56.
Xiong Linyu, Du Zeyu, Tao Yongyin. The Welding of X80 Steel Pipe [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22 (10): 53-56.
- [5] 隋永莉,薛振奎,杜则裕. 西气东输二线管道工程的焊接技术特点[J]. 电焊机,2009,39(5):18-21.
Sui Yongli, Xue Zhenkui, Du Zeyu. Welding Technique Features on the West-East Pipeline Project II [J]. Electric Welding Machine, 2009, 39 (5): 18-21.
- [6] 潘家华,郭光臣,高锡祺. 油罐及管道强度设计[M]. 北京:石油工业出版社,1986.
Pan Jiahua, Guo Guangchen, Gao Xiqi. Design of Oil Tank and Pipeline Strength [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.
- [7] 李文光,蒋智翔. 锅炉受压元件强度标准分析[M]. 北京:技术标准出版社,1980.
Li Wenguang, Jiang Zhixiang. Analysis of Strength Criterium of Boiler Press Component [M]. Beijing: Technical Standard Press, 1980.
- [8] 范钦珊. 压力容器的应力分析与强度设计[M]. 北京:原子能出版社,1979.
Fan Qinshan. Stress Analysis and Strength Design of Pressure Vessel [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1979.
- [9] 陈偕中,蔡建英,梁佩蓉. 化工容器设计[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987.
Chen Xiezhong, Cai Jianying, Liang Peirong. Design of Pressure Vessels for the Chemical Industry [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987.
- [10] 张有渝,熊皓,黄敏. 采用验证试验法设计高压大口径管件[J]. 天然气与石油,2012,30(1):83-85.
Zhang Youyu, Xiong Hao, Huang Min. Application of Verification Test Method to Design High Pressure Fittings with Large Diameter [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (1): 83-85.
- [11] 美国阀门及配件工业制造商标准化协会. 优质钢制对焊管件技术规范:MSS SP-75-1998[S]. 弗吉尼亚:美国阀门及配件工业制造商标准化协会,1998.
Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fitting Industry, Inc. Specification for High-Test, Wrought, Butt-Welding Fittings: MSS SP-75-1998 [S]. Virginia: MSS, 1998.
- [12] 美国石油协会. 管线钢管规范:API Spec 5L-2000[S]. 42 版. 中国兵器工业企业管理协会,北京北方资讯服务中心,译. 北京:兵器工业出版社.
American Petroleum Institute. Specification for Line Pipe: API Spec 5L-2000 [S]. 42nd ed. China Ordnance Industry Corporate Management Association, North Information Center of Beijing, trans. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry.
- [13] 美国机械工程师学会. 工厂制造的锻轧制对焊管配件:ASME B 16.9-2001[S]. 韩肇俊,译. 北京:冶金工业出版社.
The American Society of Mechanical Engineers. Factory-Made Wrought Butt-Welding Fittings: ASME B 16.9-2001 [S]. Han Zhaojun, trans. Beijing: Metallurgical Industry Press.
- [14] 油气田及管道建设设计专业标准化技术委员会. 优质钢制对焊管件规范:SY/T 0609-2006[S]. 北京:石油工业出版社,2006.
Design Standardization Committee of Oil-Gasfield and Pipeline Construction. Specification for High Test Wrought Butt-Welding Fittings: SY/T 0609-2006 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [15] 石油工程建设专业标准化技术委员会. 钢制对焊管件规范:SY/T 0510-2010[S]. 北京:石油工业出版社,2010.
Standardization Committee of Petroleum Engineering Construction. Code for Steel Butt-Welding Fittings: SY/T 0510-2010 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [16] 美国阀门及配件工业制造商标准化协会. 优质钢制对焊管件规范:MSS SP 75-2008[S]. 弗吉尼亚:美国阀门及配件工业制造商标准化协会,2008.
Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fitting Industry, Inc. Specification for High-Test, Wrought, Butt-Welding Fittings: MSS SP 75-2008 [S]. Virginia: MSS, 2008.

(下转第 99 页)

- Practice for Operating, Maintenance and Repair of Vertical Cylindrical Welded Steel Oil Tank; SY/T 5921 - 2011 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [12] 石油工业安全专业标准化技术委员会秘书处. 常压和低压储罐检验的推荐做法: SY/T 6926 - 2012 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- The Oil Industry Safety Professional Standardization Technical Committee Secretariat. Methods for Inspection of Existing Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks; SY/T 6926 - 2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [13] 油气储运专业标准技术委员会. 油罐检验修理改建和翻建: SY/T 6620 - 2005 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- Oil and Gas Storage and Transportation Professional Standards Technical Committee. Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction; SY/T 6620 - 2005 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [14] 姜玉梅, 张俊义, 折恕平. 从安全环保角度审视油库的选址与设计问题[J]. 油气储运, 2010, 29(3): 229 - 231.
- Jiang Yumei, Zhang Junyi, Zhe Shuping. Survey on Location and Design Issues of Tankfarm from the Angle of Safety and Environmental Protection [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29 (3): 229 - 231.
- [15] 付石, 谢海林. 油库自动化系统应用现状[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 252 - 256.
- Fu Shi, Xie Hailin. Application Status of Automation System in Oil Tankfarm [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32 (3): 252 - 256.
- [16] 张静, 帅健. 储罐的完整性管理[J]. 油气储运, 2010, 29(1): 9 - 11.
- Zhang Jing, Shuai Jian. Integrity Management of Storage Tank [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29 (1): 9 - 11.
- [17] 李刚, 黄晓真, 李学军. 集油储罐腐蚀分析与防护措施[J]. 油气储运, 2009, 28(5): 59 - 61.
- Li Gang, Huang Xiaozhen, Li Xuejun. Analysis of Oil Gathering Tank's Corrosion and Corrosion Control Measures [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28 (5): 59 - 61.
- [18] 赵彦修, 闫河. 大型储罐检测标准对比分析[J]. 油气储运, 2010, 29(12): 929 - 932.
- Zhao Yanxiu, Yan He. Comparative Analysis on Inspection Standards for Large-scale Storage Tank [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29 (12): 929 - 932.
- [19] 林明春, 辛爱华, 高金杰, 等. 罐底声发射在线检测及其可靠性验证[J]. 油气储运, 2010, 29(10): 776 - 779.
- Lin Mingchun, Xin Aihua, Gao Jinjie, et al. Acoustic Emission In-service Inspection for Tank Bottom and Its Reliability Testing [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29 (10): 776 - 779.
- [20] 刘广文, 陈次昌. 立式储罐在线检测技术与研究进展[J]. 油气储运, 2009, 28(9): 1 - 4.
- Liu Guangwen, Chen Cichang. Study and Progress of On-line Inspection Technology for Vertical Storage Tank [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28 (9): 1 - 4.
- [21] 韩克江, 帅健, 石磊, 等. 大型原油储罐内检测周期的预测方法[J]. 油气储运, 2013, 32(2): 189 - 195.
- Han Kejiang, Shuai Jian, Shi Lei, et al. Prediction Method for Internal Detection Cycle of Large-scale Oil Tank [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32 (2): 189 - 195.
- [22] 帅健, 许学瑞, 韩克江. 原油储罐检修周期[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 157 - 163.
- Shuai Jian, Xu Xuerui, Han Kejiang. Overhaul Interval of Crude Oil Tanks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (1): 157 - 163.

(上接第94页)

- [17] 美国机械工程师学会. 工厂制造的锻钢对焊管配件: ASME B 16.9 - 2007 [S]. 北京: 北京北方资讯服务中心, 2007.
- The American Society of Mechanical Engineers. Factory-Made Wrought Butt-welding Fittings; ASME B 16.9 - 2007 [S]. Beijing: North Information Center of Beijing, 2007.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 输气管道工程设计规范: GB 50251 - 2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Gas Transmission Pipeline Engineering; GB 50251 - 2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [19] 美国材料与试验协会. 高强度低合金锻钢对焊管件技术规范: ASTM A860/A860 M - 00 [S]. 蒙哥马利: ASTM, 2000.
- American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Wrought High-Strength Low-Alloy Steel Butt-Welding Fittings; ASTM A860/A860 M - 00 [S]. Montgomery: ASTM, 2000.
- [20] 王海涛, 田伟, 李炎华. X80 大口径三通低温断裂韧性试验[J]. 油气储运, 2014, (3): 306 - 310.
- Wang Haitao, Tian Wei, Li Yanhua. Test of Low-Temperature Breaking Tenacity of X80 Heavy Caliber Tee Joint [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, (3): 306 - 310.