

· 资助成果 ·

大尺度非均质壳体流体压力成形 机制与缺陷控制方法

苑世剑^{1*} 刘伟^{1*} 徐永超¹ 胡蓝² 张志超² 郭立杰²

1. 哈尔滨工业大学 流体高压成形技术研究所, 哈尔滨 150001

2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245

[摘要] 本文介绍了国家自然科学基金航天先进制造技术研究联合基金项目(U1637209)的主要进展与标志成果。针对新一代运载火箭对箱底整体制造的迫切需求,围绕非均质曲面壳体整体成形塑性失稳机制和缺陷控制的核心科学问题,开展了拼焊板液压胀形性能测试,通过失稳应力分析、箱底成形仿真、工艺实验及测试等,揭示流体载荷作用下非均质薄壳复杂变形行为与失稳机理,发明可控加压流体高压成形技术,解决了非均质薄壳起皱和开裂并存的国际性难题,突破了厚径比的极限边界,并在国际上首次采用与构件近等厚的拼焊薄板直接整体成形出3m级箱底,解决了箭体整体结构制造的重大瓶颈难题。

[关键词] 火箭箱底;非均质壳体;流体压力成形;缺陷控制

推进剂贮箱是运载火箭的关键部件,用于储存推进剂并作为主承力结构,其重量约占火箭结构的60%以上,由筒段、叉型环和箱底组成^[1]。其中,箱底为薄壁封头结构,承受内压、轴压、振动和冲击等复杂载荷的联合作用,是影响运载火箭可靠性的关键部件^[2]。20世纪70年代以来,为提高大型运载火箭推力,国际主流火箭普遍采用低温液体推进剂(液氢、液氧),对箱底可靠性提出了更高要求^[3]。由于,传统拼焊结构难于保证贮箱在超低温服役环境下的可靠性,美国、欧盟和日本等国家开始在运载火箭上采用整体结构箱底,例如美国Atlas系列、Delta系列、Falcon 9系列、欧盟Ariane 5、日本H-2A/H-2B火箭等^[4, 5]。

箱底是典型的大型薄壁曲面壳体构件,其整体成形是国际制造领域竞争的制高点。以我国某现役火箭为例,采用2219铝合金半椭球形箱底,开口直径3350mm,最大厚度不足10mm。由于厚径比仅3‰,受大板坯弱刚性、焊缝非均质的制约,整体成形时极易诱发塑性失稳,从而导致板坯发生严重的起



苑世剑 哈尔滨工业大学教授,金属精密热加工国防科技重点实验室主任、流体高压成形研究所所长。创建流体压力成形技术体系,建立基于壳坯、管坯、板坯的三类结构液压成形技术,取得工艺创新/装备实现/工程应用一体化的系列成果,广泛应用于航天、航空、汽车等行业。曾获国家技术发明奖二等奖、国家科技进步奖二等奖、中国专利金奖、光华工程科技奖等奖励。



刘伟 哈尔滨工业大学教授,金属精密热加工国防科技重点实验室副主任、流体高压成形研究所技术骨干。主要研究板材流体压力成形理论和工艺、铝合金超低温成形原理与技术等。参加国家科技重大专项、国防基础科研、国家自然科学基金等多项国家级重大、重点项目,目前作为项目负责人主持国家重点研发计划项目1项。研究成果曾获航天科技“十大技术突破”、国防科技进步奖等奖励。

皱、开裂等缺陷^[6]。为避免以上难题,美国NASA、欧空局等国家主要采用“厚板旋压制坯—数控铣削

收稿日期: 2021-06-18; 修回日期: 2021-08-16

* 通信作者, Email: syuan@hit.edu.cn, liuw@hit.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U1637209)的资助。

变薄”的技术途径^[7]。但大型旋压机长期对我国封锁和禁运,现役火箭被迫采用瓜瓣拼焊结构箱底,不仅存在工序多、周期长和材料浪费多等问题,更主要的是装配应力和大量焊缝降低了可靠性,始终是我国现役火箭的一个风险点,并影响了新一代运载火箭向大推力发展^[8-10]。

1 研究背景

为了满足我国新一代运载火箭对大型箱底整体制造技术的迫切需求,哈尔滨工业大学流体高压成形技术研究所经过持续不断攻关,提出了新一代薄壁曲面构件流体压力成形技术(图1)^[11-13]。技术原理是:采用板厚小于10 mm的薄板,通过调控流体介质加载压力改变板坯的应力状态和应变路径,同时抑制开裂和起皱缺陷,获得高性能精密整体薄壁曲面壳体构件。技术优势是:(1)沿板坯不同部位实现流体分区多向加载,调控应力状态,抑制起皱和开裂缺陷;(2)流体高压载荷可提高构件成形精度;(3)提高材料利用率和制造效率,大幅度减少后续机加量。

但是,大型铝合金薄壁曲面壳体流体压力成形的难度极大,主要存在三大技术挑战:(1)起皱和开裂并存。厚径比小于3‰的超薄板极易发生失稳起皱,但为控制起皱需加大压边力,又容易导致变形区开裂,而解决起皱和开裂的工艺措施互相制约,使得缺陷控制极具挑战;(2)变形局域化。悬空区反胀导致的局部变形集中,容易导致壁厚均匀性控制难;(3)组织性能不均。铝合金板坯固溶—成形—人工时效热处理全过程微观组织演变复杂,整体构件组织性能一致性难以调控。此外,受我国铝合金板材轧制能力的限制,国内无法提供宽幅4 m以上的大尺寸薄板,不能满足直径3.35 m箱底整体成形所需,只能采用拼焊板,导致抑制开裂和组织性能控制的难度更大。

围绕非均质曲面壳体整体成形塑性失稳机制和缺陷控制的核心科学问题,在国家自然科学基金航天先进制造技术研究联合基金重点项目资助下,突破大尺寸2219铝合金搅拌摩擦拼焊板制备和组织

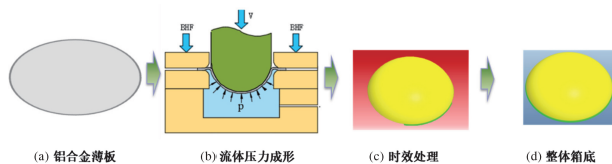


图1 薄壁曲面构件流体压力成形原理

性能均匀性调控、非均质拼焊板流体压力成形及缺陷控制等关键科学问题。取得以下主要进展:

2 研究进展与成果

2.1 非均质板坯成形性能调控

拼焊板是典型的非均质材料,易导致变形不均、焊缝开裂等缺陷。为此,提出采用搅拌摩擦焊接实现铝合金板坯高性能制备的技术路线。开展了搅拌摩擦焊接工艺参数优化,获得了高质量2219铝合金搅拌摩擦焊接接头。定量表征了非均质拼焊板接头的成形性能,发现焊后接头的非均匀变形特征,通过焊后固溶处理显著提高了搅拌摩擦焊接接头变形均匀性^[14]。图2A)所示为焊态和焊后固溶处理后接头横截面硬度分布对比,焊后接头横截面硬度分布呈“几字形”,焊核区的硬度比母材区提高了31%,表明在搅拌摩擦焊过程中发生强化。接头固溶处理后整个横向平面中的硬度分布相对一致,基体的平均硬度约为80 HV,焊接区约为78 HV,表明焊接接头在固溶处理过程中已经均匀化。图2B)所示为焊态和焊后固溶处理后接头横截面应变分布对比,焊态接头应变呈“倒几字形”,焊接区的最大应变不足4%,变形主要发生在接头两侧的母材区,最大应变达到16.3%,焊接区与母材区形成较大的应变梯度;焊后固溶处理接头横截面应变趋于一致,焊接区与母材区应变差小于3%,实现了非均质拼焊板均匀化调控。

2.2 拼焊板成形性能定量表征

流体载荷作用下,拼焊板成形性能的定量表征、材料模型的建立和变形行为的准确预测,是非均质壳体整体流体压力成形工艺优化和缺陷控制的基础。为此,获得了拼焊板在双向应力下的成形极限,分析了焊缝位置、焊缝数量对拼焊板成形性能的影响规律:焊缝位于中心位置的极限胀形高度大于偏置焊缝,1条焊缝的极限胀形高度大于2条焊缝。揭示了固溶处理对双向应力状态下拼焊板成形性能

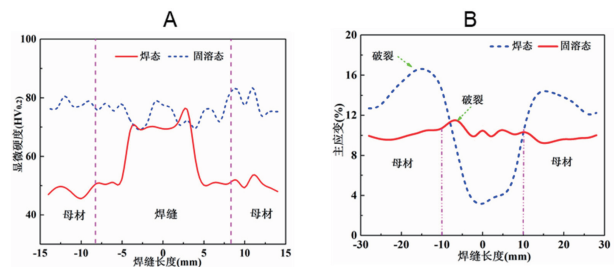


图2 焊接接头的硬度分布和应变分布对比:

A. 硬度分布曲线, B. 应变分布曲线

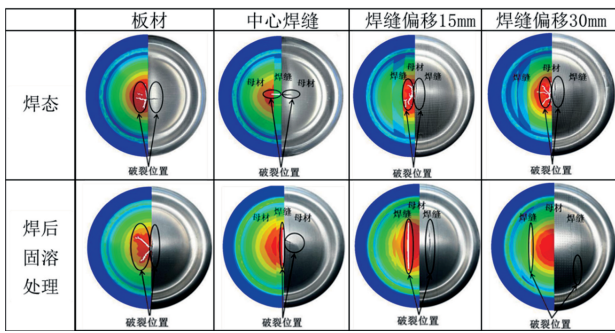


图3 双向应力状态下拼焊板成形极限

的影响规律,建立了基于微观损伤的拼焊板成形开裂预测模型。图3所示为焊态和焊后固溶处理拼焊板液压胀形结果,可以看到:由于焊态下焊缝强度高于母材,形成“硬化带”,发生垂直于焊缝的裂纹;然而,固溶处理后焊缝强度低于母材,形成“软化带”,发生平行于焊缝的裂纹。建立了考虑接头微区的非均质材料硬化模型和基于微观损伤的拼焊板成形开裂预测模型,实现了2219铝合金拼焊板变形行为准确预测^[15, 16]。在此基础上,采用优化的搅拌摩擦焊接参数和热处理工艺,制备出性能均匀的大尺寸2219铝合金拼焊板坯(直径4.2 m,厚度8 mm),解决了大规格铝合金拼焊板组织性能不均、难于高性能制备的瓶颈难题,为研发大尺寸箱底流体压力成形工艺奠定了基础。

2.3 非均质薄壳塑性失稳机制

大型曲面薄壳厚度与直径之比小于临界值时,整体成形的变形稳定性低,易诱发塑性失稳,导致起皱缺陷难于控制。临界起皱应力作为板材进入塑性失稳临界状态的理论判据,可以反映板坯在某一变形条件下的起皱趋向性。为此,建立了曲面薄壳塑性失稳的临界应力模型,揭示了流体压力、厚径比等参数对临界起皱应力的影响规律,为起皱预测与控制提供了理论判据^[17-19]。如图4所示,随流体压力增大,抗失稳能力增强,起皱趋势降低。建立薄壳流体压力成形过程变形区的几何和应力解析模型,分析了流体压力对反胀行为和应力的影响规律,发现悬空区存在“双应力峰”,通过流体压力可以调控应力峰值,控制板坯变形^[9]。揭示薄壳流体压力成形塑性失稳机制,通过起皱压力和破裂压力解析方程,确定了2219铝合金拼焊板薄壁曲面件流体压力成形工艺窗口,实现了非线性加压曲线优化设计,实验验证了临界边界窗口和压力曲线模型的正确性。

2.4 应力调控原理与缺陷控制

与传统拉深成形不同,发现流体压力下变形区产生“反胀效应”,提出了应力状态调控原理,发明了可控加压流体压力成形方法,通过控制正向和反向流体压力比,使悬空区由拉一压应力状态改变为拉一拉应力,避免起皱缺陷;同时,较大的静水压力下,变形域的断裂面增大,有利于抑制开裂,从而在本质上解决起皱和开裂并存的难题,如图5所示。

为获得流体压力对应力分布的影响规律,建立了各向异性非均质本构关系及仿真模型,研究发现:随压力比提高,悬空区反胀变形减小,焊缝环向应力降低;压力比为0.5时,悬空区处于合理应力状态,有利于避免焊缝开裂。同时,获得了反胀效应对曲面薄壳变形分布的影响,结果表明:可控流体压力成形显著提高壁厚分布均匀性,与传统拉深比,两种不同反胀形状下的壁厚均匀性提高45%^[20]。工艺仿真获得了3 m级箱底成形的合理加载工艺窗口,如图6所示,当加载曲线在成形窗口以上时,箱底开口附近易发生开裂;当加载曲线在成形窗口以下时,箱底球面发生起皱缺陷,仿真结果为成形工艺实验提供了科学依据,壁厚预测误差<5%^[16]。可

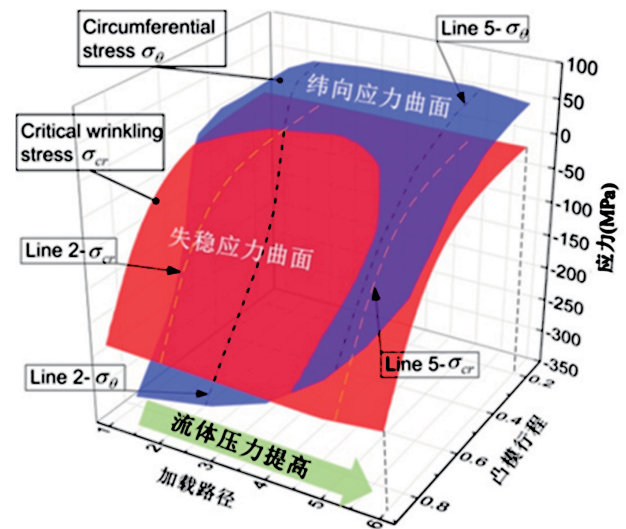


图4 曲面薄壳塑性失稳的临界应力模型

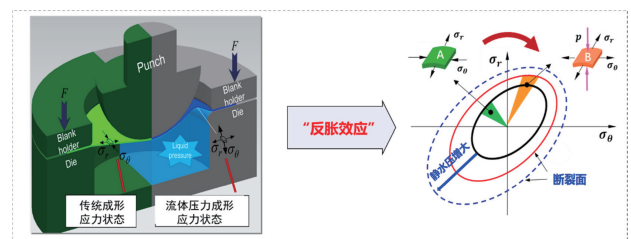


图5 流体压力成形“反胀效应”与应力调控原理

控加压流体压力成形方法,解决大尺寸非均质薄壳起皱和开裂并存的国际难题,实现了3 m级箱底壁厚分布的优化控制,突破了厚径比 $<3\%$ 的传统技术极限。

2.5 3 m级箱底整体成形及性能测试

建立了拼焊板焊接—固溶处理—流体压力成形—人工时效的工艺路线,提出了焊后热处理的组织性调控方法。通过理论分析和实验验证的模型高精度仿真建立了流体压力与位移加载曲线,采用与构件等厚度拼焊薄板直接成形出3 m级整体箱底构件,如图7所示。箱底壁厚均匀性好,最大壁厚减薄率 $<7.6\%$,壁厚偏差优于设计要求;抗拉强度 ≥ 430 MPa,比设计要求值(400 MPa)提高7.5%。整体箱底贴膜度 <0.5 mm,优于拼焊箱底2倍多^[10, 11]。通过了航天标准的耐压和气密性试验考核,达到型号产品的使用要求。此外,箱底零件数量由拼焊结构的7块变为1块,消除了箱底焊缝20 m,大幅提高箱底承载能力和火箭的可靠性。同时,该技术带来很好的经济效益,提高了我国箱底批产能力,减少大量工序和模具,生产周期缩短约2/3、材料利用率提高到70%。

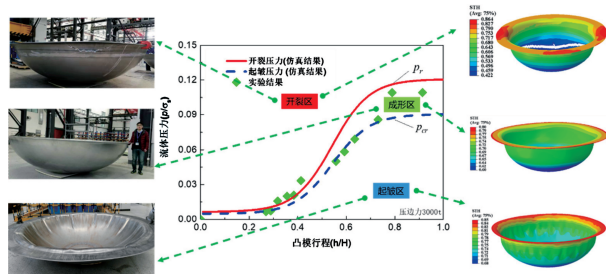


图6 3 m级薄壁箱底流体加载工艺实验和仿真



图7 3 m级2219铝合金贮箱箱底

3 成果总结与展望

(1) 定量表征非均质拼焊板成形性能,实现大尺度拼焊板制备和性能调控;揭示了双向应力状态下拼焊板塑性失稳机制,建立了曲面薄壳流体压力理论计算模型,提出以临界起皱应力为判据的加载曲线制定方法。

(2) 提出基于“反胀效应”的流体压力成形原理,发明了可控加压流体压力成形方法,解决大尺寸非均质薄壳起皱和开裂并存的国际难题,突破了厚径比3%的传统成形极限^[7]。

(3) 在国际上首次采用与构件近等厚的铝合金拼焊薄板直接整体成形出3 m级箱底,通过航天标准严格考核验证。入选“中国航天科技集团公司十大技术突破项目”,并列入中国航天科技集团公司战略发展关键技术。

(4) 项目成果编入《锻压手册(第4版)》,发表在IJMS(《国际机械科学杂志》)、《机械工程学报》等SCI论文共计12篇,中文期刊论文6篇;在本领域国际/国内会议做学术报告6人次;授权国家发明专利7项,申请国际发明专利1项。

项目发展了铝合金拼焊板流体压力成形技术,揭示了流体压力下非均质壳体塑性失稳机制,解决大尺寸薄壳起皱和开裂并存的国际难题,改变了美国NASA、欧空局沿用半个世纪的技术路线,打破了欧美对我国火箭制造关键技术的封锁,实现工艺核心技术自主可控,是我国在航天薄壁件整体成形技术的重大突破。展望未来,面向我国对5 m以上特大尺度箱底整体制造的重大需求,将发展全新的低载荷整体成形技术和装备。

参 考 文 献

- [1] 姚君山,蔡益飞,李程刚. 运载火箭箭体结构制造技术发展与应用. 航空制造技术, 2007, 50(10): 36—42.
- [2] 刘欣,王国庆,李曙光,等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望. 航天制造技术, 2013(1): 1—6.
- [3] 顾名坤,何巍,唐科,等. 我国液体运载火箭结构系统发展规划研究. 宇航总体技术, 2021, 5(2): 55—637.
- [4] 杨瑞生,陈友伟,王婧超,等. 商业化液体火箭箭体结构低成本快捷制造技术. 深空探测学报(中英文), 2021(1): 70—79.
- [5] 李宝蓉,张丽娜. H-2B运载火箭贮箱制造技术与应用. 航天制造技术, 2008(5): 35—37.

- [6] 田恕, 李继光, 张杰刚, 等. 大尺寸薄壁瓜瓣构件的充液成形技术研究与应用. 锻压技术, 2019, 44(1): 68—72.
- [7] Hoffman EK, Domack MS, Torres PD, et al. Spin forming aluminum crew module (CM) metallic aft pressure vessel bulkhead (APVBH)—Phase II. NASA technical report, 2015, 12: 218674.
- [8] 张杰刚, 李继光, 周超, 等. 拉形轨迹对铝合金贮箱箱底瓜瓣拉形形成的影响. 锻压技术, 2019, 44(10): 29—33.
- [9] 刘伟, 徐永超, 陈一哲, 等. 薄壁曲面整体构件流体压力成形起皱机理与控制. 机械工程学报, 2018, 54(9): 37—44.
- [10] 李辉, 孙斌, 丁森. 火箭贮箱箱底瓜瓣拉深成形数值模拟. 上海航天, 2012, 29(4): 54—58.
- [11] 刘伟, 徐永超, 胡蓝, 等. 大尺度薄壁曲面整体构件流体压力成形技术与装备. 锻压技术, 2020, 45(8): 42—48.
- [12] 苑世剑, 刘伟, 王国峰, 等. 轻合金复杂薄壁构件流体压力成形技术新进展. 上海航天, 2019, 36(2): 31—37.
- [13] 刘伟, 陈一哲, 徐永超, 等. 复杂曲面件多向加载液压成形技术. 精密成形工程, 2016, 8(5): 1—6.
- [14] Liu W, Cheng WJ, Xu YC, et al. Enhancing formability of AA2219 aluminum alloy friction stir welded blanks with preheating treatment. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(9): 4819—4828.
- [15] 徐永超, 周斌军, 聂辉. 2219 铝合金板材搅拌摩擦焊接接头局部力学性能研究. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 50—54.
- [16] 程旺军, 刘伟, 胡蓝, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊板硬化方案的建立与液压成形过程分析. 塑性工程学报, 2020, 27(10): 27—32.
- [17] 陈一哲, 刘伟, 苑世剑. 薄板液压成形起皱预测及控制研究进展. 机械工程学报, 2016, 52(4): 20—28.
- [18] Chen YZ, Liu W, Zhang ZC, et al. Analysis of wrinkling during sheet hydroforming of curved surface shell considering reverse bulging effect. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 120: 70—80.
- [19] Chen YZ, Liu W, Xu YC, et al. Analysis and experiment on wrinkling suppression for hydroforming of curved surface shell. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 104: 112—125.
- [20] Liu W, Chen YZ, Yuan SJ. Mechanism analysis on thickness distribution of aluminum alloy hemispherical shells in double-sided sheet hydroforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5/6/7/8): 2011—2020.

Mechanism and Defects Control of Fluid Pressure Forming for Large-sized Inhomogeneous Shell

Yuan Shijian^{1*} Liu Wei^{1*} Xu Yongchao¹ Hu Lan² Zhang Zhichao² Guo Lijie²

1. Institute of Fluid Pressure Forming Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

2. Shanghai Aerospace Equipments Manufacture, Shanghai 200245

Abstract The progress and achievements of the project supported by NSFC (U1637209) are introduced in this paper. Aiming to the urgent demand on integrated manufacture of tank dome for new generation launch vehicles, and the problem on plastic instability of inhomogeneous shell during integrated forming process, the complicated deformation behavior and instability mechanism of the tailored blank under fluid pressure were revealed. The technology of controllable fluid pressure forming process was invented, which was used to overcome the worldwide challenges on co-occurrence of bursting and wrinkling defects and the limit boundary of thickness to diameter ratio was exceeded. A dome of 3 meter in diameter was deformed in the world by the first time using tailored blank with thickness close to the component, which solves the key issues on the manufacture of integrated structure for launch vehicle.

Keywords rocket dome; inhomogeneous shell; fluid pressure forming; defects control

(责任编辑 吴征天)

* Corresponding Author, Email: syuan@hit.edu.cn, liuw@hit.edu.cn