

缠绕管式换热器

Coil-wound Heat Exchanger

张周卫 汪雅红 著



兰州大学出版社

作者简介



张周卫（1974.10—），男，动力工程及工程热物理博士、博士后，高级工程师，毕业于西安交通大学能源与动力工程学院制冷及低温工程系。主要从事多股流缠绕管式换热装备、压缩机械与真空低温设备、LNG过程控制装备、LNG系列阀门、螺旋压缩膨胀制冷机、空间低温制冷技术等课题的研究及产业化工作。先后参与国家级项目20多项、国防重点项目1项，主持国家创新基金4项、甘肃省创新基金4项、中国博士后基金1项、甘肃省自然科学基金1项、甘肃省教育厅项目1项、甘肃省建设厅项目1项及与企业合作项目20多项等；主持开发“空间隐身飞行技术方法”“缠绕管式系列换热器”“螺旋压缩膨胀制冷机”“LNG系列阀门”等重要发明专利43项，发表论文20多篇，出版专著3部。目前为兰州交通大学副教授，并兼任中远能源与动力工程企业集团法人代表及总工程师。

前 言

缠绕管式换热器是螺旋管道经层层缠绕后形成的多股流、多相流管壳式换热器,主要应用于多股流低温回热换热领域,其结构紧凑,温差应力小,可自行收缩,单位体积传热面积大,换热效率高,可实现多股流、多相流超低温回热换热过程,属高效集约化节能型换热设备。自20世纪80年代后,随着天然气、煤化工等领域内大型成套装置项目的开展,以混合制冷剂天然气液化、低温甲醇洗、低温液氮洗、大型空分工艺技术为代表的先进工艺技术的发展为契机,缠绕管式换热器开始蓬勃发展,尤其大型LNG多股流螺旋缠绕管式换热器技术的开发,代表了当今多股流、多相流、超低温换热技术的发展水平,成为此类工艺技术必不可少的特色设备或关键主换热设备。缠绕管式换热器不仅是大型石油化工工艺过程重要的单元设备,而且还是一种节能设备,可明显减少工艺流程中的换热器数量,但由于该设备工艺计算复杂,制造难度较大,工艺技术一直被国外公司垄断,国产化进展缓慢。

本书针对低温流体低温液化领域(7 MPa, -210 ℃)及多股流低温回热换热领域内的主要缠绕管式换热器进行开发,包括LNG低温液化混合制冷剂多股流螺旋缠绕管式主换热装备、LNG低温液化三级制冷螺旋缠绕管式换热装备、LNG低温液化二级制冷三股流螺旋缠绕管式换热装备、LNG低温液化一级制冷四股流螺旋缠绕管式换热装备、一种带真空绝热的双股流低温螺旋缠绕管式换热器、一种带真空绝热的单股流低温螺旋缠绕管式换热器、低温甲醇—甲醇缠绕管式换热器、变换气冷却器用低温缠绕管式换热器、低温循环甲醇冷却器用缠绕管式换热器、未变换气冷却器用低温缠绕管式换热器、原料气冷却器用三股流低温缠绕管式换热器、低温液氮用多股流缠绕管式主回热换热装备、低温液氮用一级回热多股流换热装备、低温液氮用二级回热多股流缠绕管式换热装备、低温液氮用三级回热多股流缠绕管式换热装备等换热设备,适用于低温高压流体单股流及多股流换热、流体带相变制冷及低温多相流回热换热过程,主要针对LNG低温液化用系列缠绕管式换热器、低温甲醇洗工艺用系列缠绕管式换热器、低温液氮洗系列缠绕管式换热器、空气液化分离用缠绕管式换热器及其他-210 ℃以下气体低温液化用多股流换热装备,突破设计计算技术,解决低温气体液化分离技术难题,提高低温液化效率及安全性能,以期推进大型多股流缠绕管式低温液化主换热装备及其设计计算技术的国产化进程。

多股流螺旋缠绕管式换热装备也可有效应用于过热蒸汽系统等高温热工领域,具有多股流换热及节能特点,如代替传统的单股流列管式换热器,用于电站、锅炉等多相

流领域内,可提高换热效率。目前,如电厂过热蒸汽系统大量使用列管式换热器,换热效率较低,存在盲区,只能进行单股换热,不能进行多股流换热,大型化后不易于温差较大的换热过程,换热器数量众多,不符合节能高效要求。缠绕管式换热器耐高温性能好、结构精致,灵敏度高、密封性能好,适用于大温差多股流高效换热过程,针对过热蒸汽、多相流、高温气体带相变换热过程,可有效应用于过热蒸汽及锅炉领域,减少换热器数量,增加过热蒸汽系统运行操作安全性能,提高管理效能。近年来,由于提倡节能、低碳、环保等理念,给大型多股流缠绕管式换热器替代传统的低效率列管式换热器带来了发展契机,市场前景良好,有很大的需求空间。

由于本书研究课题技术涉及多股流超低温领域,理论层次较高,涉及LNG、低温甲醇、低温液氮等低温制冷工艺技术,以及多股流换热及多相流控制等多种基础理论研究等,很多问题是跨学科、跨专业理论问题,有很大的理论难度。限于本人能力有限,不能有效地开展更深入的研究,还有很多技术及理论问题未能解决。也希望通过本书的一点探索性研究,给将来有兴趣研究缠绕管式换热器技术的研究人员一点启示,一点参考,以期将来有更多致力于LNG低温制冷技术及多股流换热技术的人将此研究深入下去,为我国LNG低温制冷技术、低温净化液化工艺技术等的研究与发展贡献更多力量。

在本书涉及课题研究过程中,得到了兰州交通大学广大师生的大力支持,提供了良好的试验设备和条件。出版过程中得到了兰州大学出版社编辑的耐心修改与宝贵意见,在此一并感谢。

兰州交通大学
张周卫 汪雅红

目 录

第一章 绪 论	001
1.1 国内外技术发展现状	002
1.2 缠绕管式换热器的研究目标及主要研究内容	029
1.3 初步研究方案、关键技术及解决途径	036
第二章 LNG 缠绕管式换热器设计计算	038
2.1 LNG 多股流低温缠绕管式换热器	038
2.2 缠绕管式换热器换热工艺计算	048
2.3 缠绕管式换热器结构设计计算	112
2.4 塔的强度设计	136
2.5 本章小结	157
第三章 低温甲醇洗缠绕管式换热器	158
3.1 设计参数	159
3.2 基础计算部分	161
3.3 管板及分程隔板计算部分	201
3.4 壳体的设计计算部分	207
3.5 接管设计计算及法兰的选取部分	212
3.6 裙座的设计计算部分	222
第四章 螺旋缠绕管式换热器设计计算方法	238
4.1 单股流螺旋缠绕管式换热器设计计算方法	238
4.2 两股流螺旋缠绕管式换热器设计计算方法	244
第五章 缠绕管式换热器设计计算软件开发	262
5.1 软件说明	262

5.2	软件安装过程	262
5.3	软件启动过程	263
5.4	具体计算过程	264
5.5	计算结果输出	268
	MCHE 换热设备设计计算软件 V2.1——部分源程序	270
第六章 缠绕管式换热器发明专利汇编		330
6.1	LNG 低温液化混合制冷剂多股流螺旋缠绕管式主换热装备	332
6.2	LNG 低温液化一级制冷四股流螺旋缠绕管式换热装备	339
6.3	LNG 低温液化二级制冷三股流螺旋缠绕管式换热装备	345
6.4	LNG 低温液化三级制冷螺旋缠绕管式换热装备	349
6.5	一种带真空绝热的单股流低温螺旋缠绕管式换热器	353
6.6	一种带真空绝热的双股流低温螺旋缠绕管式换热器	357
6.7	低温甲醇—甲醇缠绕管式换热器设计计算方法	363
6.8	低温循环甲醇冷却器用缠绕管式换热器	370
6.9	未变换气冷却器用低温缠绕管式换热器	376
6.10	变换气冷却器用低温缠绕管式换热器	382
6.11	原料气冷却器用三股流低温缠绕管式换热器	388
6.12	低温液氮用多股流缠绕管式主回热换热装备	395
6.13	低温液氮用一级回热多股流换热装备	404
6.14	低温液氮用二级回热多股流缠绕管式换热装备	410
6.15	低温液氮用三级回热多股流缠绕管式换热装备	419
附录 1 混合制冷剂物性参数表		428
附录 2 塔器设计主要符号说明		436
参考文献		438
后 记		440

第一章 绪论

缠绕管式换热器是一种换热管道经层层缠绕后形成的螺旋盘管型热交换设备,采用逆流换热形式,主要由壳体、管束上支撑、管束、芯筒、管束下支撑等主要部件构成,有单股流换热器、双股流换热器及多股流换热器,主要用于管程存在较大温差的多股流换热过程。缠绕管式换热器以其结构紧凑,单位容积具有较大的传热面积,传热管的热膨胀可自行补偿,容易实现大型化,可减少设备台数等优点成为天然气液化、低温空分、低温甲醇洗等低温净化、液化工艺中的重要设备。由于缠绕管式换热器大多应用于低温环境,体积较大,一般以传热塔的形式出现,最高可达到七八十米,一般换热器也在二三十米,内部管道缠绕复杂,没有通用设计标准,也没有统一的换热工艺设计计算方法,随着工艺流程或物性参数特点不同而存在较大差别,因此给缠绕管式换热器标准化过程带来了困难。此外,由于缠绕管式换热器管束缠绕方法很多,没有统一的管道缠绕模型及理论设计计算方法用于计算机辅助计算过程,给缠绕管式换热器的科学计算过程带来了障碍。

近20年来,国外主要有德国Linde公司、美国APCI公司等对其进行开发,主要应用于MCHE型LNG液化、低温甲醇洗、低温液氮洗等工艺中,可进行低温工况下的低温高压多股流回热换热,具有换热效率高、集约化程度高、需要换热设备数量少等特点。国内在石油化工、低温制冷等行业内对螺旋缠绕管式换热器已有较广泛应用,一般随整体工艺成套进口,设备费用包含专利使用费等极其昂贵。原开封空分厂^[1]、合肥通用机械研究所^[2]及镇海炼化公司等开发小型缠绕管式换热器,可部分替代国外进口产品,目前还没有开发大型的带回热换热的如LNG主换热器等设备,主要缺乏系统的设计计算技术,对缠绕管式换热器的换热工艺和制造工艺并没有提出过完整的、系统的研究方案及标准化方法,大型缠绕管式换热器主要依赖进口。在换热工艺计算方面,目前流行的缠绕管换热器管外传热膜数计算主要基于Gilli公式,管内传热膜数计算基于Schmidt公式^[3-5]。优点是计算过程简便,带有不同的管道修正系数,便于单股流常温换热器设计计算;缺点是不能用于低温工况、多相流、多股流计算过程,没有考虑多相流相变制冷过程等,尤其应用于大型多股流带回热换热的多股流、多相流、大温差混合制冷剂相变制冷过程时,计算误差太大。此外,缠绕管式换热器缠绕过程复杂,如何确定管道参数、缠绕参数、材料参数,并将整个设计参数代入到换热工艺计算过程,需要嵌套大量迭代计算过程,同时考虑强度计算过程及管内流速限定等问题,需要编制复杂的设计计算软件进行计算是缠绕管式换热器设计计算的核心。兰州交通大学张周卫等人曾对大型LNG

缠绕管式换热器等进行了系统的研究开发,前后开发了 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ MCHE型LNG专用系列缠绕管式换热器^[6-13]、 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温甲醇用系列缠绕管式换热器^[14-18]、 $-197\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温液氮用系列缠绕管式换热器等系列缠绕管式换热器^[19-22],根据不同温度及换热器换热领域,研究不同种类的缠绕管式换热器算法,开发了适用于低温多股流多相流计算的缠绕管式换热器设计计算软件^[23],目前正在推进标准化研究工作。本书主要针对 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ LNG专用多股流缠绕管式主换热器、 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温甲醇用多股流缠绕管式换热器、 $-197\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温液氮用多股流缠绕管式换热器的换热特点、结构特点,提出了一套较为严格、系统的工艺计算方法,主要特点如下:(1)引入单元模型数值模拟过程分析确定缠绕管基础参数;(2)编程计算分析不同条件下进出口流体换热系数;(3)分析对比不同计算数据并优化设计过程;(4)以单股流为基础研究开发双股流、三股流、四股流……多股流缠绕管式换热器多股流、多相流、超低温领域的通用管束结构设计方法。

1.1 国内外技术发展现状

1.1.1 缠绕管式换热器发展现状

我国海洋油气资源丰富,尤其南海地区天然气资源最为丰富。目前,南海地区已经成为世界上天然气产量最大的地区,南海周边的印度尼西亚、马来西亚、文莱等国家已经成为世界上LNG产量最大的国家。中国拥有广阔的南海、东海等周边海域,拥有规模庞大的天然气待开发资源储备,但由于天然气开采、液化及储运装备落后,一直无法将其开采、加工并运回国内消费。

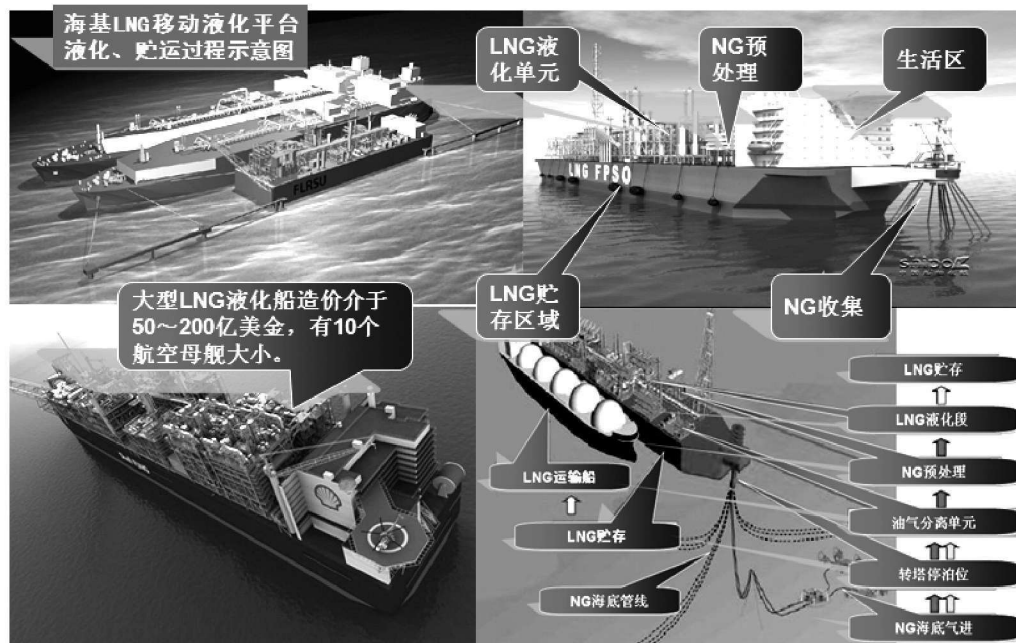


图1-1 LNG移动液化平台液化、贮运过程

此外,亚太地区是世界上LNG最大的消费地区,主要进口国有日本、韩国等,目前两国的LNG进口总量约占世界LNG进口总量的1/3。中国前些年一直坚持足不出户的能源自给自足原则,近年来,随着经济的快速发展,能源自给缺口日益增大,已经完全不能满足经济快速发展需要。2000年以后,开始大规模修建LNG接收站,进口澳大利亚、印尼等国家的LNG以满足国内快速增大的工业发展需求。2013年,中国进口LNG总量为1700万t/年,不到日本的1/5。中国目前已投入使用的接收终端有9个,即深圳大鹏LNG和上海LNG接收站等,正在建设的有3个接收站,总体接收能力为3730万t/年,主要分布在东南沿海,中国每年需要花费大量外汇储备用于购买LNG。中国的LNG能源发展相对落后,LNG装备研究开发及制造能力滞后,大型LNG液化装备全部依赖进口。世界上LNG主要产地为东南亚地区(印度尼西亚、马来西亚、文莱等)、海湾地区(卡塔尔)、非洲(尼日利亚、利比亚)、澳洲等靠近赤道的地区,主要消费区在东亚(日本、韩国)、西欧、北美(美国)等地区,主要依靠大型LNG船将液化后的天然气运输到世界各地。

LNG主要产于近大陆架的海域地区,这些地区是LNG的主要来源,占全球LNG总量的75%以上,世界上大多200万Nm³/天大型LNG项目均在海上或近海地区开采加工。我国能源消耗结构中主要以煤炭和石油为主,近年来,由于陆基煤炭及石油资源日益短缺,再加上快速发展的经济总量,传统能源已经无法满足日益增长的工业需求,缺口越来越大,依赖进口的程度逐年提高。2009年我国生产天然气830亿m³,与2008年相比增长7.7%,天然气表观消费量为874.5亿m³,同比增长11.5%。与国内产量相比,国内天然气供需缺口超过40亿m³。2006年、2007年、2008年,我国进口LNG数量分别为67.75万t、291.3万t和333.6万t。2009年我国进口LNG总量968.8万t,比2008年增长63%;价值33.7亿美元,增长16.1%;进口平均价格为每吨347.8美元,下跌28.7%。2010年1月我国液化天然气(LNG)进口量较2009年同期增长近3倍。1月份油气进口增速创下当月历史最高纪录。中国建成的LNG卫星站已超过40个,调峰站1座,LNG工厂14座,正在建设中的LNG工厂有24座,规划中的LNG接收站全部建成后总储存中转能力可达1800万t/年。按照中国的LNG使用计划,2014年国内生产能力将达到7305亿m³,而2020年为2400亿m³。而在进口天然气方面,到2020年,中国要进口350亿m³,相当于2500t/年,是目前广东省接收站的总量的7倍。

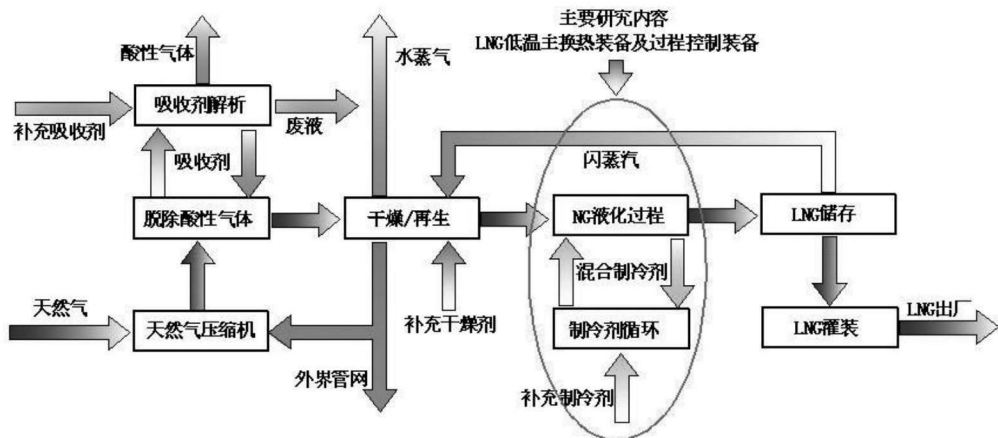


图1-2 LNG低温液化主要工艺流程图

LNG是继煤炭、石油、天然气、电力等一级能源后的新能源,是天然气经预处理并液化后的产品。20世纪90年代以来,LNG生产和储运工艺技术开发都取得了长足进步,而且随着全球经济一体化进程的加速,发展极为迅速。近10多年来,LNG消费量的年平均增长率超过了6%,远高于其他的一级能源。LNG已成为稀缺清洁资源,正在成为世界油气工业新的热点。为保证能源供应多元化和改善能源消费结构,一些能源消费大国越来越重视LNG的引进,日本、韩国、美国及欧洲各国都在大规模兴建LNG接收站。国际大石油公司也纷纷将其新的利润增长点转向LNG业务,LNG将成为石油之后下一个全球争夺的热门能源商品。为缓解天然气供不应求且缺口严重的矛盾,我国做出大规模引进LNG以解决经济发达地区能源短缺问题的决策,2006年批建上海LNG接收站项目,2008年后陆续审批广东LNG、福建LNG、唐山LNG、大连LNG、江苏LNG等接收终端项目10余个,单个投资50亿~200亿不等,一期接收能力300万t/年,二期600万t/年,建成后总体LNG接收能力达到3000万t/年,相当于日本的28%,韩国的60%。所以国内需求空间很大。国内接收站工程项目大多被国外公司总承包,主要设备包括大型低温贮罐(具有复杂的技术工艺及控制设备,单体造价2亿,一般接收站需要5~20个)、低温泵(单台造价500万)、卸料臂(单体造价0.2亿,一般码头需要6~7台)。

另外,基于陆上的LNG工厂项目也得到快速发展,自2004年新疆广汇100万m³LNG工厂(由德国林德公司提供技术及设备,总投资3亿)建成后,国内陆续有40多个LNG工厂项目已建成或正在建设,宁夏哈纳斯LNG工厂项目投资最大,年处理量10亿m³(德希尼布公司提供预处理工艺及装备,美国液化空气公司提供技术,总投资20亿),其他大多为15万~30万m³的调峰站项目,如兰州燃气30万m³LNG工厂项目(康泰斯公司提供技术及装备,总投资4.5亿)。国际上LNG工厂一般处理能力在300万m³以上,相当于100万t/年,最大的达到300万t/年,相当于1000万m³/天的处理量。LNG工厂核心装备有80多件,其中70多件可以国产化,剩余10余件不能国产化,主要涉及核心制冷工艺技术包、核心控制工艺技术包,包括大型螺旋管式换热器(如宁夏哈那斯LNG工厂,单价1亿~2亿)、低温制冷压缩机(200万m³,单价1亿,若并行两套装备,200万m³LNG工厂需要6台)及其他制冷装置(低温LNG节流阀、LNG低温泵等)。

由于我国LNG发展速度缓慢,成套核心工艺技术落后,技术装备生产能力落后,虽然能生产大多数设备,但大型成套工艺及技术全部依赖于进口。如LNG整体项目中,天然气预处理工艺及装置可国产化,但没有30万m³以上大型LNG液化单元整体制冷工艺,不能制造相关制冷主设备——大型螺旋缠绕管式主换热装备及过程控制装备,也不能生产大型离心式制冷压缩机等动力设备。LNG项目的投资成本主要用于购买专利技术,包使用权、核心关键设备等。由于不能提供核心技术工艺及大型关键设备,国内只有少数单位能承建30万Nm³/天以下的LNG工厂项目,而此类项目由于规模太小,不能发挥整体规模效应,国际上已经趋于淘汰。

目前,LNG低温液化设备主要有四大类:

超大型基本负荷型近海LNG液化项目,建于近海岛屿上,大多采用MCHE型混合制冷剂天然气液化工艺流程,如文莱、印尼、澳大利亚等国近年来建立的LNG项目均在200万~300万t/年以上,均采用混合制冷剂大型低温多股流螺旋缠绕管式主换热器作为主液化设备,具有庞大的LNG预处理设备及储存设备,另外需要配备10万~30万kW

以上的自备电厂供电。

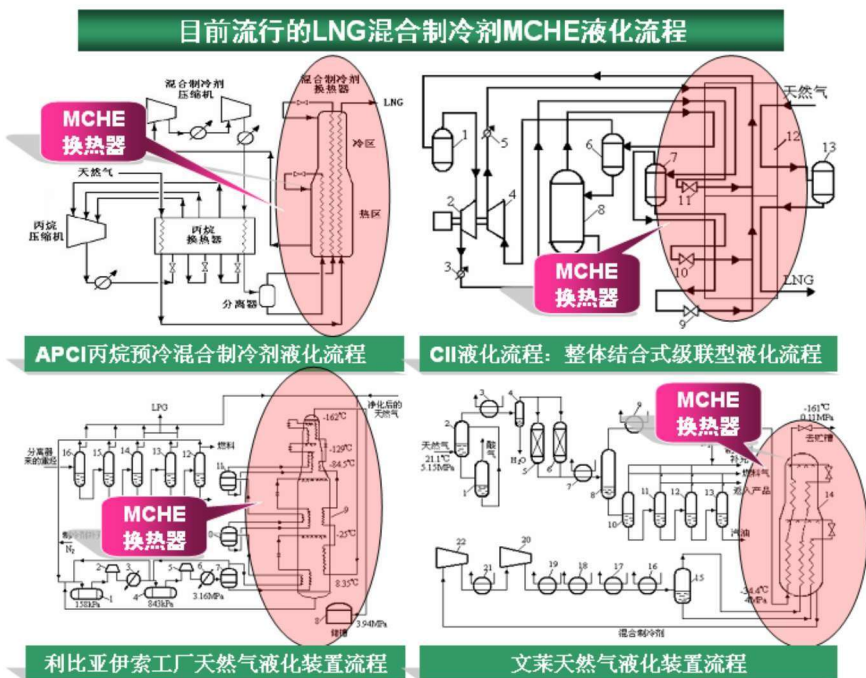


图 1-3 MCHE 型 LNG 混合制冷剂液化流程

基于固定海洋平台的 LNG 工厂, 建立于海洋平台上, 主要有开采、预处理、低温液化及储备装备等, 各过程均在海洋平台上完成, 主要采用撬装式及级联式中型 LNG 液化设备, 液化后通过 LNG 船运输至 LNG 终端接收站, 如卡塔尔的亚德里亚 LNG 接收站等。



图 1-4 LNG 海洋平台、LNG 浮动平台、LNG 海岛工厂

基于可移动的海洋平台 LNG 项目,如典型的 LNG 液化船,主要作用是将天然气直接在船上液化成 LNG,这种液化平台可移动,可将开采后的天然气在船上经过预处理后再液化,主要采用中型斯特林制冷机或级联式液化流程,如 20 世纪 80 年代后瑞典开发的 LNG 液化船等。

新型 LNG 海洋浮动平台,主要以 MCHE 型混合制冷剂天然气液化工艺技术为特征,具有小型化、产量高、效率高、可移动、可飘浮等特点,处理量在 200 万~300 万 m³/天(72 万 t/年)以下。

新型 LNG 工厂项目与陆基型最大区别是小型化、集约化程度更高,液化效率更高,主要工艺流程宜采用混合制冷剂大型低温 MCHE 多股流螺旋缠绕管式主换热装备液化工艺流程。

20 世纪 80 年代以后,由美国液化空气公司开发的 MCHE 混合制冷剂液化流程以其多股流螺旋缠绕管式主换热器为特征的低温液化工艺逐渐被认可并大量应用于 LNG 领域。MCHE 具有高效、节能、经济、一次投资少、占地少等优点,可将级联式液化流程中的众多大型换热器整合为一台温度介于 40~-163 ℃之间运行的多股流低温换热器,从而节约成本,节约场地,便于管理,并且规模越大越经济,单位能耗越小。MCHE 在基本负荷型大型 LNG 项目中得到了大规模应用,据统计,近年来世界上大型基本负荷型 LNG 项目的 80% 为 MCHE 混合制冷剂技术。

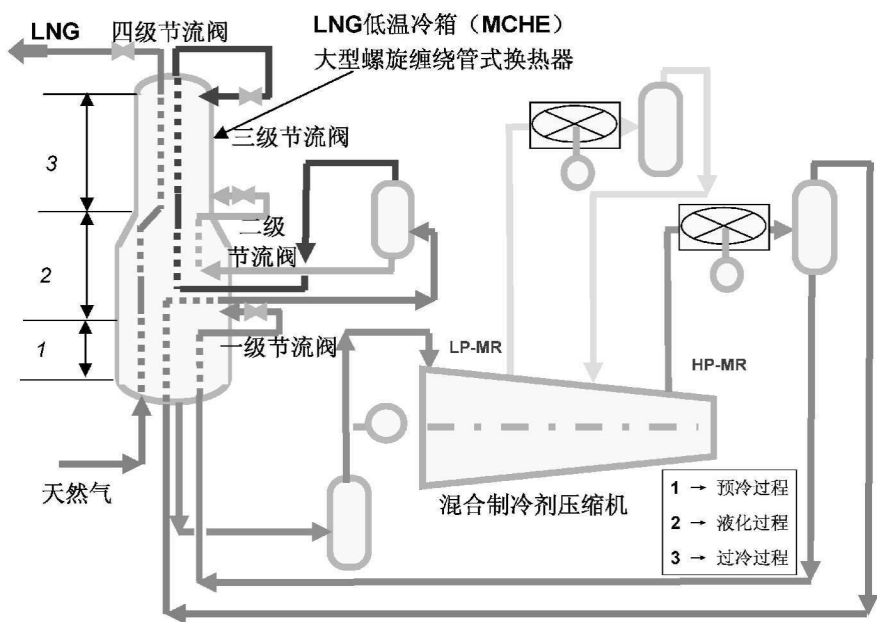


图 1-5 MCHE 型 LNG 工艺低温液化单元及主设备

由于以多股流低温螺旋缠绕管式换热器为主要特征的混合制冷剂天然气液化流程具有换热效率高、100%液化率、单位能耗低、管理集中、设备数量少、占地少等诸多高效节能优点,再加上目前 LNG 工厂项目产能更加趋于大型化、规模化,以上四类 LNG 工厂项目也必将向混合制冷剂多股流低温换热方向发展,所以研究开发混合制冷剂液化流程及大型多股流低温螺旋缠绕管式换热器及过程控制装备是目前 LNG 液化装备研究的重点。

大型LNG低温多股流螺旋缠绕管式换热器（MCHE）



MCHE具有单位换热面积换热体积较小、换热效率高、换热温差大、具有自紧收缩调整功能、多股流换热功能，换热过程无盲区，适用于大温差多相流低温换热过程。

图1-6 MCHE型LNG主换热器

LNG螺旋缠绕管式换热器管束特点

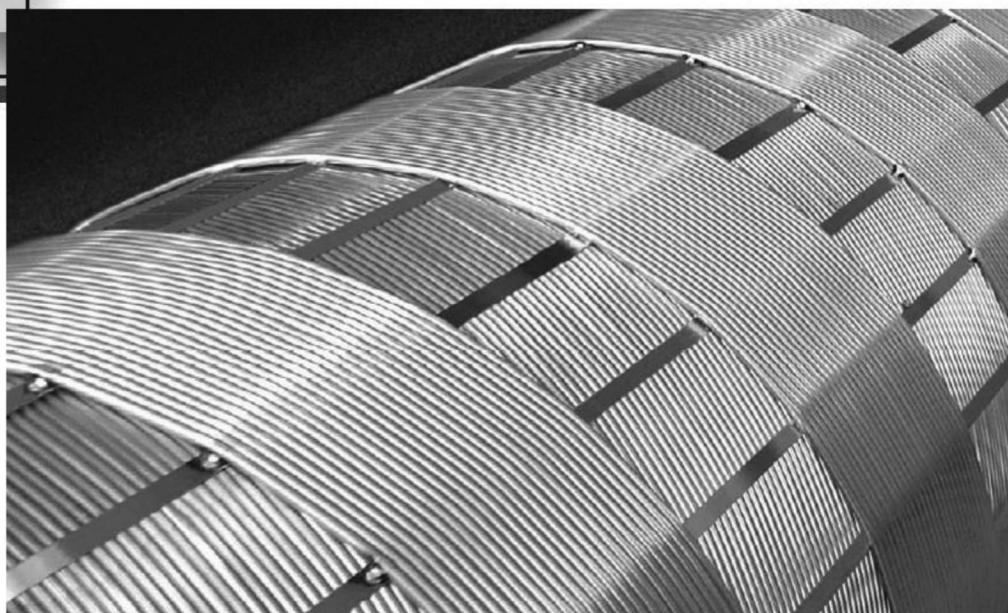


图1-7 MCHE型主换热器内部换热缠绕管束

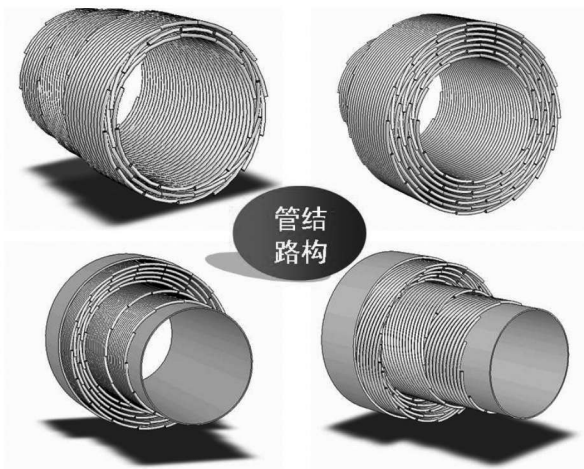


图 1-8 多股流低温螺旋缠绕管式换热器管路结构

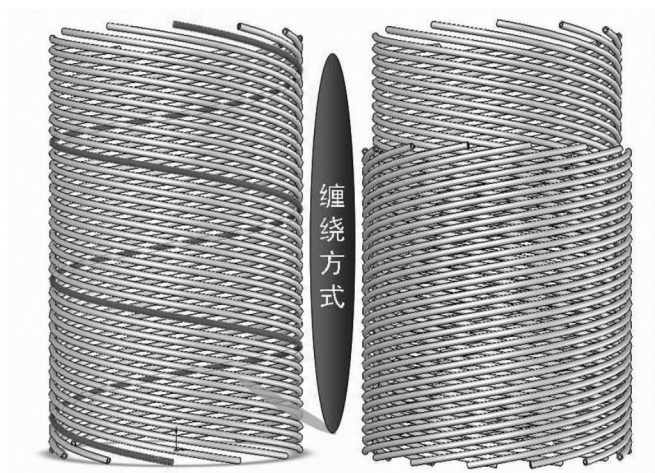


图 1-9 多股流低温螺旋缠绕管式换热器缠绕方式

管束缠绕方式

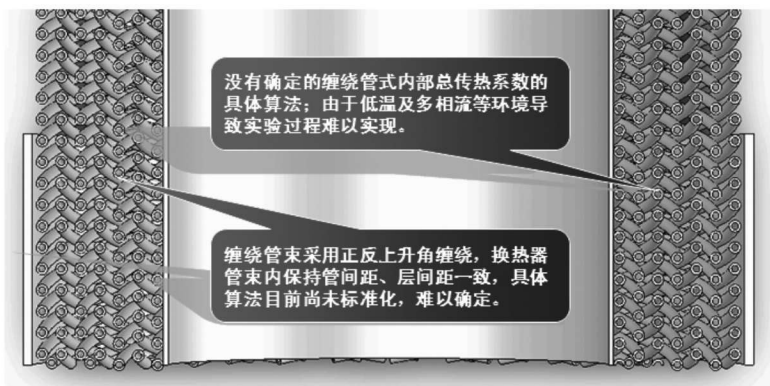


图 1-10 多股流低温螺旋缠绕管式换热器内部管束结构

MCHE 型 LNG 多股流螺旋缠绕管式换热器是由一组或多组缠绕呈螺旋管状的管子置于壳体之中制成的，又称螺旋管式换热器，其结构紧凑，传热面积比直管大，温差应力

小,多种制冷剂内部交叉换热,最多可进行10多股流低温流体相互预冷换热。LNG用缠绕管式换热器以9Ni钢为主要原料,能够满足低温环境下的换热需求,具有无效冷、热损失少,湍流度高,换热效率高,结构紧凑,空间利用效率高,无换热死区,少淤塞,可实现多股流体的同时热交换等优异的性能。缠绕管式换热器仍是一种管壳式换热器,但是其换热管为缠绕管,具有换热效率高且能够实现多股流体同时换热的优点。实践证明,与现有换热器产品相比,缠绕管式换热器具备了高效、多用途换热设备的主要优点:

(1)由于介质在螺旋流动的过程中将产生二次环流,故壳内及换热管内湍流度高,流束内外部热交换充分,所以热交换能力强。

(2)由于相邻两层螺旋管的螺旋角为相反数,故可以大大增强壳体内相邻两流层的湍流度,增强热交换能力。

(3)由于换热管是螺旋状缠绕的,因此换热管的长度将远远大于换热器的长度,极大地增大了换热面积。

(4)因为螺旋管道的长度远远大于换热器的长度,故在介质流速为定值的情况下,将大大延长换热的的时间,从而达到提高换热效率的目的。

(5)根据缠绕管式换热器的布局特点不难发现壳体内任一空隙位置的换热环境均相同(壳体内任一空隙位置的大小相同),故可以在已知的情况下进行多股流的热交换。

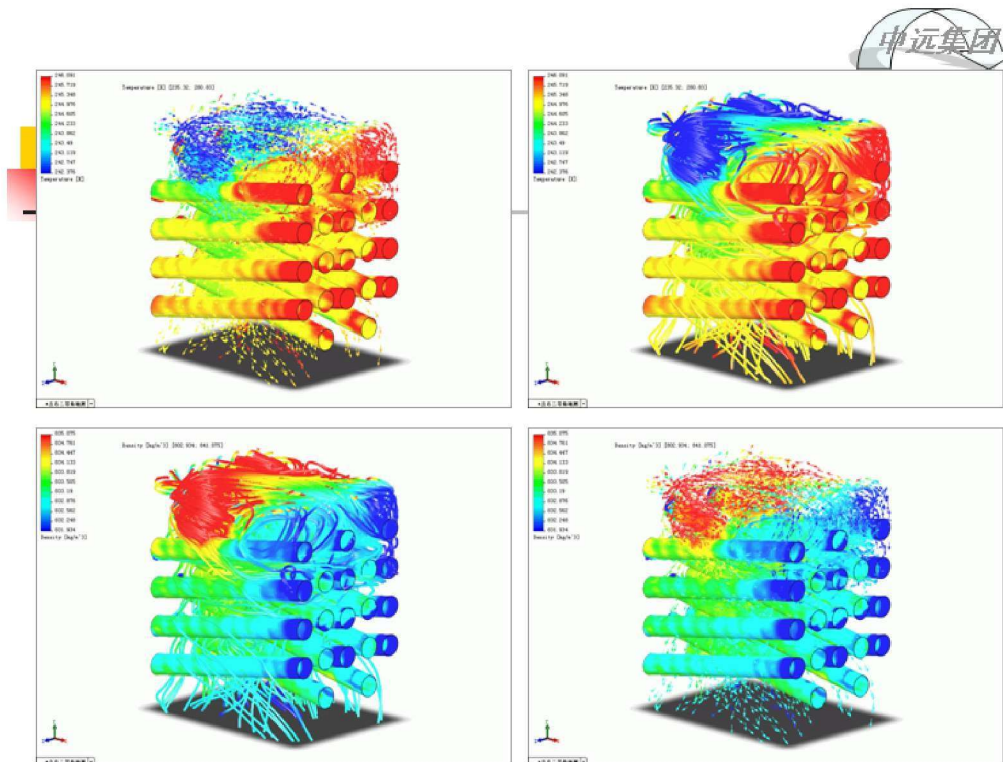


图1-11 多股流缠绕管束内部传热过程数值模拟

主要针对核心制冷工艺技术、关键设备低温多股流螺旋缠绕管式换热器及过程控制装备,研究开发混合制冷剂LNG制冷核心技术工艺及MCHE核心装备制造技术。



图 1-12 多股流缠绕管式换热器主要技术难点

主要难点如下:

(1)MCHE混合制冷剂天然气液化单元整体工艺技术难以突破。原因是液化温度低于 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用6种混合制冷剂在一台主换热器内完成整个换热过程,低温液化工艺复杂,计算、模拟、设计、实验、控制、制造等过程都相对复杂,且需要大型实验测量设备、低温仪器仪表、实验辅助设备等。

(2)高效LNG低温大型螺旋缠绕管式主换热装备研究(LNG冷箱)——液化单元主设备,设计计算过程复杂,加工制造工艺难度大,只有突破大型LNG混合制冷剂低温液化工艺技术,才能进行LNG冷箱(MCHE)的研究。目前有螺旋缠绕管式换热器的设计加工及制造经历,主要难点在于低温工况下的设计计算过程及多股流低温实验验证过程等,需要计算多种低温制冷剂带相变交叉换热过程,并应用大型数值计算方法及实验验证过程。

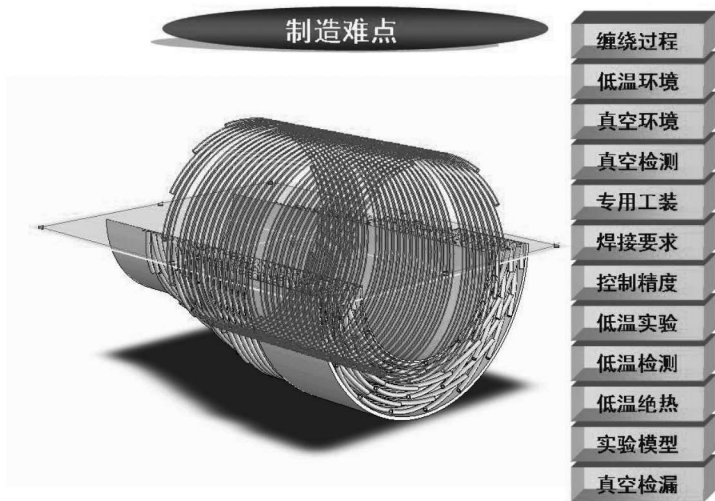


图 1-13 多股流缠绕管式换热器加工制造难点

(3) LNG 四级节流制冷装置——LNG 多股流螺旋缠绕管式换热器辅助制冷核心设备, 制冷单元主设备, 是低温制冷的核心部件, 主要用于控制气液两相流及混合制冷剂低温节流制冷过程。

(4) 大型 LNG 贮罐及相关工艺技术——拥有大型贮罐设计加工能力, 需开发低温贮罐及相关控制设备。

(5) 小型液化天然气接收站——技术成熟, 包括小型真空低温贮罐、汽化器等。

(6) 大型 LNG 低温泵——大型低温贮罐中的主设备, 目前国内没有生产加工能力, 需要开发。

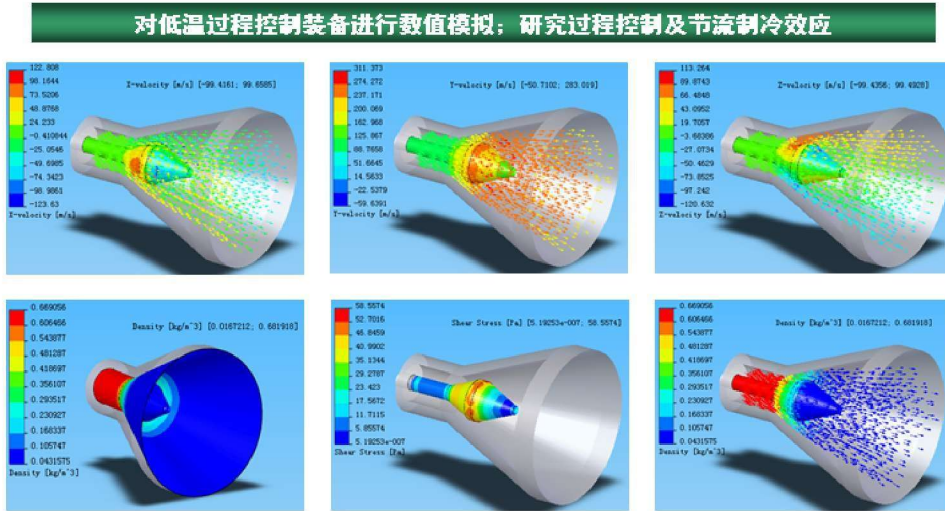


图 1-14 四级节流阀数值模拟研究过程



图 1-15 四级节流阀实验研究过程