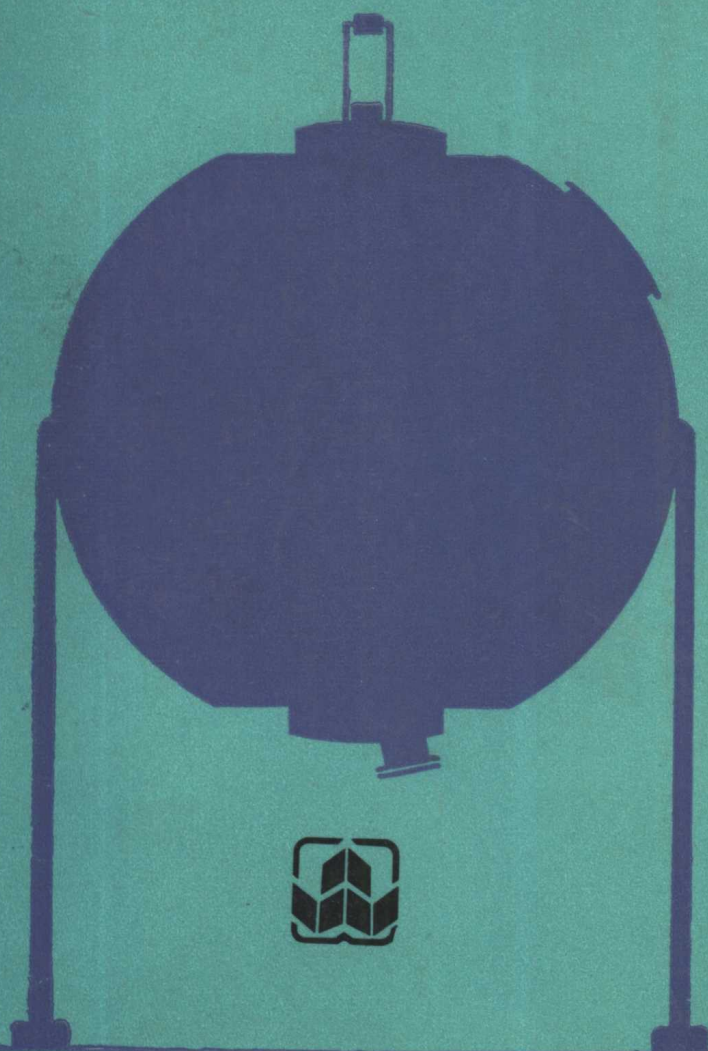


QIUXING CHUGUAN
JIANZAO
JISHU

球形储罐建造技术

王嘉麟 主编



本书是国内第一部系统地论述球形储罐建造施工技术的专著。以GBJ-94—86《球形储罐施工及验收规范》为标准,结合国内球形储罐建造的实际,并搜集国外有关资料编写而成。

本书包括球罐设计、球罐用钢、球罐壳板的制造、球罐的组装、焊接、无损检验、焊后整体热处理、安全评价与断裂分析、交工验收等。全书最后还对吉林市400m³球罐的爆炸破坏进行了事故分析。

本书是从事球罐设计、制造、安装、焊接及焊后热处理、无损检验工作的工程技术人员、科研人员以及压力容器的安全监察人员的工具性参考书,也可供大专院校化工机械专业和焊接专业师生参考。

* * *

本书编写委员会

主任委员: 朱文华 高级工程师,沈阳建筑机械厂总工程师,长城球罐科技开发公司经理。

委 员: 王嘉麟 东北工学院副教授。
钱百年 中国科学院金属研究所副研究员。
黄树甲 沈阳市产品质量监督检验所工程师。

球形储罐建造技术

王嘉麟 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 27 插页: 2 字数: 656千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷

印数: 1—7,135册 定价: 15.10元

ISBN7-112-01002-0/TU·719

(6093)

近10多年来,随着我国石油、化工、冶金等工业的开发,球形储罐作为储存气体或液化气体的合理压力容器,有了迅速发展。我国从50年代起就开始自行设计和建造球罐,直到70年代,绝大部分球罐所用钢材都是低碳钢。当时球罐建造技术特别是焊接工艺相当落后,球罐焊接时不进行预热,不控制焊接线能量(或称热输入量),球罐的无损检验技术也不够成熟。当时落后的建造技术不能用于低合金高强钢球罐的建造。低合金钢球罐建造技术尤其是焊接工艺必须在科学试验基础上制订并要严格执行,不然,会发生重大事故。球罐储存易燃、易爆介质,一旦发生事故,后果不堪设想。1979年12月吉林市曾发生一起灾难性球罐爆炸事故。经国家劳动人事部组织认真调查与分析,认为球罐焊接质量不良是导致爆炸事故的根源(详细情况见本书第十章)。为了吸取教训,国家劳动人事部对国内已建造的球罐全面进行了一次开罐检查。检查结果发现大多数球罐都存在裂纹。这些球罐经焊补后才可继续使用。这次开罐检查说明了我国过去球罐建造的质量有问题。吉林球罐爆炸给我们敲起警钟。开罐检查的结果引起国内对球罐建造质量的普遍重视,促进了球罐建造技术的提高。据统计,吉林爆炸事故后建造的球罐运行后,开罐检查表明返修率已大为减少,这说明我国球罐建造技术比过去有了显著的提高。

70年代引进了日本、法国的球罐,我国已掌握球罐的先进建造技术。但是,这些先进的技术并没有得到普遍推广。目前国内已能自行设计各类大、中、小型球罐。国内钢厂已能供应16MnR钢、16Mn稀土钢作为常温球罐用钢。屈服强度大于350MPa/mm²低合金钢以及用于乙烯球罐低温用钢目前国内尚不能生产。球壳板的制造已从过去热压成型改进为冷压成型,大大提高了球壳板的精度,满足了组装的要求。为了保证球罐焊接质量,对焊工进行了严格的培训与考核。焊接材料的选择与烘干、焊接线能量、焊接程序以及焊接工艺等都在科学试验基础上制订出合理的技术规范。球罐的无损检验除了掌握各种常规的检验方法外,已经开始用声发射检测球罐裂纹。此外,还开展了断裂失效分析。国内已初步掌握球罐整体热处理技术,对需要消除焊接残余应力的球罐进行了必要的焊后热处理。

综上所述,我国球罐建造技术已积累了较丰富经验。但是,要看到国内球罐技术的发展是不平衡的,与国外相比,还有较大差距,这需要我们认真地总结经验,不断提高以赶上世界先进水平,《球形储罐建造技术》一书就是为了这个目的而编写的。全书从球罐设计、球罐用钢、球板成型、球罐组装、焊接、无损检验、焊后整体热处理、安全评价与断裂分析等方面较系统地论述了国内球罐建造技术经验。希望本书的出版对促进我国球罐建造技术的发展与提高有所帮助。

中国机械工程学会焊接学会理事长
斯重遥

编者的话

球形储罐（以下简称球罐）是一种储存气体、液体或液化气体的压力容器。由于与同容量的其它储罐相比，具有表面积小、板厚小、消耗钢材少、重量轻、制造方便、施工周期短、占地面积少、维修方便等优点，已被广泛地应用于石油、化工、城市煤气或天然气、冶金、航空、航天、核工业等各个工业领域。1910年，世界上出现了第一台球罐，而今天，全世界已拥有五万台各类球罐。

球罐大多用于储存液化石油气、液化天然气、液态烃、乙烯、丙烯以及氧、氮、氢等易燃、易爆和有毒的液体、气体介质。一旦发生事故，不但球罐本身遭到破坏，而且还会带来灾难性后果。因为，球罐壳体的破坏，必然导致受压流体的迅速泄漏和释放，随之而来的就是大面积的爆炸燃烧，产生的冲击波会破坏周围设备和建筑，还会造成大范围的中毒和很难扑灭的火灾，使生命财产遭受巨大损失并严重污染环境。因此，球罐的建造与使用管理不仅引起各国科技界的高度重视，也受到各国政府的极大关注。球罐建造水平的高低，往往从一个侧面反映了这个国家的科技水平。球罐建造涉及材料科学、设计理论、制造技术、焊接技术、热处理技术、无损检验技术、断裂力学理论等多学科领域。只有采取严格的科学态度，各学科紧密配合，才能建造出高质量的、可以安全可靠使用的球罐。

我国自1958年才开始自行设计并建造球罐。三十年来，由于广大工人和科技人员的艰苦努力，已经初步建立了适合我国国情的球罐系列，并在大量科学研究和深入细致的实际工作的基础上，积累了许多宝贵的经验。特别是在吉林市400m³液化石油气球罐爆炸事故发生后，在全国现役球罐普遍开罐检查的基础上，总结出许多问题和教训，使我国的球罐建造水平有了明显提高。七十年代后期，我国从日本、法国等发达国家先后引进了一批较先进的球罐。通过消化、吸收，使我国的建球水平更上一层楼。到目前为止，我国已建造各类球罐三千台以上。但是，由于诸多原因，我国的建球技术与国际先进水平相比，还存在较大的差距。一些大容量、高参数以及在低温条件下工作的球罐，仍大部分依靠进口。可见，尽快使我国的建球技术赶上世界先进水平，以适应四化建设的需要，是我国科技工作者一项义不容辞的责任。

迄今为止，我国一直没有系统地论述球罐建造技术的专著，这不能不认为是一项亟待填补的空白。为此，我们邀集了多年从事球罐科技工作的有关专家、学者和工程师们编写了《球形储罐建造技术》一书。

在本书的编写过程中，我们力求理论与工程实际紧密结合，既总结我国多年积累的丰富建球经验，也将国外建球的新技术、新方法以及最新科研成果引入本书；还精选了有价值的资料和数据，提供给读者查阅；近年来实行的全面质量管理体系也在本书的有关章节中有所反映。

限于学识水平和经验不足，错误和不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

参加本书编著的同志有：中国市政工程华北设计院徐良、王庆平（概论、第一章），

东北工学院王嘉麟、李友（第二章）；沈阳工业大学赵志光（第三章）；沈阳工业安装工程公司李明（第四、五章）；中国科学院金属研究所钱百年、沈阳建筑机械厂朱文华、刘孝先、孙连城（第六章）；沈阳市技术监督局张瀚闻（第七章）；东北工学院王全山、冯泽民（第八章）；中国科学院金属研究所常春成（第九章）；中国科学院金属研究所杨海学（第十章）；沈阳市产品质量监督检验所黄树甲、黄德斌（第十一章）。全书由王嘉麟同志主编。书中全部插图由沈阳工业大学制图教研室绘制。

中国机械工程学会焊接学会理事长斯重遥同志为本书撰写了序言。

本书完成初稿后，由郭燕杰教授主审，并邀集知名专家、教授十一人组成评审组，召开评审会对书稿进行了审定。根据评审组提出的意见和问题，编写组又认真对全书进行了修改。

在本书编写过程中，承蒙沈阳市副市长任殿喜同志、编写组成员所在单位以及长城球罐科技开发公司的热忱关怀与支持，在此表示由衷的感谢。

目 录

第一章 球罐的概述与设计	
第一节 概述..... 1	四、液位计.....49
一、球罐的优缺点..... 1	五、消防喷淋及冷却喷淋水装置.....50
二、球罐的分类..... 3	六、防雷、防静电装置.....50
三、球罐的型式..... 3	附录一 全国主要地区最冷月月
四、球罐的发展简况..... 4	平均最低温度51
第二节 球罐设计条件及设计参数	附录二 球形储罐基本参数
的确定.....11	(JB 1117-82)52
一、设计应遵循的设计规范、规定.....11	第二章 球 罐 用 钢
二、设计条件.....12	第一节 对球罐用钢的基本要求53
三、设计参数的选定13	一、球罐用钢的成份和性能特点.....53
第三节 球罐的结构17	二、球罐等压力容器用钢的质量特点.....57
一、球罐本体.....17	第二节 国内外球罐用钢的现状
二、接管.....19	和发展.....57
三、支承型式.....20	一、概述.....57
四、梯子、平台.....23	二、国内外球罐用钢选材的两种倾向.....58
五、其它附件.....25	三、对球罐用钢要求的提高和冶金技术的进
六、隔热与保冷设施.....25	步.....58
第四节 球壳的计算25	第三节 低合金高强度球罐用钢的物理冶
一、球壳的应力.....25	金学.....59
二、球壳最小壁厚的计算公式.....27	一、低合金高强度钢的合金化.....59
第五节 支柱和拉杆的计算.....29	二、热处理工艺与金相组织.....64
一、载荷计算.....29	三、低合金高强度钢的焊接性.....65
二、支柱计算.....32	第四节 我国现有低合金高强度球罐用钢
三、拉杆计算.....38	简介66
四、支柱与球壳连接最低处a点的	一、16MnR67
应力验算.....39	二、15MnVR68
五、支柱与球壳连接焊缝强度验算.....40	三、15MnVNR69
第六节 球壳开孔补强的计算.....41	第五节 低温球罐用钢简介.....69
一、概述.....41	一、概述.....69
二、开孔补强的结构形式.....41	二、影响低温韧性的因素.....70
三、等面积法开孔补强计算.....42	三、低温用钢简介.....71
四、极限分析法开孔补强计算.....43	四、球罐用钢的最低工作温度和冲击韧
第七节 球罐的附件.....45	性.....74
一、安全阀.....45	第三章 球罐壳板的制造
二、压力计.....48	第一节 球壳板材质量的复验.....77
三、温度计.....49	

第二节 球壳板的下料及成型	78
一、球壳板的一次下料法	78
二、球壳板的二次下料法	80
三、球壳板下料的尺寸公差控制及其检验	84
四、壳板弧长与弦长的计算	84
五、计算举例	86
六、球罐壳板的成型	88
七、球壳板焊接坡口的加工	90
八、成型模具的制造	98
第三节 球罐壳板成型后的检验与校形	99
一、球壳板曲率的检验	99
二、球壳板几何尺寸的检验	100
三、球壳板翘曲度的检验	102
四、几何形状不合格壳板的校形	102
五、合格球壳板的处理	102
第四节 球罐立柱的下料及成型	102
一、罐体与立柱相贯部分的下料	102
二、罐体与立柱的焊接成型	103
三、人孔, 管座位置的开孔	105
第五节 球罐壳板的存放与运输	105
第六节 球罐壳板制造举例	105
一、球罐基本情况	106
二、球罐几何尺寸	106
三、球壳板及坡口几何尺寸	107
四、生产工艺流程图	108

第四章 施工准备

第一节 技术准备	109
一、审核图纸	109
二、工程场地调查	109
三、焊接工艺评定	109
四、编制施工组织设计	113
第二节 组织准备	125
一、施工组织机构的确定	125
二、质量保证体系的建立	125
三、劳动力的配备与培训	127
第三节 物质准备	127
一、施工机械准备	128
二、工具、夹具的准备	128
三、施工用料的准备	128

第四节 施工场地条件准备	128
一、三通一平	128
二、暂设工程的搭设	128
第五节 球壳板的运输、吊装与堆放	129
一、球壳板运输	129
二、球壳板吊装	129
三、球壳板堆放	129

第五章 球罐组装

第一节 组装前的准备	130
一、球壳板复检	130
二、组装块、吊耳等临时件的焊接	131
三、基础验收	131
第二节 现场组装	132
一、散装法	132
二、分带组合法	137
三、半球组合法	140
四、三种组装方法的比较	142
五、组装的质量控制	142
第三节 球罐安装防护棚	144
一、防护棚的种类与作用	144
二、防护棚的结构	145
三、防护棚的搭设	145

第六章 球罐的焊接

第一节 金属的焊接性	147
第二节 焊接裂纹的产生与防止	149
一、焊接冷裂纹的产生与防止方法	149
二、焊接热裂纹的产生与防止方法	160
第三节 其它焊接缺陷的产生与防止	169
一、夹渣	169
二、未熔合	170
三、气孔	170
四、氢白点	170
五、咬边	170
第四节 再热裂纹的产生与防止	171
一、再热裂纹的特征	171
二、再热裂纹的形成条件	171
三、影响再热裂纹的因素	172
四、几种压力容器用钢再热裂纹的试验结果	175
五、再热裂纹的防止方法	175

第五节 焊接接头的韧性控制	175
一、焊缝金属的韧性及其控制	176
二、焊接热影响区的韧性控制	189
第六节 低温钢焊接	199
一、焊接方法与填充材料的选择	202
二、低温钢焊接要点	202
第七节 焊接管理	204
第八节 对接焊缝名称及编号	205
一、球壳板各带名称及代号	205
二、焊缝编号的原则	205
三、焊缝名称及代号的表示方法	205
第九节 固定焊与定位焊	210
一、固定焊	210
二、定位焊	210
第十节 支柱与赤道板的组焊	211
一、用散装法时支柱与赤道板的组焊	211
二、用半球法和分带法时支柱与赤道板的组焊	211
第十一节 焊条的烘干与保管	212
第十二节 焊接方法与工艺	213
一、焊接方法	213
二、焊接工艺	214
第十三节 预热、后热及线能量的选择	218
一、预热温度的选择	219
二、焊后消氢的加热温度	220
三、线能量的选择	221
第十四节 焊接工艺规范	223
一、焊接顺序	223
二、焊接操作要点	225
三、焊接规范的制订	226
四、碳弧气刨清根与打磨焊缝	227
第十五节 缺陷的修复	228
一、球壳板缺陷的修复	228
二、焊缝缺陷的修复	230

第七章 球罐的无损检验

第一节 概述	232
第二节 球罐的射线探伤	233
一、射线探伤在球罐上的应用	233
二、球罐的 α 射线探伤	233
三、球罐的 γ 射线探伤	268
第三节 球罐的超声探伤	272

一、超声探伤在球罐上的应用	272
二、球罐超声探伤方法	276
第四节 球罐的磁粉探伤	284
一、磁粉探伤在球罐上的应用	284
二、球罐磁粉探伤方法	285
三、验收标准	290
第五节 球罐的液体渗透探伤	291
一、渗透探伤在球罐上的应用	291
二、液体渗透探伤方法	291
三、验收标准	294
第六节 声发射在球罐检测方面的应用	295
一、压力容器AE检测特点	295
二、AE技术在球罐建造及使用中的应用范围	296
三、球罐的AE检测方法	296
四、球罐水压试验时AE检测应用实例	301

第八章 球罐的焊后热处理

第一节 焊接残余应力及其影响	313
一、焊接残余应力的产生	313
二、焊接残余应力的分布和大小	314
三、焊接残余应力的影响及危害	315
第二节 焊接残余应力的消除方法	317
简介	317
一、机械处理消除残余应力法	317
二、焊后热处理消除残余应力法	318
第三节 焊后热处理的作用及机理	320
一、焊后热处理的目的	320
二、焊后热处理消除残余应力的机理	320
三、焊后热处理改善机械性能的作用和存在的问题	321
第四节 球罐焊后热处理工艺参数的正确制定	325
一、是否需要焊后热处理的条件规定	325
二、焊后热处理温度的确定	326
三、焊后热处理保温时间的规定	330
四、温度差的规定	331
五、加热速度的规定	332
六、冷却速度的规定	332
七、不锈钢的焊后热处理规定	332
第五节 球罐现场整体热处理高速	

喷嘴内部 燃烧法	333	一、裂纹走向及断口分析	389
一、高速喷嘴及其喷射引风装置	334	二、球罐焊接质量的外观检查	390
二、供油系统及其控制阀组	336	三、焊缝的无损检验	390
三、高压雾化风供应系统及其阀组	337	四、焊接热影响区硬度和金相组织检查	390
四、点火器及其燃料供应系统	337	五、主断裂源区B ₁ 板韧性测定	392
五、球罐热处理的保温设施	338	第三节 影响球罐焊接热影响区氢	
六、球罐热处理的测温系统	339	致裂纹的因素	392
七、球罐热处理加热和冷却过程中的		一、焊缝扩散氢含量的测定	393
柱脚移动装置	340	二、预热温度对焊接热影响区硬度及组织	
第六节 球罐热处理工艺操作及		的影响	393
施工 管理	341	三、用插销试验研究球板焊接热影响区氢	
一、制定热处理施工方案	341	致裂纹敏感性	394
二、热处理前的准备	341	四、铁研试验	396
三、热处理的点火	341	五、窗口拘束裂纹试验	397
四、热处理的温度控制	342	六、应力腐蚀的影响	399
五、热处理加热过程中应注意的问题	342	第四节 结 论	399
六、球罐热处理举例	343		
第七节 球罐焊后热处理前后的性能		第十一章 交 工 验 收	
检验及交工验收	344	第一节 验收项目的一般要求	400
一、球罐热处理的机械性能检验	344	第二节 验收的基本内容	400
二、热处理前后的金相检验	346	一、球罐零部件的验收	400
三、热处理前后的X射线应力测定	347	二、现场组装验收	402
四、焊后热处理的交工报告	347	三、焊接质量验收	402
		四、焊缝检验验收	403
第九章 球罐安全评价与断裂失效分析		五、现场焊后整体热处理验收	403
第一节 有关的断裂力学基础知识	349	第三节 产品焊接试板的检验	404
一、线弹性断裂力学基础知识	349	一、产品焊接试板验收的基本内容	404
二、弹塑性断裂力学的一些概念	356	二、产品焊接试板检验	404
第二节 含缺陷球罐的安全性评定	362	三、试样不合格时的处理	405
一、CVDA-84规范的适用范围	362	四、产品焊接试板检验的验收资料	405
二、缺陷评定方法	363	第四节 耐压试验和气密性试验	405
三、CVDA-84规范的可靠性	371	一、耐压试验和气密性试验的基本内容	405
四、球罐缺陷安全评定举例	373	二、耐压试验	405
第三节 球罐断裂失效分析	376	三、气密试验	407
一、球罐断裂失效方式	376	四、在耐压试验和气密试验的过程中应	
二、球罐断裂失效分析的步骤和方法	381	注意的问题	408
三、球罐断裂失效分析举例	385	五、耐压试验和气密性试验的验收资料	408
		第五节 总交工验收	409
第十章 吉林市球罐破裂事故分析		一、验收时应提交的资料	409
第一节 球罐的建造与使用概况	387	二、交工验收表格	409
第二节 球罐破裂事故分析	389	主要参考文献	419

第一章 球罐的概述与设计

第一节 概 述

由于近代科学技术飞速发展,压力容器技术逐步形成一门跨学科的独立学科。压力容器的设计、制造、安装、检测、试验以及使用管理等各方面的技术水平均有明显的提高,规范不断完善,新材料及新的制造、安装工艺不断充实提高,各种检测、试验的新技术和新设备广泛被采用,从而使压力容器技术更为安全、先进和合理。

随着石油、化工、冶金、城建、轻工和核能等工业以及空间与海洋科学的日益发展,压力容器的应用范围更趋广泛。其中球形压力容器与其他形式压力容器相比具有明显的优越性,从60年代开始在我国广泛应用。例如:在石油、化工、冶金、城建及国防工业中,利用球形容器贮存液氨、液化石油气(LPG—即重碳氢化合物,如丙烷、丙烯、正丁烷、异丁烷及其混合物),液化天然气(LNG)、液氧、液氮、液氢以及贮存各种压缩气体等。

用来贮存各种介质的球形容器,我们把它统称为球罐,本书将着重讨论这方面的内容。

一、球罐的优缺点

随着工厂规模及单机设备处理能力向大型化方向发展,贮存有压力的气、液相介质的容器也趋向大型化,球罐在容器大型化方面具有独特的优越性。

六十年代初,在石油、化工、城建、冶金等工业中采用球罐作为贮存容器的数量极少,而且容器均很小,一般不超过 400m^3 ,轻工系统的球形蒸发器及化工系统的球形反应器占的比例较大。七十年代中期后球罐的应用日益增多,而且单体容积越来越大。目前国内用国产钢制作的液化石油气球罐容积大多已为 1000m^3 ,用国外引进钢板,国内自己组装的液氨球罐容积已达 8250m^3 ,天然气球罐容积最大为 10000m^3 。

1. 球罐的优点

(1) 与同等容量的圆筒形容器相比,球形容器的表面积最小,故球罐板面积小。以下用设计压力为 1.6MPa ,介质为液化石油气、设计温度为常温、容积分别为 400m^3 、 1000m^3 球罐与由若干个 100m^3 其总容积相等的卧罐相比较,见表1-1。

(2) 球罐受力均匀。在相同直径和工作压力下,其薄膜应力仅为圆筒容器的环向应力的二分之一;故板厚仅约需圆筒形容器的二分之一;使得球罐用料省,造价低。材料的消耗对比见表1-2。

(3) 球罐与同样容积的圆筒形容器相比,由于球罐的风力系数约为0.3,而圆筒的风力系数约为0.7,这样球的受风面积要小;所以对风载荷来说,球罐比圆筒形容器安全得多。

圆筒形与球形贮罐面积对比

表 1-1

型 式	球 形 贮 罐		卧式圆筒形贮罐	
	400m ³	1000m ³	100m ³	
规 格	φ 9200 × 30	φ 12300 × 40	$\phi 3000 \times \begin{matrix} 18 \\ 20 \end{matrix}$ $L = 14840$	
单体内表面积(m ²)	266	476	145.6	
总 容 积 (m ³)	408	970	4 × 100 = 400	10 × 100 = 1000
总内表面积(m ²)	266	476	582.5	1456

圆筒形容器与球罐的材料消耗对比表

表 1-2

总 容 积 (m ³)	圆 筒 形 容 器 (A)		球 罐 (B)	钢材消耗对比
	以100m ³ 单重	总 重 (t)	(t)	(B/A)
400		88	66	0.75
1000	22	220	156	0.71
2000		440	301	0.69

(4) 球罐基础简单、工程量小、且建造费用便宜。

(5) 由于球罐容积大，在总容积一定情况下，球罐数量大大减少；这样相应的工艺管线、阀门及附件等的数量也相应减少。除节省投资外，给操作、管理带来极大方便。

从上述球罐的优点来看，可以得出球罐建造得越大，优越性体现得越明显。但是球罐也有它固有的缺点，从而限制了它无限制的向大型化方向发展。

2. 球罐的缺点

(1) 受国家原材料供应（包括板材厚度、规格尺寸及性能等）的限制程度严格；

(2) 与圆筒形贮罐比较，制造、安装均较困难；

(3) 球罐几乎全是现场组装和焊接，条件差而技术要求高；

(4) 由于国内钢材品种少、规格尺寸偏小，球罐板幅小，使得焊接长度偏长，增加了工作量；

(5) 现行规范多且不统一，检验工作量大，要求严格。

综上所述，我国在近期内建造的球罐要向大型化方向进展，还有许多方面问题有待解决。

目前完全采用国内现有材料（以16MnR为例），进行设计、制造、安装的球罐情况如下：

设计压力小于0.4MPa时最大能做到5000m³；

设计压力小于或等于1.6MPa时最大能做到2000m³；

设计压力大于1.6MPa时最大能做到400m³。

二、球罐的分类

根据球罐的用途分析,球罐大体可分为三类:

- 1.在高、中压、常温情况下使用的球罐,如贮存液化石油气、天然气、氨、氧、氮、氢等气体的球罐;使用压力大多为 $1 \sim 3 \text{ MPa}$,使用温度为常温。
- 2.在中、低压、低温情况下使用的球罐,如贮存液氨、乙烯、丙烯等介质的球罐,使用压力为 $0.4 \sim 2 \text{ MPa}$,使用温度为 $-20 \sim -100^\circ\text{C}$ 。
- 3.在低压、深冷情况下使用的球罐,如贮存 -100°C 以下液化气等介质的球罐,使用压力极低,使用温度为 -100°C 以下。为了防止与大气温度接触进行热交换,以达到保冷效果,多数采用双重球罐。

由于低温贮存所需费用很大,而且是急冷的罐费用极大。这方面应考虑的影响因素很多,如绝热措施问题、用材问题、焊接问题、经济性问题等等。各国根据各自的条件,规定有所不同,如西德把贮存液化气体的球分为两类,其彼此的分界线为 -150°C ,即温度在 -150°C 以上可以采用简单的单层加保温层球罐;在 -150°C 以下,为了更好地保持低温,就必须采用双重球罐。

三、球罐的型式

球罐的型式,从外观形状来分,有圆球型、椭球型。从球壳板组合情况来分,有足球瓣型、瓜瓣型和混合瓣型。从球壳板厚度组合来分,有单层、多层、双金属层和双重(二个单层)壳球罐等。本书仅对国内外常采用的单层球型罐作一介绍。

1. 足球瓣型球罐

如图1-1所示,其球壳板的划分和足球壳一样,各瓣片尺寸大小相同,所以又叫均分法。由于每块球壳板不能拼接,且各国厚板板材规格尺寸的限制,足球瓣型球罐一般容积不超过 400m^3 ,即直径不超过 9200mm 。

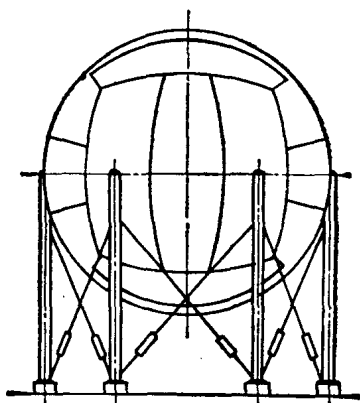


图 1-1 足球瓣型球罐

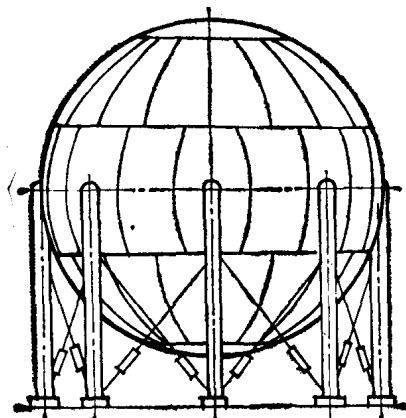


图 1-2 瓜瓣型球罐

2. 瓜瓣型球罐

如图1-2所示,其球壳板的划分如西瓜瓣一样,为一常用的结构型式,随着容积及直径的变化,可增减球壳的分带数量,常有分带数有三带(上极带、赤道带、下极带)、五

带（上极带、上温带、赤道带、下温带、下极带）、七带（上极带、上寒带、上温带、赤道带、下温带、下寒带、下极带）三种。一般容量为 50m^3 到 10000m^3 、直径为 4600mm 到 27400mm 的，球罐均可采用这种型式。

3. 混合型球罐

如图1-3所示，其上、下部分球壳板划分为足球瓣型、中部球壳板划分采用西瓜瓣型混合组成。一般容量为 100m^3 到 2000m^3 ，直径为 6100mm 到 15700mm 的球罐可采用这种型式，是一种球壳板划分新方法。

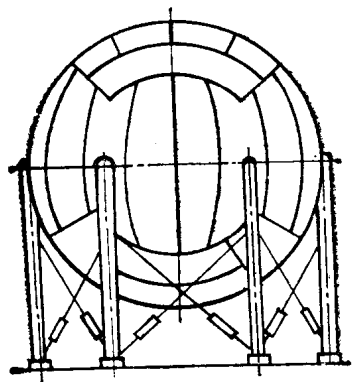


图 1-3 混合型球罐

出现这些球壳划分方法的原因主要在于充分利用钢板规格、减少焊缝长度，缩短焊接和检验工期，便于加工安装和运输等等。

圆球形球罐无论它的球壳由何种形式组成，其球壳板之间的连接均采用对接型式焊接连接。同时，球罐上各配件（如接管、人孔、支柱、垫片等）的连接，也是采用焊接连接。

球罐承受内压时，沿整个球体切线产生均匀的应力。在没有压力时，球的上半部为一圆顶，下半部象是一个悬挂的半球形底。整个球体还起着将金属本体（包括附件）和盛装介质的载荷由本体传向支柱的圆形曲梁作用。

球罐本体及贮存介质的重量均是靠沿本体赤道安装的若干根管状支柱来支承的；支柱间的拉杆是为了承受由于地震力，风力等载荷所引起的水平力而设置的，为便于安装和调整拉紧程度，一根拉杆必须做成两节，中间以一可调松紧结构的连接件来连接。支柱通过底板分别固定在混凝土基础上，支柱和基础均能承受球罐本体和贮存介质的总重量，同时还要能承受地震力，风力等载荷所引起的水平力。

四、球罐的发展简况

1. 发展概况

用于贮存气相介质的大型低压容器，从十九世纪末期就已开始。而在工业中用球罐来贮存工业介质的历史不长。当时，由于球罐这种理想容器形状的制造技术复杂、需要进行较为严格的试验。检查的技术和手段不完善等原因，在五十年代前，球罐的应用还处于无足轻重的地位，世界上仅有少数几个国家，如美国在1910年、西德在1930年分别建造了有限的几台低压小型球罐，其结构均为铆接结构，由于铆接结构不但费工而且费料（一般铆接搭接部分，所需钢板重量占壳体总重量的 $13\sim 17\%$ ，所需铆钉重量占壳体总重量的 $4\sim 6\%$ ），同时严密程度差，制造极为困难，给球罐发展带来了很大阻滞。

五十年代初，随着焊接工艺的不断进步及适合焊接的钢材不断开发，球罐结构由铆接改向焊接结构，球罐才得到初步发展：如美国于1941年、苏联于1944年、日本于1955年、西德于1958年均分别建造了一些压力较高、容量较大的球罐。

球罐的进一步发展，是从六十年代以至现在。在这段时间中，日本的球罐发展最为突出。据日本机械日报报道，1965~1970年日本建造的球罐就达4135台。在1962年以前，液

化气球罐的容积均在 2000m^3 以下,在1962年建成了容积为 3000m^3 的液化气球罐,1965年达到了 5000m^3 ,现在已能生产容积为 20000m^3 以上的球罐,至1971年,在日本,单层球罐的总数已超过10000台。在西德,某公司从1965年到1970年共建成球罐100余台,其中直径最大为44m,容积为 43300m^3 。1966年在法国建成了直径为55m,容积为 87000m^3 的大型球罐。一些国家还进行了双重壳低温、深冷球罐及运输液化天然气的深冷大型船用球罐的建造工作,均取得重大进展。

从以上发展简况可以看出,球罐的建造虽然开始于本世纪初,但发展较晚(五十年代后期)。其进程先是低压、常温、气体介质、小型,其后是中高压、低温、液化气介质、较大型,六十年代以来已发展到中高压、极低温、各种介质、更大型的范围。

我国制造球罐始于六十年代初,其历史较短,与国外先进国家相比,无论是建造数量,还是单球容量大小方面,均有一定差距。随着我国工业建设的发展,我国球罐发展速度还是相当快的。

为满足我国日益发展的工业、城建、科研和国防需要,结合国内的具体情况,已制造了各种不同规格和用途的球罐约2000台左右。这些球罐的最大直径为15700mm,工作压力范围为 $0.4\sim 3\text{MPa}$,贮存介质有氨、氮、氢、氦气、液化石油气、丙烯、乙烯、天然气等,所使用的材料有A3R、20g、16Mn、16MnR、16MnReR、15MnVR、15MnVNR等。近年来又引进了一些较大型的球罐,如贮存液氨的球罐直径为25100mm,容量达 8250m^3 ;贮存天然气的球罐直径分别为21200mm和27400mm,容积分别为 5000m^3 和 10000m^3 。

2. 国内的球罐系列标准

自七十年代后期,球罐在我国发展比较快,为了简化设计,便于制造和安装,我国于1968年颁布了JB1117—68《球形贮罐基本参数》部颁标准。标准中规定球罐公称容积有50、120、200、400、650、1000、2000、3000、4000、 5000m^3 十种规格,相应球罐内径为 $\phi 4500$ 、 $\phi 6100$ 、 $\phi 7100$ 、 $\phi 9200$ 、 $\phi 10700$ 、 $\phi 12300$ 、 $\phi 15700$ 、 $\phi 18000$ 、 $\phi 20000$ 、 $\phi 21200$ 。公称压力在 $0.4\sim 3\text{MPa}$ 范围内。支座型式为赤道正切柱式支座,并规定了球罐壳体分带数、各带球心角及各带分块数。其具体系列标准见JB1117—82《球形贮罐基本参数》。为了查阅方便,我们将此标准列入本章附录中,见附录一。

3. 球罐的发展动向

从球罐建造的进程可以看出,随着球罐各种规范的不断建立,设计工作可做到既安全又合理,新材料不断开发,焊接、制造、安装、检验技术的不断进步,球罐也正向着结构多样化,应用范围日愈广泛、高参数的方向发展。其中最为突出的还是球罐容积大型化。大型化后,带来了很大的经济性。

(1) 大型化的动向

球罐大型化始于六十年代中期,到七十年代中期已达到相当水平。

从生产球罐较多的国家日本来看,根据日本机械统计月报,1965~1970年化工装置用球罐产量如表1~3所示。

表1-3中虽然仅列有台数,平均每台重量,而未表示出各台球罐的规格大小,大容量球罐占多大比例,容量大到什么程度,但还是不难从表中分析出,从1968年起其中大容积球罐所占的比例是急剧增加的,从1965年~1970年的整个趋势来看是向大型方向发展的。

日本1960~1970年球罐产量

表 1-3

年 度	台 数	重 量 (t)	平均每台重量(t)
1965	420	5805	13.8
1966	631	10669	19.9
1967	853	13951	16.4
1968	544	15879	29.2
1969	715	18313	25.7
1970	912	24248	25.0

我国到目前为止,除引进了一些大型球罐外,六十年代中期所建球罐容量一般为50~200m³;七十年代所建球罐容量大部分为400m³,八十年代所建球罐中容量为1000m³占的比例较大。虽然这些球罐单罐容量与国外相比还很小,达不到大型化的程度,但从我国整个球罐的建造进程来看,球罐建造大型化的趋势是很明显的。

(2) 大型化的经济性

球罐大型化带来的经济性是显而易见的。用同样贮存一定量的某种物料(即压力,温度等设计参数不变),用同一种材料(对于小贮罐,由于板厚的关系,选用材料强度可以低一级,这样比较时,对比性差一些),分别以一台大型球罐与分成二台和数台中小球罐(总容量不变)来贮存的经济性比较,可以从容器本身的建设费用,必需的占地面积,所需附属设备费用(包括工艺管道、人孔、法兰、阀门等)和维护保养费用等方面来综合考虑。

表1-4是以贮存总气量30万Nm³气体为基准的比较。

在压力为10kgf/cm²下,贮存30万Nm³气体

表 1-4

所 需 台 数		1	2	20
使 用 材 料		WEL-TEN80	WEL-TEN60	SB42B
每台容积规格	直径(m)	38.6	30.6	14.2
	几何容积(m ³)	30000	15000	1500
	板厚(mm)	35	37	35
钢材总重量(t)		1400	1900	4500
所需占地面积(m ²)		3600	4500	14500
钢材重量比率		1	1.35	3.2
占地面积比率		1	1.25	4.0
附件的比率		1	2	20

表1-5是贮存总容量为50000Nm³天然气体为基础的比较。

由表1-4及1-5可知,在同压力、同材质情况下,采用一台大型球罐或采用数台中小型球罐,其钢材总耗量大体相近。然而,采用数台中小型球罐时,所需的占地面积,附件等的比例将会增加。同时,由于台数增加球表面积增加,维护保养的工作量和费用等均随之增大。因此,用一台大型球罐要比用数台中小型球罐组合经济。

在压力为10kgf/cm²下, 贮存50000Nm³天然气

表 1-5

所需台数		1	5	25
使用材料		16MnR		
每台容器规格	直径(m)	21.2	12.3	7.1
	几何容积(m ³)	4989	975	188
	板厚(mm)	42	26	16
钢材总重量(t)		466	485	500
所需占地面积(m ²)		980	2145	4663
钢材重量比率		1	1.04	1.07
占地面积比率		1	2.2	4.8
附件的比率		1	5	25

有关国家球壳厚度计算公式

表 1-6

规范名称	球壳最小厚度计算公式	备 注
JISB8243 压力容器的结构	$t = \frac{PD}{400\sigma_o\eta - 0.4P}$	
日本高压气体监督 法规	$t = \frac{PD}{100f\eta - P}$	许用应力 f , 为材料抗拉强度或屈服强度的 (3.4-2 r)倍; γ ——屈强比
日本压力容器结构标准 ASME	$t = \frac{PD}{400\sigma_x\eta - 0.4P}$	σ_x 的取法 0.7 < γ ≤ 0.8 时 $\sigma_x = \frac{\sigma_s}{2.5}$; γ > 0.8 时 $\sigma_x = \frac{\sigma_s}{2.8}$ σ_s ——屈服强度 r ——屈强比
美国ASME 第八篇第1分篇	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	
英国BS1515	$t = \frac{PD}{4fJ - P}$	
法国SNCTTI	$t = \frac{PR}{2fz - 0.6P}$	
中国球形储罐设计规定	$t = \frac{PD}{4[\sigma]\varphi - P}$	$[\sigma] = \sigma_s/n_s$ $n_s = \frac{1}{0.5(1.6 - r)}$ r ——屈强比

注: 公式中 P ——设计压力;
 D ——球罐内径;
 R ——球罐内半径;
 t ——计算球壳板厚度;
 η 、 E 、 J 、 z 、 φ ——均表示焊缝系数;
 σ_o 、 σ_x 、 f 、 $[\sigma]$ ——均表示材料的许用应力。

(3) 大型化的界限

球罐大型化的进程,在不同国家、不同时期内,受着不同因素的制约。随着科学技术的不断发展,这些制约因素不断得到解决,球罐大型化随之不断发展。

尽管各国规范中,对承受内压的球罐,球壳厚度计算公式不尽相同(见表1-6),但总的来看出入不大。

下面以我国标准中给出的公式为例进行分析,可以看出影响球罐大型化的因素不外乎有以下几个方面:

1) 球体板厚的影响:球罐大型化的界限,从结构设计上来看,可由球壳板厚度来确定。

由于大型球罐壁厚较厚,组装、焊接工作均是在现场进行,如何消除焊接区应力是一项较困难的工作,针对这一问题,绝大多数国家在规范中均规定了不进行应力消除时的可焊板厚,即超过此规定的板厚就必须做热处理工作(板厚仅为需做热处理的条件之一)。如在美国ASME规范中规定低碳钢为32mm,英国BS1515规范中规定低碳钢为38mm,日本的法规中没有明确规定,一般规定为40mm,16MnR为30mm,15MnVR为28mm。

由于我国冶炼技术还跟不上需要,压力容器专用钢种很有限,其中高强钢更缺乏。钢材本身综合性能差,当厚度达到一定极限,性能就不能保证。而且制造不了大吨位、大规格尺寸的钢板(主要指板宽),因此我国根据国内具体情况在《球形储罐设计规定》中作了壁厚小于或等于50mm的规定。这些均给我国球罐大型化带来了极大的限制。

球罐的直径由下式计算求得:

$$D = \frac{(4[\sigma]\varphi - P)(t - c)}{P} \quad (1-1)$$

式中 D ——容器的内直径, mm;

P ——最高工作压力, MPa (kgf/cm²);

t ——板厚, mm;

$[\sigma]$ ——许用应力, MPa (kgf/cm²);

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s} \text{ MPa (kgf/cm}^2\text{)}$$

σ_s ——钢材在常温下的屈服点, MPa (kgf/cm²);

n_s ——安全系数,

$$n_s = \frac{1}{0.5(1.6 - r)}$$

r ——钢材的屈服点与抗拉强度之比值;

φ ——焊缝系数;

c ——腐蚀裕量, mm。

从计算公式中可知,当选用材料确定、设计压力不变的情况下,球罐直径与球壳板厚度成正比,即球壳板厚度愈厚,球罐直径可以做得愈大。

例如以8kgf/cm²的压力贮存天然气时,材料选用16MnR,板厚为30mm。试求球罐的直径和容量。