

搅拌摩擦焊舱段与铸造舱段应用比较分析

范开春¹ 郭辉荣¹ 肖任勤¹ 唐众民²

(1 中国航天三江集团设计所,武汉 430040)

(2 中国航天三江集团红阳厂,孝感 432100)

文 摘 从生产工艺、力学性能、产品质量等几方面,将搅拌摩擦焊(FSW)舱段与传统的铸造舱段进行对比分析,得出搅拌摩擦焊舱段具有性能稳定、承载能力高、尺寸精度高的优势。

关键词 搅拌摩擦焊,铸造,舱段,优势

Comparison and Analysis of FSW Cabins and Casting Cabins

Fan Kaichun¹ Guo Huirong¹ Xiao Renqin¹ Tang Zhongmin²

(1 China Aerospace SanJiang Group Design Corporation, Wuhan 430040)

(2 China Aerospace SanJiang Group Hongyang Machinery plant, Xiaogan 432100)

Abstract This paper compares the cabins made in welding with traditional casting cabins from production process, mechanical properties and product quality. And getting the conclusion that the cabins made in welding has the advantages of stable performance, high carrying capacity and high dimensional accuracy.

Key words Friction stir welding(FSW), Casting, Cabins, Advantages

0 引言

航空、航天等单位相继开展了搅拌摩擦焊研究工作,实现了搅拌摩擦焊接技术在航空航天等制造领域的工程应用。首都航天机械公司编制了国内首份搅拌摩擦焊航天行业标准 QJ20043—2011《铝合金中厚板搅拌摩擦焊技术要求》^[1]。但是,目前国内搅拌摩擦焊主要在小型的、受到载荷较小的结构件上应用较多,在大型的弹体结构舱段应用上还鲜有报道。本文对搅拌摩擦焊舱段与铸造舱段应用进行比较分析。

1 搅拌摩擦焊舱段与铸造舱段

舱段作为弹体结构的主承力件,结构形式主要有以下几种:铆接舱段、锻件整体机加舱段、整体铸造舱段。铆接舱段由于结构自身的缺陷,不适于承受大载荷,不用于大射程、大载荷的弹体结构上,应用范围有限;整体机加舱段虽然承载能力高、刚性好,但是加工周期长,加工余量大,原材料毛坯生产周期长,成本高;整体铸造舱段具有刚性好、成本低、便于批量生产等优点,已得到广泛的应用。整体铸造的缺点在于产品质量一致性难以保证,舱体壁厚难以控制,易出现针孔、疏松等缺陷。

中国航天三江集团从 2003 年以来,与中国搅拌摩擦焊中心合作,对 LD7、LY12 等热强性铝合金材料

进行了摩擦焊工艺的研究和探索。在完成一系列工艺试验(主要是力学性能测试、金相组织分析、热处理工艺优化等)的基础上,完成了搅拌摩擦焊舱段的试制。综合考虑原材料、加工、焊接性能等各项综合因素,将舱段壳体分为前端框、筒体、后端框三部分。结构示意图见图 1。

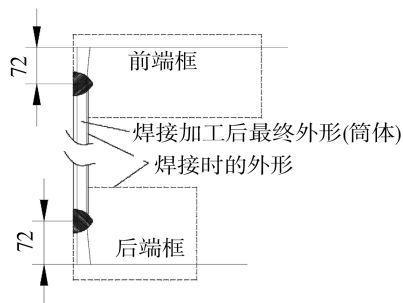


图 1 搅拌摩擦焊舱段示意图

Fig. 1 Schematics of FSW cabins

2 舱段承载能力计算

在导弹弹体结构设计中,圆筒(锥)壳占有十分重要的地位。不管是搅拌摩擦焊舱段还是整体铸造舱段,从结构形式上讲均属于圆筒(锥)壳。弹体在地面停放、起吊、运输以及飞行过程中要承受弯矩、轴

收稿日期:2013-05-03

作者简介:范开春,1965 年出生,高级工程师,主要从事弹体结构设计及成形工艺研究。E-mail:ghrr@tom.com

表 1 焊接试样抗拉强度和弹性模量

Tab.1 Tensile strength and elastic modulus of FSW testspecimen

试样编号	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
a	381	64.6
b	379	62.0
c	381	66.8
d	379	62.8
e	377	63.1

东北大学研究人员对 5 mm 厚 2A12 铝合金板搅拌摩擦焊焊接区域的抗拉强度及弹性模量进行过研究,结果表明:大部分焊接试样的强度都能达到母材强度的 90% 以上,不同焊接参数下焊接区弹性模量与母材相比降低了 12% ~ 40%^[3]。小板试验结果与上述研究结果相符。

搅拌摩擦焊和传统熔化焊一样,也伴随着时间尺度和空间尺度上的不均匀加热与冷却,存在焊接残余应力和变形。按照航天工业标准 QJ2916—97《铝及铝合金表面残余应力的 X 射线测试方法》,对不同焊接参数、热处理工艺焊接试样(主要是对接焊)的焊缝区域进行了残余应力测试,结果见表 2。结果表明:不同焊接参数、热处理工艺对焊接区域的残余应力影响较大。

表 2 焊接小板试样残余应力

Tab.2 Residual stress of FSW test specimen MPa

试样	残余应力	试样	残余应力
a	25.0	d	56.0
b	83.2	e	84.0
c	102		

焊件结构中残余应力的存在,应力释放后构件会产生一定的残余变形,特别是大尺寸铝合金薄板,由于其刚度较小,利用搅拌摩擦焊连接,焊后存在不可忽视的残余变形^[4-5]。残余变形的存在会对其尺寸精度、装配精度和使用性能造成一定影响。

正是由于残余应力的存在会对产品的性能造成不利,适当控制焊缝区域的焊接残余应力是十分必要的。目前控制残余应力的方法主要是通过优化搅拌头及其焊接工艺参数,在一定程度上减小残余应力,有效减小焊接变形^[6]或者采用动态控制低应力无变形(DC—LSND, Dynamical Control—Low Stress No Distortion)焊接技术,可以明显的降低焊接接头的残余应力^[7]。

中国航天三江集团进行了大量的残余应力试样测试,测试结果表明:通过搅拌头、焊接参数优化后,焊缝的最大残余应力均控制在 25 ~ 60 MPa。但是对焊接舱段的残余变形还没有数据积累。

3.2 铸造小板材料性能试验

中国航天三江集团目前多个型号弹体结构舱段采

力、外压等各种载荷作用,需要考虑舱体在各种载荷作用下的稳定性尤其是轴压稳定性问题^[2]。

根据圆筒壳稳定性计算理论,圆筒壳的稳定性主要由其轴压承载能力决定,而要计算其承载能力,应根据参数 z 首先对舱段结构的所属形式进行判断。

$$z = \sqrt{1 - \mu^2} \left(\frac{l}{R} \right)^2 \frac{R}{t}$$

式中, μ —材料的泊松比, l —圆筒壳长度, R —圆筒壳半径, t —圆筒壳壁厚。

当 $z \geq 30$ 时,属于中长圆筒壳。中长圆筒壳的轴压临界应力 σ_{lj} :

$$\sigma_{lj} = K_0 E \frac{t}{R}$$

$$K_0 = 0.605 - 0.545 \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \right]$$

式中, K_0 —轴压临界应力修正系数, E —材料的弹性模量。

如果计算出来的 $\sigma_{lj} > \sigma_b$, 则还应该对轴压临界应力 σ_{lj} 进行塑性修正:

$$\sigma_{cr} = \sigma_b - (\sigma_b - \sigma_s) \sqrt{\sigma_s / \sigma_{lj}}$$

式中, σ_s —结构材料屈服极限。

中长圆筒壳的轴压承载能力为:

$$T_{lj} = 2\pi R t \sigma_{lj} \text{ 或 } T_{lj} = 2\pi R t \sigma_{cr}$$

当 $z < 30$ 时,属于短圆筒壳,短圆筒壳 σ_{lj} :

$$\sigma_{lj} = \varphi_0 C K_c \frac{\pi^2 E}{12(10 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{l} \right)^2$$

由圆筒壳稳定性理论可以看出,在壳体结构外形尺寸已定的情况下,决定壳体稳定性的决定因素是弹性模量和抗拉强度。

上述圆筒壳轴压稳定性计算时,未考虑焊接残余应力问题,残余应力对舱段的承载能力有一定的影响。

3 材料小板性能试验

3.1 焊接小板材料性能试验

由于材料的弹性模量、抗拉强度对舱段的承载能力起决定性作用,因此在舱段试制之前,都要通过调整不同的工艺参数(主要是母材厚度、加工余量,焊接压力角、搅拌头压入量、转速、焊速等),并进行优化组合,经过大量的工艺试验,使焊接试样有较高的力学性能,最终将工艺参数固化,应用到舱段的焊接上。目前在搅拌摩擦焊舱段成形研究方面原材料主要为 LD7,焊接厚度在 20 mm 以内。

在试制之前,焊接试样主要需要测量的力学性能指标有弹性模量、抗拉强度、残余应力等。某搅拌摩擦焊舱段小板性能见表 1。结果表明,LD7 搅拌摩擦焊焊接试样具有较高的力学性能,跟母材相比,试样的抗拉强度都能达到母材强度的 90% 以上,弹性模量能达到母材的 85% 以上。

用铸造成形,铸造的材料为 ZL114A,该材料铸造性能好,工艺稳定。某批次舱段小板材料性能试验结果见表 3。

表 3 铸造小板试样抗拉强度

Tab. 3 Tensile strength of casted test specimen MPa

试样	抗拉强度	试样	抗拉强度
a	287	d	202
b	273	e	235
c	248		

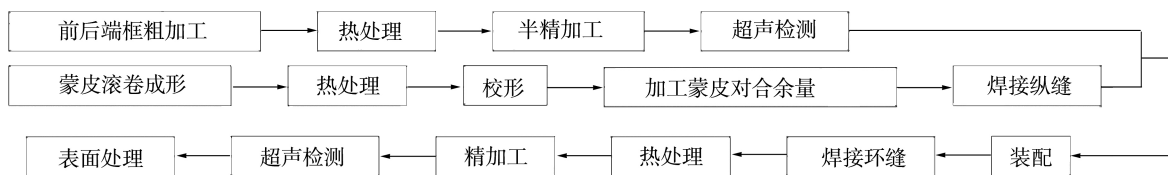
由表 3 结果看出,由于原材料的原因,铸造小板试样的抗拉强度要远低于搅拌摩擦焊,并且离散性大,性能不稳定。

3.3 小板材料性能试验总结

搅拌摩擦焊小板性能试验结果及铸造小板性能试验结果说明:由于原材料、成型工艺不同,LD7 搅拌摩擦焊试样比 ZL114A 铸造试样力学性能更高,性能更稳定,在同样尺寸条件下,根据舱段承载能力计算方法,LD7 搅拌摩擦焊舱段比 ZL114A 铸造舱段具有更高的承载能力。

4 搅拌摩擦焊舱段成形

为了适应搅拌摩擦焊工艺需要,根据整体舱段结



焊接工装主要有前端定位盘、后端定位盘、焊接定位骨架等。在搅拌摩擦焊焊接过程中,搅拌摩擦焊轴向压力较大,对工装刚性要求较高,因此,在设计焊接接头位置和连接形式时必须考虑与工艺装备的适应性,确保焊接过程稳定。某舱段焊后实物见图 2。



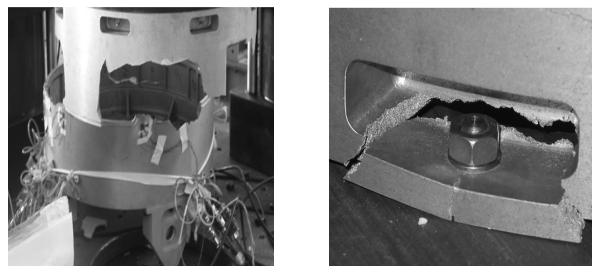
图 2 搅拌摩擦焊舱段照片
Fig. 2 Picture of FSW cabins

5 舱段承载能力与静力试验

对某型号导弹壁厚为 3.5 mm 的铸造舱段进行静力试验,静力试验分为轴压承载能力试验及轴拉承载能力试验,见图 3。该铸造舱段承载能力及强度安全系数的理论计算结果及试验结果见表 4。

构特点、复杂程度,将舱段按典型结构、典型接头形式进行分类。分类原则为:结构设计以降低材料成本、简化加工工序、减小加工工作量、降低加工难度、满足工艺需要。在此原则下,结合型号产品结构将舱段毛坯分解为端框+端框、端框+蒙皮+端框、端框+蒙皮+端框+环向筋等典型结构,焊接接头形式采用试验研究较为成熟的对接、对搭接等形式。由于变整体大锻件为分段小锻件、蒙皮、环向筋等,这样的结构设计和划分大大缩短产品备料周期、降低了原材料成本。

在产品试制之前,利用标准试板($L=350\text{ mm}$)进行一轮大范围焊接试验参数摸索,根据其试验过程控制、焊缝表面成形、焊接压力变化情况、反面成形情况、X 射线检测结果、机械性能检测结果及金相检测分析情况,基本确定出较优的焊接工艺参数。然后在此范围内对焊接参数进行微调,确保在此参数范围内焊接的试板 X 射线、超声波检测无缺陷,金相检测组织正常,从中挑选焊接机械性能(主要是抗拉强度、屈服强度和延伸率等)好且稳定的焊接参数,从而最终确定最佳工艺参数。以某舱段为例,其焊接及加工工艺流程如下:



(a) 轴压 (b) 轴拉

图 3 某铸造舱段轴压和轴拉承载能力试验照片

Fig. 3 Picture of casting cabins bearing compressive and tensile testing for the axis direction

表 4 铸造舱段理论计算与试验结果对比

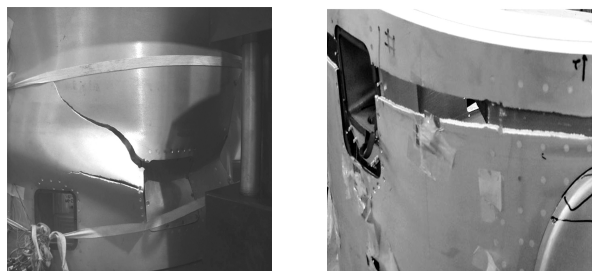
Tab. 4 Compare between theory calculation result with testing result for casting cabins

数据来源	轴压承载能力/kN	轴拉承载能力/kN	强度安全系数
理论计算	1330	294	≥ 9.2
试验	980	240	≥ 6.7
二者偏差/%	26.3	18.3	26.3

试验与理论计算结果偏差较大。造成强度偏低的主要原因是铸造舱体壁厚不均匀[设计要求(3 ± 0.2) mm,实测值(2.2~3.5) mm],铸件缺陷较多,内部疏

松和针孔度偏大。

对某型号导弹壁厚为 3.0 mm 搅拌摩擦焊舱段进行静力试验,见图 4。该摩擦焊舱段承载能力及强度安全系数的理论计算结果及试验结果见表 5。



(a) 轴压 (b) 轴拉

图 4 某摩擦焊舱段轴压和轴拉承载能力试验照片

Fig. 4 Picture of FSW cabins bearing ability compressive and tensile testing for the axis direction

表 5 焊接舱段理论计算与试验结果对比

Tab. 5 Compare between theory calculation result with testing result for FSW cabins

数据来源	轴压承载能力/kN	轴拉承载能力/kN	强度安全系数
理论计算	1460	1020	≥13.1
试验	1380	970	≥12.3
二者偏差/%	5.8	5.2	5.8

与铸造舱段相比,摩擦焊舱段的试验结果与理论计算结果相比误差不大,主要原因是摩擦焊焊接性能

比较稳定,尺寸精度控制较好。

6 结论

(1) 由于材料以及成型工艺不同,LD7 搅拌摩擦焊焊接试样比 ZL114A 铸造试样具有更好的力学性能。在同样尺寸条件下,LD7 搅拌摩擦焊舱段比 ZL114A 铸造舱段具有更高的承载能力;

(2) 搅拌摩擦焊舱段跟铸造舱段相比,搅拌摩擦焊舱段具有成形工艺好,力学性能稳定、尺寸控制精度高、质量偏差小等优点,可作为弹体结构主承力舱段,并适合大规模批量生产。

参考文献

[1] 苏敏,徐春风. 铝合金搅拌摩擦焊与熔焊航天行业标准的对比分析[J]. 航天标准化,2010(4):16-17

[2] 张俊华,张旭香,等. 导弹结构强度计算手册,1975:411-422

[3] 王磊,谢里阳,等. 搅拌摩擦焊焊接过程对材料弹性模量的影响[J]. 焊接技术,2009(8):22-25

[4] Price D A, Williams S W, Wescott A, et al. Sei. Technol. Weld Join. [R]. 2007,12:620

[5] Shi Q Y, Silvanus J, Liu Y, et al. Sei. Technol. Weld Join [R]. 2008,13:472

[6] 陈贺静,杨新崎. 搅拌摩擦焊残余应力的研究进展[J]. 有色金属加工,2007(4):36-38

[7] 李光,李从卿,栾国红,等. 薄壁铝合金搅拌摩擦焊焊接应力变形与控制[J]. 金属学报,2009(2):29-31

(编辑 李洪泉)

(上接第 65 页)

3 结论

(1) 稀土镁合金构件在精锻过程中两个侧筋相交的位置容易形成“充不满”缺陷。通过对坯料尺寸的优化设计,在较小的吨位下可以成形出表面质量好无成形缺陷的筋板类锻件。

(2) 锻件在时效过程中有大量的析出相弥散分布在基体上,在 200℃/63 h 锻件强度达到峰值,峰值时效抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为:380、243 MPa 和 4.07%。强化相 β' 相和长周期相在基体上的弥散分布是锻件获得峰值强度的主要原因。

(3) 精锻件拉伸试样断口分析表明,在未时效处理的精锻件试样断口有大量韧窝存在。随着时效过程的进行,韧窝逐渐减少,在 200℃时效 63 和 80 h 后试样断口存在明显的片层状的撕裂岭,且伴随有部分河流状解理台阶,说明试样断裂形式已转变为解理和准解理的方式进行。

参考文献

[1] 梁维中,吉泽升,左锋,等. 耐热镁合金的研究现状及发展趋[J]. 特种铸造及有色合金,2003(2):39-41

[2] 康鸿跃,陈善华,马永平,等. 镁合金在军事装备中的应用[J]. 金属世界,2008(1):61

[3] 郭学锋,魏建锋,张忠明. 镁合金与超高强度镁合

金[J]. 铸造技术,2002,23(3):133-136

[4] Shan D B, Xu W C, Lu Y. Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1/3):289-293

[5] 郝南海,薛克敏,吕炎. 上机匣等温锻造工艺研究[J]. 热加工工艺,1997(2):36-37

[6] 张洪杰,孟健,唐定骧. 高性能镁-稀土结构材料的研制、开发与应用[J]. 中国稀土学报,2004,22(1):40

[7] Yang Z, Li J P, Guo Y C, et al. Precipitation process and effect on mechanical properties of Mg-9Gd-3Y-0.6Zn-0.5Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007(454/455):274-280

[8] Liu Ke, Rokhlin L L, Elkinc F M, et al. Effect of ageing treatment on the microstructures and mechanical properties of the extruded Mg-7Y-4Gd-1.5Zn-0.4Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2010(527):828-834

[9] He S M, Zeng X Q, Peng L M, et al. Microstructure and strengthening mechanism of high strength Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007(427):316-323

[10] Zheng K Y, Dong J, Zeng X Q, et al. Precipitation and its effect on the mechanical properties of a cast Mg-Gd-Nd-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008(489):44-54

[11] Shao X H, Yang Z Q, Ma X L. Strengthening and toughening mechanisms in Mg-Zn-Y alloy with a long period stacking ordered structure[J]. Acta Mater. , 2010, 58:4760-4771

(编辑 吴坚)