

运载火箭铝合金贮箱全搅拌摩擦焊接工艺及应用

郝云飞¹ 王国庆² 周 庆¹ 厉晓笑¹ 李劲松¹

(1 首都航天机械公司,北京 100076)

(2 中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

文 摘 搅拌摩擦焊技术具有焊接缺陷少、焊接变形小、接头性能高等优点,是运载火箭铝合金贮箱制造的发展趋势。本文分析了我国运载火箭贮箱的结构组成和主焊缝结构特点,系统梳理并研究了实现贮箱主焊缝全搅拌摩擦焊接制造所需要的关键技术,包括常规搅拌摩擦焊技术、可回抽搅拌摩擦焊技术、超声相控阵检测技术及补焊技术。研究成果已经逐步实现了在运载火箭贮箱筒段纵缝、箱底主焊缝、贮箱总装环缝上的工程化应用。

关键词 运载火箭贮箱,主焊缝,全搅拌摩擦焊接,关键工艺,应用

中图分类号: TG4

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2016.06.003

Application of All Friction Stir Welding Technology on the Launch Vehicle Tank

HAO Yunfei¹ WANG Guoqing² ZHOU Qing¹ LI Xiaoxiao¹ LI Jinsong¹

(1 Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

(2 China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract Friction stir welding technology has become the manufacturing trend of launch vehicle aluminum tank due to the characteristics of less weld defects, small welding deformation, high joint performance, and so on. This paper analyzes the rocket tank structure composition and the main weld structure characteristics, and systematically studied all the key technologies used to realize the all-friction-stir-welded tank manufacturing, including conventional friction stir welding technology, phased array ultrasonic inspection technology and repair welding technology. The results of this paper has been gradually applied to the longitudinal weld, the main weld of the dome, and the circumferential weld of the launch vehicle tank.

Key words Launch vehicle tank, All Friction Stir welded tank, Key techniques, Application

0 引言

搅拌摩擦焊技术是1991年英国焊接研究所发明的一项新型固相焊接技术^[1]。由于焊接温度未达到轻质合金熔点,可以有效避免轻质合金熔焊过程中易出现的气孔、夹杂、热裂纹等冶金缺陷,该技术的出现为轻质合金的焊接带来了革命性的变化。搅拌摩擦焊技术一出现便使得工业界产生了极大的兴趣,尤其是航天领域。美国宇航机构已经实现了搅拌摩擦焊技术在运载火箭贮箱上的规模化工程应用。例如:波音公司率先应用于Delta II火箭中间舱段的制造,

并于1999年8月17日成功通过飞行考核,之后推广应用于Delta II、Delta IV、航天飞机外贮箱的承压筒段制造^[2];此外,美国NASA实现了Ares I火箭的 $\Phi 5.5$ m箱底及 $\Phi 3.6$ m猎户座载人飞船的全搅拌摩擦焊接(图1)。随着搅拌摩擦焊技术的优势逐渐被认识,我国也开始将该技术应用于铝合金结构件的制造中。本文介绍了我国运载火箭贮箱的结构组成、焊缝特点及贮箱全搅拌摩擦焊接制造所需要的关键工艺,为实现该技术在我国贮箱上的应用提供技术支持。

收稿日期:2016-01-18;修回日期:2016-09-18

作者简介:郝云飞,1984年出生,硕士,工程师,主要从事搅拌摩擦焊、摩擦塞补焊、运载火箭贮箱研制等工作。E-mail: haoyunfei1234@163.com

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第6期

— 11 —



图1 搅拌摩擦焊技术在美国宇航产品中的应用

Fig. 1 Application of friction stir welding technology in the American aerospace products

1 铝合金贮箱主焊缝结构特点及其关键焊接工艺

铝合金贮箱是火箭最主要的结构组成部分,主要由前(后)箱底、前(后)短壳以及若干个中间筒段组成(图2)。铝合金贮箱主焊缝主要包括3类:(1)筒段或短壳通常由3~4块壁板组成,焊缝为长直焊缝;(2)箱底由叉形环、瓜瓣圆环、顶盖及若干法兰组成,主焊缝为变曲率瓜瓣纵缝和封闭环缝;(3)短壳与箱底、箱底与筒段以及筒段与筒段之间的贮箱总装环缝。上述3类贮箱主焊缝均适宜搅拌摩擦焊接,但由于不同部段的主焊缝结构及零部件精度等存在差异,导致所采用的焊接工艺存在一定差异,主要表现如下。

(1) 筒段纵缝和变曲率瓜瓣纵缝可以在焊后通过机械去除前、后端的焊接余量达到图纸尺寸要求,因此这两类主焊缝采用常规搅拌摩擦焊技术进行焊接。但是由于零部件状态、装配状态以及焊接轨迹的不同,在焊接控制方式上存在差异。因此对于筒段纵缝和变曲率瓜瓣纵缝,关键焊接工艺在于常规搅拌头

研制和焊接过程控制。

(2) 对于箱底封闭环缝和贮箱总装环缝的搅拌摩擦焊接,需要解决常规搅拌摩擦焊接结束时的匙孔问题,保证焊缝结构的完整性。可回抽搅拌摩擦焊技术是解决封闭环缝无匙孔焊接的有效途径,其关键点在于分体式可回抽搅拌头研制及无匙孔可回抽焊接工艺。

(3) 搅拌摩擦焊缝除了X射线探伤可检测到的体积型缺陷(孔洞、沟槽等)以外,还包括一些特有的缺陷,例如弱结合缺陷。超声相控阵检测技术是目前可以检测出弱结合缺陷的唯一检测方法。因此超声相控阵检测技术是搅拌摩擦焊实现工程化应用的关键工艺之一。

(4) 搅拌摩擦焊难以避免会出现焊接缺陷,例如:孔洞、沟槽、未焊透、搅拌头折断产生的“匙孔”、以及整箱状态下出现的焊接缺陷等。因此欲实现运载火箭贮箱的全搅拌摩擦焊接,必须解决搅拌摩擦焊缝缺陷的补焊问题。

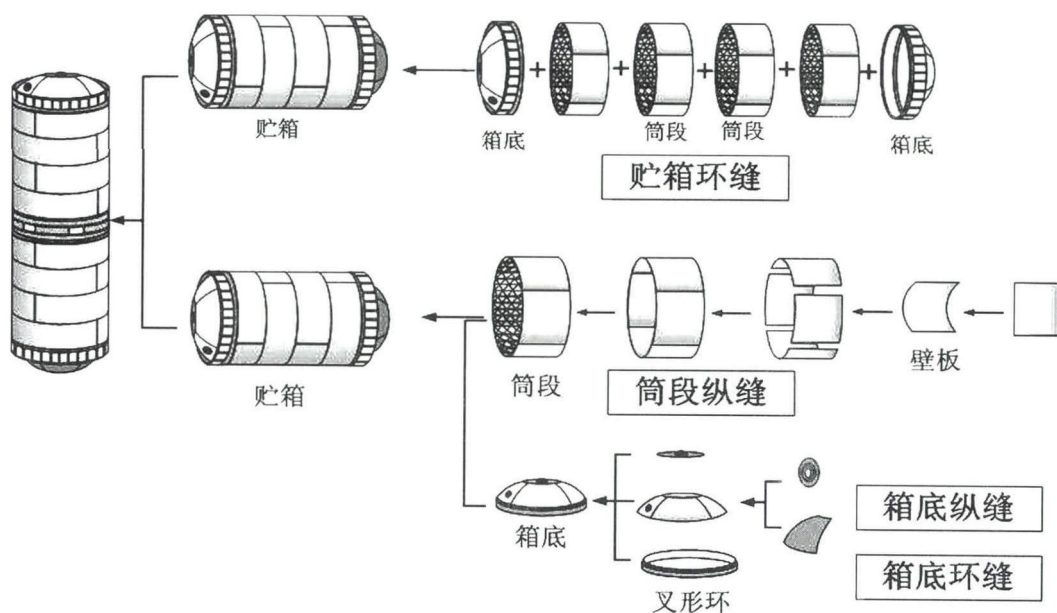


图2 运载火箭贮箱主体结构及主焊缝示意图

Fig. 2 Schematic diagram for the structure and main seam of the launch vehicle tank

2 全搅拌摩擦焊接贮箱应用的关键工艺技术

以我国新一代运载火箭中的 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 贮箱模块及 6 mm 厚 2219 铝合金为研究对象,总结了全搅拌摩擦焊接贮箱研制过程中所面临的关键技术(包括常规搅拌摩擦焊接技术、可回抽搅拌摩擦焊接技术、超声相控阵检测技术及补焊技术等)。

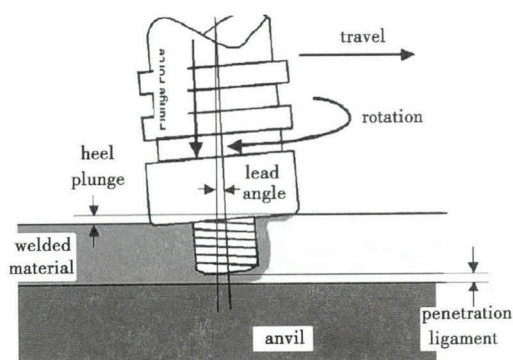
2.1 常规搅拌摩擦焊接技术

2.1.1 常规搅拌头

在贮箱筒段长直纵缝和瓜瓣纵缝的搅拌摩擦焊接中,常规搅拌头是其核心技术,其发展大致经历了 3 代。

(1) 第一代常规搅拌头轴肩为内凹结构的搅拌头(图 3),通常为 $7^\circ \sim 12^\circ$,这是工业中应用最为广泛的。该搅拌头适合于带倾角焊接工艺(通常为 $2^\circ \sim 3^\circ$),轴肩内凹结构设计可以使焊缝上表面塑性金属受到向

内、向下的作用力。在焊接高强铝合金或者厚板时,需要对单一的内凹结构进行改进,主要是为了增加焊接热输入,例如:在内凹斜面的基础上增加“同心圆环结构、辐条形结构、螺旋线结构、斑点型结构”等,如图 4 所示。随着板材厚度的增加,为了增加焊缝热输入和内部塑性金属的流动能力,搅拌针结构逐渐从单一的圆锥螺纹结构(Screw Thread)过渡至 Three Flats 结构、甚至 MX TrifluteTM 结构(图 5)。常规搅拌头轴肩与搅拌针根部的直径比例也是一个很重要的参数,通常为 $2.5^\circ \sim 3^\circ$,随着焊接厚度的增加,比例可以逐渐减小。该类结构搅拌头在我国运载火箭贮箱生产中应用广泛,但存在一些问题:一方面带倾角焊接导致焊缝表面存在一定程度的减薄;另一方面在平面复杂焊缝和三维曲线焊缝上的应用难度较大。



(a) 内凹结构搅拌头的带倾角焊接工艺



(b) 内凹倾角轴肩结构的搅拌头

图 3 内凹轴肩结构搅拌头及其带倾角焊接工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram for the FSW process with the tilt angle

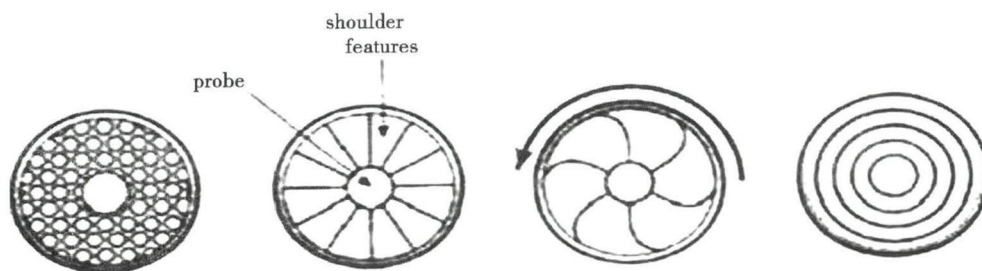
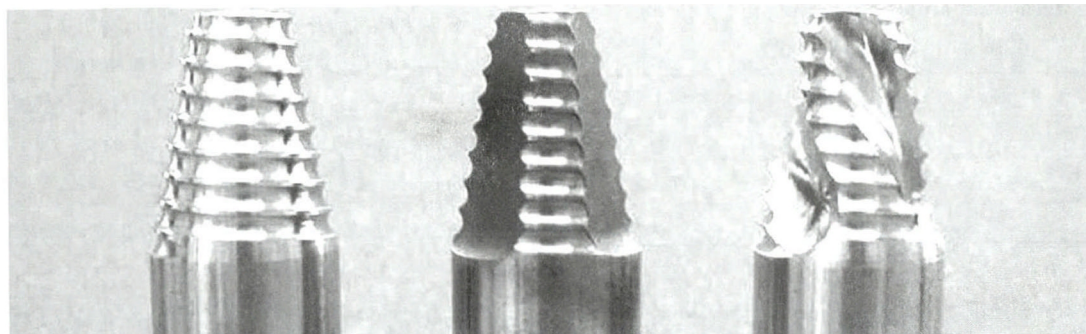


图 4 内凹斜面 + 改进结构的轴肩

Fig. 4 Shoulder with the concave structure



(a) Screw Threads

(b) Three flats

(c) MX TrifluteTM Tool

图 5 工程应用常用的 3 种结构的搅拌针

Fig. 5 The three kinds of pins in engineering application of FSW

(2) 第二代常规搅拌头的轴肩结构为“平面 + 内聚螺纹结构”(图6),适用于 0° 倾角下的长直焊缝焊接,内聚螺纹结构导致焊缝表面成型非常好,无焊缝

减薄。只是其平面结构导致对轴肩下压量的适应性不好,焊接中需要频繁调节。另外,对长直焊缝的装配错缝要求较高,故很少在贮箱的长直焊缝中应用。

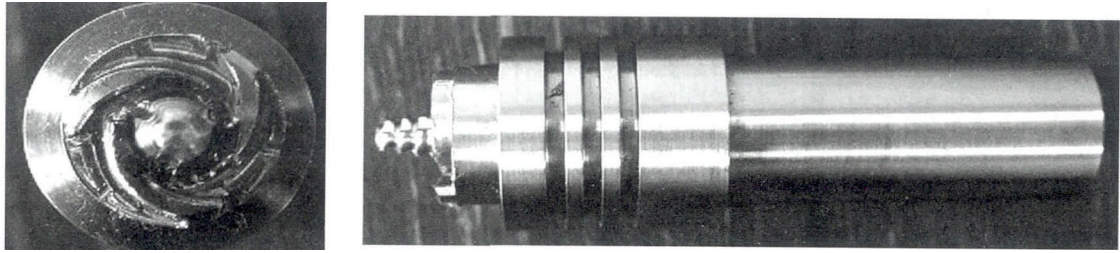


图6 “平面 + 内聚螺纹”轴肩结构的第二代搅拌头

Fig.6 The second generation pin tool

(3) 第三代搅拌头为“外凸锥型或外凸圆球面 + 内聚螺纹结构”(图7),对轴肩下压量的适应性很好,焊接中不需要全部将轴肩下压至母材即可形成有效的焊缝成型^[3]。该类搅拌头既适合于 0° 倾角焊接,也适合于 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 的低倾角焊接,焊缝表面成型非常好,其内聚螺纹结构引起的径向上向焊缝内部聚拢塑性金属的作用,致使焊缝几乎无飞边、无焊缝减薄,非常适用于平面内复杂及三维曲线焊缝的焊接。

目前在搅拌摩擦焊装备上应用最普遍的是恒位移和恒压力两种控制方式(图8)。

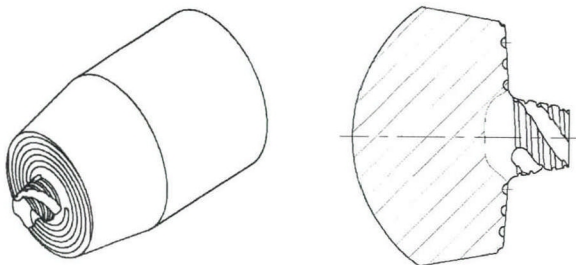
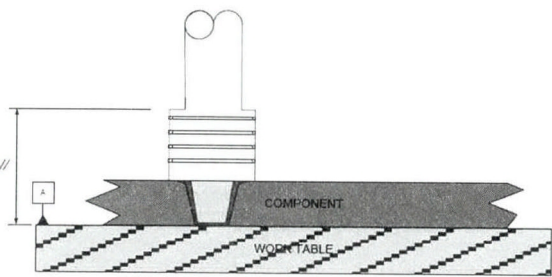


图7 “外凸锥型或外凸球面 + 内聚螺纹”轴肩结构的第三代搅拌头

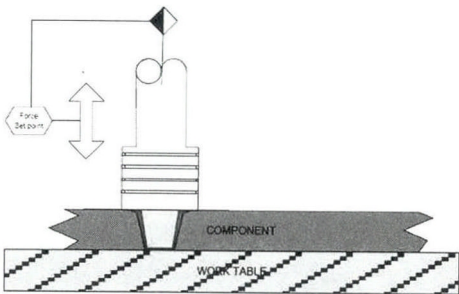
Fig.7 The third generation pin tool

2.1.2 常规搅拌摩擦焊接接头力学性能

采用第一代搅拌头在 2.5° 倾角下和第三代搅拌头分别在 0° 、 1° 倾角下对6 mm厚2219C10S铝合金进行了搅拌摩擦焊接,测试了接头抗拉强度和延伸率(表1)。



(a) 恒位移



(b) 恒压力

图8 搅拌摩擦焊接工程化应用中的两种典型控制模式

Fig.8 Two representative control modes in the application of friction stir welding

表1 不同结构搅拌头在不同焊接倾角下的接头力学性能

Tab.1 Mechanical properties of the joint with the different friction stir tools

搅拌头类型	焊接倾角/ $^\circ$	抗拉强度/MPa	延伸率/%
内凹轴肩结构	2.5	325 ~ 335	5.5 ~ 7.0
外凸球面轴肩结构	0	320 ~ 335	4.5 ~ 8.5
	1	320 ~ 340	4.5 ~ 8.0

从表中可以看出,2类结构搅拌头及不同焊接倾角下的接头力学性能无明显差异,其抗拉强度系数均能达到70%以上,延伸率在3.5%以上。

2.1.3 搅拌摩擦焊的恒位移和恒压力控制方式

这两种控制方式各有优缺点,在实际生产中既可单独使用,也可结合使用。(1) 恒位移控制方式是最简单的一种控制方式,其理想方式在于焊接过程中搅拌头的运行轨迹与焊接垫板表面平行。目前我国的搅拌摩擦焊设备普遍采用此种控制方式,非常适用于运载火箭贮箱筒段的长直纵缝。另外我国现役系列运载火箭的化铣壁板,由于其焊接区厚度精度较差,为了保证焊缝充分焊透,也适宜采用该方式。但是其缺点在于焊接过程中需要较多的人为干预搅拌头的下压量。(2) 恒压力控制方式指的是焊接过程中维持焊接压力在一个恒定值。通常在焊接主轴上集成

恒压力控制单元,实时检测主轴压力,与设定值比较,并自主干预焊接主轴的抬升或下压。这种控制方式非常适合于贮箱变曲率箱底纵缝、数控加工筒段壁板纵缝、环缝的焊接。在实际工程应用中,恒压力和恒位移控制方式通常结合使用,即在主轴下压阶段通常采用恒位移控制方式,当进入正常焊接阶段后切换至恒压力控制方式。

2.2 无匙孔可回抽搅拌摩擦焊接工艺

环缝无匙孔焊接采用一种特殊结构的可回抽搅拌头。该搅拌头与工件接触部位的结构设计与常规搅拌头相同,其最大的特点在于轴肩与搅拌针采用分体式结构设计(图9)。和常规搅拌头相比,可回抽搅拌头的刚性较弱,在实际工程应用搅拌针应该选择高温性能更好的材料,例如GH4169、MP159等。封闭环缝的无匙孔焊接原理如图10~11所示,从A点开始逆时针旋转,在 $0\sim 360^\circ$ 范围内焊接时搅拌针长度保持不变;当搅拌针穿过起始焊接位置时(A点),在一定距离内搅拌针长度依旧保持不变(A~B),之后

从B点开始轴肩和搅拌针在垂直方向上相对运动,逐渐将搅拌针缩回至轴肩内,即搅拌针长度逐渐缩短,同时焊缝深度也逐渐减少;当搅拌针端面与轴肩端面位于同一平面时(即C点),焊接结束,形成完整的封闭环缝。

对于封闭环缝的无匙孔焊接,搅拌针在回抽区域的运动轨迹是非常值得研究的。为此在6 mm厚2219C10S铝合金母材上进行回抽工艺模拟,并从起始回抽、回抽25%、50%、75%以及回抽结束处沿焊缝横截面取金相试样进行观察。金相分析结果显示(图12)。不同取样处的横截面宏观形貌均为典型的搅拌摩擦焊接头,但是其焊透深度在逐渐变浅,可以认为是“相同直径的轴肩+不同长度的搅拌针”组成的搅拌头焊接的常规搅拌摩擦接头。对取样位置和焊透深度的相对关系进行分析得出,两者基本上呈线性关系,因此回抽过程中搅拌针运动轨迹是焊接速度与“搅拌针相对于轴肩的收缩运动”的线性合成运动(图13~图14)。

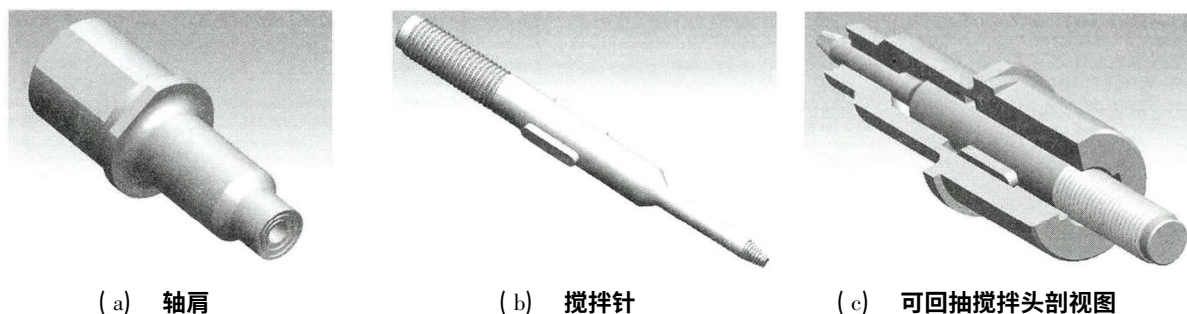


图9 分体式可回抽搅拌摩擦焊工具

Fig. 9 Retractable pin tool for the circumferential welds

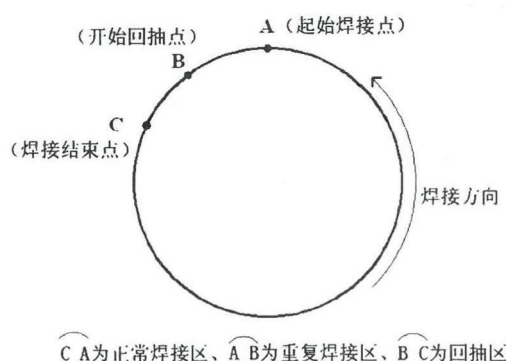


图10 可回抽搅拌摩擦焊工艺原理示意图

Fig. 10 Principle for the retractable friction stir welding

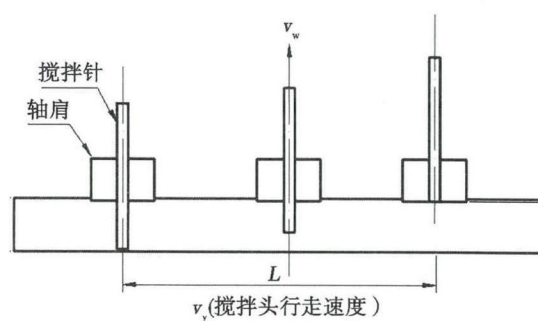
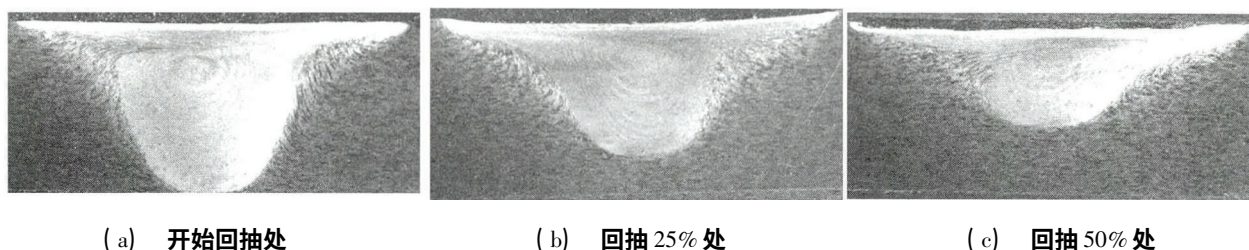


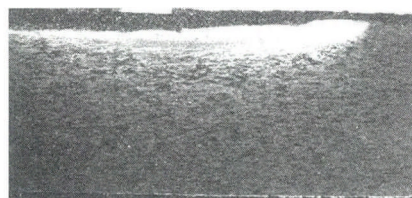
图11 B~C点搅拌针回抽运动示意图

Fig. 11 Retractable track of pin





(d) 回抽 75% 处



(e) 回抽结束处

图 12 6 mm 厚 2219 铝合金母材上的回抽工艺模拟试验

Fig. 12 Sectional morphologies of weld seam for simulation of retractable FSW technology

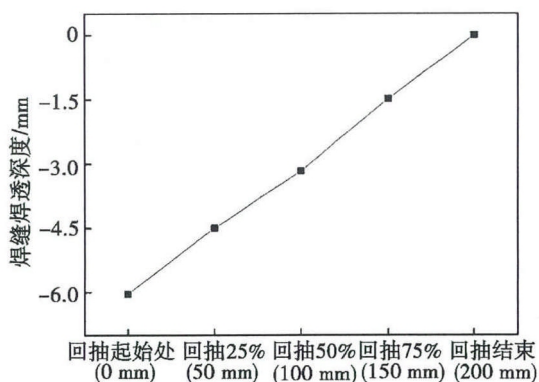


图 13 金相取样位置与焊缝焊透深度相对关系

Fig. 13 Relation of weld depth and sampling location

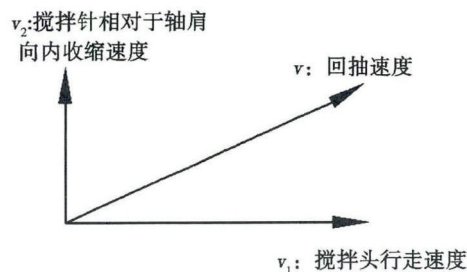


图 14 模拟试验中搅拌针运动轨迹示意图

Fig. 14 Schematic of retractable track

对于可回抽搅拌摩擦焊接工艺,搅拌针回抽速度对回抽区域接头内部质量和力学性能具有相当重要的影响(图 15)。

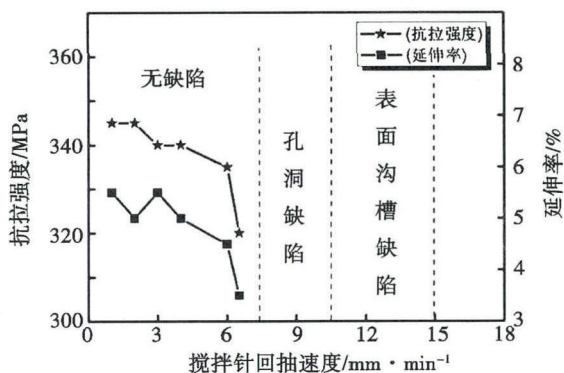


图 15 回抽速度对焊缝成型及性能的影响

Fig. 15 Effect of retracting speed for mechanical properties

当回抽速度过快时,回抽过程中单位时间内在搅拌针底部产生的空腔体积增大,塑化的塑性金属来不及填充空腔,则容易在回抽区域焊缝内部产生空洞缺陷,甚至表面沟槽缺陷(图 16)。试验结果显示:随着

回抽速度的降低,回抽区域焊缝成型越来越好,由表面沟槽缺陷、孔洞型缺陷直至无缺陷接头^[4]。而当接头无缺陷后,随着搅拌针回抽速度的再次降低,回抽区域的接头力学性能呈现出逐渐升高的趋势,可达到 330 MPa 以上。但是在实际工程应用中,回抽速度过慢可能会影响焊缝表面成型,甚至导致接头力学性能不稳定等。

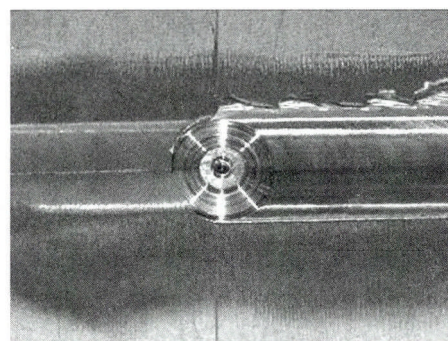


图 16 匙孔消除处形貌

Fig. 16 Elimination of keyhole

2.3 搅拌摩擦焊缝的超声相控阵检测技术

超声相控阵检测技术是进行搅拌摩擦焊缝检测最为有效的方法,该技术可以直观反映缺陷的形态和尺寸,利于研究人员对接头缺陷做出恰当的评价和描述,使得接头缺陷的检测与评定技术易于操控和掌握。文中采用国际上应用最为广泛的加拿大 R/D tech 公司研制的 Omni Scan MX 超声相控阵设备,对采用特殊工艺预制缺陷的 6 mm 厚 2219C10S 铝合金搅拌摩擦焊缝进行超声相控阵检测、X 射线探伤和金相剖切分析,结果如下。

2.3.1 弱结合、未焊透缺陷

弱结合是搅拌摩擦焊特有的焊接缺陷,被连接材料间紧密接触但未形成有效的物理结合,位于焊缝的根部,从试件对接处向内延伸,类似微裂纹,宽度只有几微米,长度大概在数十微米到数百微米不等,常规检测方法很难检测此类缺陷。从图 17 中可以看出弱结合缺陷金相检测长度为 143 μm,宽度 < 1 μm,弱结合缺陷采用 X 光无损检测方法是无法检测出来的,而通过超声相控阵检测技术和剖切金相检查能够发现该类缺陷。未焊透缺陷与弱结合缺陷处于同一个

位置,都位于焊缝根部,区分这两类缺陷的主要指标是,未焊透缺陷宽度尺寸(数百微米)远大于弱结合缺陷的宽度尺寸($<1\ \mu\text{m}$),因此未焊透缺陷在低倍

显微镜下就可以观测到,而弱结合缺陷需要在高倍显微镜下才能观察到。

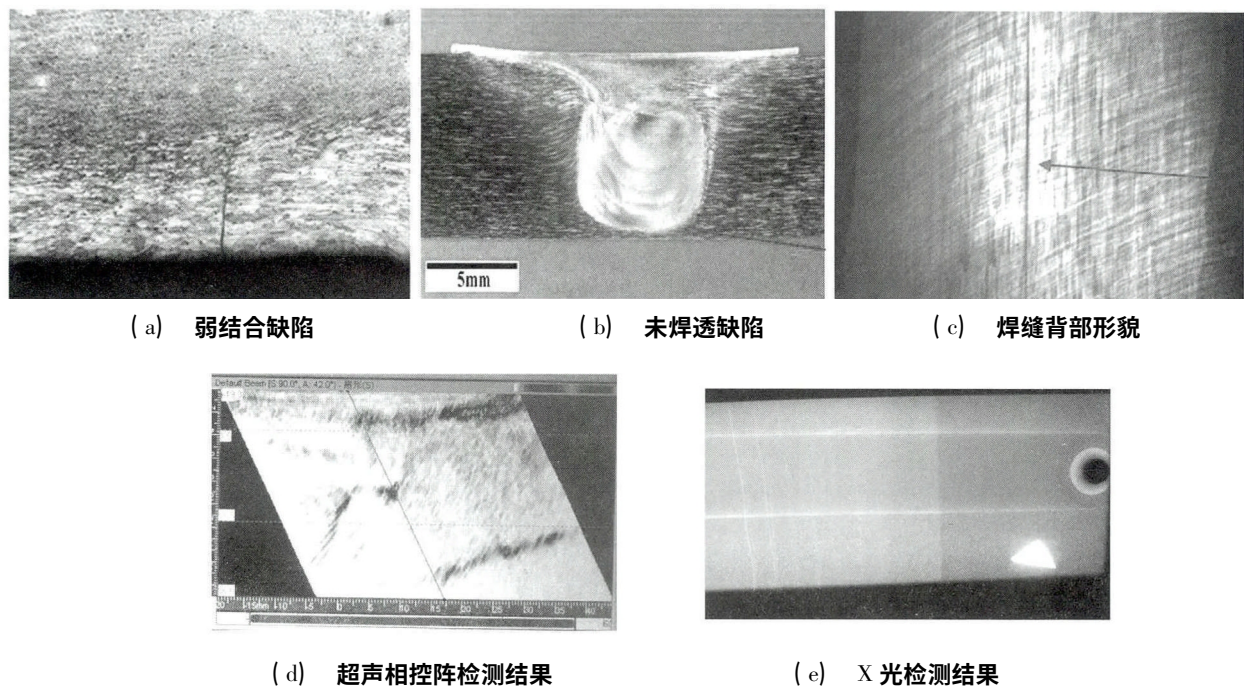


图 17 弱结合、未焊透缺陷检测结果对比

Fig. 17 Comparison of the NDT results of the kiss bonding and lack of penetration

2.3.2 孔洞型、趾跟型缺陷

图 18 为孔洞型缺陷,一般是在焊接参数不合理(焊接速度太高,旋转速度相对较低)或搅拌头形状不合理等情况下产生的。一般来说,出现孔洞型缺陷时,X 射线无损检测和相控阵超声波无损检测均可以

检出,而相控阵超声波检测还可以确定缺陷的基本位置。趾跟型缺陷主要位于焊缝上部分靠近前进侧区域,主要表现为组织疏松,通常与搅拌头根部设计不合理密切相关。

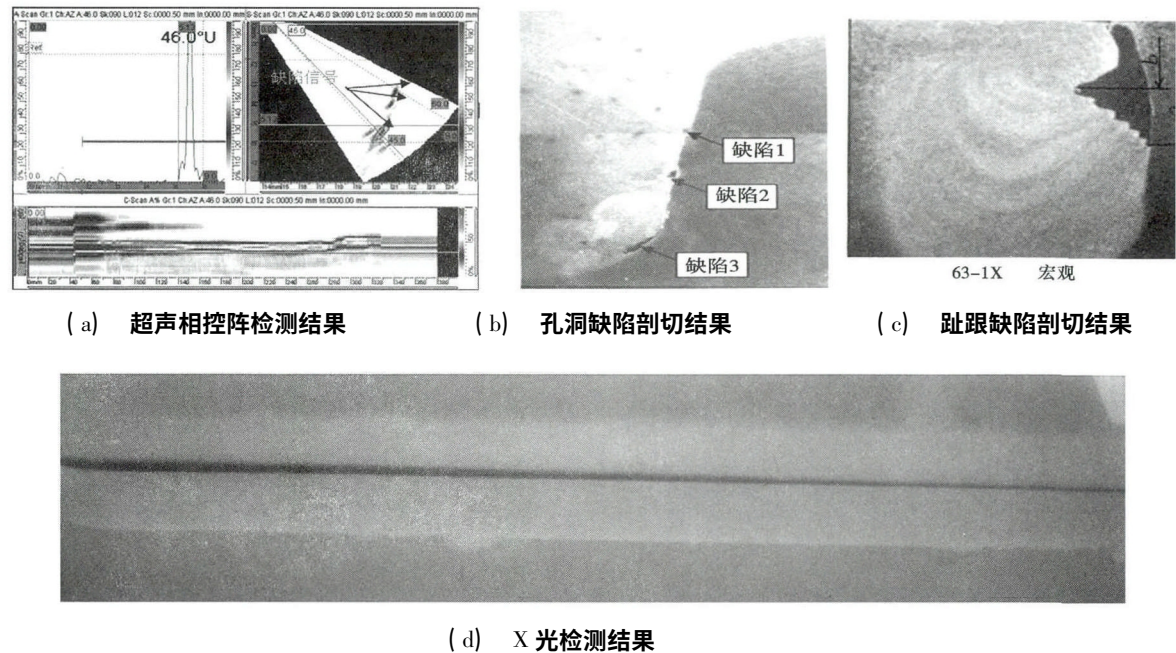


图 18 孔洞型、趾跟型缺陷检测结果对比

Fig. 18 The NDT results of the wormhole defect

2.4 搅拌摩擦焊缝缺陷的补焊技术

随着产品的变化、焊接缺陷的变化,其适应的补
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 6 期

焊工艺也存在差异。贮箱筒段、箱底、总装环缝焊接过程中可能出现的焊接缺陷的补焊方案(表 2)。

表2 运载火箭贮箱不同焊缝缺陷的补焊方案
Tab.2 Repair welding schemes for the different defects of the tank welds

缺陷种类	补焊方案
孔洞、沟槽、未焊透缺陷	FSW 补焊、多次 FSW 补焊
匙孔类缺陷	固相填充或熔焊填充 + FSW 补焊
贮箱下架后搅拌摩擦焊缝缺陷的修补	手工氩弧焊修补、摩擦塞补焊

对于贮箱筒段、箱底或总装环缝焊接过程中出现的孔洞、沟槽或未焊透等缺陷,通常采用搅拌摩擦焊补焊方案。另外修补过程中可能存在多次修补,对焊缝力学性能的影响值得关注。对 6 mm 厚 2219 铝合金焊缝进行 1~3 次重复焊接后的力学性能见表 3。可以看出,接头强度和延伸率变化都不大,这说明重复焊对接头性能影响不大^[8]。

搅拌摩擦焊过程中搅拌头因寿命问题而出现搅拌针折断的现象是很难避免的。此缺陷的修补方案如下:首先手工挖排将搅拌针取出,然后采用同种

牌号、同种状态的材料将空腔填满,或采用手工氩弧焊填充,最后采用专用搅拌头进行搅拌摩擦补焊(图 19)。表 4 为两种补焊方案匙孔修补位置的拉伸性能。结果表明:两种补焊方案接头力学性能均能达到设计要求,其中“固相修补 + FSW 补焊”接头与原始接头性能无明显差异,而“熔焊填充 + FSW 补焊”接头力学性能下降较多,这主要是由于熔焊填充过程中过渡的热输入引起的^[8]。

表3 搅拌摩擦焊接头重复焊次数对接头力学性能的影响

Tab.3 Effect of welding times on the mechanical properties of the joint

重复焊接次数/次	抗拉强度/MPa	伸长率/%
0	340	6.0
1	343.3	5.67
2	341.7	6.33
3	338.3	7.0

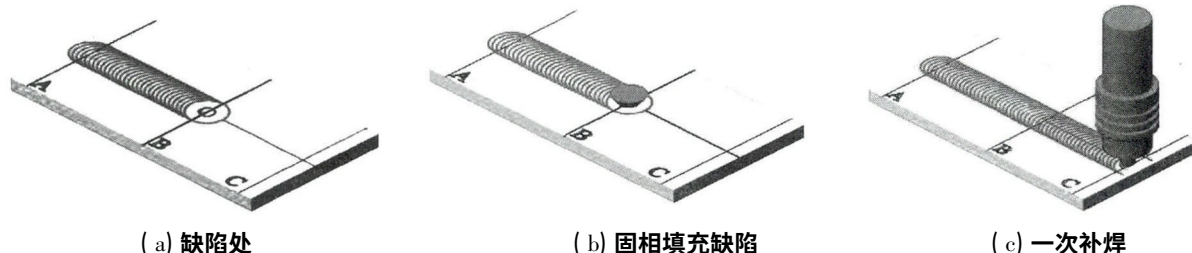


图19 固相填充或熔焊填充 + 搅拌摩擦焊修补缺陷方案

Fig.19 Repairing technology for the solid-state filling or fusion filling + FSW

表4 匙孔型缺陷的补焊接头力学性能
Tab.4 Tensile strength of the repair weld for the key-hole defect

接头	抗拉强度/MPa	伸长率/%
原始	330~345	5.0~7.0
固相填充 + FSW 补焊	335~345	5.0~8.0
熔焊填充 + FSW 补焊	280~295	5.0~6.5

贮箱下架后如果焊缝发现缺陷,可通过熔焊修补、摩擦塞补焊。6 mm 厚 2219 铝合金搅拌摩擦焊缝的熔焊修补接头抗拉强度分布在 250~265 MPa,伸长率高于 3.5%。对 4~8 mm 厚 2219 铝合金搅拌摩擦焊缝进行了摩擦塞补焊(图 20)。

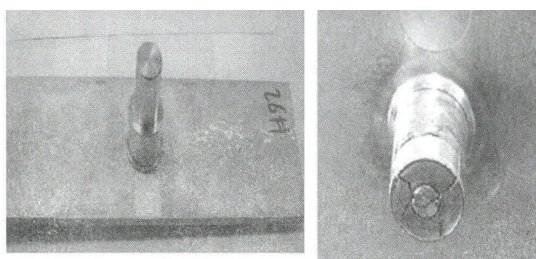


图20 摩擦塞补焊试样外观形貌

Fig.20 Morphology for the FPW sample

试验结果显示摩擦塞补焊技术修补焊缝缺陷效果显著,接头抗拉强度接近或达到了搅拌摩擦焊缝的力学性能(接头抗拉强度系数达到 0.7,伸长率均超过 3.5%)。值得说明的是,国内的摩擦塞补焊技术及装备还不成熟,因此现有条件下熔焊修补方案是整箱状态下搅拌摩擦焊缝缺陷修补的唯一方案。

3 搅拌摩擦焊技术在运载火箭贮箱中的应用

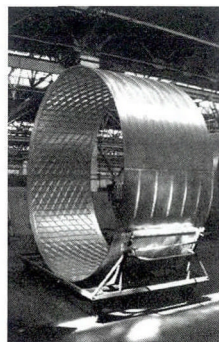
经过近十多年的技术攻关,首都航天机械公司逐步掌握了实现运载火箭贮箱全搅拌摩擦焊接制造的所有关键工艺,并逐步实现了在运载火箭贮箱筒段、箱底以及总装环缝上的工程化应用和考核。

3.1 贮箱筒段纵缝

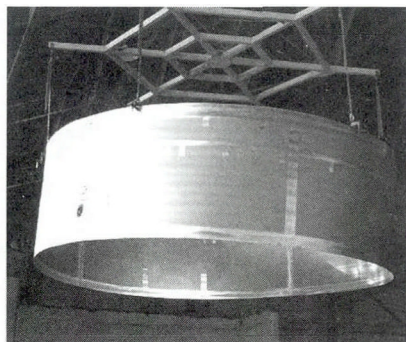
首都航天机械公司在国内率先实现了搅拌摩擦焊技术在 CZ-3A 系列运载火箭贮箱筒段纵缝上的工程化应用。2008 年在自主研制的搅拌摩擦焊设备上对 CZ-3C 一级燃烧剂箱体的中间筒段纵缝的搅拌摩擦焊接,并在 2009 年 4 月 15 日成功通过了国内首飞考核,成功发射北斗导航第 2 颗卫星。后续为了满足十二五高强密度发射和新一代运载火箭贮箱的研制需求,成功推广应用于现役运载系列、CZ-5、

CZ-7 等型号的 $\Phi 2\ 250\ \text{mm}$ 、 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 、 $\Phi 5\ 000\ \text{mm}$

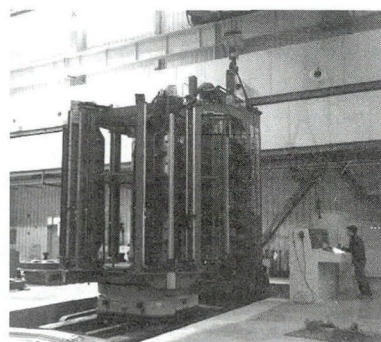
模块贮箱筒段纵缝的焊接。



(a) $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 筒段



(b) $\Phi 5\ 000\ \text{mm}$ 筒段



(c) 筒段纵缝 FSW 装备

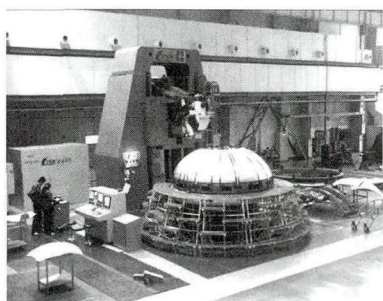
图 21 FSW 技术在运载火箭贮箱筒段纵缝上的应用

Fig. 21 Application of FSW in the longitudinal weld of the tank barrel

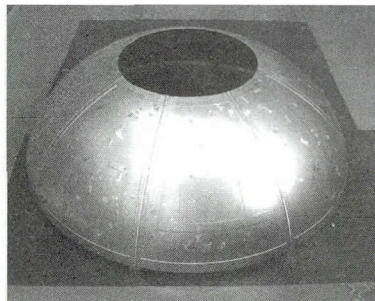
3.2 贮箱箱底主焊缝

首都航天机械公司和北京航空制造工程研究所联合研制了大型封闭框式悬臂搅拌摩擦焊接装备,采用恒压力控制下的常规搅拌摩擦焊接工艺和无匙孔可回抽搅拌摩擦焊接工艺,实现了 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 箱底主焊缝的搅拌摩擦焊接。2012 年采用搅拌摩擦焊接

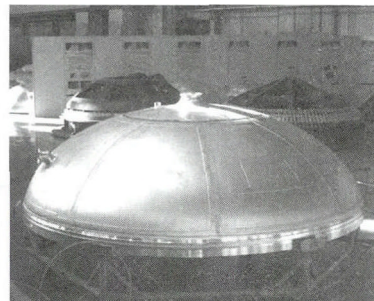
工艺生产的 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 箱底配套应用于 CZ-3B、CZ-3C 等型号火箭,并于 2012 年 9 月和 10 月成功通过国内首飞考核。目前该技术已推广应用于 CZ-5 等 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 椭球箱底生产中,且成功通过了低温静力、模振等试验考核。



(a) 箱底焊接设备



(b) FSW 焊接的瓜瓣圆环



(c) 全搅拌摩擦焊接箱底

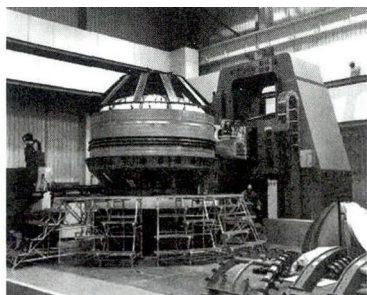
图 22 FSW 技术在运载火箭贮箱 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 箱底上的应用

Fig. 22 Application of FSW in the main welds of the $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ dome

3.3 贮箱总装环缝

和筒段、箱底相比,贮箱总装环缝的搅拌摩擦焊接技术难度更大。为了验证其技术应用可行性,在 2012 年 10 月份首都航天机械公司成功研制了国内首个 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 全搅拌摩擦焊接贮箱展示件。2013 年年底采用立式总装方式研制了国内首个全搅拌摩

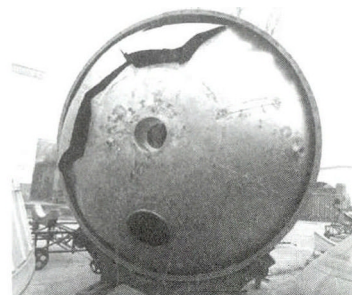
擦焊接贮箱,该贮箱设计使用载荷 $0.46\ \text{MPa}$,其静力试验结果达到了 $0.88\ \text{MPa}$ (图 23),且爆破位置位于箱底薄区母材上。2014 年研制了国内首台套大型非标卧式环缝搅拌摩擦焊接系统,并成功完成了某型号多个 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 贮箱正式产品的生产(图 24)。



(a) 立式总装



(b) 液压考核



(c) 爆破后的贮箱

图 23 采用立式总装方式研制的国内首个全搅拌摩擦焊接贮箱

Fig. 23 The first all-FSWed tank with the vertical assembly mode

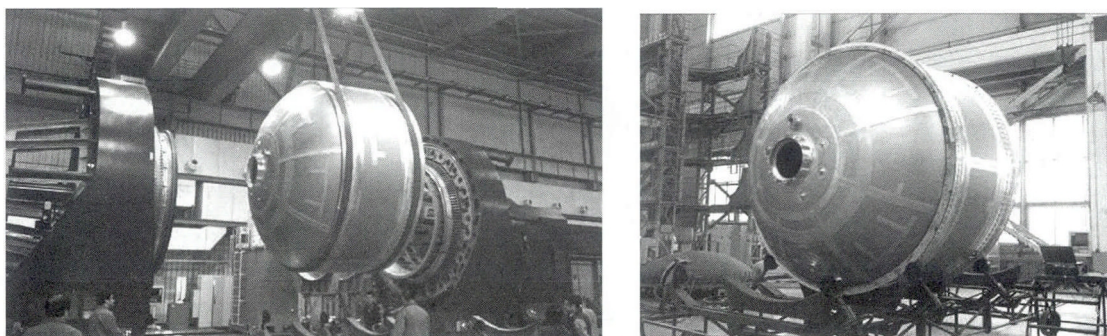


图 24 采用卧式总装方式研制的某型号 $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ 贮箱正式产品

Fig. 24 The FSWed tank with the diameter of $\Phi 3\ 350\ \text{mm}$ produced by the horizontal assembly

4 结语

搅拌摩擦焊技术已经成为运载火箭铝合金贮箱制造的发展趋势。对实现全搅拌摩擦焊接贮箱的关键技术研究结果表明:常规搅拌摩擦焊技术可以实现贮箱筒段纵缝和箱底瓜瓣纵缝的高质量焊接;采用可回抽搅拌头和无匙孔焊接工艺可以满足封闭环缝的无匙孔焊接,且回抽区域接头力学性能完全可以达到设计指标要求;超声相控阵检测技术是可以检测出搅拌摩擦焊缝的常见焊接缺陷,是搅拌摩擦焊技术实现工程化应用的重要配套技术;重复搅拌摩擦焊、“固相或熔焊填充+搅拌摩擦焊”、熔焊修补、摩擦塞补焊是搅拌摩擦焊工程应用中的重要补焊手段,补焊接头性能均可以达到 50% 以上。在上述关键技术获得突破的基础上,我国逐步实现了搅拌摩擦焊技术在运载火箭贮箱筒段纵缝、箱底主焊缝直至贮箱总装环缝上

的工程化应用。

参考文献

- [1] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing [J]. Materials Science and Engineering, 2005, R50: 1 - 78.
- [2] JOHNSEN, MARRY, RUTH. Friction stir welding takes off at Boeing [J]. Welding Journal, 1999, 78(2): 35 - 39.
- [3] 赵慧慧, 封小松, 熊艳艳, 等. 铝合金超薄板无倾角微搅拌摩擦焊接头组织性能 [J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 47 - 50.
- [4] 郝云飞, 李延民, 周庆, 等. 铝合金可回抽搅拌摩擦焊接头组织和性能 [J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(4): 56 - 62.
- [5] 封小松, 徐萌, 钱纪红. 载人航天器结构件 FSW 制造工艺及应用 [J]. 载人航天, 2011(1): 52 - 56.
- [6] 郝云飞, 白景彬, 田兵, 等. 熔焊填充 + FSW 修补搅拌摩擦焊缝匙孔型缺陷的接头组织性能研究 [J]. 航空制造技术, 2014(10): 83 - 87.