

球形储罐 焊接工程技术

主 编 王嘉麟 侯贤忠
副主编 刘家发 李 友



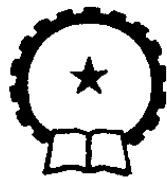
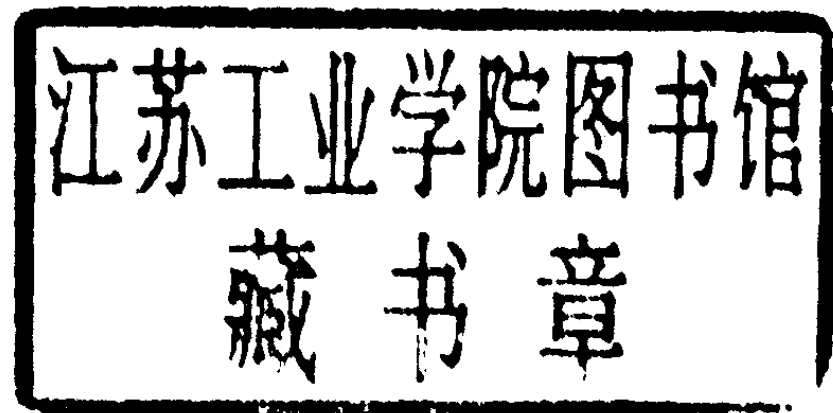
机械工业出版社
China Machine Press

球形储罐焊接工程技术

主 编 王嘉麟 侯贤忠
(教授) (教授级高工)

副主编 刘家发 李 友
(高工,总工) (副教授)

主 审 郭燕杰 王兆清
(教授) (研究员)



机 械 工 业 出 版 社

本书以 GB50094—98《球形储罐施工验收规范》为依据,系统全面地论述了球罐焊接的理论和工程实践中所涉及的技术问题。全书共分六篇十二章,第一篇球罐的设计和材料,共三章包括球罐概论、球罐的设计、球罐用钢;第二篇球壳板的工厂制造及球罐组装,共两章包括球罐的工厂制造、球罐的组装;第三篇球罐的焊接工程,共两章包括球罐焊接的物理冶金、球罐的焊接;第四篇球罐焊接残余应力的发生与对策,共两章包括球罐焊接残余应力的产生与消除、球罐的焊后热处理;第五篇球罐的焊接质量检测、交工验收,共两章包括球罐的无损检测、球罐的质量控制与交工验收;第六篇球罐的安全评定与失效分析共一章,包括球罐的脆性断裂分析及安全评定。全书以 2000m³ 球罐焊接工程实践为实例贯穿始终。

本书可供从事球罐焊接或压力容器设计、制造和研究以及从事焊接工程的科技人员使用,亦可做为高等学校材料加工工程专业和化工机械专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

球形储罐焊接工程技术/王嘉麟,侯贤忠主编. —北京:
机械工业出版社, 1999. 12

ISBN 7-111-07654-0

I. 球… II. ①王…②侯… III. 球形储罐-焊接-技术
IV. TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 66005 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:俞逢英 版式设计:冉晓华 责任校对:韩 晶

封面设计:姚 毅 责任印制:路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16· 26.5 印张· 1 插页· 640 千字

0 001—3 500 册

定价:42.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

编写人员

林 磊	李 栋	王嘉麟	冯泽民
(高工)	(工程师)		(教授)
官云胜	刘立新	钱百年	刘家发
(高工)	(工程师)	(研究员,博导)	
陈怀宁	王全山	李 友	马恩甲
(研究员,博士)	(教授)		(副教授)
顾晶伟	孙树涛	罗 震	陈亮山
(高工)	(工程师)	(高工,硕士)	(研究员,博导)

序 言

球罐是以储存气体或液化气体为主要功能的压力容器，是复杂的焊接壳体结构。广泛应用于石油天然气、化工、石油化工、冶金、城建等工业领域。由于球罐大多储存易燃、易爆或有毒的介质，所以其制造质量及使用安全性始终被球罐理论界和产业界高度重视。随着我国经济建设的高速发展，不仅球罐需求数量在不断增加，而且趋向大型化，目前我国已建造了 10000m^3 的球罐，将来还会有更大容量的球罐出现。为使我国的球罐建造技术尽快赶上国际先进水平，适应国民经济发展的需要，则是我国球罐工程技术人员义不容辞的责任。因此，出版一本系统论述球罐焊接理论与工程实践的专著，具有重大意义。

我国球罐工程界王嘉麟教授和侯贤忠教授级高工等一批长期从事球罐研究、设计和焊接工程的教授、专家和工程师们，为适应当今知识经济时代的创新要求，大力推广球罐建造新技术，满足国内从事球罐工程技术人员需要，综合多年丰富的球罐建造科研成果、工程实践和信息，消化吸收国内外近年来在球罐工程中所出现的新技术、新工艺，并搜集了典型实例和相关文献，特别是结合刚修改过的球罐国家标准，编著了《球形储罐焊接工程技术》一书。

全书详细论述了球罐的设计、选材、球壳板制造、现场组焊、焊后整体热处理、质量检测、交工验收和安全评定等问题，涉及到了球罐焊接工程技术的各个方面，并首次将球罐焊接自动化技术、球罐现场焊后整体热处理的微机自动控制技术、无损检测的图像化技术以及一些新型球罐用钢等编入书中，内容丰富，是一本在深入理论研究和丰富实践基础上编写的具有可读性和实用性很强的著作。本书必将为广大球罐工程技术人员所欢迎，也将为提高我国球罐工程技术人员的技术素质和我国球罐的整体技术水平做出应有的贡献。

中国机械工程学会焊接学会理事长



1999年7月

前 言

球形储罐(以下简称球罐)是一种存储气体、液体或液化气体的压力容器。由于它具有其他储罐无法比拟的优点,因而被石油、化工、煤气和天然气、冶金等工业领域和相关产业广泛应用。近年来,我国球罐数量急剧增加,连世界屋脊城市拉萨也建成了球罐群。另外,球罐的大型化和高参数化的势头也锐不可挡,我国近年来主要靠引进建起了一批 5000m^3 、 10000m^3 的特大型球罐和低温球罐。可见,球罐作为一种装备在国民经济中已经占据重要而又不可忽视的地位。

球罐大多数用于储存易燃、易爆和有毒的液体和气体介质,一旦发生事故,不但球罐本身会遭到破坏,而且还会带来灾难性后果。因为,球罐壳体的破坏,必然会导致受压流体的迅速泄漏和释放,随之而来的就是大体积范围的爆炸和燃烧,所产生的冲击波也会破坏周围的建筑物和装备,还会造成大范围的中毒和难以扑灭的火灾,酿成生命财产的巨大损失并且严重污染环境。因此,球罐的建造与使用管理—球罐的安全性不仅引起各国科技界的高度重视,同时也得到各国政府的极大关注。

球罐是一个大型的、复杂的焊接壳体结构。以焊接为主要加工手段的球罐建造工程是一个复杂的系统工程。它涉及到结构设计理论、材料科学、塑性加工技术、焊接技术、热处理技术、无损检测技术、断裂力学等多个学科理论和技术领域。只有采取严格的科学态度,各学科的工程技术人员紧密配合,才有可能建造出高质量的、可以安全可靠使用的球罐。

40 多年来,为适应经济建设的发展,我国已形成一支庞大的球罐科技队伍,球罐的焊接工程技术也有了长足的进步和发展。特别是改革开放的 20 多年来,我国从一些发达国家陆续引进了相当数量的较先进的球罐,通过认真的消化、吸收,为我所用,使我国的建球技术水平又上了一个新台阶。在此基础上,我国建立了适合国情的球罐系列,制定了与国际标准接轨的球罐设计、施工验收规范等一系列国家标准,使我国的球罐建造走上了法制化的轨道。因此,近年来我国有不少建球企业获得 ASME 的认可,并有一定数量的球罐出口到发展中国家。

但是,我们不能不看到,由于诸多原因,与国际先进水平相比,我国的建球技术还存在较大差距。例如,我国球罐用钢板的定尺还较小,从而导致球壳板尺寸小、分块多、组合设计单调,这就加大了焊缝长度;我国球罐焊接至今仍以焊条电弧焊为主,焊接自动化程度极低;检测手段落后等等,这就使我国的球罐质量很难进一步提高。至今,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。

尽快使我国的球罐建造技术赶上国际先进水平,以适应下个世纪祖国经济腾飞的需要,是我国科技工作者的一项义不容辞责任。为此,我们邀集了多年从事球罐设计、焊接工程研究等方面的专家、学者和球罐工程实践经验丰富、造诣颇深的中青年工程师共同编写了《球形储罐焊接工程技术》一书。

本书是在《球形储罐建造技术》一书的基础上,以新颁布的 GB50094—98《球形储罐施工验收规范》国标为依据和主线,更加全面系统地论述球罐焊接工程的理论与实践,球罐焊接工程中所涉及的技术,特别是新技术。编者在编写过程中力求理论与工程实际的紧密结合,认

真总结我国多年来积累的丰富的建球经验和教训，并将国内外近年来在球罐工程中有价值的新技术、新方法以及最新科研成果收入本书，还介绍一些球罐焊接工程成功的实例。

本书共分六篇十二章。球罐的设计和材料篇共三章，第一章球罐概论、第二章球罐的设计由中国市政工程华北设计院林磊、李栋同志编写，第三章球罐用钢由东北大学王嘉麟、冯泽民同志编写。球壳板的工厂制造及球罐组装篇共两章，第四章球罐的工厂制造由大庆石油管理局建材公司官云胜同志编写，第五章球罐的组装由大庆石油管理局油田建设二公司刘家发同志和建材公司官云胜同志编写。球罐的焊接工程篇共两章，第六章球罐焊接的物理冶金由中国科学院金属研究所钱百年同志编写，第七章球罐的焊接由大庆石油管理局油田建设二公司刘家发同志和油田安装工程公司刘立新同志编写。球罐焊接残余应力的发生与对策篇共两章，第八章球罐焊接残余应力的产生与消除由中国科学院金属研究所陈怀宁同志编写，第九章球罐的焊后热处理由东北大学王全山、李友和马恩甲同志编写。球罐的焊接质量检测、交工验收篇共两章，第十章球罐的无损检测由大庆石油管理局建材公司顾晶伟同志编写。第十一章球罐的质量控制与交工验收由大庆油田化工总厂孙树涛同志和大庆石油管理局基建处罗震同志编写。球罐的安全评定与失效分析篇共一章，第十二章球罐的脆性断裂分析及安全评定由中国科学院金属研究所陈怀宁、陈亮山同志编写。全书由东北大学王嘉麟同志和大庆油化焊接研究所侯贤忠同志共同主编，刘家发同志和李友同志为副主编。限于编者的水平，本书必定会存在疏漏和错误，恳请广大读者批评指正。

本书主审郭燕杰教授和王兆清研究员，对书稿从结构层次、内容及文字进行了认真的审校，提出了许多宝贵的修改意见，对书稿质量的提高起到了很好的作用。他们的工作为本书能在一年的时间内就顺利出版起到了至关重要的作用，在此谨一并致以深深的谢意。

中国机械工程学会焊接分会理事长吴林同志，对本书的编写和出版很是关注，并为本书作序，在此谨致谢忱。

在此我们还要向本书所援引文献的原作者深致谢意，是这些中外文献资料作者的研究成果充实丰富了本书的内容。

编 著

常用符号、代号

符 号	意 义		
A	[放射性]活度, $/s^{-1}$	d	球罐中心线处内部垂直总高度, m 或 mm
A	容器受热面积, m^2	da/dN	疲劳裂纹扩展速率, mm/应力循环
A	梁、杆、板、支柱金属的横截面积, m^2	E	棱角值, mm
A_B	通过 B 点的水平面截得的球壳金属的横截面积, m^2	E	喷嘴雾风量, kg/h
α	材料的电阻温度系数	E	静放电时能量, J
α	热扩散率, m^2/s	E	弹性模量, MPa
a	裂纹半深度, mm	E	光照度, LX
α_{KV}	夏比 V 形缺口试样冲击韧度值, $J \cdot cm^{-2}$	E'	支柱材料弹性模量, MPa
α_{VN}	夏比 V 形试样冲击韧度值, $J \cdot cm^{-2}$	ΔE	钢卷尺修正量
B	焊缝熔宽, mm	e	等效应变, %
B	磁感应强度, T	e	支柱底板底面至拉杆与支柱中心线交点的距离, m 或 mm
B	燃料消耗量, kg	F	系数, 容器在地面上时 $F=1$
c	比热容, $J/(kg \cdot K)$	$FATT$	脆性转化温度, $^{\circ}C$
c_t	球罐在 t 温度下的比热容, $J/(kg \cdot K)$	F_{mas}	水平风载荷或水平地震载荷较大者, kN
C	腐蚀裕量, mm	F_1	拉杆水平分力, kN
C	电容, F	FTE	弹性断裂转变温度, $^{\circ}C$
C	应变时效敏感系数	FTP	延性断裂转变温度, $^{\circ}C$
C_2	综合影响系数, 通常取 $C_2=0.45$	f_1	风压高度变化系数
c	裂纹半长度, mm	f_2	球罐附件增大系数, 一般取 $f_2=1.1$
c	球面积雪系数, $c=0.4$	f_c	喷嘴风口截面积, m^2
C_f	表面裂纹率, %	f_s	支柱基础板与基础之间的摩擦因数
COD	裂纹尖端张开位移, mm	F_0	操作时每根支柱上的静载荷, kN
C_f	根部裂纹率, %	F_{gmax}	支柱承受总垂直载荷, kN
C_s	断面裂纹率, %	F_{gmax}	F_{g0max} 和 F_{gTmax} 中较大者
CST	凝固裂纹敏感性的临界应变增长率	F_{Tmax}	拉杆承受最大载荷, kN
$CTOD$	与 COD 同	F_d	球罐水平风载荷, kN
D_c	球壳的外直径, mm	F_c	球罐水平地震载荷, kN
D_{CP}	球壳平均直径, mm	g	重力加速度, m/s^2
D_i	球壳内径, mm	H	磁场强度, A/m
D_{i0}	球壳保温层外直径, mm 或 m	h	试样高度, mm
DT	动态撕裂	H_0	支柱底板底面与球罐中心的距离, m 或 mm
DTE	动态撕裂能量, J	h	半价层
DTR	失塑裂纹脆性温度区间	I	电流, A
d	晶面间距, μm	i	管电流, A
		I_a	支柱横截面惯性矩, m^4

J, J_{IC}	J 积分; 延性断裂韧度 kJ/m^2	R_0	样板的曲率半径, mm 或 0°C 时材料的电阻值
K	探头 K 值	R_T	$t^\circ\text{C}$ 时材料电阻值, Ω
K_1	风载体形系数, 取 $K_1=0.4$	r_2	过渡圆角半径, mm
K_2	风振系数	r_1, r_2, r_3	水平大圆赤道线
K_{IC}	平面应变断裂韧度, $10\text{N/mm}^{3/2}$	s_a	基础板外边缘至支柱外表面的距离, m 或 mm
k	装料系数	s	跨距, m 或 mm
k	保冷材料的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	s	距离, m 或 mm
L_1, L_2	单边焊缝长度, m 或 mm	s	拉杆两端销轴间距, cm
L_2, L_3	垂直大圆外周长, m 或 mm	s_B	B 点至球罐中心水平线的垂直距离, m 或 mm
L_m	燃料燃烧实际空气需要量, m^3/kg	s	水平位移, m 或 mm
L. P. G	液化石油气	s	刀口位移, mm
l_w	支柱与球壳连接焊缝单边长度, m 或 mm	T	周期
l	等效裂纹长度, mm	$T; t$	热力学温度, K; 摄氏度 $^\circ\text{C}$
l_1, l_2	焊缝较小直角边长度, mm	t_0	预热温度, $^\circ\text{C}$
M	弯矩, $\text{N} \cdot \text{m}$	T_g	特征周期
M_a	由水平风载荷引起的推倒弯矩 $\text{N} \cdot \text{m}$	t_r	脆性转化温度, $^\circ\text{C}$
N	循环次数	t_0	在泄放压力下液化气体的饱和温度, $^\circ\text{C}$
N	支柱数目	U	试样形变功, J
NDT	无塑性转变温度, $^\circ\text{C}$	U_0	载荷所做的功, J
$N\Delta L$	周长修正量	U_s	加载到 F_s 时系统吸收的能量, J
n	安全因数	u	在泄放压力下, 液化气体的质量内能, kJ/kg
n	散射比	u	熔化潜热, J/kg
p	设计压力, 最高使用压力, 最高许用工作压力, 最大工作压力, MPa	V	静电电压, V
p_B	操作状态下介质在 B 点处的静压力, kPa	v	气体在进气管内流速, m/s
P_{CM}	化学成分的裂纹敏感性指数, %	W_1	B 点以下球壳重力载荷, N
P_w	裂纹敏感性指数	W_{ol}	B 点以下介质重力载荷, N
p_g	基本雪压值, Pa	W_{Ti}	B 点以下水的重力载荷, N
p_{g0}	10m 高处基本风压值, Pa	W_X	某一化学组成 X 的质量分数, %
Q	容器的吸热量, J	W_6	支柱和拉杆重力载荷, kN
Q_H	燃料低发热值, kJ/kg	W_7	附件重力载荷, kN
$Q_{球}$	球罐吸热(有效)热量, kJ	$w_{Ni eq}$	Ni 当量的质量分数
Q_a	外界环境温度为 50°C 时从储槽表面输入的热量, kJ/h	$w_{C eq}$	IIW 碳当量公式
q_m	容器的安全泄放量, kg/h	$w_{Cr eq}$	Cr 当量的质量分数
R	支柱中心圆半径, m 或 mm	X	照射量 C/kg
R_0	0°C 时材料的电阻值, Ω	Z	单根支柱的截面系数, m^3
R_i	支柱的惯性半径, m 或 mm	α	膨胀系数, $\times 10^6/^\circ\text{C}$
R_a	表面粗糙度, μm	α	拉杆和支柱间夹角, 度($^\circ$)
R_B	弯曲拘束度, MPa	α_1	相当于球罐基本自振周期下的地震影响系数 α 值
R_F	拉伸拘束度, MPa	β	探头折射角, 度($^\circ$)
R_i	球壳内半径, m 或 mm		

β, θ, ϕ	夹角, 度($^{\circ}$)	ρ_4	保温材料体积质量, g/cm^3
Δ	拉杆中部的挠度, cm	σ	应力, MPa
ΔH	蠕变激活能, J/g	$[\sigma]$	许用应力, 公称计算应力, MPa
ΔK_{th}	疲劳裂纹扩展门槛值, MPa	σ_s	屈服点, MPa
ΔT_B	脆性温度区间	σ_b	抗拉强度, MPa
$\Delta \epsilon$	应变变化, 应变增量, $\mu\epsilon$	σ_{Ys}	总端面屈服应力, MPa
$\Delta \epsilon_m$	加工应变, $\mu\epsilon$	σ_x	纵向残余应力, MPa
δ	伸长率, $\%$	σ_y	横向残余应力, MPa
δ	保温层厚度, mm 或 m	$\sigma_{\min}$	最小应力, MPa
δ	球罐钢板的平均厚度, mm	$\sigma_{\max}$	最大应力, MPa
δ	球壳的实际厚度, mm	σ_r	切向应力, MPa
δ_0	球壳开孔处计算壁厚, mm	σ_r	径向应力, 残余应力, MPa
δ	钢板厚度, mm	σ_p	弹性极限, MPa
δ_0	接管的计算壁厚, mm	σ_m	相变应力, MPa
δ_b	球壳 B 点处壁厚, m 或 mm	σ_{mx}	x 方向相变应力, MPa
δ_s	包括腐蚀裕量的接管实际壁厚, mm	σ_{my}	y 方向相变应力, MPa
$\delta_{\min}$	焊缝凝固后期晶界塑性, $\%$	σ_{cr}	冷裂纹临界应力, MPa
ϵ	应变, $\mu\epsilon$	σ_{ey}	下屈服点, MPa
ϵ	焊缝凝固时的塑性应变, $\mu\epsilon$	σ_t	解理断裂应力, MPa
ϵ_c	蠕变应变弧量, $\mu\epsilon$	σ_0	操作状态下球壳应力, MPa
ϵ_x	横向应变, $\mu\epsilon$	σ'_s	t C 的屈服应力, MPa
ϵ_y	纵向应变, $\mu\epsilon$	$[\sigma_{bb}]_a$	基础底板材料的许用弯曲应力, MPa
η	焊接效率	$[\sigma]'$	球壳板的许用应力, MPa
θ	拉杆仰角, 度($^{\circ}$)	$[\sigma_b]_a$	支柱基础底板材料的许用压应力, MPa
θ_i	支柱的主位角, 度($^{\circ}$)	$[\sigma]_s$	耳板、翼板材料的挤压许用应力, MPa
θ_{i-j}	拉杆的方位角, 度($^{\circ}$)	σ_T	水压试验下球壳应力, MPa
λ	热导率, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$\tau_{\max}$	最大切应力, MPa
λ	波长, m	τ_s	抗切屈服点, MPa
λ	支柱的细长比	$[\tau]$	许用剪切应力, MPa
$\lambda_{\text{保}}$	保温被的热导率, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	τ_b	抗切应力, MPa
μ	泊松比	$\tau_{8/5}$	800 $^{\circ}\text{C}$ 至 500 $^{\circ}\text{C}$ 的冷却时间, s
ν	球壳材料泊松比	ϕ	压痕直径, mm
ξ_1	拉杆影响系数	ϕ	焊缝系数
ρ	体积质量, g/cm^3	φ	面缩率, $\%$
ρ_1	球壳材料体积质量, g/cm^3	ϕ	角焊缝的焊缝系数, 取 $\phi=0.6$
ρ_2	物料体积质量, g/cm^3		
ρ_3	水体积质量, g/cm^3		

目 录

序言	
前言	
常用符号、代号	

第一篇 球罐的设计和材料

第一章 球罐概论	1	三、强度计算	17
第一节 球罐的特点和分类	1	第五节 支柱和拉杆的计算	18
一、球罐的特点	1	一、载荷计算	19
二、球罐的分类	2	二、支柱计算	22
第二节 球罐的历史及发展	3	三、拉杆计算	28
一、球罐发展的历史	3	四、支柱与球壳连接最低处 B 点的应力验算	29
二、我国球罐发展的现状	3	五、支柱与球壳连接焊缝强度验算	30
三、球罐发展的方向	5	第六节 球壳的开孔补强计算	31
四、国内与国外的差距	6	一、补强设计准则	31
第二章 球罐的设计	8	二、开孔补强的结构形式	32
第一节 设计应遵守的设计标准规范	8	三、等面积补强设计	33
一、国内球罐的设计标准	8	四、弹塑性失效补强设计	35
二、国外球罐的设计标准	8	第七节 球罐的附件	37
三、设计基础资料	9	一、安全阀	37
第二节 球罐的结构设计	9	二、压力表	40
一、球罐本体	9	三、温度计	40
二、人孔与接管	9	四、液面计	42
三、支承结构	11	五、消防喷淋装置	42
四、梯子、平台	11	六、球罐的绝热保冷	43
第三节 球罐的设计步骤	12	七、球罐的防腐	44
一、储存能力的确定	13	八、球罐的防雷及防静电装置	44
二、设计压力的确定	13	主要参考文献	45
三、设计温度的确定	13	第三章 球罐用钢	46
四、主要受压元件用钢的确定	14	第一节 对球罐用钢的基本要求	46
五、厚度附加量的确定	14	一、球罐用钢的成分和性能特点	46
六、焊缝系数	14	二、球罐用钢的加工工艺性能	52
七、安全系数的确定	14	三、球罐用钢的耐腐蚀性能	52
第四节 球壳计算	15	四、应变时效与时效冲击韧度	53
一、球罐的设计方法	15	第二节 球罐用钢的冶金质量特点	54
二、载荷的种类	17	一、冶炼方法	54

二、钢板的内部质量要求	54
三、球罐用钢要求的提高和冶金 技术的进步	54
第三节 球罐用钢的物理冶金学分析	55
一、概述	55
二、球罐用钢的合金化	56
三、微量元素在球罐用钢中的作用	61
四、球罐用钢的热处理工艺与金相 组织	63
第四节 我国球罐用钢简介	65
一、概述	65

二、常用球罐用钢化学成分和性能 简介	65
第五节 低温球罐用钢	78
一、低温脆断概述	78
二、影响低温冲击韧度的因素	78
三、低温球罐用钢简介	83
四、几种常用引进低温球罐用钢简介	86
五、球罐用钢的最低工作 温度和冲击韧度	87
主要参考文献	89

第二篇 球壳板的工厂制造及球罐组装

第四章 球罐的工厂制造	90
第一节 球罐用材的复验	90
第二节 球壳板的计算及分辨方法的 比较	91
一、球壳板的尺寸计算	91
二、球罐分瓣形式的比较	93
第三节 球壳板下料板幅的计算	95
一、球面近似展开计算模型	95
二、各带板板幅计算	96
三、计算实例	97
第四节 球壳板的成形	97
一、冷压成形	97
二、温压成形	99
三、热压成形	99
四、滚压成形	99
五、液压成形和爆炸成形	99
六、压制及矫正成形模具	100
第五节 球壳板的下料及坡口加工	101
一、球壳板的一次下料法	101
二、球壳板的二次下料法	103
三、球壳板坡口加工半自动切 割胎的设计	109
四、球壳板坡口切割工艺及影响因素	112
五、热切割技术进展	114
第六节 支柱和接管与球壳板的组焊	115
一、罐体与立柱相贯部分的下料	115
二、立柱与赤道板的组焊	116
三、接管与极板的组焊	117

第七节 球壳板成形后的检验	117
一、球壳板曲率的检验	117
二、球壳板几何尺寸的检验	118
三、球壳板翘曲度的检验	120
四、球壳板与零部件组焊后的检验	120
五、几何形状不合格球壳板的矫正 成形	120
六、合格球壳板的坡口 防腐及检尺线打印	121
七、出厂资料	121
第八节 球罐球壳板的存放和运输	122
第九节 球罐球壳板制造举例	122
一、球罐概况	122
二、球壳几何尺寸	122
三、球壳板及坡口几何尺寸	122
四、球壳板二次下料放样尺寸	122
五、生产工艺流程图	122
主要参考文献	127
第五章 球罐的组装	128
第一节 组装方案的编制	128
一、编制依据	128
二、编制要求	128
三、组装方案内容	129
第二节 组装设备及工具	130
一、起重设备	130
二、中心柱	131
三、工夹具	131
四、脚手架	133

第三节 组装前准备	135
一、施工现场准备	135
二、基础验收	136
三、球壳板编号与摆放	136
第四节 支柱、定位块及吊耳安装	136
一、定位块及吊耳安装	136
二、支柱安装	138
第五节 组装方法	139
一、散装法	139

二、分带组装法	145
三、半球组装法	149
四、混合组装法	150
五、组装方法的比较与选择	150
第六节 球罐防护棚的安装	152
一、防护棚的种类与作用	152
二、防护棚的结构	153
三、防护棚的搭设	153
主要参考文献	155

第三篇 球罐的焊接工程

第六章 球罐焊接的物理冶金	156
第一节 金属的焊接性概述	156
一、根据钢材化学成分进行焊接性 评定	157
二、热影响区最高硬度法 (GB4675.5—84)	157
三、斜 Y 形坡口焊接裂纹试验法 (GB4675.1—84)	158
四、窗形拘束裂纹试验法	159
第二节 焊接冷裂纹的产生与防止方法	159
一、焊接冷裂纹的分布形态	160
二、焊接冷裂纹的特征	160
三、焊接冷裂纹的形成条件	160
四、影响焊接冷裂纹的因素	164
五、防止产生焊接冷裂纹的措施	167
第三节 焊接热裂纹的产生与防止方法	169
一、焊接热裂纹的分类	170
二、结晶裂纹	171
三、液化裂纹	175
四、失塑裂纹	175
第四节 其他焊接缺陷的产生与防止	176
一、夹渣	176
二、未熔合	176
三、气孔	177
四、氢白点	177
五、咬边	177
第五节 再热裂纹的产生与防止	177
一、再热裂纹的特征	177
二、再热裂纹的形成条件	178
三、影响再热裂纹的因素	179

四、几种压力容器用钢再热 裂纹的试验结果	180
五、再热裂纹的防止方法	180
第六节 焊缝金属的韧性控制	181
一、焊缝金属的韧性及其影响因素	181
二、焊缝金属的韧性控制	188
第七节 焊接热影响区的韧性控制	189
一、热影响区的相变特点及产物	189
二、影响热影响区韧性的因素	191
三、热影响区的韧性控制	196
四、典型球罐用钢焊接 HAZ 韧性	197
第八节 低温球罐用钢的焊接	197
一、概述	197
二、焊接方法与填充材料的选择	200
三、低温钢焊接要点	200
主要参考文献	201
第七章 球罐的焊接	203
第一节 焊接工艺编制	203
一、焊接工艺评定试验	203
二、焊接工艺规程编制与管理	204
三、球壳板与焊缝的编号	205
第二节 焊接材料选用与管理	208
一、焊接材料的选用	208
二、焊接材料烘干与管理	208
三、球罐气保护自动焊用焊丝	209
第三节 球罐焊接程序与要点	212
一、焊接施工程序	212
二、焊接施工要点	212
三、焊接环境要求	214
第四节 球罐的预热与后热	214

一、预热温度的选择	214
二、后热温度的选择	215
三、预热及后热加热器具的选择	217
第五节 固定焊及定位焊	217
一、固定焊	217
二、定位焊	217
第六节 球罐的焊条电弧焊	218
一、焊接工艺	219
二、焊接规范参数	224
第七节 球罐气保护自动焊设备与工艺	226
一、焊接设备	226
二、焊接工艺	229

三、焊接规范参数	232
四、焊接程序与操作要点	232
第八节 线能量选择	235
一、线能量的计算确定	235
二、线能量下限的测定(最高硬度法)	235
三、线能量上限的测定试验 (低温冲击试验法)	236
第九节 焊接缺陷的修补	237
一、球壳板缺陷的修复	237
二、焊缝缺陷的修复	238
主要参考文献	239

第四篇 球罐焊接残余应力的发生与对策

第八章 球罐焊接残余应力的

产生与消除

第一节 焊接残余应力的产生及其影响	240
一、焊接残余应力的产生过程	240
二、典型焊接结构中的残余应力分布	243
三、焊接残余应力的影响	247
第二节 焊接残余应力的测定	250
一、残余应力测定方法的分类	250
二、几种主要残余应力测定 方法的使用介绍	251
第三节 焊接残余应力的消除方法	263
一、消除焊接残余应力方法的分类	263
二、焊后热处理	264
三、过载处理	266
四、振动消除残余应力处理(VSR)	267
五、锤击处理(Hammer Peening)	268
六、爆炸消除应力处理	269
七、逆焊接加热处理	271
主要参考文献	272

第九章 球罐的焊后热处理

第一节 焊后热处理的作用及机理	274
一、焊后热处理消除残余 应力的作用及机理	274
二、焊后热处理对接头性能的改善 和存在的问题	277
第二节 焊后热处理方法简介	280
一、现场焊后整体热处理	280

二、局部热处理	280
三、炉内热处理	281
四、分件热处理	282

第三节 球罐焊后热处理工艺参数的

制定

一、焊后热处理的条件规定	282
二、焊后热处理温度的确定	282
三、焊后热处理保温时间的规定	285
四、温度差的规定	286
五、加热速度的规定	287
六、冷却速度的规定	287

第四节 球罐焊后热处理过程的热工

计算

一、球罐的热处理工艺设定	287
二、有关原始数据	288
三、热平衡计算	289

第五节 球罐现场焊后整体热处理

高速喷嘴内部燃烧法

一、高速喷嘴及其喷射引风装置	299
二、供油系统及其控制阀组	301
三、高压雾化风供应系统及其阀组	302
四、点火器系统	302
五、球罐热处理的保温设施	302
六、球罐热处理的测温系统	303
七、球罐热处理过程中的柱脚移动 装置	304

第六节 球罐焊后热处理工艺控制及

操作	305
一、热处理前的准备	305
二、热处理的点火	305
三、热处理的温度控制	306
四、加热过程应注意的问题	306
五、球罐热处理举例	307
第七节 焊后热处理效果评定	309
一、球罐焊后热处理工艺报告	309
二、球罐热处理的力学性能	309

第八节 球罐焊后整体热处理的 微机自动控制	311
一、球罐焊后热处理过程微机自动 控制系统的采用	311
二、提高微机自动控制系统的 可靠性方法	311
三、热处理过程微机自动 控制的功能和特点	313
主要参考文献	314

第五篇 球罐的焊接质量检测、交工验收

第十章 球罐的无损检测	315
概述	315
第一节 球罐的 γ 射线探伤	315
一、 γ 射线源及 γ 射线探伤设备	316
二、 γ 射线探伤机的操作	317
三、球罐 γ 射线全景曝光工艺	318
四、 γ 射线探伤工艺实例	321
第二节 球罐的X射线探伤	326
一、X射线探伤设备及参数的选择	326
二、X射线探伤方法	328
三、胶片的暗室处理	328
四、射线照相底片的评定	329
第三节 球罐的超声波探伤	329
一、球罐超声波探伤方法	329
二、数字化超声波探伤仪	338
第四节 球罐的磁粉探伤	339
一、球罐磁粉探伤的工艺方法	340
二、验收标准	344
第五节 球罐的液体渗透探伤	344
一、渗透探伤的操作程序	344
二、渗透探伤用材料	344
三、操作方法	344
四、验收标准	347
五、安全技术	347
第六节 X射线实时成像检测	347
一、X射线实时成像技术的发展	347
二、X射线检测计算机实时成像技术	348
第七节 工业射线底片数字化存储系统	350

一、系统的构成及原理	350
二、数字化底片存储的特点	351
主要参考文献	351
第十一章 球罐的质量控制与交工 验收	353
第一节 概述	353
第二节 球罐的设计质量控制	353
第三节 球罐施工的质量控制	356
一、施工队伍资质要求	356
二、球罐材料采购控制	356
三、球罐预制过程的质量控制	356
四、基础质量验收	358
五、现场组装的质量控制	358
六、球罐焊接质量控制	360
七、无损检测质量控制	362
八、现场焊后整体热处理质量控制	362
第四节 球罐质量检验	363
一、球罐尺寸检验	363
二、压力试验和气密性试验	365
第五节 交工验收	368
一、球罐交工验收的主要内容	368
二、球罐验收的标准	368
三、交工验收的依据	369
四、球罐验收组织机构	369
五、球罐验收的程序	369
六、验收应提交的技术资料	369
主要参考文献	370

第六篇 球罐的安全评定与失效分析

第十二章 球罐的脆性断裂分析

及安全评定 371

第一节 脆性断裂特征及其影响因素 371

一、应力状态 372

二、温度的影响 372

三、加载速度的影响 373

四、材料状态的影响 373

第二节 防断设计准则及相关试验方法 ... 373

一、抗开裂性能试验方法 374

二、止裂性能试验方法 378

第三节 防止脆性断裂的措施 381

一、选材 381

二、合理的焊接结构设计 382

三、合理安排结构制造工艺 382

第四节 球罐使用安全评定 383

一、断裂力学的基本概念 383

二、“合于使用”原则安全评定的 发展 386

三、CVDA—84 规范使用简介 389

四、我国压力容器安全评定 技术的某些新进展 395

第五节 球罐的断裂失效分析 397

一、球罐断裂失效方式 397

二、球罐断裂失效分析的步骤和方法 ... 399

三、吉林球罐破坏事故分析 400

主要参考文献 407

第一篇 球罐的设计和材料

第一章 球罐概论

第一节 球罐的特点和分类

随着我国石油、化工、轻纺、冶金及城市燃气工业的发展,作为储存容器的球罐,得到了广泛的应用和迅速的发展,在石化企业、国防工业、冶金工业及城市燃气中,用于储存液态丙烷、丁烷、丙烯、丁烯及其混合物(LPG)、液化天然气(LNG)、液氨、液氧、液氮、液氢等物料。例如在城市燃气中,球罐供气系统常用于储存液化石油气和天然气以及煤气,在钢厂中利用球罐储存氧气或氮气等,这都说明球罐作为储存容器而言,不仅应用广泛,而且具有很大的优越性。

一、球罐的特点

储存容器一般有圆筒形和球形两种,球形储罐一般由球壳板、支柱、拉杆、人孔、接管、梯子、平台等部件组成(见图 1-1)。作为球罐来说具有如下优点:

1) 与同等体积的圆筒形容器相比,球罐的表面积最小。

2) 球罐受力均匀,且在相同的直径和工作压力下,其薄膜应力为圆筒形容器的 $1/2$,故板厚仅为圆筒形容器的 $1/2$ 。

3) 由于球罐的风力系数为 0.3 ,而圆筒形容器约为 0.7 左右,因此对于风载荷来说,球罐比圆筒形容器安全得多。

因此,球罐具有占地面积少、壁厚薄、质量轻、用材少、造价低等优点。

此外圆筒形容器,由于其受内压后,内部的薄膜应力相对较大,故此,对于大型的圆筒形储罐其设计压力较低,如湿式或干式燃气的储罐,一般在几万立方米到几十万立方米之间,但其设计压力则为几千帕左右。如要求储存的压力较高,则圆筒的直径不能太大,因此,作为圆筒形容器对储存高压的介质的能力是有限的,国内一般的中、高压的卧式储罐最大也就做到 150m^3 左右。国外最近几年出现了枕形罐,即大直径的高压的卧式储罐,采用掩埋式的方式,但最大也就几千立方米。球罐因在受内压时薄膜应力分布均匀且相对较小,因此,能做到储罐单体

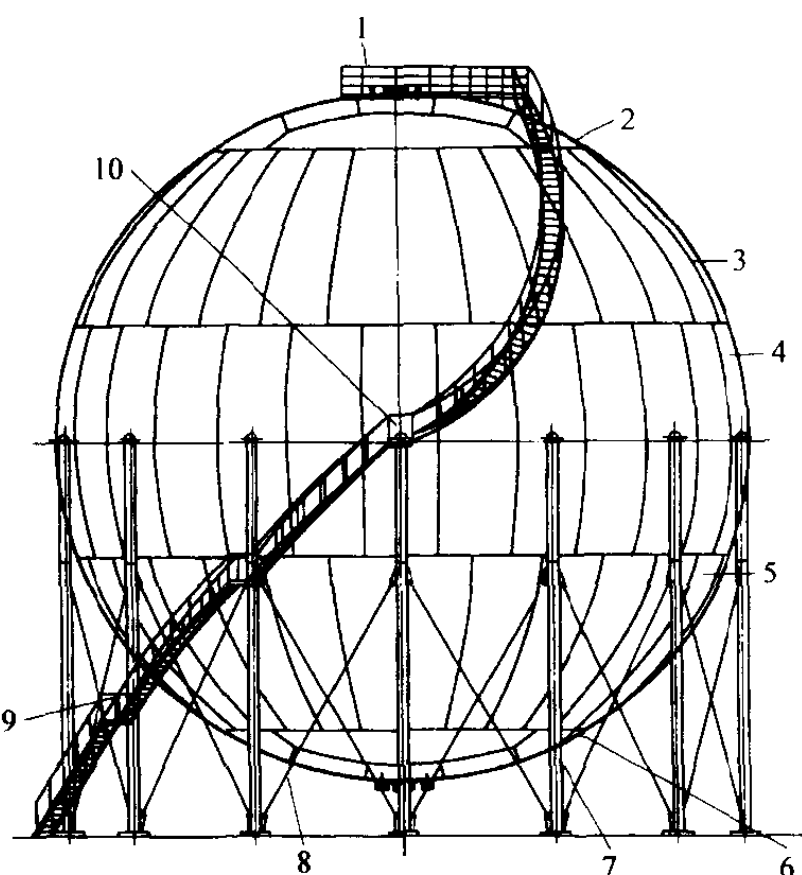


图 1-1 球罐

1—顶部操作平台 2—上部极带板 3—上温带板
4—赤道带 5—下部温带板 6—下部极带板
7—支柱 8—拉杆 9—盘梯 10—中间休息台