

大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的新进展

王冰^{1,2} 陈学东^{1,2} 王国平³

1.合肥通用机械研究院 2.国家压力容器与管道安全工程技术研究中心 3.合肥工业大学

王冰等.大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的新进展.天然气工业,2010,30(5):108-112.

摘要 天然气低温常压(或低压)储存方式因其具有储存效率高、占地少、储存规模易于大型化等优点在液化天然气(LNG)接收终端站、天然气液化厂和城市燃气调峰系统中得到了越来越广泛的应用。为此,对国内外大型低温 LNG 储罐建造状况进行了调研,分析了大型低温 LNG 储罐建造技术的发展趋势,同时介绍了我国在大型低温 LNG 储罐材料研发、绝热分析、结构设计和施工工艺等方面的技术进展。结论指出:国产 06Ni9 钢研制及其配套应用技术研究已取得突破,并在大型 LNG 项目建设中投入使用,是我国大型低温 LNG 储罐国产化工作迈出的标志性一步。

关键词 LNG 大型储罐 设计 建造 进展 国产化

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.05.028

天然气低温常压(或低压)储存方式因其储存效率高、占地节约、储存规模易于大型化等优点在液化天然气(LNG)接收终端站、天然气液化厂和城市燃气调峰系统中得到了越来越广泛的应用。

1 国内外概况

LNG 技术发展史可以追溯到 20 世纪初期。1914 年,美国公布首项 LNG 专利,并建成小型天然气液化工厂。1939 年,Hope 天然气公司在西弗吉利亚建立了一个处理量为 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 的天然气液化工厂,用以研究 LNG 远地运输技术。1940 年,俄亥俄天然气公司在克利夫兰建立了处理量为 $1.13 \times 10^5\ \text{m}^3/\text{d}$ 天然气工厂,制成 3 台直径为 17.37 m 的 LNG 球形储罐。1954 年出现了第一台用于液氧的不锈钢双壁绝热平底低温储槽。1958 年美国芝加哥桥梁钢铁公司在路易安那建造了第一座工业规模的 LNG 储罐,容积为 $5\ 550\ \text{m}^3$ 。从 20 世纪 50~80 年代,双壁绝热平底 LNG 储罐容积不断扩大:60 年代为 $(1\sim 3) \times 10^4\ \text{m}^3$,70 年代为 $(5\sim 10) \times 10^4\ \text{m}^3$,80 年代已超过 $20 \times 10^4\ \text{m}^3$ [1-2]。

日本是世界上建造大型 LNG 储罐最多的国家。据 2008 年的统计数据,日本拥有 27 座大型 LNG 接收终端站,LNG 进口量占全球的 40%,居世界首位 [3]。每个 LNG 接收终端站都建有数量不等的 LNG 储罐,

其中双壁绝热平底 LNG 地面储罐最大容积已达 $20 \times 10^4\ \text{m}^3$ [4]。另据报道,日本正计划在横滨 LNG 厂建造 $25 \times 10^4\ \text{m}^3$ 双壁绝热平底 LNG 地面储罐。

我国最早建造大型液化气体储罐始于 20 世纪 90 年代中期,广东深圳 2 台 $8 \times 10^4\ \text{m}^3$ 液化石油气(LPG)低温储罐和扬子石化 $1 \times 10^4\ \text{m}^3$ 低温乙烯储罐即为其中的代表 [5-6]。20 世纪 90 年代末,上海建造了我国第一台 $2 \times 10^4\ \text{m}^3$ 低温 LNG 储罐 [7]。2002~2005 年合肥通用机械研究院等单位承担原国家经贸委国家“十五”重大技术装备研制项目专题“ $2 \times 10^4\ \text{m}^3$ 液化天然气储罐研制”等课题,着重对 9% Ni 钢焊接、无损检测和低温绝热材料及结构、LNG 储存安全等进行了研究。

进入 21 世纪以来,中国海洋石油总公司(下称中海油)、中国石油天然气集团公司(下称中石油)、中国石油化工集团公司(下称中石化)三大集团分别在广东、福建、浙江、上海、辽宁、江苏、山东等沿海省份建立或筹划建立大型 LNG 接收终端站,其中广东、福建项目已建成投产,江苏、辽宁项目正在建设中,山东项目尚在前期规划中。上述大型 LNG 接收终端站中大型低温 LNG 储罐建造情况见表 1。

除上述 LNG 接收终端站外,在天然气液化领域,新疆广汇集团、中原油田、陕北气田等小型天然气液化

表1 我国 LNG 接收终端站大型低温 LNG 储罐建造情况统计表

建设单位	建设地	储罐数量/ 台	储罐规格/ 10 ⁴ m ³	备注
中海油	广东深圳	4	16	3台建成,1台在建
	福建莆田	4	16	2台建成,2台在建
	浙江宁波	4	16	2台在建,2台拟建
	上海	3	16	已建成
中石油	辽宁大连	2	16	在建
	江苏南通	3	16	在建
中石化	山东青岛	2	16	拟建

厂建设也陆续展开,其中新疆广汇集团建造了1台 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的低温 LNG 储罐;在城市燃气调峰领域,上海于2008年又建造了2台 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的低温 LNG 储罐。

此外,20世纪初以来,国内已建造多台(1~2)× 10^4 m^3 的低温乙烯储罐。目前上海绿碱化工股份有限公司正计划建造 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的低温乙烯储罐。

2 LNG 储罐设计建造规范与标准

2.1 国外情况

在大型低温 LNG 储罐设计与建造方面,美国、英国(欧盟)、日本等工业发达国家都分别制定了专门的规范或标准。

2.1.1 美国

《API STD 620 大型焊接低压储罐设计与建造》;《NFPA 59A 液化天然气(LNG)生产、储存和装运标准》;《API STD 650 钢质焊接石油储罐》。

2.1.2 英国

《BS 7777-1 低温用平底、立式、圆柱形储罐—罐储的设计、制造、安装和操作的一般规定指南》;《BS 7777-2 低温设备用平底、立式、圆柱形储罐—储存最低温度达 -165°C 液化气体的单层、双层和全密封金属罐的设计和制造规范》;《BS 7777-3 低温用平底、立式、圆柱形储—预应力钢筋混凝土罐基础的设计和制造及罐内衬和罐涂层的设计和安装推荐方法》;《BS 7777-4 低温用平底、立式、圆柱形储罐—储存液态氧、液态氮和液态氩的单层密封罐的设计和制造规范》。

2.1.3 欧盟

20世纪初欧盟等效采用 BS 7777 标准发布了欧盟的大型低温 LNG 储罐标准:《BS EN 14620-1 操作温度在 0°C 到 -165°C 之间的现场组装立式圆筒平底钢质低温液化气体储罐的设计与建造—总则》;《BS EN 14620-2 操作温度在 0°C 到 -165°C 之间的现场组装立式圆筒平底钢质低温液化气体储罐的设计与建造—金属构件》;《BS EN 14620-3 操作温度在 0°C 到

-165°C 之间的现场组装立式圆筒平底钢质低温液化气体储罐的设计与建造—混凝土构件》;《BS EN 14620-4 操作温度在 0°C 到 -165°C 之间的现场组装立式圆筒平底钢质低温液化气体储罐的设计与建造—隔热构件》;《BS EN 14620-5 操作温度在 0°C 到 -165°C 之间的现场组装立式圆筒平底钢质低温液化气体储罐的设计与建造—试验、干燥、除扫和冷却》。

2.1.4 日本

日本燃气协会(JGA)制定了如下专门 LNG 储罐及设备设计与建造规范:《JGA 指-107-02 液化天然气(LNG)地下储罐指南》;《JGA 指-108-02 液化天然气(LNG)地上储罐指南》;《JGA 指-102-03 液化天然气(LNG)接收站设备指南》;《JGA 指-105-03 液化天然气(LNG)小型接收站设备指南》。

2.2 国内情况

我国至今尚未颁布专门的大型低温 LNG 储罐设计与建造规范。近年来,全国天然气标准化技术委员会正积极组织力量研究和制订我国液化天然气行业标准体系,并着手按等效采用英国 BS 7777 的方式制订我国的大型低温 LNG 储罐设计、建造规范(GB/T),现已公布了征求意见稿。此外,国内在 LNG 储存、运输与小型低温绝热液化气体储罐、现场储罐施工方面颁布了如下几个相关标准:《GB/T 20368 液化天然气(LNG)生产、储存和装运(等效采用美国 NFPA 59A)》;《SY/T 0608 大型焊接低压储罐的设计与建设(等效采用美国 API STD 620)》;《SY/T 6711 液化天然气接收站安全技术规程》;《GB 18442 低温绝热压力容器》;《JB/T 9072 固定式真空粉末绝热低温液体贮槽》;《JB/T 5905 真空多层绝热低温液体容器》;《SH/T 3537 立体式圆筒形低温储罐施工技术规程》。

3 内罐用低温材料

目前,低温 LNG 储罐主要采用双壁绝热立式圆筒平底结构,按其容积通常如表2所示划分类别。

表2 低温 LNG 储罐按容积划分的类别

储罐规格/ m^3	类别
<200	小型
200~5 000	中型
5 000~10 000	大型
10 000~50 000	较大型
>50 000	特大型

注:大型低温 LNG 储罐一般是指容积在 $5 000 \text{ m}^3$ 以上的储罐。

大型低温 LNG 储罐内罐用低温材料选用是其设计与建造的技术关键之一^[1]。现在低温 LNG 储罐内罐材料最常用的是 9% Ni 钢和不锈钢,前者因其强度高、低温韧性好广泛应用于大型低温 LNG 储罐,后者主要用于 5 000 m³ 以下的中、小型低温 LNG 储罐。

长期以来,9% Ni 钢及其焊接材料一直依赖进口,这也是困扰我国大型 LNG 工程建设的一个难题。2005~2007 年,太原钢铁集团公司承担科技部 863 项目“液化天然气储罐用超低温 9% Ni 钢开发及应用技术”研究工作,研制成功国产 9% Ni 钢 06Ni9,随后合肥通用机械研究院等单位对 06Ni9 钢的综合材料性能与焊接性能进行了广泛而深入的技术研究^[8-11]。结果表明,国产 9% Ni 钢 06Ni9 包括 -196 °C 冲击功在内的综合性能指标超过了美国标准 ASTM A553/A553M(I 型)和欧盟标准 EN 10028 的要求,与日本、欧洲按上述美欧标准生产的 9% Ni 钢水平相当或略高。2007 年该钢通过了全国锅炉压力容器标准化技术委员会组织的专家评审,同意用于低温储罐和低温压力容器。中石油在建的江苏南通、辽宁大连两个 LNG 项目中的 16×10⁴ m³ LNG 储罐,内罐低温材料已选用国产 06Ni9 钢,这是我国大型低温 LNG 储罐国产化的一个重要里程碑。

4 低温绝热材料及结构

大型低温 LNG 储罐绝热保温结构分罐顶保温、侧壁保温和罐底保温 3 部分(图 1)。用于低温储罐

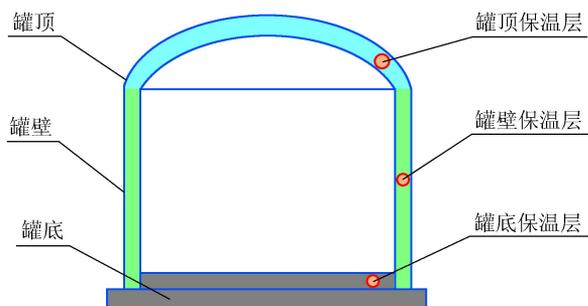


图 1 双壁绝热 LNG 储罐保温结构示意图

的保温绝热材料应满足导热系数小、密度低、吸湿率与吸水率小、抗冻性强、耐火性好、有一定强度,且环保、耐用和便于施工等要求。大型低温 LNG 储罐绝热材料大致分为气孔型、纤维型和气泡型 3 类(表 3)^[12]。

20 世纪 90 年代末,中国绝热隔音材料协会组织专家综合研究了国内各类绝热材料性能及其施工要

表 3 常用绝热材料分类表

分类	名称	形状
气孔型(无机物)	膨胀珍珠岩	粉、粒状
纤维型(无机物)	玻璃纤维 石棉毡	板、筒、带、棉毡 板、筒、带、棉毡
气泡型(无机物)	泡沫玻璃	板、筒、有机物
气泡型(有机物)	聚氯乙烯泡沫	板、筒
	聚苯乙烯泡沫	板、筒
	酚醛泡沫	板、筒
	硬质聚氨酯泡沫	板、筒、现场发泡材料

求,编制完成《绝热材料与绝热工程实用手册》^[13],21 世纪初,上海交通大学等多家从事低温研究的单位编辑出版了《国产材料低温性能数据汇编》一书,将国内数十年从事低温物性研究工作的具体成果反映出来^[14]。国产低温绝热材料在大型低温 LNG 储罐建造中应用已取得成熟经验。近年来,国内又成功开发多种新型高效的深冷绝热材料,进一步确立了大型低温 LNG 储罐低温绝热材料的国产化地位^[12]。

罐顶现多采用外罐拱顶加内罐铝吊顶结构(图 2),其绝热结构与施工相对简单。储罐侧壁保冷结构如图 3 所示。20 世纪 80 年代以前,大多为单一的松散珍珠岩,其缺点是设备降温后,内壁收缩使得罐侧壁的上部及顶的边缘区域缺少珍珠岩,所需二次填充量很大,填充时间也较长,致使内外罐间进入大量的空气,并使得许多水分在两罐之间的空气内冷凝下来,加剧了设备的腐蚀。另外,珍珠岩受潮,导热系数将变大,使操作期间冷藏液的蒸发量增加,加大了制冷机的负荷,增加了操作成本。20 世纪 80 年代后期建设的双层低温罐多数都在内罐的外壁增加一层弹性保温毡,这层毡在松散珍珠岩侧压力的作用下被压缩,当内罐降温时,弹性毡回弹,以此来补偿罐的收缩量,大大减少了二次填充量,即避免了二次填充。填充物——弹性毡是由玻璃棉制成的,其回弹量等于罐的收缩量,可以很容易计算出来。对于罐底绝热保温结构设计,不但要保证储罐的冷损失率降至最小,而且保温材料还要具有足够的抗压强度来支撑储罐和介质重量。根据罐底受力情况和最大限度降低冷损失率,建议将底

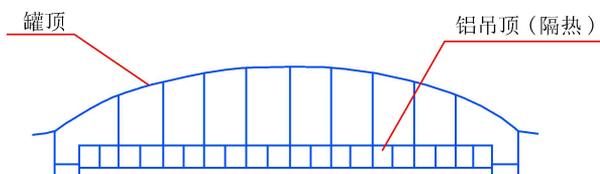


图 2 双壁金属储罐罐顶保温结构示意图

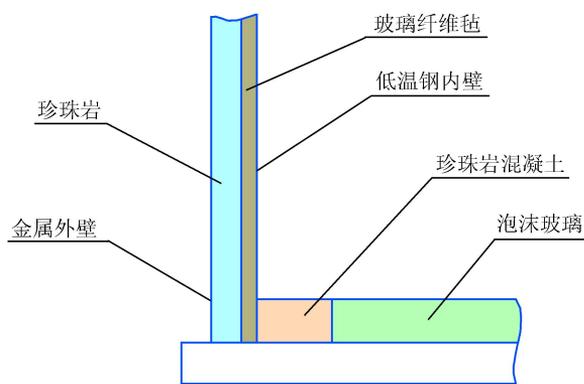


图 3 双壁金属储罐侧壁保温和罐底保温结构示意图

部绝热保温结构分成周边圈梁和中心圆形隔热区两部分,参见图 3^[15]。

多年来,国内研究者^[16-19]对大型低温液化气体储罐绝热结构的绝热分析与计算工程方法进行了大量研究,为大型低温 LNG 储罐绝热结构设计奠定了基础。

5 LNG 储罐制造与施工工艺技术

5.1 06Ni9 钢应用研究

为了推进国产 9% Ni 钢 06Ni9 在大型低温 LNG 储罐上的应用,合肥通用机械研究院等单位对 06Ni9 钢从成形加工、焊接、无损检测和热处理等方面进行了研究,本文着重介绍焊接试验研究方面的工作^[11]。

5.1.1 试验方法

采用 GLEEBLE 1500 热模拟试验机分别模拟单道焊和多道焊的焊接热循环,研究不同热循环条件下的 06Ni9 钢焊接热影响区(HAZ)性能和组织状况,并进行了实物焊接试板试验。

5.1.2 试验内容及结果

1)首先对试验用材料进行化学成分分析和力学性能试验,结果表明国产 06Ni9 钢各项指标均明显高于欧盟标准 EN 10028 要求。

2)对单道焊和多道焊模热循环试样分别进行低温冲击试验、显微组织分析和冲击断口分析等试验研究。冲击试验结果分别见表 4、5。

表 4 单道焊热模拟试样的低温冲击功试验结果表

冷却时间($t_{8/5}$)/s	冲击功($A_{KV(-196\text{ }^\circ\text{C})}$)/J
8	127
17	113
29	82

表 5 多道焊热模拟试样的低温冲击功试验结果表

峰值温度(T_p)/ $^\circ\text{C}$	冲击功($A_{KV(-196\text{ }^\circ\text{C})}$)/J
1 350+1 150	93
1 350+900	122
1 350+620	71
1 350+1 150+900	133
1 350+1 150+620	97
1 350+1 150+900+620	144

结果表明,经模拟焊接热循环后其低温冲击功与母材相比均明显降低,且随着热输入的增加即 $t_{8/5}$ 时间的增加,热模拟试样的低温韧性呈明显下降趋势。两道焊第二道热循环的峰值温度为 900 $^\circ\text{C}$ 时,低温冲击功最高;第二道峰值温度为 620 $^\circ\text{C}$ 时,低温冲击功最低;多次热循环冲击韧性比相应的一次、二次热循环冲击韧性显著提高。

3)对 20 mm 厚的 06Ni9 钢焊接试板的焊接接头进行了低温冲击试验,结果表明焊接试板焊接接头热影响区(HAZ)—196 $^\circ\text{C}$ 冲击功比相应的相同温度热过程的热模拟试样高。

5.1.3 试验研究结论

1)国产 06Ni9 钢单道焊(峰值温度 1 350 $^\circ\text{C}$),随着热输入增加即 $t_{8/5}$ 时间的增加,冲击韧性呈下降趋势。

2)两道焊(第一道峰值温度为 1 350 $^\circ\text{C}$)当第二道峰值温度为 900 $^\circ\text{C}$ 时冲击韧性最高,第二道峰值温度为 600 $^\circ\text{C}$ 时冲击韧性最差。

3)多道焊相应峰值温度模拟试样的低温韧性显著提高。故 9Ni 钢的焊接宜采用小热输入、多层多道焊接。

4)上述焊接试验结果表明,国产 06Ni9 钢采用适当的热输入、温度和多层多道焊接工艺,能获得良好的低温韧性,可满足 LNG 低温储罐对低温性能的要求。

5.2 施工工艺技术

国内已经和正在建造的低温 LNG 储罐,不管其工艺及设备技术来自何方,但储罐建造施工无一例外地都由国内施工队伍完成。因此,国内较早承担大型低温 LNG 储罐建造施工的企业,已积累了丰富的经验,并在基础及罐壁混凝土施工、内外罐组装焊接施工和绝热结构施工等方面对国外技术进行了改进。

5.2.1 混凝土施工

邸国清结合福建 LNG 项目 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 混凝土外罐现场施工案例^[20],分别从混凝土承台、墙体、罐穹顶以及预应力施工等方面进行了分析与总结,提出了大型低温 LNG 储罐混凝土外罐施工中的控制要点。束廉阶等结合上海 LNG 事故备用站 2 台 5×10^4

m³ LNG 储罐的预应力设计及施工实践^[21],对预留孔道施工、预应力筋穿束、张拉顺序、张拉方式、孔道灌浆等环节都进行了分析与探讨,为今后同类储罐施工留下了宝贵的经验。

5.2.2 内外罐组装焊接施工

对双金属罐内外罐的组装焊接施工,国内的工程设计和施工企业参考过去大型石油储罐的施工经验,结合双层罐结构与施工要求的特点,提出了一系列具体实用的施工工艺方法,如内罐底板的环板与中心底板的排板优化^[22]、双金属罐正装法与倒装法的经济性 & 工期与质量保证情况对比^[23]和罐顶气吹顶升工艺措施^[24]等。这些工作促进了我国大型低温 LNG 储罐双金属罐内外罐的组装焊接施工工艺技术的进步。

5.2.3 绝热结构施工

上海市安装工程有限公司等单位结合多年大型低温 LNG 施工实践,对膨胀珍珠岩充填技术进行了总结,从材料要求、工艺流程、施工准备、施工专用设备和施工作业等方面提出了具体措施和应注意的问题,并通过施工实践验证,取得了良好的效果^[25]。

6 结论

1)国产 06Ni9 钢研制及其配套应用技术研究已取得突破,并在 LNG 项目建设中投入使用,使我国大型低温 LNG 储罐国产化进程迈出了标志性的一步。

2)我国工程设计与施工企业的大型低温 LNG 储罐设计建造实践和有关高校、科研机构及企业在 LNG 相关的设计规范与标准、绝热材料及结构、施工工艺技术等方面所取得的积极进展,为我国大型低温 LNG 储罐国产化打下了一定的基础。

3)根据目前国内大型低温 LNG 储罐设计、建造技术现状,我国 3×10⁴ m³ 以下的 LNG 储罐实现自主设计、建造的条件已基本成熟。

4)我国在大型低温 LNG 储罐标准化以及设计与建造专利技术方面与美国、欧盟、日本等工业发达国家相比仍存在较大差距。这也是目前制约 3×10⁴ m³ 以上 LNG 储罐实现自主设计、建造的一个重要因素。

参 考 文 献

[1] 徐文渊,蒋长安.天然气利用手册[M].北京:中国石化出版社,2002.
 [2] 顾安忠.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2004.
 [3] 王立敏.国内外 LNG 行业的变化与趋势[J].国际石油经济,2008(12):57-62.

[4] 熊光德,毛云龙.LNG 的储存与运输[J].天然气与石油,2008,23(2):17-20.
 [5] 邢献军,杨必应,周晓清,等.大型低温常压液化石油气储罐的设计[J].压力容器,2001,18(1):48-50.
 [6] 刘祥儒.9Ni 钢低温储罐焊接施工经验与工艺问题探讨[J].石油工程建设,1997,23(5):14-18.
 [7] 严艺敏.上海液化天然气事故气源备用站[J].城市公用事业,1999,13(4):30-32.
 [8] 刘东风,崔天燮,王采焕,等.太钢 06Ni9 钢母材和焊接接头断裂韧性实验评定[J].太钢科技,2007(3):13-16.
 [9] 王国华,卫英慧,刘东风,等.06Ni9 钢热处理工艺对组织性能的影响[J].山西冶金,2009,32(1):14-16.
 [10] 刘东风,崔天燮,王采焕.06Ni9 钢热处理性能及组织结构[J].太钢科技,2008(1):20-25.
 [11] 王国平,陈学兵,王冰.超低碳 9Ni 钢焊接接头低温韧性[J].焊接学报,2008,29(3):37-40.
 [12] 李雨康,张世荣.深冷绝热材料的探讨[J].中国海洋平台,2001,16(3):31-34.
 [13] 中国绝热隔音材料协会.绝热材料与绝热工程实用手册[M].北京:中国建材工业出版社,1998.
 [14] 徐烈.我国低温绝热与贮运技术的发展与应用[J].低温工程,2001(2):1-8.
 [15] 陈江凡,邹华生,龚敏.大型液化气低温储罐结构及其保冷设计[J].油气储运,2006,25(7):11-15.
 [16] 徐烈.低温绝热与储运技术[M].北京:机械工业出版社,1999.
 [17] 王良军,刘扬,罗仔源,等.大型 LNG 地上全容储罐的冷却技术研究[J].天然气工业,2010,30(1):93-95.
 [18] 王良军,刘扬.大型储罐内 LNG 翻滚机理和预防措施[J].天然气工业,2008,28(5):97-99.
 [19] 时国华,王松岭,荆有印.LNG 气化站储罐最优配置模型[J].天然气工业,2008,28(5):100-102.
 [20] 邸国清.16 万 m³ LNG 混凝土外罐施工控制要点[J].石油工程建设,2008,34(4):30-34.
 [21] 束廉阶,施广明,吕游州,等.大型低温液化天然气钢筋混凝土储罐预应力设计与施工技术[R].上海:上海电力建筑工程公司,2008.
 [22] 程久欢,贾士林,叶忠志.LNG 低温储罐内罐底板与环板排板的探讨[J].石油工程建设,2009,35(2):77-79.
 [23] 冷辉.中小型双层金属结构低温储罐正装倒装施工工艺对比[J].石油化工建设,2006,28(6):55-56.
 [24] 杨新和.气吹法安装 LNG 储罐罐顶[J].石油化工建设,2009(3):58-60.
 [25] 秦凯凯.50000 m³ LNG 储罐膨胀珍珠岩充填技术[R].上海:上海市安装工程有限公司,2009.