

# 推进剂贮箱先进焊接 工艺研究进展

Research Progress of Advanced Welding  
Technique for Propellant Tank

上海航天设备制造总厂 姚君山 徐 萌 贾洪德 郭立杰  
北京赛福斯特技术有限公司 柴 鹏 栾国红



姚君山

工学博士, 上海航天设备制造总厂副总工程师。2001年11月获北京航空航天大学机械制造及自动化专业博士学位; 2002年1月—2004年8月, 在中国航天科技集团第一研究院从事新一代运载火箭箭体结构先进焊接技术方面的博士后研究工作; 2004年9月至今, 在中国航天科技集团第八研究院从事新一代运载火箭箭体结构研制工作。

与国外先进航天技术相比, 我国现役长征运载火箭在“三化”(通用化、系列化、组合化)、运载能力、可靠性与安全性、发射周期与适应性等方面存在很大差距, 尤其在箭体结构材料和制造工艺方面差距明显, 很难满足 21 世纪空间运输的发展需求。因

搅拌摩擦焊和变极性等离子弧焊作为新兴的铝合金焊接工艺, 已在国外的推进剂贮箱上获得广泛而成熟的应用, 但在我国, 其工程应用仍属起步阶段。基于推进剂贮箱结构焊缝特点、受载状态和焊接工艺特性来选用焊接工艺是制定我国新型运载火箭推进剂贮箱焊接工艺方案的基本原则。

此, 我国明确提出了研制新型大推力、高可靠、低成本运载火箭的目标, 以跟上国际运载技术的发展步伐, 确保我国空间技术的竞争优势。新型运载火箭的发展思路为“一个系列、两种发动机、三个模块”, 并对箭体结构提出“高可靠、低成本、快速制造”的研制要求。

由于箭体结构材料改用新型的 2219 高强铝合金, 并提出高可靠性要求, 对箭体结构的制造技术提出了一系列挑战。与 2A14 铝合金相比, 2219 铝合金的可焊性和断裂韧性显著改善, 但其常规熔焊的气孔发生率高, 成为贮箱高质量焊接的技术瓶颈; 新型运载火箭采用液氧 / 煤油、液氧 / 液氢推进剂, 其贮箱属于低温推进剂贮箱, 除了要求具备优异的低温抗断性能和气密性能外, 大尺寸低温贮箱需要采用绝热包敷层, 对低温

贮箱的制造精度和焊接变形控制提出严格要求, 保形制造成为贮箱高质量焊接的关键制约条件; 为满足我国未来航天器密集发射需求和 21 世纪环保发展要求, 新型运载火箭的生产当量有较大提高, 要求贮箱的焊接工艺必须具有鲜明的绿色、快速制造特点。

## 国内外推进剂贮箱结构材料与焊接工艺发展

如表 1 所示, 自运载火箭诞生以来, 国外推进剂贮箱的结构材料已从第 1 代铝镁合金、第 2 代铝铜合金发展到第 3 代铝锂合金。其发展趋势是材料的比强度越来越高, 但其熔焊的焊接性总体呈下降趋势。贮箱的焊接工艺由最初的 TIG 焊、电子束焊发展到变极性 TIG 焊、变极性等离子弧焊和搅拌摩擦焊。

表1 国外推进剂贮箱结构材料与焊接工艺

| 结构材料              | 抗拉强度级别 /MPa     | 焊接工艺               |
|-------------------|-----------------|--------------------|
| 铝镁合金 (5086、AMT 6) | 300 (O 状态)      | TIG                |
| 铝铜合金 (2014、2219)  | 450 (T6/T62 状态) | TIG/VPTIG/VPPA/FSW |
| 铝锂合金 (1460、2195)  | 700 (T8 状态)     | TIG/VPTIG/VPPA/FSW |

目前,我国运载火箭推进剂贮箱的结构材料主要是第2代的2A14、2219铝铜合金。其中,2A14铝合金作为贮箱结构材料使用至今已近30年,而2219铝铜合金则刚被确定为我国新型运载火箭推进剂贮箱的结构材料。

随着推进剂贮箱结构材料的更新换代,其焊接工艺也获得了长足的发展,但由于贮箱结构材料和焊接工艺的不同带来明显的工艺焊接性的差异。例如对于2014铝合金,搅拌摩擦焊的焊接性要优于TIG焊和VPPA焊接工艺;搅拌摩擦焊工艺对于不同的贮箱结构材料均具有良好的工艺焊接性。

VPTIG、VPPA和FSW是近年来在国外推进剂贮箱制造中得到广泛应用的新型焊接工艺。例如,欧盟的阿里亚娜5型运载火箭广泛采用VPTIG焊工艺制造推进剂贮箱,美国主要综合采用FSW和VPPA两种焊接工艺作为推进剂贮箱主导焊接工艺,日本则主要采用FSW工艺焊接推进剂贮箱。我国拟在新型运载火箭研制中综合应用上述3种焊接工艺以实现箭体结构的高可靠、低成本快速制造。

## 推进剂贮箱结构、承载分析与焊接工艺选用

### 1 结构特点和焊缝分类

按照空间分布和结构特点,推进剂贮箱的结构焊缝主要分为以下几类:

- 纵缝: 筒段纵缝、瓜瓣纵缝和 $\gamma$ 型材框纵缝;
- 环缝: 筒段对接环缝、箱底

$\phi$ 1380环缝、箱底顶盖环缝、圆环- $\gamma$ 型材框环缝、筒段- $\gamma$ 型材框环缝和法兰环缝;

• 其他焊缝: 点焊缝、角焊缝等; 其中,贮箱筒段纵缝、筒段对接环缝和箱底焊缝属于关键结构焊缝,需要选用最适当焊接工艺来保证结构焊缝所需的综合承载性能。

### 2 结构焊缝承载分析和几何完整性要求

推进剂贮箱有加注准备发射阶段和空间飞行阶段两个承载状态。对于液氧/液氢贮箱而言,由于需要深冷绝热结构包覆,为保证良好的深冷绝热效果(即绝热结构和贮箱外壁紧密贴合粘结),对液氧贮箱的几何形位制造精度控制更加严格,要求贮箱焊接完成后不得出现“凹塘”等几何失稳缺陷。

#### (1) 纵缝。

无论是在加注准备发射阶段,还是在空间飞行阶段,推进剂贮箱纵缝总是承受拉应力。对焊接质量和形位制造精度的要求为: 接头强度系数高,焊缝质量优异,缺陷允许的尺寸小(近无缺陷焊接),焊接残余应力和变形低,对母线直线度要求严格,以保证形位尺寸精度和后续的总体装配。

#### (2) 环缝。

在加注准备发射阶段和匀速飞行阶段,由于贮箱的增压作用,贮箱环缝承受一定的拉应力。其中,筒段环缝承受的拉应力为筒段纵缝的一半; 由于箱底结构为椭球面,箱底 $\phi$ 1380环缝和顶盖环缝为双向受力状态,且属于高值的拉应力区域,因

此其受载为高值的双向拉伸应力。而在发射加速飞行阶段,由于发动机加速推进,上述环缝承受的拉应力有所降低。

同时,由于箱底属于薄壁壳体结构,装配难度高,不可避免存在不同程度的强迫装配。对焊接质量的要求为: 接头强度系数高,近无缺陷焊接,焊接残余应力和变形越小越好,接头的塑韧性优异。

对于除箱底环缝以外的环缝,其承受的拉应力仅为筒段纵缝的一半,且为单向应力状态。对焊接质量和形位制造精度的要求为: 接头强度系数高,近无缺陷焊接,焊接残余应力和变形小,焊接效率高。

对比筒段纵缝和筒段环缝的焊接质量及几何完整性要求,可以看到筒段环缝对焊接接头塑性的要求要低于筒段纵缝和箱底焊缝。所以筒段环缝可以选用高能束的焊接工艺

现役运载火箭 $\phi$ 3350贮箱

施焊,但箱底焊缝和筒段纵缝不宜选用高能束焊接工艺施焊。

### 3 焊接工艺选用

#### (1) 选用依据。

推进剂贮箱焊接工艺的选用一般从以下几个方面来考虑:

- 结构焊缝的承载状态;
- 根据接头应力状态确定对接头强度、韧性、残余应力与变形的要求;
- 贮箱为压力容器类焊接结构,对焊缝内部质量和外观质量的要求依次是近无缺陷、成形美观一致、接头塑韧性好、接头强度高、低应力和近无变形;

· 装配焊接简单、可靠、可达性好,工艺稳定性好。

(2) 几种焊接工艺对比。

表2综合对比了方波TIG、VPTIG、VPPA和FSW四种焊接工艺的接头性能和工艺特性。

(3) 贮箱纵缝和环缝焊接工艺方案。

综合以上因素,对于筒段纵缝和箱底焊缝,由于其装配可达性较好,所以应当选用搅拌摩擦焊工艺施焊。

对于筒段环缝,由于装夹存在一定难度,因此选用工艺柔性好、焊接工装简单的变极性等离子焊工艺施焊,可以有效降低装焊难度,确保焊缝质量。

对于贮箱上的其他焊缝如法兰焊缝、锁底焊缝等,实现变极性等离子弧焊和搅拌摩擦焊非常困难,而采用VPTIG焊则工艺非常简单,所以这类焊缝应首选变极性TIG焊工艺。

变极性等离子弧焊工艺除了采用变极性焊接电源外还采用了等离子焊枪,并充分利用“小孔效应”和“立向上焊接方式”来获得单道穿透焊接和无缺陷的焊接效果。搅拌摩擦焊在本质上属于微区锻造的塑性连接工艺,宏观上是一种基于热力挤压锻造作用的机械化焊接工艺。

搅拌摩擦焊和变极性等离子焊在国内均没有应用的经验可借鉴。将其应用于我国推进剂贮箱的焊接制造,必须首先建立并健全工艺技术体系,包括焊接工艺、技术标准、焊接装备和焊缝质量检测手段等。搅拌摩擦焊属于最新的铝合金焊接技术,搅拌工具、焊接装备、工艺技术标准 and 检测手段均需要通过系统工艺研究来建立和完善;而变极性等离子焊技术由于属于新型熔焊技术,现有的熔焊技术标准和检测手段均可借用,但其焊接电源和工装则仍需要立

箱纵缝立式搅拌摩擦焊接设备和第一台贮箱箱底搅拌摩擦焊设备。

搅拌工具是搅拌摩擦焊技术的核心,直接决定焊接质量、焊接工艺稳定性。焊接铝合金材料必须在800℃以上工作条件下具备优异的抗磨性、良好的高温硬度、高温强度和高的红硬性,不与基体金属发生粘附作用;根据焊缝成形机理,搅拌工具外形还应有利于塑性金属的流动、转移,并对转移金属施加向下旋压作用,同时要有利于减小焊接过程中的前进阻力。

按照上述要求,结合新型推进剂贮箱的焊接厚度研制了典型焊接厚度(6mm、8mm等)的搅拌工具,并通过正交工艺试验系统研究了焊接速度、旋转速度、焊接压力等焊接参数对接头质量的影响规律,建立了基于线能量因子( $n/v$ )的工艺优化方法、接头的质量分级和性能标准,制定了航天工业第一个搅拌摩擦焊等级标准——《铝及铝合金搅拌摩擦焊通用技术条件》(Q/Rz141.001-2006),并顺利通过专家组评审。

在搅拌摩擦焊焊缝质量检测方面,通过接头缺陷特征表征和检测特征分析,进一步明确了现有的X射线检测和着色检查仍是搅拌摩擦焊接头缺陷检测的最有效的技术手段。

(1) 筒段纵缝搅拌摩擦焊。

采用自主研发的纵缝立式搅拌摩擦焊机、定型的长寿命典型厚度搅拌工具和优化的工艺参数,完成了贮箱筒段纵缝的搅拌摩擦焊。

焊缝外观成形均匀美观,表面光滑,基本无需后续表面加工。采用X射线、表面着色检验了焊缝的内/外部质量。结果表明,焊缝内部无任何缺陷、表面无裂纹,一次性满足Q/Rz141.001-2006 I级焊缝标准。

(2) 箱底焊缝搅拌摩擦焊。

2008年2月,航天八院149厂应用箱底搅拌摩擦焊设备首次成功研制了我国第一个2219铝合金

表2 同种贮箱结构材料VPTIG、VPPA和FSW焊接工艺对比

| 序号 | 对比项目     | 方波 TIG   | VPTIG    | VPPA | FSW |
|----|----------|----------|----------|------|-----|
| 1  | 接头强度系数   | 低        | 一般       | 高    | 最高  |
| 2  | 接头延伸率    | 高        | 较高       | 一般   | 最高  |
| 3  | 接头组织     | 铸造       | 铸造       | 铸造   | 锻造  |
| 4  | 气孔等缺陷发生率 | 较高       | 高        | 极低   | 无   |
| 5  | 接头残余应力   | 较高       | 高        | 低    | 最低  |
| 6  | 焊接热输入    | 最大       | 大        | 小    | 最小  |
| 7  | 焊缝层数     | 多层焊      | 多层焊      | 单道焊  | 单道焊 |
| 8  | 工艺柔性     | 优        | 优        | 良    | 一般  |
| 9  | 装焊要求     | 低        | 低        | 高    | 高   |
| 10 | 工艺窗口     | 宽        | 宽        | 一般   | 最宽  |
| 11 | 焊接效率     | 低        | 低        | 高    | 高   |
| 12 | 环境控制要求   | 温/湿度控制严格 | 温/湿度控制严格 | 不需要  | 不需要 |

## 先进焊接工艺研究进展

变极性TIG焊与方波TIG焊工艺的根本区别在于焊接电源:VPTIG采用新型的变极性焊接电源,而方波TIG采用方波焊接电源。

足于自主研发才能打破国外的技术封锁。

### 1 搅拌摩擦焊

按照“自主创新为主、协作创新为辅”的原则,航天八院149厂与航空625所合作研制了国内第一台贮

$\phi$  3350 推进剂贮箱箱底,第一次实现箱底瓜瓣纵缝和  $\phi$  1380 环缝的数控搅拌摩擦焊,并顺利通过液压强度试验和气密试验。经外观和内部质量检查,焊接质量全部达到 Q/Rz141.001-2006 I 级焊缝标准。

## 2 变极性等离子焊接工艺研究

### (1) 变极性等离子弧焊电源。

2004 年,航天八院 149 厂与北京工业大学合作研制了具有自主知识产权的国内第一台实用化的纯转移弧型变极性等离子焊接电源——VPPA-400A。工艺试验表明,该电源稳定可靠,具有突出的快速过零和纯转移弧等优点,从而有效保障焊接过程的稳定性,能够满足工程应用的可靠性要求。

### (2) 焊接工装研制。

根据变极性等离子焊接工艺“立向上焊”焊接要求,分别针对箱底型材框环缝和筒段对接环缝自行研制了箱底一体化焊接工装和用于  $\phi$  3350 贮箱筒段环缝变极性等离子焊的张力平衡式工装。

### (3) 变极性等离子弧焊工艺优化。

变极性等离子穿孔立焊不同于常规 TIG 焊工艺,为了形成稳定的穿孔,对焊接参数的匹配控制要求非常严格。试验研究表明,热力型电弧穿孔是获得稳定焊接过程的前提;在其他参数确定后,采用焊接电流和离子气按一定斜率联合递增的方法可以实现热力型穿孔熔池的建立。

根据线能量恒定的原则,通过重点调节焊接电流值、预热电流以及离

子气流量进行工艺参数优化试验,采用焊缝外观成形(尤其是背面成形)观察、焊缝内部质量检测,结合部分接头力学性能拉伸试验的方法,初步确定匹配的焊接工艺参数,进而采用单因素逐步逼近法获得典型焊接厚度接头的工艺容限。



综合应用 VPTIG & VPPA & FSW 焊接的循环预冷贮箱

### (4) 贮箱环缝变极性等离子焊。

应用自主研制的纯转移弧型变极性等离子焊接电源、一体化  $\gamma$  型材框环缝工装和张力平衡式筒段环缝工装和优化的焊接工艺,在国内第一次实现了变极性等离子焊接工艺在推进剂贮箱上的工程应用。所焊接的箱底  $\gamma$  型材框环缝、筒段对接环缝均通过相关的液压强度试验和气密试验。经检验,焊缝内部无任何缺陷,表面无裂纹,一次性达到 YS0620-97 I 级焊缝标准。

箱底焊接后的形位检测结果、筒段对接环缝焊接后的形位检测结果

表明,采用 VPPA 焊接工艺后,贮箱的形位精度得到阶跃式提高。

## 贮箱整箱试验考核

根据贮箱整箱性能试验考核要求,综合应用 VPTIG、VPPA、FSW 三种先进焊接工艺研制了两只 2219

铝合金  $\phi$  3350 推进剂贮箱,其一为新工艺验证贮箱,其二为用于动力系统冷流试验的循环预冷贮箱,均顺利通过液压强度、气密试验。

尺寸测量、强度和气密的性能考核试验结果表明,综合应用搅拌摩擦焊、变极性等离子焊工艺研制的两只新型运载贮箱以及搅拌摩擦焊箱底的焊接质量、几何制造精度均得到跨越式提升。

## 结束语

搅拌摩擦焊和变极性等离子弧焊作为

新兴的铝合金焊接工艺,已在国外的推进剂贮箱上获得广泛而成熟的应用,但在我国,其工程应用仍处于起步阶段。基于推进剂贮箱结构焊缝特点、受载状态和焊接工艺特性来选用焊接工艺是制定我国新型运载火箭推进剂贮箱焊接工艺方案的基本原则。

研究表明,综合应用 FSW、VPPA 和 VPTIG 焊工艺,不仅能够实现推进剂贮箱关键结构焊缝的低应力、近无变形和无缺陷焊接,而且可以显著提高贮箱几何形位制造精度和焊接生产效率,从而满足我国新型运载火箭推进剂贮箱高可靠、低成本、快速制造的研制需求。

(责编 晓霖)



我国第一个搅拌摩擦焊贮箱箱底