

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.022

1215 易切削钢与 302 不锈钢真空钎焊工艺

尹凡, 陈鑫, 李忱

(中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 210016)

摘要:采用 BNi82CrSiBFe 钎料对 1215 易切削钢和 302 不锈钢异种金属进行真空钎焊, 并对接头界面组织及接头性能进行了研究。试验结果表明: 采用 BNi82CrSiBFe 钎料、保持恒定压紧力的作用下, 可以实现 1215 易切削钢与 302 不锈钢异种材料的高温真空钎焊; 钎焊温度 1 050 °C, 保温 10 min, 得到的接头抗拉强度可达到 335 MPa 以上, 在 10.5 MPa 的压力下接头密封性良好, 无渗透。

关键词: 1215 易切削钢; 302 不锈钢; BNi82CrSiBFe 钎料; 真空钎焊; 工艺

中图分类号: TG454 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0114-03

Vacuum Brazing Process Between 1215 Free Cutting Steel and 302 Stainless Steel

YIN Fan, CHEN Xin, LI Chen

(AVIC Nanjing Electromechanical Hydraulic Engineering Research Center, Nanjing 210016, China)

Abstract: BNi82CrSiBFe brazing material was used for vacuum brazing of 1215 free cutting steel and 302 stainless steel dissimilar metals, and the interface structure and joint properties of the joint were studied. The experimental results show that using BNi82CrSiBFe brazing material and maintaining a constant compression force can achieve high-temperature vacuum brazing of 1215 free cutting steel and 302 stainless steel dissimilar materials. Under the conditions of brazing temperature 1 050 °C and insulation for 10 minutes, the tensile strength of the joint can reach over 335 MPa, and under a pressure of 10.5 MPa, the joint has good sealing performance with no penetration.

Keywords: 1215 free cutting steel; 302 stainless steel; BNi82CrSiBFe solder; vacuum brazing; technology

0 引言

近些年来由隔磁环线圈骨架制成的电磁铁在航空航天中的应用越来越广泛, 与传统的由同一种金属直接经机械加工制成的骨架相比, 新型的隔磁环线圈骨架一般在骨架中间增加隔磁环, 经焊接、机械加工制成, 其大大提高液压系统中控制油路通断电磁阀工作的可靠性^[1]。1215 易切削钢切削加工性好且为环保材料, 与不锈钢 (1Cr18 Ni9Ti) 成为骨架的常用组合材料。线圈骨架的使用工况要求其焊接接头可靠, 既要保证密封性, 还需要保证所需的强度, 同时对内部尺寸变形还要控制严格。钎焊是通过熔化的钎料润湿被连接材料而形成接头, 零件整体受热均匀, 可将变形量控制到最小程度, 特别适宜于精密产品的钎焊^[2]。

目前国内对真空钎焊的研究主要集中在新材料的钎焊工艺优化和数值模拟仿真方面。周恒等^[3]研究了 Ti3Al 基合金真空钎焊过程。结果表明: 利用 Ag-Cu-Zn 钎料可实现 Ti3Al 基合金的

连接, 在界面处有明显的层状结构, 反应层厚度的成长模型为 $X^2 = 2.13 \times 10^{-5} \exp(-170/RT)t$ 。王全兆等^[4]研究了 TiC/NiCr 金属陶瓷与 1Cr13 不锈钢的真空钎焊。结果表明, 采用 CuMnNi 钎料时在 1 050 °C 保温 30 min 的钎焊工艺下获得了最高界面抗剪强度为 338 MPa, 而采用 CuMnCo 钎料时在 1 050 °C 保温 60 min 的钎焊工艺下获得了最高界面抗剪强度仅为 274 MPa, 剪切断面发生在金属陶瓷靠近钎缝侧。罗云萌等^[5]研究了不同钎缝宽度对 Cr12 钢与 YG8 硬质合金真空钎焊接头组织及性能的影响。试验表明: 采用 CuMnCo 钎料, 在 1 070 °C 温度下真空钎焊, 钎缝宽度控制在 0.1 mm, 所得到的焊接接头抗弯强度最高, 组织性能最好。

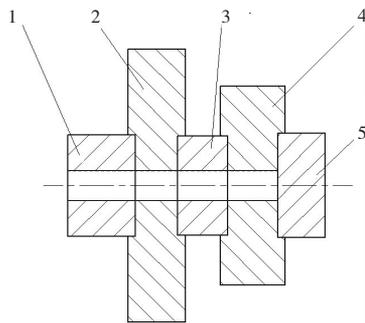
目前的钎焊研究多集中在新材料的钎焊机理研究, 对工艺过程控制研究较少。本文通过生产过程发现的问题, 针对性地提出了工艺过程改进措施, 包括如何提升表面清洁度及控制钎焊间隙等, 有效解决了某型号线圈骨架钎焊合格率低的问题。

第一作者简介: 尹凡(1991—), 男, 江苏灌南人, 硕士研究生, 研究方向为氩弧焊、真空钎焊技术, 1034020576@qq.com。

1 线圈骨架钎焊

1.1 试件结构及材料

本次试验所选取的焊接组件是飞机某型号的线圈骨架,该组件由密封环、前导磁环、隔磁环、后导磁环及端盖经钎焊、机械加工制成。图 1 为线圈骨架毛坯结构示意图,其中前后导磁环材料为 1215 易切削钢,其余零件材料为 302 不锈钢,采用 BNi82CrSiBFe 钎料经高温真空钎焊连接在一起,有效钎焊截面为 2.85 cm^2 ,制成毛坯件。BNi82CrSiBFe 钎料的质量分数和熔化温度如表 1^[6]所示。



1—密封环;2—前导磁环;3—隔磁环;4—后导磁环;5—端盖。

图 1 线圈骨架毛坯结构示意图

表 1 BNi82CrSiBFe 钎料主要质量分数及熔化温度

w(Ni)/%	w(Co)/%	w(Cr)/%	w(Si)/%	w(B)/%
余量	≤0.1	6.0~8.0	4.0~5.0	3.75~3.50
w(Fe)/%	w(C)/%	w(P)/%	固相线 $T_s/^\circ\text{C}$	液相线 $T_L/^\circ\text{C}$
2.5~3.5	≤0.06	≤0.02	970	1 000

1.2 工艺过程

真空钎焊对零件表面质量要求高,焊前需将零件表面、钎料箔钎料用丙酮清洗干净,保证表面清洁,装配完成后用工装夹紧,放入钎焊炉进行真空钎焊。通过阶梯升温的方式,保证零件温度均匀,主要参数如表 2 所示。

表 2 骨架真空钎焊技术参数表

技术指标	规格参数
钎焊温度/ $^\circ\text{C}$	1 030±5
钎焊保温时间/min	10±3
真空度/Pa	≤ 1×10^{-2}
冷却方式	800 $^\circ\text{C}$ 以下充氩气冷却

1.3 问题描述

对钎焊后的零件进行拉伸试验,试件如图 2

所示。结果发现零件的抗拉强度低,最高仅为 175 MPa,低于设计需求指标,难以满足工况使用的要求,断口形貌如图 3 所示。从图 3 中明显看出钎料流淌不充分,钎焊缝的钎合率低,钎料与母材未能形成有效的扩散。



图 2 钎焊拉伸试件



图 3 拉伸试件断口形貌

2 原因分析及工艺改进

2.1 原因分析及改进措施

一般钎焊反应只在母材表面数十微米的界面进行^[7],零件表面不可避免会存在一些油污或其他杂质。钢制零件在真空炉中直接钎焊,易产生氧化,表面形成稳定、致密的钝化膜,从而降低钎焊接头质量。在零件表面镀镍,不仅可提高钎料的流动性,还可以有效隔绝基体材料与外界物质反应生成钝化膜,降低钎焊接头中杂质的产生,提高钎焊接头的质量。

钎焊间隙对钎焊接头质量同样具有重要的影响。不锈钢钎焊接头主要由固溶体、连续共晶和金属间化合物及网状组织组成,钎料的流动主要通过毛细作用,随着钎焊缝间隙的减小,钎焊接头中金属间化合物逐渐减少,接头元素分布更加均匀,接头性能不断提高,且当间隙在 $30\ \mu\text{m}$ 时,综合性能最好^[8]。通过夹具压紧的方式,在钎焊时因零件及钎料上的毛刺、材料的热膨胀系数等,钎焊缝间隙无法控制。利用扩散焊设备上的压机,保持焊接全过程的恒定压力,保证钎焊缝间隙稳定在 $50\ \mu\text{m}$ 以下,能最大程度地保证钎焊质量。

钎焊温度是真空钎焊过程的重要参数之一,根据钎料的熔点进行设计,一般高于钎料液相线 $30\ ^\circ\text{C}\sim 100\ ^\circ\text{C}$ 。适当提高温度和时间,将有利于促进钎料与母材的相互扩散,从而形成良好的钎焊接头。但钎焊温度不能过高,否则容易造成钎料中的低沸点元素蒸发,同时使母材向钎料中溶解

过量而导致溶蚀,降低钎焊接头性能。

通过以上分析,对骨架钎焊工艺流程进行改进:1)对零件进行 D.Ni5 表面处理,增强钎焊缝表面清洁度和提高钎料流动性;2)改用扩散焊炉,在钎焊过程中,根据组件的大小和数量对组件施加恒定的压力,保证钎焊缝间隙控制在一定范围内;3)适当提高钎焊温度和保温时间,促进钎料与母材的扩散。

2.2 工艺改进方案

根据原因分析,对现有的工艺流程和参数进行改进,工艺流程为配套—清洗—零件镀镍—装配钎料—压紧(扩散炉)—真空钎焊(扩散炉)—出炉。工艺参数按表 3 所示进行调整。工艺试验在中电二所制造的 ZRS-50 真空扩散炉中进行,借助扩散炉的压机,保证钎焊过程保持恒定压力。

表 3 改进后骨架真空钎焊炉技术参数表

技术指标	规格参数
钎焊温度/℃	1 050±5
钎焊保温时间/min	12±3
真空度/Pa	≤1×10 ⁻²
载荷/kN	0.5~0.8
冷却方式	800 ℃ 以下充氩气冷却

3 结果及讨论

3.1 力学性能

对改进工艺后进行的钎焊样件进行室温抗拉强度试验,结果如表 4 所示。抗拉强度最低为 335 MPa,最高能达到 404 MPa,远高于改进前的 175 MPa 抗拉强度,满足设计指标需求。

拉伸试件断口形貌如图 4 所示,可看出拉伸试件断裂在钎焊缝上,钎料流淌充分,整个断口上不存在无钎料的现象。这说明钎焊过程中钎料的流动性较好,表明提升钎焊表面清洁度及施加压力以控制钎焊间隙等措施能有效解决钎料流通不畅的问题。但试件无明显颈缩现象,具有明显的脆性断裂特征。

表 4 钎焊接头室温抗拉强度 单位:MPa

炉号	试件号				平均值
	1	2	3	4	
1	358	369	335	342	351.0
2	353	404	373	340	367.5
3	337	361	375	348	355.3

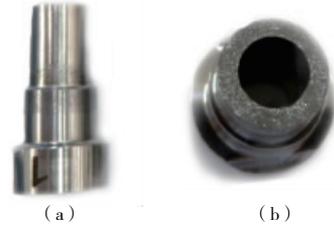


图 4 拉伸试件断口形貌

3.2 钎焊缝接头组织

对钎焊缝处进行低倍金相观察,如图 5 所示。查阅资料可知:采用 BNi-2 钎料进行钎焊不锈钢材料时,当钎焊缝间隙较大时,会在钎焊缝中心形成连续的脆性相层(由硼和硅的化合物相、硼化镍、硼化锆等化合物组成),如图 6 所示^[9],这将降低钎焊接头性能。从图 5 可明显看出:整条钎焊缝均匀一致,钎料流动均匀,无未钎合处。分析认为,钎焊过程中因为施加了一定的载荷,钎焊缝间隙很小,抑制了中间脆性相层的产生,同时提升了钎焊温度,促进钎料与母材之间的扩散。钎缝中的脆性相已全部消除,在钎焊缝中间未能观察到脆性相层。这主要是因为当钎焊缝间隙较小时,钎料中的 Cr、P 等元素扩散距离较短,在钎焊保温时间内元素扩散均匀,而在焊缝中心易形成金属间化合物(脆性相层)的元素大大减少,使得焊缝中心的金属间化合物减少直至消失,从而也进一步提升了钎焊缝的力学性能。



图 5 钎焊接头焊缝组织

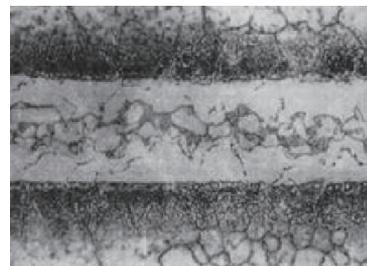


图 6 间隙 100 μm 的接头组织

(下转第 130 页)

中,步进电机步长引起的不确定性是固有的,精度取决于步进电机步长和两个齿轮的增减速比。

2)过高的机械负反馈也能引起系统不稳定,机械负反馈的减速比需要和螺旋副配合设计,确保稳定。

3)减速机构、阀芯和阀体的配合,会产生一定的回隙,回隙的大小可以通过步进电机进行补偿。每个系统需要实现出厂标定和参数设置并通过实际编程控制来消除回隙影响。

4)本文提出的数字阀控制摆动缸的角度控制方案、数学建模、传递函数和仿真结果对类似的应用系统具有设计指导意义,对阀的设计或选用、摆动缸等元器件选择也有指导意义。

参考文献:

- [1] 李世伦,陈爱民,骆涵秀,等. 高速数控步进液压缸系统的研究[J]. 机床与液压,1995,23(6):311-314.
- [2] 陈佳,邢继峰,彭利坤. 基于传递函数的数字液压缸建模与分析[J]. 中国机械工程,2014,25(1):65-70.
- [3] 朱浩宇,裴忠才,刘红麟,等. 数字液压缸机理分析及其控制系统研究[J]. 机床与液压,2020,48(24):8-12.
- [4] 王慧,姜守岭. 数字液压缸反馈螺杆库伦摩擦仿真研究[J]. 控制工程,2020,27(4):662-668.
- [5] 郭旭升. 基于 AMESim 的数字液压缸建模与动态特性仿真[D]. 天津:天津大学,2013.
- [6] 江海军,宋飞,王传辉,等. 阀芯螺杆螺距对数字液压缸性能影响的仿真分析[J]. 机床与液压,2014,42(11):150-152.
- [7] 潘炜,彭利坤,邢继峰,等. 数字液压缸换向冲击特性

研究[J]. 液压与气动,2012(2):77-81.

- [8] 宋飞,楼京俊,徐文献,等. 某型数字液压缸阀芯遮盖形式仿真研究[J]. 机床与液压,2015,43(19):200-202,154.
- [9] 彭利坤,宋飞,邢继峰,等. 数字液压缸阀芯特性研究[J]. 机床与液压,2012,40(20):62-65.
- [10] 张乔斌,宋飞. 数字液压缸跟踪误差特性仿真分析[J]. 机床与液压,2015,43(7):157-160.
- [11] 刘有力,马长林,潘荣安,等. 数字液压缸联合仿真与试验研究[J]. 机床与液压,2019,47(1):49-52,27.
- [12] 马赛平,张均利,潘彩霞,等. 数字液压缸在数控折弯机液压控制系统中的应用与分析[J]. 机械设计与制造工程,2017,46(10):105-108.
- [13] 孙如军. 数控液压伺服系统设计原理与应用[J]. 现代制造技术与装备,2007(2):62-64.
- [14] 杨世祥,杨涛,李桂英. 一种带内导向装置的数字电动缸:CN1251885A[P]. 2000-05-03.
- [15] 李洪人. 液压控制伺服系统[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
- [16] 刘有力,马长林,李锋. 数字液压缸非线性建模仿真与试验研究[J]. 液压与气动,2018(10):118-124.
- [17] 谢吉明,董荣宝. 基于 AMESim 的电液步进油缸建模与仿真[J]. 液压气动与密封,2018,38(7):36-39.
- [18] 杨辉,田大庆,江怡舟. 一种新数字液压缸的结构及其工作原理[J]. 机电技术,2018,41(3):17-18,22.
- [19] 恭飞,王雪婷,杜奕. 基于 AMESim 的液压系统建模与仿真[J]. 软件,2020,41(1):42-45.
- [20] 林勇刚,许建强,刘宏伟,等. 基于数字液压缸组的波浪能装置压力匹配[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(10):1892-1897.

收稿日期:2023-07-13

(上接第 116 页)

3.3 其他性能试验

对样件进行 10.5 MPa 的油压试验,试验结果无泄漏,进一步表明钎焊缝的致密性和强度均达到工况使用的要求。

4 结语

1)通过对待焊件表面镀镍及施加恒定载荷的方式促进钎料的流动,提升钎焊接头质量,钎焊接头抗拉强度达到 335 MPa 以上,但断口仍呈现典型的脆性断裂特征,在钎焊缝处断裂。

2)钎焊过程中施加恒定载荷,控制钎焊缝间隙,能有效消除钎焊缝中间脆性相产生,提升钎焊缝的钎合率,达到提升强度、提高钎焊缝致密性的效果。

参考文献:

- [1] 马涛. 关于制造电磁铁的线圈骨架隔磁环中骨架产生裂纹现象的研究[D]. 长春:长春工业大学,2012.

- [2] 黎保新. 电磁换向阀的新进展[J]. 机床与液压,1995,23(4):237-240.
- [3] 周恒,李宏伟,冯吉才. Ti3Al 基合金的真空钎焊[J]. 有色金属,2005(2):11-14.
- [4] 王全兆,刘越,张玉政,等. TiC/NiCr 金属陶瓷与 1Cr13 不锈钢的真空钎焊[J]. 焊接学报,2006,27(8):43-46,115.
- [5] 罗云萌,马涛,曹峻. Cr12 钢与 YG8 硬质合金焊接接头组织及性能研究[J]. 机械制造与自动化,2018,47(6):59-61.
- [6] GB/T 10859—2008 镍基钎料[S].
- [7] 刘顺国,李易生. 镀镍—钎焊工艺试验及应用[J]. 航空工艺技术,1981,24(3):33-34.
- [8] 石昆,于治水. 钎缝间隙对 316L 不锈钢真空钎焊接头组织和硬度的影响[J]. 机械工程材料,2010,34(2):15-17,38.
- [9] 孙磊. 改进镍基钎料钎焊不锈钢钎焊工艺及机理研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2015.

收稿日期:2023-07-21