

# 大厚度比窄焊缝不锈钢薄板缝焊工艺研究

武绍旺

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 采用电阻缝焊方法对航天推进剂贮箱用 0.086 mm 厚不锈钢网片 (022Cr17Ni12Mo2) 和 1 mm 厚不锈钢支板 (1Cr18Ni9Ti) 进行搭接缝焊工艺试验, 通过控制不锈钢支板变形量和网片变形张力, 检查焊缝外观质量、密封性和内部质量, 解决了接头组合材料厚度比大于 10: 1 和焊缝宽度 1~1.2 mm 的不锈钢薄板缝焊难题。研究表明, 采用合适工艺参数可以避免缝焊过程焊缝成型不良等问题, 保证了焊缝密封性; 采用专用工装对缝焊过程不锈钢支板变形进行控制和焊后校形处理, 可有效控制不锈钢薄板焊接变形; 通过缝焊过程网片表面张力的调节, 达到了控制网片性能的目的。

**关键词:** 电阻缝焊; 不锈钢网片; 不锈钢支板

**中图分类号:** V261-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 02-0077-05

## Research on big thickness ratio and narrow weld width seam welding craft for thin sheet stainless steel

WU Shaowang

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The resistance seam welding method is used to conduct a test of the lap joint of 0.086 mm thickness stainless steel net and 1 mm thickness stainless steel support plate for space propellant tank. In order to solve the welding stainless steel problem of thickness ratio 10:1 and weld width 1~1.2 mm, a method of controlling the stainless steel sheet deformation and the stainless steel net tension, and checking the appearance quality, sealing property and internal quality of welded joint is adopted. The results demonstrate that the suitable welding parameters can avoid the poor weld joint shape in welding process and ensure a good sealing performance of weld joint, the stainless steel sheet deformation can be effectively controlled by using special fixture and postweld orthopaedic treatment, and a perfect stainless steel net performance can be achieved by adjusting the surface tension of stainless steel net in the weld process.

**Keywords:** resistance seam welding; stainless steel net; stainless steel sheet

收稿日期: 2016-06-16; 修回日期: 2016-11-17

作者简介: 武绍旺 (1985—), 男, 工程师, 研究领域为焊接工艺研究

## 0 引言

航天推进剂贮箱是用来存储和管理推进剂的部件。表面张力型推进剂贮箱以其显著的性能优势和高可靠性被广泛用于各类卫星上,其核心部分是推进剂管理装置,使用了众多毛细不锈钢网片组件,利用液体在网片上的表面张力对推进剂进行管理。毛细组件在制造中经常出现焊接缺陷,并导致焊接接头通常在包括验证试验在内的使用过程中暴露失效,为目前航天推进剂贮箱制造亟待解决的一项重要技术问题<sup>[1-3]</sup>。

电阻缝焊作为一种高效和易于控制的焊接方法,广泛应用于金属薄板的焊接<sup>[4]</sup>。电阻缝焊的热量集中、加热时间短、焊接变形小、冶金过程简单,一般不需要填充材料及熔剂,也不需要保护气体。其设备能为每个焊点提供大致相等的加热电流,产生大小均匀、相邻重叠的熔核。均匀平整的搭接焊缝保证了薄板的连接强度,严密连续的焊缝不用密封材料和密封处理,焊缝的强度及密封性也均较好,特别适合于薄板的密封焊接。航空航天用产品的电阻缝焊工艺性研究,充分发挥了电阻缝焊优势,加快了其在其他工业领域的普及应用<sup>[5-9]</sup>。

本文运用理论分析与试验相结合的方法,通过对航天不锈钢推进剂贮箱用 0.086 mm 厚不锈钢网片和 1 mm 厚不锈钢支板的电阻缝焊工艺性研究,解决了接头组合材料厚度比大于 10:1 和焊缝宽度 1~1.2 mm 缝焊难题,保证了支板组件在无水乙醇中密封性能检查泡破点值大于 6 000 Pa 的技术要求,实现了大厚度比窄焊缝支板组件的电阻缝焊的可靠连接。

## 1 焊接结构及焊接性分析

航天用不锈钢推进剂贮箱核心部分是推进剂管理装置,它由支板组件电子束焊接而成。支板组件由不锈钢网片与支板缝焊组成,支板如图 1(a)所示。

不锈钢支板内型面圆弧半径  $R$  为 367 mm、角度  $19.02^\circ$ ,其缝焊结构如图 1(b)所示。厚度 1 mm 不锈钢支板自身刚度小,电阻缝焊焊接时变形较大,影响支板本身的结构强度、制造精度和使用性能。为形成一定型面的密封性焊缝,需用工装焊前进行装卡定位、压紧,防止焊接变形和不锈钢网压伤、划伤。不锈钢网片厚度 0.086 mm,由不同直径金属丝纵横交错编织而成,结构型式如图 1(c)所示。

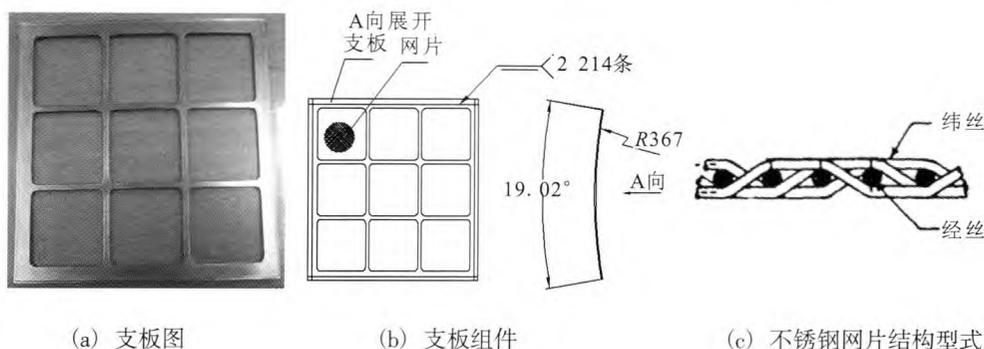


图 1 支板组件组成结构图

Fig. 1 Structure diagram of support plate components

推进剂贮箱支板组件用不锈钢网片和不锈钢支板同属奥氏体型不锈钢。相对其他钢种,其电导率和热导率均较低,高温强度高,热敏感性强。对于接头组合材料厚度比大于 10:1,焊缝宽度 1~1.2 mm 的缝焊连接,缝焊时热输入量要

求小,需准确控制电极压力、焊接速度、加热时间和焊接电流,防止产生未熔合、烧穿、飞溅和过深压痕等缺陷。不锈钢缝焊轮应选用硬度高且具有较高的再结晶软化温度的铜合金,以减少缝焊滚轮损耗和变形。因缝焊轮线膨胀系数比低碳

钢大，需采取工艺措施防止缝焊过程焊接变形量过大，保证缝焊前后支板弧度尺寸的稳定性。不同厚度材料缝焊时，熔核会向厚板侧偏移。厚度差较大时，为纠正熔核偏移，在薄板一侧采用导电性较差的铜合金做电极，或电极焊轮宽度和直径做的小些，来减少散热，提高焊接热效率。

## 2 试验材料及试验方法

推进剂贮箱用支板组件由 0.086 mm 厚 022Cr17Ni12Mo2 不锈钢网片与 1 mm 厚 1Cr18Ni9Ti 不锈钢支板组成，网片化学成份如表 1 所示。

推进剂贮箱用不锈钢网片规格为 325 mm×2 300 mm×0.086 mm，纵横两向 25.4 mm 的长度上分别有 2 300 根和 325 根金属丝，横向纬丝直

径为 0.025 mm，纵向经丝直径为 0.036 mm。不锈钢网片经向丝拉断力值 $\geq 195$  N，纬向拉断力值 $\geq 450$  N，经向丝断后伸长率 $\geq 2\%$ ，纬向丝断后伸长率 $\geq 5\%$ 。

推进剂贮箱用不锈钢网片和不锈钢支板缝焊，采用 FM-40 台式三向交流变直流缝焊机，控制系统采用 Med Weld 5000 微机控制箱，并通过 Wed Weld 5000 控制器来精确调控和记录焊接电流。焊接速度 8~50 mm/min，最大工作压力 1 500 N，次级空载电压 4.31~8.62 V。缝焊轮材料为铍钴铜，直径  $D$  为 150 mm，下电极宽度  $B_1$  为 9.9 mm，上电极宽度  $B_2$  为 7 mm，电极接触表面为圆柱面双侧倒角型，平面宽度  $b$  为 1.0 mm，采用随焊水冷 (TWC) 对焊缝轮内部进行冷却。

表 1 022Cr17Ni12Mo2 不锈钢网片化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of 022Cr17Ni12Mo2 stainless steel net

								%
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.029	0.57	0.91	0.027	0.03	12.88	17.86	2.37	余量

支板加工、校形处理后，为了控制回弹，对支板热定型处理，消除成形应力，稳定成形尺寸。要求支板弧面与标准样板的间隙不大于 0.3 mm。电阻缝焊前为减小支板表面质量对筛网性能的影响，保持支板筋  $R0.4$  mm 圆滑过渡锐边，化学清洗去除表面油污，以提高支板表面光洁度。网片剪裁后化学清洗去除表面油污，再用酒精清洗、真空烘干。



图 2 工装和缝焊电极结构

Fig. 2 Structure of welding jig and electrode

支板组件电阻缝焊时的装卡、定位和压紧工

艺装备采用硬铝制造，表面进行硬氧阳极化处理，电阻缝焊前用绸布蘸丙酮擦洗干净工装和缝焊轮，工装和缝焊轮结构如图 2 所示。每次焊前检查、测量焊轮外圆尺寸，来保证缝焊缝宽度的一致性。

缝焊参数主要包括：焊接电流、焊接通电时间、电极压力和焊接速度。焊接电流主要影响缝焊连接强度、压痕深度和外观成型。焊接电流过大，容易引起金属过热、喷溅和压痕过深等缺陷。焊接电流过小，易形成未熔合。焊接通电时间通常称为焊接时间，主要影响缝焊压痕深度和外观成型（烧穿、未熔合等）。为了获得窄型密封性缝焊缝，通电时间应缩短，休止时间应加长。电极压力保证了支板和网片贴合面的紧密接触，影响成型时的喷溅和压痕深度。电极压力过大时将导致缝焊焊缝压痕过深，加速电极变形和损耗。电极压力过小时焊缝表面容易产生喷溅，接触电阻过大易使电极烧损。焊接速度决定了电

极与焊接部位的接触时间,影响焊接接头的加热和散热。电阻缝焊最重要的是要保证焊后气密性良好,影响电阻缝焊气密性的关键因素是焊接速度<sup>[7]</sup>。焊接速度增大时,为了获得足够的热量,必须增大焊接电流,过大的焊接速度,会

引起产品烧损和电极粘附。为了获得窄型密封性缝焊缝,焊接速度应尽量小,可避免喷溅,保证焊缝成型质量。支板组件缝焊时采用试验件确认优化的工艺参数,电阻缝焊工艺参数如表2所示。

表2 电阻缝焊工艺参数

Tab. 2 Parameters of resistance seam welding

电极压力/N	上滚轮 直径/mm	上滚轮接触面 宽度/mm	焊接 电流/A	焊接 时间/s	冷却 时间/s	焊接速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )
650~950	150	1.0	2 800~3 200	0.02	0.16~0.20	12

支板组件缝焊采用搭接接头形式,搭接量为6.5 mm。选择热输入量小的焊接规范参数和装配焊接顺序,会使焊后应力、变形和缝焊缺陷减少,从而使缝焊后筛网部件密封性得到有效控制。缝焊前为防止缝焊过程不锈钢网相对不锈钢板运动(会使不锈钢网片出现撕裂、压伤和褶皱,影响焊接质量),采用电阻点焊将筛网边缘固定在支板上。在电阻点焊前用工装垫于筛网和支板间,调节筛网张力,使焊接时筛网处于自由张力状态,保证筛网缝焊后不会出现褶皱缺陷。缝焊时采用分布在焊缝两侧的固定支板式的压紧工装来减少支板变形。工装材料导热性比产品好,可以减少焊缝附近焊接时所受热量。采用对称焊接缝焊缝,来控制焊接变形量,从而减少焊接变形。缝焊后采用机械校正法使支板产生与焊接变形方向相反的塑性变形,使两者变形相互抵消,达到消除或减少焊接变形的目的。

支板组件缝焊后,先进行10倍放大镜宏观检查,再将其放入无水乙醇介质中进行密封性气密试验检查,不锈钢网片泡破点值需大于6 500 Pa。选取典型试验样件进行焊缝X光质量检查,沿缝焊位置线切割,再经镶嵌、粗磨、精磨和抛光之后制成金相样品,用MEF4M光学显微镜进行缝焊内部组织观察。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 宏观形貌

支板组件缝焊后,先进行10倍放大镜宏观

检查,如图3所示,缝焊接头表面质量、支板弧面与标准样板间隙、内型弧半径和角度均满足设计要求。



图3 缝焊后支板组件宏观图

Fig. 3 Macro-morphology of support plate appearance after resistance seam welding

#### 3.2 无损检测

电阻缝焊支板组件缝焊接头局部X射线检测结果如图4所示。初期2条缝焊缝相接处附近缝焊核中心均有缩孔出现,后通过适当增大缝焊电极压力和降低焊接速度,2条缝焊缝相接处附近的缩孔现象最终消除。采用合适的工艺参数进行缝焊,可以避免两缝焊缝相交处焊缝内部存在缩孔的问题。



图4 支板组件缝焊接头局部X检查图

Fig. 4 X-ray detection picture of welded joint of support plate

### 3.3 微观组织分析

线切割支板组件缝焊接头局部焊缝, 金相检查, 焊点熔核内无缩孔、裂纹、夹杂等内部缺陷, 纵向焊缝如图 5 所示, 熔核直径 3.1 mm, 熔核宽度 1.1 mm, 不锈钢板一侧焊缝处表面压痕深度为 0.05 mm。

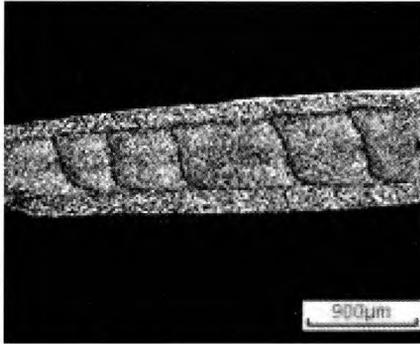


图 5 纵剖切内部焊核图

Fig. 5 Weld centre in longitudinal cross-section

航天推进剂贮箱用支板组件 0.086 mm 厚不锈钢网片和 1 mm 厚不锈钢支板搭接缝焊工艺试验表明: 用合适的工艺参数缝焊可以避免缝焊过程喷溅、氧化色、过深压痕、焊缝接合不好等问题。焊后机械校形处理, 可克服缝焊后奥氏体不锈钢结构变形大、不易控制的难题, 保证缝焊后的支板组件密封性, 提高了液体火箭发动机贮箱制造工艺水平。

## 4 结论

通过开展表面张力贮箱用不锈钢网片与支板的电阻缝焊的工艺研究, 分析了焊接结构和焊接性, 采用合理的电阻缝焊工艺参数, 成功焊接了支板组件, 满足了表面张力贮箱的设计要求。主要结论如下:

1) 获得了 1 mm 厚不锈钢支板电阻缝焊变形的有效控制方法。通过电阻缝焊前不锈钢支板机械变形校正、热定型处理, 焊接时工装对不锈钢支板的装夹和固定, 并调整焊接过程缝焊顺序, 增加焊后压板校形处理, 使支板组件用不锈钢支板的焊接变形得到有效控制。

2) 获得了 0.086 mm 厚不锈钢网片缝焊过程张力控制工艺方法。缝焊前先用电阻点焊方法沿焊缝接头处点焊固定网片于支板上, 定位前先在网片与支板间垫上工装, 控制筛网变形张力, 达到对不锈钢网片缝焊过程性能的控制。

3) 实现了航天贮箱用支板组件大厚度比窄焊缝缝焊连接。通过开展 0.086 mm 厚 022Cr17Ni12Mo2 不锈钢网片和 1 mm 厚 1Cr18Ni9Ti 不锈钢支板搭接缝焊试验, 合适的工艺参数施焊, 可以得到性能良好焊缝宽度 1~1.2 mm 的支板组件。

### 参考文献:

- [1] 李永, 潘海林, 魏延明. 第二代表面张力贮箱的研究与应用进展[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 503-507.
- [2] 张天平. 表面张力贮箱推进剂管理装置设计进展[J]. 中国空间科学技术, 2000 (5): 36-42.
- [3] 李治, 沈赤兵, 周进. 通道式表面张力贮箱推进剂管理装置的设计[J]. 推进技术, 2003, 24(4): 303-305.
- [4] 周丽丹, 张婷婷, 王志斌, 等. 443 铁素体不锈钢电阻缝焊接头的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2013, 37(3): 42-46.
- [5] 吴家云. 0Cr15Ni5Cu2Ti 不锈钢电阻缝焊工艺[J]. 航空制造技术, 2003 (11): 51-54.
- [6] 李仕民, 杨尚磊, 楼松年. 航天贮箱用不锈钢网与钛合金板电阻缝焊技术研究[J]. 焊接技术, 2005, 34(5): 26-28.
- [7] 姜俊. 电容储能缝焊控制系统的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.

(编辑: 马 杰)