

航天发射场低温容器管道设计

王明富,王 立

(北京航天发射技术研究所,北京 100076)

摘要:低温容器管道受力复杂,同时也是容器结构薄弱部件。为确保航天发射场低温容器安全、可靠的运行,针对航天发射场低温容器使用特点,提出低温容器管道设计内容(包括结构要求,主要管道功能分析及验算,管道柔性计算及结果判定)。以DN50管道方案设计为例,运用分析软件对管道进行应力分析,从管道占用空间、管道应力值及管道对容器接管处的作用力三方面进行比较,提出增加管道柔性的措施。鉴于航天发射场低温容器管道设计的重要性和复杂性,建议采取措施,确保管道结构合理、可靠。

关键词:低温容器;管道;设计

中图分类号:V553;TB65

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2016)01-0047-06

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2016.01.011

DESIGN OF CRYOGENIC VESSELS PIPE FOR SPACE LAUNCH SITE

WANG Ming-fu, WANG Li

(Beijing Institute of Technology Space Launch, Beijing 100076, China)

Abstract: The forces of cryogenic vessels pipes are complicated. The pipes also are the weak parts of cryogenic vessel. In order to ensure the cryogenic vessels of space launching site operate safely and reliably, this paper presents the design contents (including the structural requirements, the main analysis and checking on pipeline function, the flexible pipeline computing and result determination) according to the using feature of the cryogenic vessels of space launching site. For an example of the design of a pipe with 50mm diameter, the pipe stress analysis was conducted by analysis software. It is proposed to increase the flexibility of the pipe according to the comparisons among the pipe occupation space, the pipe stress value and the force producing by the pipe to cryogenic vessel nozzles. Base on the importance and the complexity of the pipe design for the cryogenic vessels of space launching site, it is suggested to take measure to ensure the pipe structure reasonable and reliable.

Key words: cryogenic vessel; pipe; design

0 引言

随着国民经济的快速发展以及低温技术的普及,低温液体的应用日趋广泛,各行业对低温容器的需求日益增长^[1]。航天发射场低温推进剂加注系统通常配有低温容器,用来贮存液氮、液氧和液氢,由于这些介质的标准沸点低且气化潜热小,极易从环境中吸热而气化为气体。为了减少低温容器的漏热量,降低容器蒸发损失,从而有效贮存低温液体介质,航天发射场贮存液氮、液氧和液氢的容器通常采用夹套结构,在夹套内装填绝热材料并抽真空(真空粉末绝热;夹套真空度1~3 Pa;真空多层

绝热;夹套真空度 1×10^{-3} Pa)。

为了满足航天发射场低温推进剂加注工序要求,低温容器应具备贮存、自增压、按规定流量向外输送低温液体的基本功能,工作期间,还需对液面、压力进行检测和控制。

位于低温容器夹套内的管道,既承受压力载荷、内外容器间的温差载荷,同时还承受介质重力载荷,对于移动式低温容器,夹套内的管道还承受运动时的惯性载荷,管道受力复杂。夹套内的管道一旦失效发生泄漏,低温液体会进入夹套,导致夹套真空度丧失和绝热层隔热功能失效,低温容器漏

收稿日期:2015-10-27

作者简介:王明富(1971-),男,四川达州人,高级工程师,主要从事低温容器及低温工程研制。E-mail:scwmf929@sina.com。

热量将显著增加,容器不能正常工作。当大量低温液体进入夹套时,可能导致碳钢制作的外夹套产生低温脆断。文献[2]对卧式低温容器径向支撑结构温度场进行了研究,文献[3]对高压低温容器加工工艺关键技术进行了研究,其研究内容均未涉及低温容器管道,为此对航天发射场低温容器管道进行功能分析、结构优化是非常必要的。

1 管道设计

1.1 结构一般要求

低温容器管道结构需满足要求:管道漏热量小、结构可靠性高、布局紧凑,以减小夹套空间,从而减小容器外形尺寸和质量。

1.2 结构形式

低温容器管道结构如图1所示。

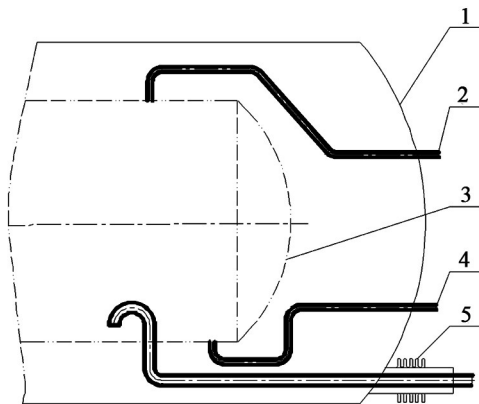


图1 低温容器管道结构

1. 外夹套;2. 气相管道;3. 内容器;4. 液相管;5. 波形膨胀节

(1)开口位于容器液相部位的管道,应设置密封,以阻止管道内的气体进入内容器,从而减小容器漏热量;

(2)为了提高管道的可靠性,夹套内的管道通常采用自然补偿,一般不在管道上设置波形膨胀节。必要时可在管道的外夹套管上设置波形膨胀节,以满足管道低温补偿需求;

(3)夹套中的管道尽量采用整管制作,如需焊接,所有焊接接头需进行无损检测。

1.3 主要管道功能、结构及验算

1.3.1 增压管及增压回气管

低温容器通常配有增压管道,如图2所示。低温液体通过增压管道进入增压器,在增压器(用空气加热或电加热)内被加热气化为低温气体,通过回气管进入容器气相空间,逐步提高低温容器气相空间压力。增压回路需满足低温容器在额定工作压力下的排量能力(供液量)以及由常压升至工

作压力所需最短时间,同时还需校核低温容器在最低液面时的升压能力。

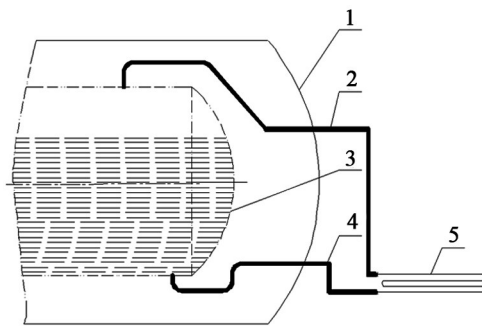


图2 低温容器增压管路

1. 外夹套;2. 增压加气管;3. 内容器;4. 增压管;5. 增压器

增压回路水力计算式(1)。

$$\Delta P \geq \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (1)$$

式中: ΔP 为循环动力,MPa; ΔP_1 为液体从容器至增压器入口间的流阻(包括局部阻力、摩擦阻力),MPa; ΔP_2 为增压器流阻,MPa; ΔP_3 为增压器出口至容器顶部气体流阻(包括局部阻力、摩擦阻力和气柱静压力),MPa;

$$\Delta P = \rho gh \quad (2)$$

式中: ΔP 为循环动力,MPa; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为液面高度,m。

1.3.2 差压液面计取压管

低温容器通常配有差压液面计,通过差压液面计指针来显示容器内的液面高度。压差液面计配有两根接管(气相取压管和液相取压管),气相取压管开口位于容器顶部气相空间,液相取压管开口位于容器底部,低温容器差压液面计及取样管如图3所示。

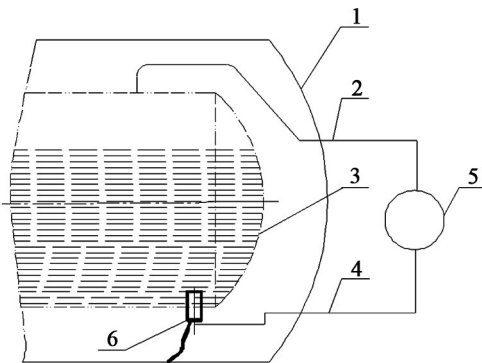


图3 低温容器差压液面计及取压管

1. 外夹套;2. 气相取压管;3. 内容器;4. 液相取压管;5. 差压计;6. 取压装置

由图3可看出,差压液面计以容器内低温液体液面升降时产生的液柱高度,等于容器气相空间和

底部液相间静压力之差为原理,通过测量静压力差的大小,来确定被测液体液面的高低^[4]。

容器内被测液体液面高度与差压液面计指示压差值的关系如式(3)。

$$h = \frac{\Delta P \rho_1}{\rho} \quad (3)$$

式中: h 为被测液体液面高度,mm; ΔP 为差压计指示压差值,mm; ρ 为被测液体密度, kg/m^3 ; ρ_1 为差压液面计用(mmwc)时水的密度, kg/m^3 。

从图3和式(3)可知,差压液面计指示压差值 ΔP 不仅与容器内低温液体液面高度有关,而且与气相取压管和液相取压管内介质密度和差压液面计安装高度有关。因气体密度远小于液体密度,气柱产生的静压力相比液柱静压力可忽略不计。因气相取压管开口位于容器顶部,可确保气相取压管内介质为气体。为确保液相取压管内介质为气体,通常在低温容器液相取压管与容器底部连接处安装一取压装置,该装置通过铜导线与外夹套连接,从夹套导入适量热量,将取压装置内的低温液体气化,以此来保证差压液面计读数的精准。

1.3.3 进、排液管

为确保低温容器投用前冷却充分,通常在立式容器上部进液管靠近内容器的一端安装喷头(在卧式容器上部进液管上开喷淋小孔)。通过上部进液管转注低温液体,可对低温容器气相空间的气体进行冷却,降低气相空间压力,减小气体排放量。

根据容器排液量以及合理的液体流速确定排液管直径。立式容器排液管开口通常位于容器底部,对于大口径排液管,在管道入口处设置防涡架;卧式容器以及贮存极度危害和高度危害介质的低温容器,排液管通常从容器顶部引出,并通过插底管延伸到内容器底部。

1.4 管道柔性计算及结果判定

1.4.1 管道柔性计算

低温容器管道工作时温度与制作时温度相差较大(贮存液氮、液氧的容器,温差约220℃;贮存液氢的容器,温差高达270℃),因管道固定端的约束,限制了管道的自由伸缩,从而产生热应力,如果应力超过了材料的抗拉强度,管道就有断裂的危险。因此,要求夹套内的管道必须具有较强补偿能力,以满足内容器和管道本身冷缩要求,为了确保管道的补偿能力和可靠性,需对管道进行柔性计算。

夹套中的管道通常利用弯头和管臂几何形状具有弹性来吸收热位移,减少热应力。对于确定的关系,可根据式(4)判断管道是否具备自补偿能力^[4]。

$$\frac{DY}{(L-U)^2} \leq 2.08 \quad (4)$$

式中: D 为管子直径,cm; L 为管道展开长度,m; U 为固定端之间的直线距离,m; Y 为管道热位移和端点位移的总和,cm,由式(5)、(6)和(7)计算。

$$Y = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (5)$$

$$\Delta x = \alpha \Delta t \cdot L_x \quad (6)$$

$$\Delta y = \alpha \Delta t \cdot L_y \quad (7)$$

式中: Δx 为 x 方向的热度位移,cm; Δy 为 y 方向的热度位移,cm; α 为材料的线膨胀系数, $\text{cm}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; Δt 为温差, $^\circ\text{C}$; L_x 为 x 方向管道总长,m; L_y 为 y 方向管道总长,m。

式(4)适用范围为管子直径相同、固定点不超过两个且不存在中间约束的情况,当低温容器夹套管道满足式(4)使用条件时,可按其进行柔性判断。

式(4)是经验公式,其适用范围有限,只能简单的判断管道是否具备补偿能力,不能计算管道各点的应力、位移值,也不能计算管道对容器固定处的推力和弯矩。当容器存在压力、温度交变载荷工况时,不能对管道的疲劳寿命进行评估。为此,设计人员通常应用分析软件对管道结构进行柔性分析,并提供容器管口、管道支架的推力和弯矩。

1.4.2 计算结果判定

依据许用应力判定公式对计算结果进行分析。管道系统中任何一处由位移引起的应力应不超过式(8)规定的应力范围。

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad (8)$$

式中: S_A 为许用应力范围,MPa; f 为许用应力范围折减系数,如表1所列; S_c 为循环载荷作用下管道元件或管子材料在最低工作温度下的许用应力,MPa; S_h 为循环载荷作用下管道元件或管子材料在最高工作温度下的许用应力,MPa。

表1 许用应力折减系数 f

当量循环次数 N	折减系数 f
$N \leq 7\,000$	1.00
$7000 < N \leq 14\,000$	0.90
$14000 < N \leq 22\,000$	0.80
$22000 < N \leq 45\,000$	0.70
$45000 < N \leq 100\,000$	0.60
$100000 < N \leq 200\,000$	0.50
$200000 < N \leq 700\,000$	0.40
$700000 < N \leq 2\,000\,000$	0.30
$N > 2\,000\,000$	0.15

当考虑永久载荷(压力、重力)作用于管道系统,计算得到的管道元件的轴向应力 S_L 小于材料在最高工作温度下的许用应力 S_h 时,则许用应力范围可按式(9)进行计算:

$$S_A=[1.25(S_c+S_h)-S_L]$$
 (9)

2 管道设计

文章以 CAESAR II 管道应力分析软件为工具,通过某低温容器 DN50 管道方案比较,提出增加管道柔性的方法。

2.1 DN50 管道情况

管道用 GB/T1497606Cr19Ni10 无缝管制造,外径 57 mm,公称壁厚 3.5 mm,腐蚀裕量 0 mm,弯头选用 GB/T12459 DN50 短半径弯头,壁厚与管道相同。管道采用真空多层绝热保冷,厚度 10 mm。流体介质为液氮(密度:810 kg/m³)。管道预计的当量循环次数低于 7 000。用于管道分析的弹性模量取 2.09×10⁵ MPa,泊松比为 0.3^[5]。

该管道在正常操作期间预计的内压、最高和最低金属温度及设计条件如表 2 所列。该设计条件根据实际操作条件并留一定余量而确定。

表 2 温度/压力组合

条 件	压力/MPa	温度/℃
设计条件	1.6	-196
正常操作(P、T)	1.4	-196
最高金属温度操作(P ₁ 、T ₁)	0.2	100
设备温度	0	20

2.2 DN50 管道方案

2.2.1 DN50 管道方案 1

管道结构及分析模型 1 如图 4 所示,分析模型相关参数如表 3 所列。管道为平面结构,由 3 段直管和 2 个弯头构成。管道一端同内容器封头相连接,另一端同外套管连接。管道在温度载荷和端点位移工况下计算结果如表 4 所列。

表 3 管道模型参数

起点	终点	Δx/mm	Δy/mm	要素类型
10	20	150	-	10-附加位移:dx=-2.1 mm
20	30	-	1 000	20、30-三个节点弯头
30	40	290	-	40-锚固点

由表 4 可知,节点 40 处弯曲应力高达 590.76 MPa,远高于文献[6]许用应力值 205 MPa,管道柔性不合

格,需对管道结构重新设计。

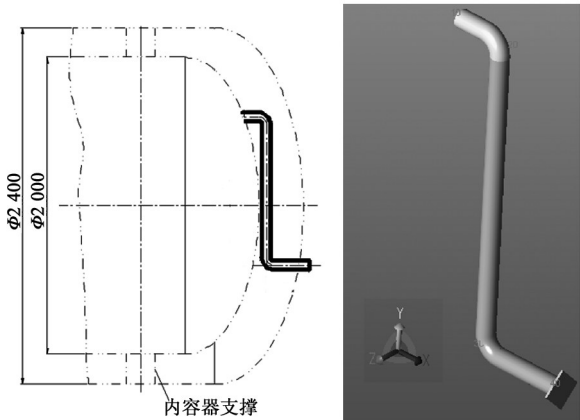


图 4 DN50 管道结构及模型 1

表 4 管道关键节点在温度和端点位移工况下的应力

节 点	弯曲应力 / MPa	扭转应力 / MPa	平面内应力增强系数	平面外应力增强系数	当量应力 / MPa
10	275.69	0.0	1.000	1.000	275.69
18	64.51	0.0	2.094	1.745	64.51
19	147.49	0.0	2.094	1.745	147.49
20	102.62	0.0	1.000	1.000	102.62
28	327.07	0.0	2.094	1.745	327.07
29	259.68	0.0	2.094	1.745	259.68
30	22.76	0.0	1.000	1.000	22.76
40	590.76	-0.0	1.000	1.000	590.76

2.2.2 DN50 管道方案 2

管道结构及分析模型 2 如图 5 所示,分析模型参数如表 5 所列。管道为空间结构,由 5 段直管和 4 个弯头构成。管道两端连接情况同方案 1。管道在温度载荷和端点位移工况下的计算结果如表 6 所列。

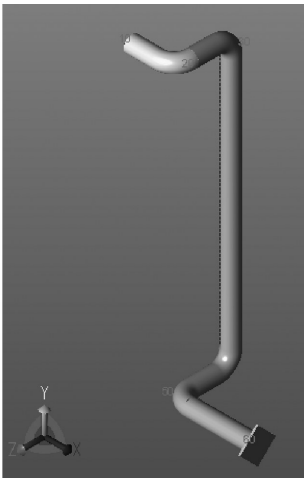


图 5 DN50 管道结构及模型 2

表5 要素连接、类型和长度

起点	终点	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	要素类型
10	20	150	—	—	10-附加位移: $dx=-2.1\text{mm}$
20	30	—	—	-300	
30	40	—	-1 000	—	
40	50	—	—	300	20、30、40、50- 三个节点弯头
50	60	290	—	—	60-锚固点

由表6可知,节点38处应力最值最高为94.65 MPa,满足文献[6]允许应力范围,管道柔性格。

管道各点在压力、重力、温度和端点位移工况下的应力如表7所列。节点38处应力最值最高为102.86 MPa,满足文献[6]允许应力范围,管道柔性合格。

表6 管道关键节点在温度和端点位移工况下的应力

节点	弯曲 应力/ MPa	扭转 应力/ MPa	平面内 应力增 强系数	平面外 应力增 强系数	当量 应力/ MPa
10	20.31	33.38	1.000	1.000	69.78
19	47.68	30.53	2.094	1.745	77.48
28	26.40	15.16	2.094	1.745	40.21
29	56.39	13.70	2.094	1.745	62.70
38	94.06	5.27	2.094	1.745	94.65
39	73.62	14.73	2.094	1.745	79.30
40	20.91	16.61	1.000	1.000	39.26
48	70.45	16.61	2.094	1.745	77.89
50	16.96	29.11	1.000	1.000	60.65
60	60.12	-29.11	1.000	1.000	83.70

表7 管道各点在压力、重力、温度和端点位移工况下的应力

节点	弯曲 应力/ MPa	扭转 应力/ MPa	平面内 应力增 强系数	平面外 应力增 强系数	当量 应力/ MPa
10	21.10	33.94	1.000	1.000	77.24
19	48.75	30.91	2.094	1.745	84.58
28	27.26	15.25	2.094	1.745	46.16
29	57.72	13.77	2.094	1.745	72.14
38	92.91	5.27	2.094	1.745	102.86
39	72.48	14.64	2.094	1.745	86.41
40	20.51	16.49	1.000	1.000	44.28
48	69.85	16.49	2.094	1.745	82.68
50	17.04	-28.79	1.000	1.000	66.20
60	58.55	-28.79	1.000	1.000	88.27

管道在压力、重力、温度和端点位移工况下对锚固点作用力如表8所列。根据表计算,可为容器接管设计提供外力和外力矩载荷。

表8 管道在压力、重力、温度和端点位移工况下对锚固点作用力

节点	FX N	FY N	FZ N	MX N.m	MY N.m	MZ N.m	备 注
10	471	-2 444	53	-504	-71	-140	附加位移
60	-471	2 323	-53	427	48	-432	锚固点

2.2.3 DN50 管道方案3

管道结构及分析模型如图6所示,分析模型相关参数如表9所列。管道为平面结构,由5段直管和4个弯头构成。管道一端位于内容器固定支撑处的直筒上,另一端与外套管相连接。

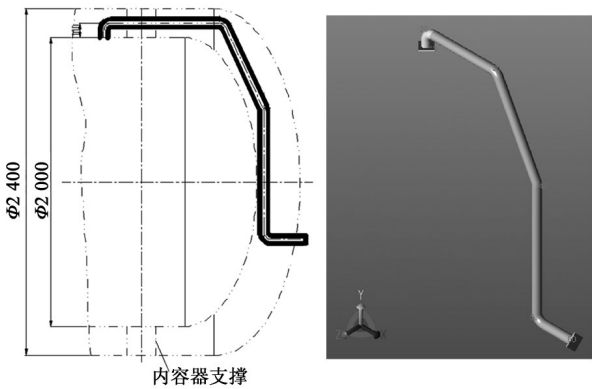


图6 DN50管道结构三

表9 要素连接、类型和长度

起点	终点	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	要素类型
10	20	—	100	10-端点位移:
20	30	800	—	$dx=0.78\text{ mm}$
30	40	310	-588	20、30、40、50-
40	50	—	-912	三个节点弯头
50	60	290	—	60-锚固点

经分析:在温度载荷和端点位移工况下,最高应力点位于节点18,应力值为117.5 MPa;在压力、重力、温度和端点位移工况下,最高应力点位于节点18,应力值为120.6 MPa,该工况下对容器接管处的推力和弯矩如表10所列。

2.2.4 DN50 管道方案比较

DN50 管道方案比较如表11所列。

2.3 增加管道柔性方法

通过 DN50 管道方案结果比较可知,增加管道

柔性的方法有三种:(1)当管道具有附加位移时,管道冷缩方向尽量与附加位移方向一致;(2)当夹套空间允许时,管道尽量设计为空间结构;(3)在外夹套管上设置波形膨胀节,设置波形膨胀节后,柔性计算时应考虑波形膨胀节自身的刚度。

表 10 DN50 管道对容器接管处的作用力

节点	FX N	FY N	FZ N	MX N.m	MY N.m	MZ N.m	备注
10	604	-951	0	-0	0	-440	附加位移
60	-604	783	-0	0	0	47	锚固点

表 11 DN50 管道方案特点

项 目	管道结构特点	优 点	缺 点
DN50 管道方案 1	平面布管	1. 管道长度短; 2. 占用夹套空间小。	1. 管道刚度大、柔性不足,应力值远大于规范值,该方案不可行; 2. 管道冷缩方向与附加位移方向相反。
DN50 管道方案 2	空间布管	1. 弯头数量多,自补偿能力强,管道应力小,管道柔性好。	1. 管道冷缩方向与附加位移方向相反; 2. 管道对容器接管处作用力比方案 3 大。
DN50 管道方案 3	平面布管	1. 管道对容器接管处作用力比方案 2 小; 2. 管道冷缩方向与附加位移方向一致。	1. 占用夹套空间比方案 2 大; 2. 弯头数量多,自补偿能力较强,管道柔性的比方案 2 差。

3 结束语

航天发射场低温加注系统间歇使用的特点决定了发射场低温容器管道存在温度/压力变载荷工况,管道除进行压力、温度和重力载荷引起的柔性分析外,还需考虑管道的疲劳寿命。对于移动式低温压力容器(如液氢运输车),还应校核管道的固有频率(通常不小于 30 Hz)^[7],以免管道产生疲劳破坏。低温容器管道设计涉及流体、结构、传热、真空、机械加工及无损检测等专业知识。目前我国航天发射场低温加注系统配套的液氢容器容积已达 300 m³,液氧固定容器容积已达 330 m³,随着航天发射场低温加注系统规模的不断发展,对大型低温容器的需求日益迫切,经论证未来发射场低温容器容积高达 3 000 m³。随着航天发射场低温容器规模的不断增大,管道规格也日益增大,这些因素都增加了低温容器管道设计的难度。为此,在进行发射场大型低温容器设计时,需采取切实有效的措施对管道结构进行优化,确保结构合理、可行,为航天发射场低温

容器安全、可靠运行提供保障。

参考文献:

[1] 毕龙生. 低温容器应用及发展前景(一)[J]. 真空与低温, 1999, 5(3): 125-134.

[2] 王正兴. 特种卧式低温容器径向支撑结构温度场的有限元分析[J]. 低温工程, 2008, 163(3): 42-44.

[3] 徐烈, 郑传永. 高压低温容器研制中的几个技术问题[J]. 制冷技术, 1991(1): 26-28.

[4] 化学工业部第四设计院. 深冷手册[M]. 化学工业出版社, 1979.

[5] 中华人民共和国国家标准. GB/T20801.2-2006. 压力管道规范 工业管道第 2 部分 材料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[6] 美国国家标准. ASME B31.3-2004. 工艺管道 [S]. 北京: 中国石化出版社, 2006.

[7] 中华人民共和国行业标准. JB/T4783-2007. 低温液体汽车罐车[S]. 北京: 新华出版, 2007.