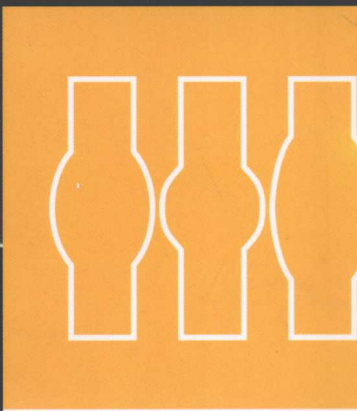
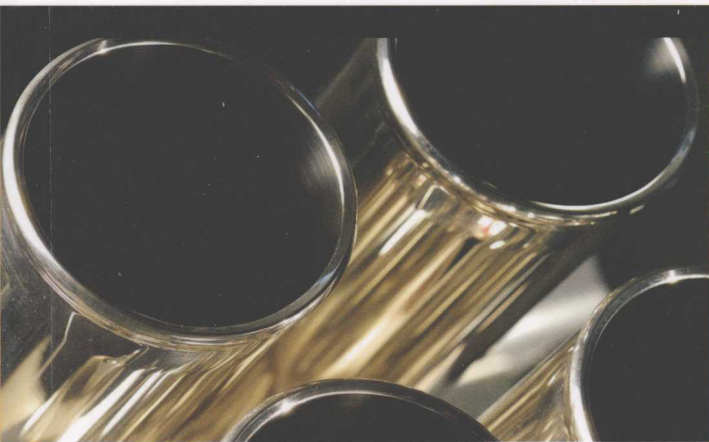


Yeya Zhangxing
Jinshubaobiguan de Cailiaotexing



液压胀形金属薄壁管 的材料特性

杨连发 ■ 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

液压胀形金属薄壁管的材料特性

杨连发 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书是关于金属薄壁管在液压胀形(tube hydroforming, THF)技术中的材料特性的一本专业书,从材料学、塑性力学、静水力学、断口学等角度对液压胀形薄壁管材料特性中的几个热点问题及研究方法进行了阐述,内容包括 THF 技术概况、THF 材料特性的研究现状、液压胀形试验平台及管材性能参数测试装置、管材力学性能测试及液压胀形试验方法、基于 THF 环境的管材塑性本构关系的构建方法、有缝管材料特性及其液压胀形 FEM 数值模拟方法、管材 THF 成形性能及材质不均匀的影响规律、管材断口分析及 THF 宏观胀裂机理探讨等。

本书对从事金属塑性加工、材料加工工程及其相关专业的读者有一定的参考价值,也可供相关专业的研究生作为专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液压胀形金属薄壁管的材料特性/杨连发 著. —武汉:华中科技大学出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-5609-6578-9

I. 液… II. 杨… III. 金属管;薄壁钢管-金属材料-特性-研究 IV. ①U173.1 ②TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 187292 号

液压胀形金属薄壁管的材料特性

杨连发 著

责任编辑:刘 飞

责任校对:张 琳

封面设计:范翠璇

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:880mm×1230mm 1/32

印 张:6.5

字 数:172 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:18.50 元



华中科大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

国家自然科学基金项目资助出版(51065006)

广西自然科学基金项目资助出版(桂科自 0832243)

制造系统与先进制造技术广西重点实验室基金项目
资助出版(09-007-05S007)

桂林电子科技大学学术著作出版基金资助出版

前 言

管材液压胀形(tube hydroforming, THF)技术是生产截面形状复杂的中空薄壁整体结构件的一种先进、特殊、精密(半精密)的净成形技术,具有工序集成度高、工艺简单、废品率低、零件刚度高、质量轻及模具成本低等特点,在汽车、航空、航天、船舶、家电等领域得到了越来越广泛的应用,特别是汽车工业对于高刚度、轻质量零件的需求,推动了 THF 的迅速发展。美国、日本、德国等汽车工业发达国家都将 THF 作为实现“车身轻量化”的有效途径,竞相投入大量人力、物力和财力加以研究和推广应用。

THF 技术始于 20 世纪 40 年代,当时主要是用来成形 T 形管接头。到 70 年代末期,德国开始对 THF 技术进行基础性研究,并于 90 年代初期率先将其应用到汽车结构件的生产中。目前,一些学者从成形机理、管材选用、摩擦特性、预成形设计、成形工艺、模具材料及其涂覆处理等方面对 THF 开展了大量的研究工作。其中,金属薄壁管的材料特性(如力学性能、本构关系、成形性能、流动特性、胀裂机理等)在 THF 中起着极其重要的作用,对 THF 的产品精度、成形极限、载荷大小及模具寿命等有很大的影响,常常关系到 THF 的成败。所以,在实施 THF 工艺前,材料特性的确定是一项极其重要的工作。基于 THF 的材料特性的研究近年来比较活跃,主要集中在如下几个热点问题:基于 THF 环境的管材塑性本构关系的构建、针对 THF 应用的管材性能参数测试技术、有缝管材料特性及其 FEM 模拟技术、材质不均匀管材的 THF 成形性能及胀裂断口分析等。

首先,对于 THF 技术的深入研究尤其离不开精确的材料特性(如材料模型)。通常的做法是用单向拉伸试验法来确定材料特性,但直接将板材的拉伸力学参数、本构关系用于 THF 中会产生较大的误差,合理的方法应是基于双向应力状态下的管材液压胀

形试验。此外,随着有缝管应用的日益广泛,焊缝的胀形变形有时是不可避免的,研究其基体、焊缝及热影响区(heat affected zone, HAZ)对 THF 成形的影响规律具有重要意义。

其次,在对有缝管的 THF 成形建立模拟模型时,目前通常不考虑焊缝及 HAZ 的存在,认为整个管材的材料特性是均匀的;或者只考虑焊缝与基体的存在,而忽略 HAZ 的材料特性差异,这样必然造成较大的误差。精确的有缝管 THF 成形模拟模型要充分体现有缝管环向不同位置的材料特性差异,并能准确描述 THF 的特征。因此,展开这方面的研究显得十分重要。

再次,管材 THF 成形性能通常是以管材在 THF 中失效(如屈曲、起皱及破裂等)时的成形极限来衡量的。目前,THF 极限载荷及成形极限的确定主要基于平面应力状态、材质均匀及无缺陷假设。但在 THF 成形时,管材还受高压液体的作用,它对管材的成形性能有较大的影响,与单纯的平面应力状态应该有所差别;而且,在制造及搬运等过程中,管材会不可避免地存在微观缺陷(如夹杂、裂纹、疏松等)及表面宏观缺陷(如划伤、凹陷等),甚至管材本身就存在宏观上的初始壁厚偏差、初始形状偏差(截面轮廓形状为非圆形)等几何不均匀现象,这对 THF 变形的规律及管材的成形性能应该有一定的影响。

最后,材料断口形貌反映出材料断裂的性质,较真实地记载了材料的断裂过程、材料的韧性优劣程度及其他很多信息。因此,对 THF 成形的管材破裂形态及断口形貌分析有助于揭示管材在不同变形环境中材料特性及成形性能表现差异的原因。

本书是研究液压胀形金属薄壁管的材料特性的一本专业书,涉及上述几个热点问题。本书内容共分八章。在第 1 章中,对管材液压胀形技术及 THF 材料特性的研究现状作了概略介绍。第 2 章介绍液压胀形试验平台及管材性能参数测试装置。第 3 章讲述管材力学性能测试及液压胀形试验方法,包括管材的单向拉伸试验、液压胀形试验、变形量测量、断口形貌观测等。第 4 章介绍

前 言

基于 THF 环境的管材塑性本构关系的构建方法。第 5 章介绍如何确定有缝管的材料特性及其液压胀形 FEM 数值模拟方法。第 6 章介绍管材 THF 成形性能及材质不均匀的影响规律,重点为材料特性不均匀(存在焊缝)、管材初始壁厚偏差、管材初始形状偏差对 THF 成形性能的影响规律。第 7 章为管材断口分析及 THF 宏观胀裂机理探讨,从细观和微观上对拉伸与胀裂断口进行对比分析,探索 THF 成形中的裂纹扩展模型及宏观胀裂机理,解释管材在单向拉伸及液压胀形时材料特性不同的原因。第 8 章为总结与展望。

全书重点内容集中在第 2 章、第 4~7 章。各章内容相互关联又自成一体,建议读者按顺序阅读。

本书内容主要是作者在攻读博士期间、在日本作访问学者期间和近年来所做的肤浅研究工作,并借鉴、引用、吸收了国内外同行近年来的相关研究成果。作者期望本书的出版能对从事和研究管材液压胀形技术的读者起到抛砖引玉的作用。

本书只是重点表述作者对过去一些研究问题的观点,限于作者的学识与水平,书中难免会有错误和不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2010 年 8 月

目 录

第 1 章	绪论	(1)
1.1	管材液压胀形技术	(1)
1.2	THF 技术的优势及应用背景	(4)
1.3	THF 技术的发展趋势	(7)
1.4	THF 材料特性的研究现状	(10)
1.5	THF 材料特性的科学核心问题	(15)
第 2 章	液压胀形试验平台及管材性能参数测试装置	(17)
2.1	概述	(17)
2.2	外控充液增压式试验平台	(18)
2.3	管材 THF 性能参数测试装置	(22)
2.4	本章小结	(35)
第 3 章	管材力学性能测试及液压胀形试验方法	(36)
3.1	概述	(36)
3.2	单向拉伸试验	(36)
3.3	液压胀形试验	(43)
3.4	液压胀形后管件变形的测量	(47)
3.5	破裂形态及断口形貌观测	(51)
3.6	焊缝及热影响区显微硬度测量	(53)
3.7	本章小结	(57)
第 4 章	基于 THF 环境的管材塑性本构关系的 构建方法	(58)
4.1	概述	(58)
4.2	胀形轮廓形状与壁厚分布的关系	(59)
4.3	管材塑性本构关系的构建新方法	(62)
4.4	本构关系构建新方法的精度检验	(74)
4.5	本构关系构建新方法的适用性特点	(84)

4.6	本章小结	(86)
第5章	有缝管材料特性及其液压胀形 FEM 数值模拟方法	(88)
5.1	概述	(88)
5.2	焊缝材料特性的确定	(89)
5.3	有缝管 HAZ 材料本构关系的确定	(95)
5.4	有缝管 THF 成形过程数值模拟及结果分析	(100)
5.5	本章小结	(110)
第6章	管材 THF 成形性能及材质不均匀的影响规律	(112)
6.1	概述	(112)
6.2	管材 THF 成形性能	(113)
6.3	确定极限载荷及成形极限的新方法	(117)
6.4	材料特性不均匀的影响规律	(127)
6.5	初始壁厚不均匀的影响规律	(130)
6.6	初始形状不均匀的影响规律	(137)
6.7	本章小结	(142)
第7章	管材断口分析及 THF 宏观胀裂机理探讨	(144)
7.1	概述	(144)
7.2	单向拉伸与液压胀形时的材料特性	(145)
7.3	THF 中管材的宏观胀裂机理	(160)
7.4	管材在拉伸及胀形时材料特性不同的原因	(172)
7.5	本章小结	(175)
第8章	总结与展望	(177)
8.1	总结	(177)
8.2	展望	(180)
	参考文献	(184)
	后记	(198)

第1章 绪 论

1.1 管材液压胀形技术

管材液压胀形(tube hydroforming, THF)技术是将一定长度的薄壁管坯放入模具内,在内部液体(水或油)压力的作用下,使管坯沿径向向外扩张,产生塑性变形的成形技术^[1]。THF技术是取代铸、锻、焊、切削加工,生产整体中空薄壁结构件的一种先进的、特殊的、精密(半精密)的净成形技术。THF的成形原理如图1-1所示^[2]:将管坯放入敞开模腔的正确位置(见图(a));分瓣模具合模、锁紧,左右两个堵头相向同步运动并施加一定的轴向载荷将管坯两端压紧、密封(见图(b));外部液压系统向管坯内注入液体

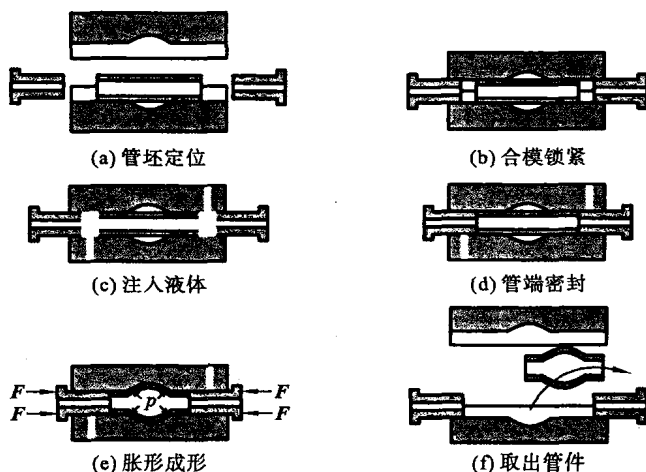


图 1-1 管材液压胀形原理示意图

(见图(c));管坯内液压力达到一定水平后密封管端(见图(d));继续向管坯内注入高压液体使管坯内液压力迅速升高的同时,两堵头对管坯施加轴向载荷 F ,使其胀形(见图(e));管坯变形贴紧模具型腔后,使液体回流、堵头回退,开模取出管件,胀形结束(见图(f))。

THF 技术的发展可以追溯到 20 世纪 40 年代 T 形管接头液压胀形技术的研究。历经 20 世纪 50—60 年代美、英、日等国相关专利开发与产品应用,至 70 年代末期德国开始对 THF 技术进行基础研究,批量生产自行车、摩托车及汽车部分结构件的液压胀形产品才开始在国际市场上出现^[3]。时至今日,THF 技术已成为汽车制造技术中最具突破性的应用,并已跃升为主流制造技术之一。

THF 的种类很多,通常根据成形条件及力学模型的不同,将 THF 分为自然胀形、轴压胀形和复合胀形三大类^[4]。

若在成形过程中,仅对管坯内壁施加液压力 p (亦称内压力),零件的成形主要靠管壁厚度(简称“壁厚”)的局部变薄和轴向的自然收缩(缩短)来完成时,则称为自然胀形(free hydraulic bulge, FHB),如图 1-2 所示^[5]。自然胀形的变形区(即胀形区)主要承受双向拉应力的平面应力状态和两向拉伸、一向压缩的立体应变状态。自然胀形的极限变形程度与胀形中管端沿轴向的收缩有关。因此,根据管端轴向收缩的情况,自然胀形又分为管端固定胀形(fixed-end bulge)、管端自由胀形(free-end bulge)及管端约束胀形(constrained/pinched-end bulge)三种情况。管端固定胀形,即

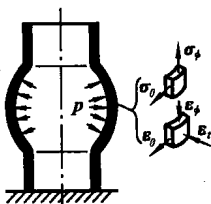


图 1-2 自然胀形
力学模型

管端面沿轴向无收缩,胀形区完全靠管坯的局部变薄而成形,变形性质为局部成形,胀形极限变形程度最小,与管坯的许用伸长率及变形的均匀性有极大的关系;管端自由胀形,即管端面沿轴向可自由收缩,胀形区局部变薄的同时,轴向收缩部分的材料补充到胀形区,缓解了胀形区材料的不足,故极限变形程度最大;管端约束胀形,即管端面沿轴向受阻碍(约束)

收缩,有较小的收缩量,故极限变形程度介于前两者之间。

在管坯内部作用有液压力 p 的基础上,同时对管端施加轴向载荷 F ,使管坯产生轴向压缩变形,以补充胀形区材料的不足,则称为轴向压缩胀形,简称轴压胀形(forced-end hydroforming),如图 1-3 所示^[5]。与自然胀形相比,胀形区材料不仅得到大量补充,而且胀形区的应力、应变状态得到明显改善:当轴向压力足够大时,胀形区母线方向的拉应力变为压应力,成为一拉一压的平面应力状态;变形也由两向拉伸、一向压缩变为一向拉伸、两向压缩的应变状态,抑制了胀形区材料的过度变薄,管坯壁厚分布趋于均匀,可以显著提高极限变形程度,故实际生产中常采用轴压胀形。轴压胀形的成形极限不仅与材料伸长率有关,而且与轴向载荷(压缩量)、液压力大小及两者的比值有极大的关系。

复合胀形是在自然胀形及轴压胀形的基础上发展起来的。在轴压胀形的同时,对管坯胀形区施加径向反压力,则称为“反压-轴压胀形”;轴压胀形若与缩口或扩口成形同时进行,则分别称为“缩口-轴压胀形”或“扩口-轴压胀形”。总之,凡在轴压胀形的基础上,又同时施加其他变形力或(与)其他成形工序的胀形技术,均可称为复合胀形(如挤胀成形、塑挤胀形等)。如变形量大的薄壁多通管,必须采用挤胀复合成形技术,如图 1-4 所示^[6];在管坯内作用高静水压力,在管端施加适当挤压力,在支管端部施加有较大的平衡力(反压力),使支管区域产生明显的压应力状态。复合胀形技术近年来在生产中得到了推广应用,取得了良好的技术效果。

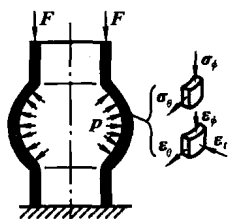


图 1-3 轴压胀形力学模型

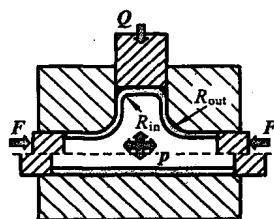


图 1-4 T形管挤胀复合成形原理

1.2 THF 技术的优势及应用背景

1.2.1 THF 技术优势

THF 技术与其他成形技术相比具有显著优势^[7]。

1. 提高零件强度、刚度和精度

管坯经 THF 技术成形后,强度和刚度比用传统工艺制造的拼焊构件高出许多;THF 成形件较焊接件整体性能好,再加之高压介质的校形作用,尺寸精度高。

2. 减轻零件质量

通过有效的截面设计和壁厚设计,结构件由标准管材成形为复杂的单一整体结构件;较少的管材及装配部件减轻了产品的自重。对于空心轴类零件可以减轻 40%~50% 的量,有些可达 75%;与冲压焊接的组合件相比,THF 成形的空心结构件可减轻 20%~30% 的量。

3. 降低零件生产成本

采用 THF 技术通常仅需要一套模具,如汽车副车架部件所用模具由 6 套减少到 1 套,散热器支架零件的工装数目由 17 个减少到 10 个。由于减少了工序种类、工装数目、模具套数及加工废料,零件的制造成本降低。根据德国某公司的统计分析,液压胀形件比冲压件平均降低成本 15%~20%,模具费用降低 20%~30%。

4. 增加零件设计的灵活性

THF 技术具备整体成形几何形状非常复杂的薄壁结构件的能力,可以显著地改善零部件结构的一体性及完整性(integrity),特殊的成形能力使 THF 产品的设计更灵活。

1.2.2 THF 技术应用背景

THF 技术广阔的应用前景被工业领域尤其被汽车制造业所看好,在航空、航天、船舶、家电等工业部门得到了越来越多的应用。

1. THF 技术在汽车工业中的应用

汽车工业对于刚度高、质量轻的零部件的需求,推动了 THF 技术的迅速发展。实践证明,用 THF 技术生产的汽车中空件具有刚度高、质量轻和成本低的优点,是一种很有发展潜力的成形技术。例如,福特 Mondeo 车型的发动机架采用液压胀形技术,与传统的加工技术相比,具有明显的优越性:零件的数目由 6 个减少为 1 个;工装数目由 32 个减少为 3 个;成形件的重量由 12 kg 降低为 8 kg;平均每个成形件的成本由 20 英镑降低为 10 英镑。由于 THF 技术的应用,一些汽车零部件的设计和制造发生了革命性的变化,对可持续发展有着十分重要的意义。据国际汽车行业预测,若汽车结构件的 50% 由冲压焊接件改为 THF 成形件,自重可降低 15%~30%,不仅实现了结构的优化设计,使单位重量承载能力(强度、刚度及疲劳性能等)大幅度提高,而且有效地节省了材料用量、提高了生产率,成本可降低 20%~30%^[8,9]。因此,美国、日本、德国等汽车工业发达国家都将 THF 技术作为实现“车身轻量化”的有效途径之一,竞相投入大量人力、物力和财力加以研究和推广应用^[10]。包括 BENZ, BMW, AUDI, VW, OPEL, GM, FORD 及 CHRYSLER 等汽车制造厂家均已将 THF 技术投入汽车零部件生产中,且市场需求正在快速成长。如 BMW 500 系列的后轮轴, BENZ 的排气管系统, Buick Park Avenue 的顶棚梁及发动机托架, Corvette 的下臂梁、顶梁及仪表盘支架等均采用了 THF 技术^[6]。根据美国钢铁研究院汽车应用委员会的调查结果,在北美制造的汽车中, THF 成形件在汽车零部件的总量中所占的比例,已经由 15 年前的 10% 上升到 16%^[11]。美国三大汽车公司与十大钢铁公司联合发起成立了“汽车/钢铁合作液压胀形工业资

源集团 (Auto/Steel Partnership Hydroforming Industry Resource Group)”来推动 THF 技术在汽车轻量化进程中应用的深度及广度^[11]。THF 技术被“汽车超轻车体计划 (ultra light auto steel body, ULSAB)”列为重点发展的三大技术之一。目前应用 THF 技术生产的汽车零配件有异形件、波纹管、排气管、控制臂、凸轮轴、前/后驱动轴、下梁、后桥壳、差动齿轮箱、副架、仪表盘支架、座椅框架、散热器支架、发动机托架、棚顶托架、车身框架、底盘构架等^[6]。图 1-5 为应用 THF 技术制造的典型汽车零部件^[7]。



图 1-5 汽车的部分 THF 成形件

2. THF 技术在其他领域中的应用

除汽车行业外,THF 技术在航空、航天、船舶制造等工业部门及家电等关键零件的生产中也得到了越来越多的应用^[12]。随着国民经济的发展,工业上广泛应用的传输流体多通管,自行车中连接车架的无缝钢管接头件,作为冰箱、空调冷凝器配套件的异形三通管接头,家用水龙头及沐浴器等管接头

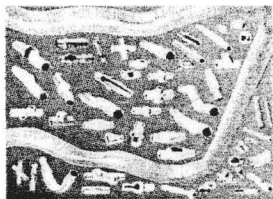


图 1-6 THF 成形件

需求量增加。传统的制造工艺,如铸造、焊接、锻造和机加工等,具有工序多、产品质量不高、生产率低、材料消耗大及生产成本高等缺点,因此用 THF 技术一次成形这些中空件已成为一种发展趋势^[13,14]。图 1-6 为用 THF 技术制造的一

些零部件^[15]。目前, THF 技术突破了主要用于提供毛坯的范畴, 向部分取代切削加工、直接生产半成品和成品零件的方向发展。

1.3 THF 技术的发展趋势

考虑到汽车工业批量化、规模化生产的特点及其在整个国民经济中的支柱产业地位, 研究 THF 技术不仅具有重要的学术价值, 同时也蕴藏着巨大的经济效益和社会效益。因此, 人们积极开发 THF 技术新工艺及新设备, 在理论方面、在有限元数值模拟分析技术(finite element method, FEM)方面也展开了比较系统、深入的研究。

1.3.1 工艺开发

为提高生产率、降低成本、提高构件精度及整体性, THF 技术与其他工艺复合是一个发展趋势: 如胀形与穿孔复合、胀形与装配复合、胀形与压扁(crushing)复合等新工艺^[16~18]。针对铝合金、镁合金等成形性较差的问题, “有益起皱” THF 技术、热态介质 THF 技术及局部热处理 THF 技术也引起了人们的兴趣^[17, 19]。美国密歇根州的 Tomco Tool & Die in Belding 公司申报了一项“液体冲击成形技术(liquid impact forming, LIF)”专利, 该技术借助压力机以足够大的力快速合模, 引起管材内液体的急速流动, 使管材弯曲与成形。LIF 技术是一个极具发展前景的新技术, 与常规的 THF 技术不同的是, 它没有液体的实际注入过程, 不需要专用的 THF 机床, 可在通用压力机上使用, 其生产效率是常规 THF 技术的 2.5~3 倍^[20]。

1.3.2 设备研发

截至 2001 年, 全世界范围内建成并投入使用的 THF 设备共 236 台/套, 其中大约 80% 应用于汽车制造业。目前的 THF 设备

通常采用“外控充液增压式”,即需要专用的、复杂的、昂贵的外部液压系统来控制管材内的液体介质,以保证成形所需的液压力,对设备和模具的自动化程度要求很高。因此,开发能在通用压力机上使用的、非外控充液增压式的 THF 设备是今后的一个发展方向。国内学者刘庆国等开发的非外控充液增压式 THF 成形设备,通过一套对向挤压装置即可在一般通用液压机上实现三通管的 THF 成形^[21]。THF 锁模力通常由压力设备提供,当成形载荷很大时,需要很大吨位的压力设备。因此,开发能显著降低设备吨位、锁紧行程小的自动锁模装置是人们追求的目标。

1.3.3 理论研究

薄壁管的胀形是复杂零件 THF 的基础,因此研究薄壁管的 THF 具有重要意义。20 世纪 80 年代,Manabe 等^[22]最早系统地分析了轴压胀形时的变形特点和成形极限。同一时期,Fuchizawa^[23,24]基于薄膜理论、增量理论及 Hill 的各向异性理论,研究了有限长薄壁管的自然胀形过程,分析硬化指数 n 和塑性应变比 γ 对成形载荷、壁厚分布及 THF 成形性能等的影响规律。此后,绝大多数的研究是基于薄膜理论,应用有限差分法、全应变理论、边界元理论、增量理论等分析薄壁管的 THF 变形特点、成形规律及成形载荷^[25~28]。近年来出现了一些新的研究方法,如 Xia^[29]及 Nefussi 等^[30]将压曲与颈缩同时当做失稳建立失稳预测模型,分析材料参数对自然胀形过程的影响,评价 Swift 的两个失稳准则对于 THF 失稳分析的适用性;Liu^[31]基于破裂极限图(failure limit diagrams)及可预测应变场(predicted strain fields),分析成形载荷对破裂的影响。

1.3.4 数值模拟

由于 THF 成形的零件种类繁多、成形过程复杂、影响因素多,而且在 THF 成形过程中,因管材被密封在模具内,材料的流