



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

无模液压胀球原理

Theory and Key
Techniques of Hydro-bulging
Spherical Vessels

与关键技术

● 王仲仁 苑世剑 滕步刚 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS





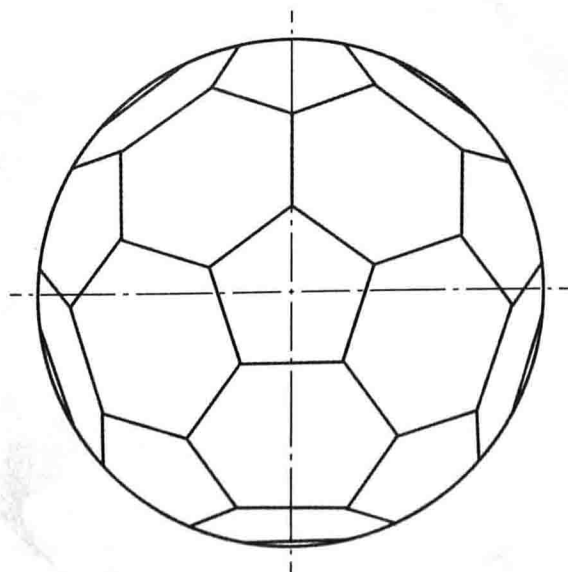
“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

无模液压胀球原理

Theory and Key
Techniques of Hydro-bulging
Spherical Vessels

与关键技术

● 王仲仁 苑世剑 滕步刚 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书阐述了壳体无模液压胀形的原理、关键技术和应用情况。此项技术曾经获得国家发明奖、国家科技进步奖及 36 届尤里卡发明博览会金奖。书中介绍了壳体无模液压胀形的思路、力学原理、壳体的典型结构和关键技术。

全书共分 8 章,分别阐明球形容器的无模液压胀形原理与典型结构、胀球前壳体结构设计、双层球形容器的无模液压胀形、不等厚球形容器的无模液压胀形、椭球形容器的无模液压成形、环壳的无模液压胀形、壳体内约束无模液压成形、无模液压胀形技术在液化气球形储罐及压力容器与建筑装饰制品中的应用。

本书主要供从事工业球罐、压力容器及建筑装饰设计与制作的技术人员和研究人员使用,也可供材料加工工程学科的师生参考。

Introduction

Theories, key techniques and the applications for die-less hydro-bulging vessels are mentioned in this book. This technology has won the national invention award, national science and technology progress award and the gold medal in the 36th eureka invention expo. The thoughts, mechanical theories, typical structures and key techniques of die-less hydro-bulging closed shell are introduced.

There are eight chapters in this book, including principle and structure for die-less hydro-bulging of spherical vessel, structure design of polyhedron shell before hydro-bulging, die-less hydro-bulging of double-layer polyhedron shell, die-less hydro-bulging of spherical vessel with non-uniform thickness, die-less hydro-bulging of ellipsoidal vessel, die-less hydro-bulging of ring shell, die-less hydro-bulging of shell with inner constraint, applications of die-less hydro-bulging in LPG tank, normal pressure vessels and architecture decoration products.

This book is useful for scientific and technical personnel in designing and manufacturing industrial spherical tank, pressure vessels, architectural ornament and intended as a reference for teachers, and students in colleges and universities.

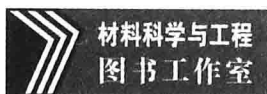
图书在版编目(CIP)数据

无模液压胀球原理与关键技术/王仲仁,苑世剑,滕步刚著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2014.7

ISBN 978-7-5603-4737-0

I. ①无… II. ①王…②苑…③滕… III. ①高压液体成型
IV. ①TG394

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 098834 号



责任编辑	何波玲
封面设计	高永利
出版发行	哈尔滨工业大学出版社
社 址	哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真	0451-86414749
网 址	http://hitpress.hit.edu.cn
印 刷	哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本	787mm×960mm 1/16 印张 13 字数 267 千字
版 次	2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5603-4737-0
定 价	36.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

从 1985 年用无模液力胀球法制造第一个直径为 600 mm 钢质“足球”至今已经 29 年了,该球目前已陈列在哈尔滨工业大学博物馆中。岁月如梭,往事历历在目。我记得这个制球方法从诞生那一刻起,就引起很多业内人士的浓厚兴趣,认为这种不用模具不用压力机的液力制球方法具有高柔性、低载荷、少投入的优点,与此同时也受到相关领域专家的高度赞扬,认为此法构思巧妙,便于实施。例如,我国塑性力学界的前辈王仁院士称赞无模胀球技术是将“塑性力学与压力加工结合的典范”。1985 年 6 月适逢建校 65 周年,日本东京大学木内学教授应邀来我校访问,他在参观实验室时我向他介绍了那个“足球”,并说明我们已对制造方法申请了专利。他很兴奋的是目睹了用全新方法制成的球体,而且中国也开始实施专利制度。在日语中用“特许”两字表示“专利”,回国后他在日本塑性加工界的权威杂志《塑性与加工》中发表了一篇题为“中国特许第一号?”的文章,文中报道了前述见闻,并附上图片(题目中的问号是表明不知道确切的专利号)。在 1990 年的 NAM-RC 北美制造研究会上,发表了我们的制球新方法论文,在会议的简介中将其列为 3 个亮点之一。后来,又在 1987 年的 36 届尤里卡发明博览会上获得了金奖;1992 年又得到国家发明奖。毫不夸张地说,无模胀球法的原创性是得到国内外公认的。

本人的科研理念是创新、务实与服务社会。我和弟子们一起走过了各类壳体无模胀形的研发之路,在本书的各个章节中分别介绍了主要研究结果、工程应用与关键技术。值得强调的是,本课题组的研究生特别是博士生已经不单纯是“学生”,而是 co-worker,是研究的主力,相当于“项目经理”,他们朝气蓬勃、不辞辛苦、全身心的投入,为无模胀形技术的发展做出了重要贡献。

方漪是第一个钢制“足球”的研制人,他推导了足球式结构边长与半径的关系式,直径 3 m 的“足球”很快被用到压力供水系统,此后在成都体育场建有大型足球雕塑,他还是青岛市的五四广场上的地标“五月的风”中的直径 7 m 球的技术负责人,如今该地标已是重要景观;张士宏是双层球无模胀形技术的研制人,已制成直径 1 350 mm 的双层球样件,为进一步产业化提供了范例,他还参加了国内多个球体的建造;苑世剑与董建令是世界上首座用无模胀球法生产 200 m³ 液化气罐的研制人,该球罐直径 7.1 m,壁厚 24 mm,材料为 16MnR。为了保证安全,苑世剑用 30 mm 厚的 16MnR 钢板模拟试件进行非常苛刻的拉伸试验,制定了合理的施工规范,董建令正确地设计了胀形前的单曲率壳体,该球罐于 1992 年投入使用,至今已

有 20 多年,仍正常运行。值得指出的是,在中间年检时所测焊缝附近的残余应力远低于用传统方法制造的球罐,这是由于无模胀球能使焊接残余应力“释放”。这项技术也曾引起国际上最著名的压力容器制造商美国的 CBI 公司关注,他们曾派两名工程师到现场考察,后来苑世剑教授在美国做访问学者期间该公司曾邀请他去做技术报告并讨论相关合作事宜。应该指出的是单曲率“篮球”形式后来已经是主要结构,成功地应用于大型水塔、建筑装饰和地标之中。

王风志是不等厚球无模胀形技术的研制人,他成功地制成直径为 1 500 mm 球体,但各个区域的壁厚分别是 8 mm、6 mm 及 4 mm,这充分揭示了胀球过程中存在几何调节(大曲率半径处优先变形)与物理调节(应变强化不显著处优先变形),使壳体在胀形过程中逐渐趋球。曾元松开展了椭球胀形的系统研究,首次从理论与试验中证实无模胀形椭球存在极限,即长短轴之比 $a/b \leq \sqrt{2}$,否则会在赤道附近沿纬线方向起皱,并从动能变化证明起皱时的失稳本质,他还提出了限制短轴方向位移可避免起皱的方法,已得到实验证实。

张旭与滕步刚是无模液力胀形环壳技术的研制人,这项技术不仅可用于环壳制作,也可用于特大型弯头现场制作,即将已制成的环壳切成 4 段或 3 段而构成 90° 或 120° 弯头,应当指出的是,液力胀环壳时的外侧受的是内压而内侧则受外压,因此内侧有可能起皱。滕步刚还研究了内约束条件下的无模胀形,他用这个办法成功地制作了长短轴比 $a/b=2$ 的椭球,该椭球也陈列在哈尔滨工业大学博物馆中。

如今,当年风华正茂的弟子们多数已年近半百,拥有教授职称,作为领军人物或学术带头人的他们正向着事业的顶峰努力攀登,我由衷地祝愿他们再创辉煌。

我高兴地看到,我校液力成形团队在苑世剑教授的领导下已经由壳体液力成形扩展到管材内高压成形与板材液力成形,特别是管材内高压成形已经成为国际上三大研发中心之一,不仅进行了系统的理论研究还研发了十多条生产线,为汽车、航空及航天工业中构件的轻量化做出了重要贡献。

本人感到十分高兴的是,如今在年届八旬时尚能与本书的另两位作者,我的弟子苑世剑教授及滕步刚教授共同完成此书的撰写工作,还亲自执笔撰写了“封闭壳体无模液压胀球的力学原理”一节。

最后,我要感谢苗启斌工程师、尚秀田技师在数量众多的球体制造过程中做出的贡献;感谢合作单位哈尔滨铁路工业处、核工业 23 公司的大力协同;感谢滕步刚教授为整理书稿所付出的辛劳;感谢哈尔滨工业大学出版社许雅莹编辑为本书出版所给予的帮助。

苑世剑

2014 年 5 月 10 日

主要符号表

p	内压;成形压力(MPa)
p_s	初始屈服压力(MPa)
p_{cr}	临界失稳压力(MPa)
σ_{φ}	经向应力(MPa)
σ_{θ}	纬向应力(MPa)
σ_i	等效应力(MPa)
σ_{cr}	临界失稳应力(MPa)
σ_b	极限应力(MPa)
σ_b^j	接头极限应力(MPa)
ε_i	等效应变
ε_{φ}	经向应变
ε_{θ}	纬向应变
t	壳体壁厚(mm)
d	壳体外径(mm)
γ	二面角($^{\circ}$)
V	壳体容积(m^3)
S	壳体表面积(m^2)
Y_r	屈服强度比
S_r	抗拉强度比
α_i	扇形圆心角($^{\circ}$)
λ	轴长比
δ	椭圆度(%),减薄率(%)

目 录

第 1 章 球形容器的无模液压胀形原理与典型结构	1
1.1 无模胀球原理与胀前多面壳体结构	1
1.1.1 无模胀球的特点	1
1.1.2 胀前多面壳体结构	2
1.2 封闭壳体无模液压胀球力学原理	4
1.2.1 封闭壳体受内压时力的平衡方程	4
1.2.2 封闭壳体受内压时的屈服方程	6
1.2.3 球壳与柱壳承压能力计算	6
1.2.4 壳体液压胀形过程中的趋球原理	7
1.3 32 面足球式壳体的无模液压成形	8
1.4 近足球状封闭壳体无模液压胀形	11
1.4.1 壳体结构设计	11
1.4.2 成形过程、应变及壁厚变化	12
1.4.3 型面变化及尺寸	16
1.4.4 典型点的应力轨迹	16
1.4.5 焊缝厚度对成形的影响	19
1.4.6 切角大小对成形的影响	20
1.5 单曲率单层壳体的无模液压胀形	22
1.5.1 壳体结构	22
1.5.2 多面壳体法向挠度	22
1.5.3 多面壳体胀形前后壁厚分布	23
1.5.4 多面壳体胀形过程中的应变变化	26
1.5.5 多面壳体胀球后的不圆度和棱角度	27
1.5.6 桔瓣式单曲率多面壳体胀形的仿真分析	29
第 2 章 胀球前壳体结构设计	33
2.1 平板类壳体结构设计	33
2.2 单曲率壳体的结构设计	35
2.2.1 赤道带为椭圆柱面壳的桔瓣式单曲率多面壳体	35

2.2.2	圆柱面壳体的桔瓣构造	44
2.2.3	圆柱面和椭圆柱面形拼瓣对多面壳体胀形过程的影响	51
2.2.4	内接椭球面的三带桔瓣式单曲率多面壳体	52
第3章	双层球形容器的无模液压胀形	62
3.1	双层无间隙球形容器无模液压胀形	62
3.1.1	双层球形容器整体液压胀形工艺的基本原理	62
3.1.2	双层壳体的结构和胀形实验	63
3.1.3	内外层壳体的应力应变分布及壳体的变形特点	68
3.1.4	双层球壳胀后的壁厚	72
3.1.5	双层球壳的夹层间隙	75
3.2	有间隙双层球形容器无模液压胀形	81
3.2.1	壳体结构及材料	81
3.2.2	实验流程与加载方式	82
3.2.3	胀形时的应变分布规律	82
3.2.4	胀形后壳体尺寸	86
第4章	不等厚球形容器的无模液压胀形	87
4.1	不等厚球形容器胀球结构及实验	87
4.2	不等厚球形容器胀形时的塑性变形规律	91
4.3	不等厚球形容器胀形时曲率半径的变化	92
4.3.1	球瓣中心线上各点和焊缝线上各点的曲率半径	92
4.3.2	卸载前后的曲率半径变化及回弹	95
4.4	不等厚球形容器各带的材料匹配优化	97
4.4.1	各带材料的正交设计	97
4.4.2	材料匹配优化后壳体各部分塑性变形规律	99
4.4.3	材料匹配优化前后壳体应变变化比较	100
4.4.4	材料匹配优化后壳体成形过程中壳体的曲率半径变化	102
第5章	椭球形容器的无模液压胀形	107
5.1	椭球形容器的应用领域	107
5.2	椭球壳体的应力特点及胀形压力	109
5.2.1	椭球壳体应力特点及轴长比的影响	109
5.2.2	椭球壳体应力分布的图形表示	112
5.2.3	内压椭球壳体塑性变形的发生部位分析	115
5.2.4	椭球壳体的胀形压力	116
5.3	椭球壳体内压胀形实验	117

5.3.1	实验过程描述及典型点的位移变化	117
5.3.2	壳体的应变分布	118
5.3.3	壳体的应力分布	123
5.3.4	壳体的壁厚及长短轴变化	126
5.4	塑性变形规律及典型点应力轨迹	128
5.4.1	塑性变形的发生部位及扩展过程	128
5.4.2	典型点的加载轨迹	130
5.5	封闭壳体液压胀形的起皱分析	134
5.5.1	失稳的分类和一般判据	134
5.5.2	单曲率壳体胀形时的起皱分析	135
5.5.3	圆板成对无模液压胀形时的起皱分析	138
第 6 章	环壳的无模液压胀形	141
6.1	胀形原理及工艺过程	141
6.2	胀前壳体结构设计及胀形压力计算	141
6.2.1	胀形前壳体结构	141
6.2.2	胀形压力计算	144
6.3	环壳无模液压胀形实验	145
6.3.1	壳体尺寸及测点布置	145
6.3.2	应变变化规律	146
6.3.3	壁厚分布	146
6.3.4	位移与几何形状	148
6.3.5	环壳成形起皱分析	148
6.4	环壳初始结构对成形的影响	150
6.4.1	环壳结构对应变的影响	150
6.4.2	不同初始结构环壳的成形	154
第 7 章	壳体内约束无模液压胀形	156
7.1	等边双圆锥台壳体的内约束胀形	156
7.1.1	等边双圆锥台壳体自由胀形时的受力分析	156
7.1.2	多节圆锥台壳体自由胀形时的受力分析	157
7.1.3	内加圆环约束的等边双圆锥台壳体胀形实验研究	159
7.2	中心限位椭球壳体的内约束胀形	161
7.2.1	实验过程	162
7.2.2	椭球胀形前后形状变化	163
7.2.3	胀形过程中的应变分布规律	164

第 8 章 无模液压胀形技术在液化气球形储罐及常压容器与
建筑装饰制品中的应用 167

8.1 200 m³液化气球罐的无模液压胀形 167

8.1.1 200 m³液化气球罐研制中解决的关键技术 167

8.1.2 角变形宽板拉伸实验 168

8.1.3 焊接工艺对接头塑性的影响 171

8.1.4 带角变形宽板拉伸的塑性变形规律 176

8.1.5 200 m³液化气球罐胀后安全性 184

8.2 无模液压胀形应用实例 188

参考文献 191

Contents

Chapter 1 Principle and structure for die-less hydro-bulging

spherical vessel	1
1.1 Principle and structure	1
1.1.1 Advantages	1
1.1.2 Structure before hydro-bulging	2
1.2 Mechanical theory of die-less hydro-bulging closed shell	4
1.2.1 Equilibrium equation under internal pressure	4
1.2.2 Yield equation under internal pressure	6
1.2.3 Pressure carrying capacity for spherical and cylindrica shells	6
1.2.4 Spherodization plastic deformation mechanism	7
1.3 Die-less hydro-bulging of 32-sided polyhedron shell	8
1.4 Die-less hydro-bulging of near soccer shell	11
1.4.1 Structure design	11
1.4.2 Stain and thickness distribution	12
1.4.3 Shape and roundness	16
1.4.4 Stress locus	16
1.4.5 Effect of weld thickness on hydro-bulging	19
1.4.6 Effect of corner-cutting on hydro-bulging	20
1.5 Die-less hydro-bulging of single-curvature polyhedron shell	22
1.5.1 Shell structure	22
1.5.2 Normal displacement	22
1.5.3 Thickness distribution	23
1.5.4 Stain variation	26
1.5.5 Non-roundness and angular distortion	27
1.5.6 Numerical simulation of hydro-bulging single-curvature polyhedron shell	29

Chapter 2	Structure design of polyhedron shell before hydro-bulging	33
2.1	Regular zero-curvature polyhedron shell	33
2.2	Single-curvature polyhedron shell	35
2.2.1	Structure with elliptic cylinder shell in equatorial zone	35
2.2.2	Structure with cylinder shell in equatorial zone	44
2.2.3	Effect of the shape of shell in equatorial zone on hydro-bulging	51
2.2.4	Polyhedron shell with an inscribed ellipsoid	52
Chapter 3	Die-less hydro-bulging of double-layer polyhedron shell	62
3.1	Die-less hydro-bulging of double-layer spherical vessel without gap	62
3.1.1	Principle of die-less hydro-bulging double-layer spherical vessel	62
3.1.2	Structure and experiment	63
3.1.3	Stress-strain distribution and characters of forming	68
3.1.4	Thickness distribution	72
3.1.5	Clearance of the double-layer spherical vessel	75
3.2	Die-less hydro-bulging of double-layer spherical vessel with gap	81
3.2.1	Structure and materials	81
3.2.2	Experiment and loading mode	82
3.2.3	Strain distribution	82
3.2.4	Dimension of the double-layer spherical vessel after hydro-bulging	86
Chapter 4	Die-less hydro-bulging of spherical vessel with non-uniform thickness	87
4.1	Structure and experiment	87
4.2	The occuring and spreading of plastic deformation	91
4.3	Variation of radius during forming	92
4.3.1	Radius of points on the center line and weld of petals	92
4.3.2	Variation of radius and springback	95
4.4	Optimization of materials match of spherical vessels with non-uniform thickness	97
4.4.1	Orthogonal design of materials	97
4.4.2	Plastic deformation after materials match optimizing	99

4.4.3	Comparison of strain distribution before and after materials match optimizing	100
4.4.4	Variation of radius after materials match optimizing	102
Chapter 5	Die-less hydro-bulging of ellipsoidal vessel	107
5.1	Application fields of ellipsoidal vessel	107
5.2	Stress characters and hydro-bulging pressure for ellipsoidal shell	109
5.2.1	Stress characters and effects of axis ratio on forming	109
5.2.2	Graphic description of stress	112
5.2.3	Occurring and spreading of the plastic deformation in ellipsoidal shell subjected to internal pressure	115
5.2.4	Hydro-bulging pressure for ellipsoidal shell	116
5.3	Hydro-bulging experiment of ellipsoidal shell	117
5.3.1	Process and variation of displacement	117
5.3.2	Strain distribution	118
5.3.3	Stress distribution	123
5.3.4	Thickness and dimensions after hydro-bulging	126
5.4	Plastic deformation of hydro-bulging ellipsoidal shells and stress locus	128
5.4.1	Occurring and spreading of the plastic deformation in hydro-bulging ellipsoidal shells	128
5.4.2	Stress locus of typical location	130
5.5	Buckling analysis of die-less hydro-bulging closed shell	134
5.5.1	Types and criteria for buckling	134
5.5.2	Buckling of hydro-bulging single-curvature polyhedron shell	135
5.5.3	Buckling of hydro-bulging plates in pairs	138
Chapter 6	Die-less hydro-bulging of ring shell	141
6.1	Principle and process of die-less hydro-bulging ring shell	141
6.2	Structrue design and forming pressure for ring shell	141
6.2.1	Structure before hydro-bulging	141
6.2.2	Bulging pressure	144
6.3	Experiment of die-less hydro-bulging ring shell	145
6.3.1	Dimension of the ring shell and measured points	145
6.3.2	Strain distribution	146

6.3.3	Thickness distribution	146
6.3.4	Displacement and shape	148
6.3.5	Wrinkling analysis for hydro-bulging ring shell	148
6.4	Effect of initial structure of ring shell on hydro-bulging	150
6.4.1	Effect of initial structure of ring shell on strain	150
6.4.2	Hydro-bulging ring shell with different initial structure	154
Chapter 7	Die-less hydro-bulging of shell with inner constraint	156
7.1	Hydro-bulging of equilateral double-cone-frustums shell with inner constraint	156
7.1.1	Force analysis of hydro-bulging equilateral double-cone-frustums shell	156
7.1.2	Force analysis of hydro-bulging equilateral multi-cone-frustums shell	157
7.1.3	Experimental research of hydro-bulging equilateral double-cone-frustums shell with restraining ring	159
7.2	Die-less hydro-bulging of ellipsoidal shell with central tube constraint	161
7.2.1	Experiment	162
7.2.2	Dimension variation of ellipsoidal shell after hydro-bulging	163
7.2.3	Strain distribution	164
Chapter 8	Applications of die-less hydro-bulging in LPG tank, normal pressure vessels and architecture decoration products	167
8.1	Die-less hydro-bulging of 200m ³ LPG tank	167
8.1.1	Key technologies in hydro-bulging 200m ³ LPG tank	167
8.1.2	Tensile test for angle deformation by wide specimen	168
8.1.3	Effect of welding on plasticity of welded joints	171
8.1.4	Plastic deformation of wide specimen tensile with angle deformation	176
8.1.5	Security of the 200m ³ LPG tank after hydro-bulging	184
8.2	Applications of die-less hydro-bulging	188
References		191

第 1 章 球形容器的无模液压胀形原理与典型结构

1.1 无模胀球原理与胀前多面壳体结构

1.1.1 无模胀球的特点

球形容器(球壳)与圆柱形容器相比具有两个主要优点:一是球形容器受力均匀、承载能力高,在相同壁厚和相同直径条件下,其承载能力比圆筒形容器高一倍;二是球形容器表面积小,因而在同等容量下球形容器所用钢材少、质量最轻、热量损失最小,从而降低了制造和储运成本。此外,球形结构还具有外观美丽、风的阻力小等优点,常用于建筑装饰与地标之中。球壳传统制造技术主要是模压成形工艺,对于不同直径和不同壁厚球壳,采用不同的模具压制出球壳瓣再焊接成为整个球体,其主要缺点是需要大工作台面压力机和大型模具、压制和二次切割工艺复杂、成本高。对于直径较小球壳,也可以采用拉深成形半球或若干球瓣再焊接成为整个球体,其缺点主要是模具成本高、拉深过程容易出现起皱和开裂缺陷。为了克服球壳传统制造技术的缺点,于 1985 年,一种球形容器无模液压胀形技术在哈尔滨工业大学诞生,该技术克服了传统制造工艺使用模具和压力机的主要缺点。

球形容器无模液压胀形工艺的基本过程:先由平板或经过辊弯(对于厚板)的单曲率壳体,并与极板组焊成封闭多面壳体,然后在封闭多面壳体内充满液体介质(通常为水),并通过一个加压系统向其中施加内压,在液体压力作用下,壳体产生塑性变形而逐渐趋向于球壳。对于单曲率壳体,该工艺的主要工序为:下料→弯卷→组装焊接→液压胀形,如图 1.1 所示。其理论上的基本依据为:一是在趋球力矩的作用下壳体将随着成形压力的增加而逐渐变为球壳,在壳体的任一部位如果曲率半径相对大一些,则该处在加载时就先变形,相应的曲率半径就会变小而停止变形,原曲率半径相对小的部位此时变成相对大些而开始变形,如此循环最终各处的曲率半径相等就变成了球壳;二是金属材料塑性变形引起应变强化的自动调节功能,在成形过程中,先满足屈服条件的部位首先开始塑性变形,随着变形量的增加该处先发生强化,使塑性变形向其他相对较弱的区域转移,而原来相对较强的区域变为相对较弱的区域而又发生塑性变形,如此循环调节最终成形的球壳厚度分布较为均匀。将在下一节对趋球原理做进一步阐述。

球形容器无模液压胀形技术的主要优点为：①不需要大型的模具和压力机，产品初投资少，因而可降低成本；②因为不需要模具，生产周期缩短，产品变更容易，下料组装简单；③经过超载胀形，有效地降低了焊接残余应力。

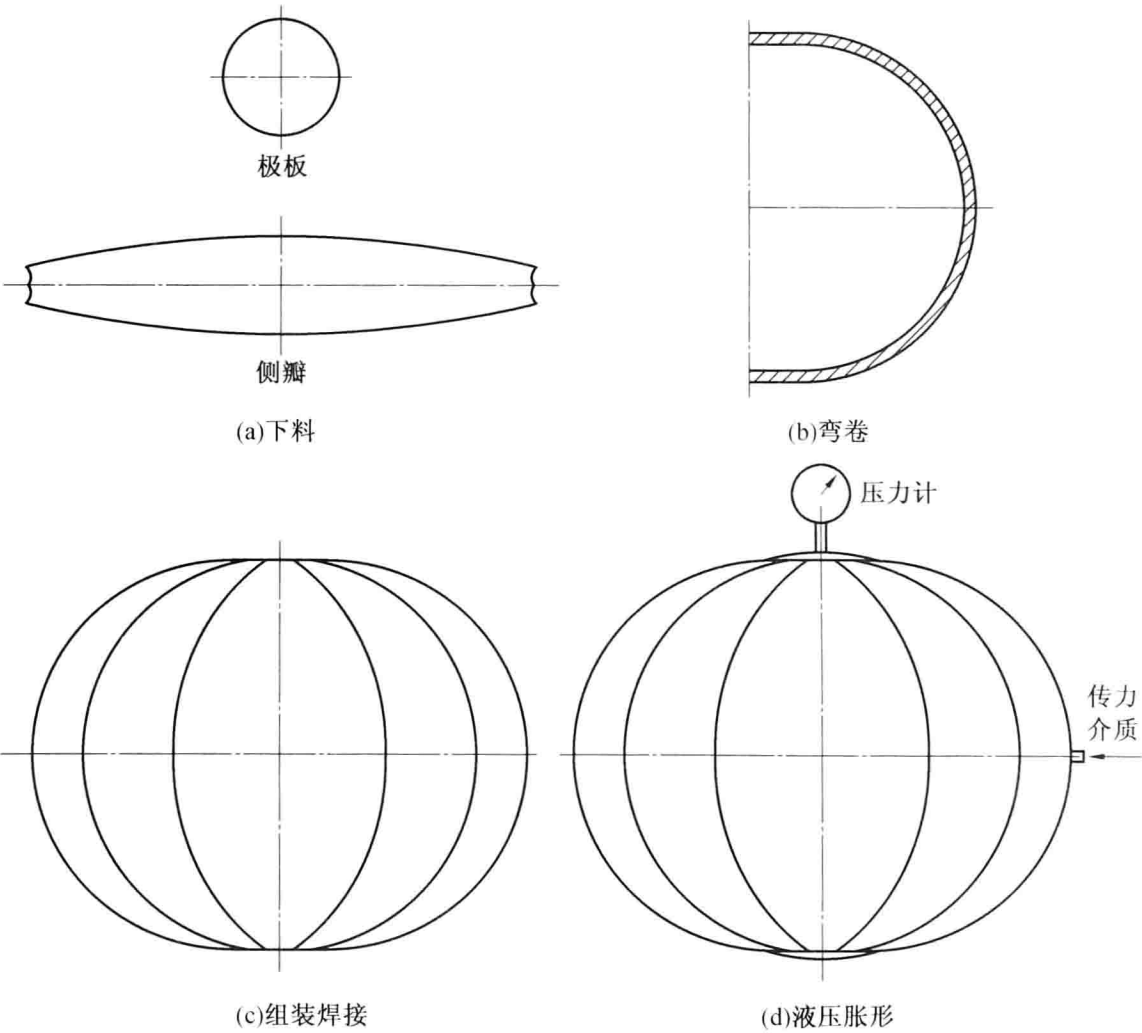


图 1.1 球形容器无模液压胀形的主要工序

1.1.2 胀前多面壳体结构

胀前多面壳体结构有两大类：一类是平板结构，构成多面壳体的元素为不同形状的平板，如 32 面体（足球形式）、20 面体、12 面体、排球形式等；另一类是单曲率结构，如篮球形式和网球形式。胀前多面壳体的结构形式如图 1.2 所示，这几种壳体主要参数比较见表 1.1（以直径为 4 m 的球壳为例）。其中，最小二面角是指构成多面壳体相邻球瓣二面角的最小值，其数值越小，焊缝角变形越大，越容易产生开裂；焊缝长度是决定制造周期和成本的一个主要指标；体积变化率是指由多面体变成球壳的体积变化，体积变化率大，多面体变成球壳需要的注水量多、胀形时间长，同时，表面积变化大，壳体壁厚减薄大。

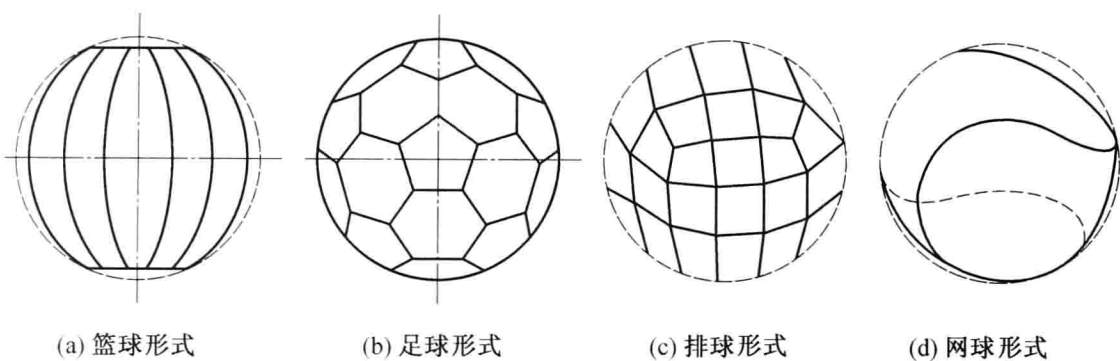


图 1.2 胀前多面壳体的结构形式

表 1.1 不同形式壳体主要参数比较(球壳直径 4 m)

参数	篮球形式 (赤道带 15 瓣)	足球形式	排球形式	网球形式
最小二面角/(°)	156	138	150	90
焊缝长度/m	86.6	96	98.5	22
多面体体积/m ³	32.52	28.71	31.1	20.77
体积变化率/%	3	16.7	7.7	61.3
多面体面积/m ²	49.51	46.56	47.04	41.2
平均减薄率/%	1.49	7.36	6.37	18.0

胀前多面壳体结构的选择是球形容器内压成形的一个关键技术,从表 1.1 看出,网球形式的平均减薄率最大,达到了 18%;足球和排球形式的平均减薄率相当,篮球形式的平均减薄率最小。

工业上常用的胀前多面壳体结构为足球形式和篮球形式。足球结构形式的优点是仅由正五边形和正六边形组成,下料简单,组装容易,但是最小二面角比 15 瓣的篮球形式小,体积变化率大,焊缝长度也比 15 瓣的篮球形式的多面壳体长,这是足球结构形式的主要缺点,尤其是二面角小和焊缝长,容易造成胀形时焊缝处开裂;足球结构形式另一个主要缺点是材料利用率低。篮球结构形式的优点是二面角大和减薄率小,并且赤道带瓣数越多,二面角越大,焊缝变形量小,但赤道带瓣数增加会使焊缝长度增加。不同赤道带瓣数的篮球结构壳体主要参数比较见表 1.2。

表 1.2 不同赫道带瓣数的篮球结构壳体主要参数比较(球壳直径 4 m)

赤道带瓣数	12	15	20	25
最小二面角/(°)	150	156	162	165.6
焊缝长度/m	69.02	86.6	110.95	137.01
多面体体积/m ³	31.94	32.52	32.91	33.1
体积变化率/%	4.9	3	1.8	1.2
多面体面积/m ²	49.1	49.51	49.82	49.97
平均减薄率/%	2.26	1.49	0.84	0.545