

引用格式:陈鑫,刘明举,尹凡,等. 电工纯铁在真空扩散焊过程中的变形研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(3): 60-64

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20230805
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

电工纯铁在真空扩散焊过程中的变形研究

陈鑫, 刘明举, 尹凡, 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 211102)

摘要:扩散焊焊接的线圈骨架零件(电工纯铁+不锈钢)具有焊缝界面平整,尺寸精度高,焊接质量优良等优势,在液压舵机产品上得到了广泛应用。在某新型线圈骨架产品的研制过程中,发现毛坯零件扩散焊后高度超差太多,具体表现为零件中的电工纯铁材料发生了严重的镦粗变形导致无法使用。研究发现,电工纯铁的材料成分纯度差异是造成该问题的根本原因。在相同的扩散焊参数下,电工纯铁纯度越高,材料在扩散焊过程中表现出的刚性越差,变形也越厉害。通过添加 BNi82CrSiBFe 中间层并优化工艺参数,在保证焊后毛坯零件变形率的基础上,大幅提升了扩散焊缝的抗拉强度,达到 320 MPa 以上,满足了产品的使用要求。

关键词:电工纯铁;骨架;扩散焊;变形

中图分类号: TG439.6; TG453+.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)03-0060-05

Study on Deformation of Electrical Pure Iron during Vacuum Diffusion Welding

CHEN Xin, LIU Mingju, YIN Fan, LI Chen

(Nanjing Electromechanical Hydraulic Engineering Research Center of Aviation Industry, Nanjing 211102, China)

Abstract: The coil skeleton parts (electrical pure iron+stainless steel) welded by diffusion welding have the advantages of flat weld interface, high dimensional accuracy and excellent welding quality, it is widely used in hydraulic steering gear products. During the development of a new coil skeleton product, it was found that the height of the blank parts after diffusion welding was too much out of tolerance, the electrical pure iron material in the parts had a serious upsetting deformation and could not be used. According to the research, the difference in the purity of electrical pure iron is the root cause of the problem. Under the same diffusion welding parameters, the higher the purity of electrical pure iron, the worse the rigidity of the material in the diffusion welding process, and the more severe the deformation. By adding BNi82CrSiBFe intermediate layer and optimizing the process parameters, the tensile strength of diffusion weld has been greatly improved on the basis of ensuring the deformation rate of the blank parts after welding, and it reaches more than 320 MPa, which meets the use requirements of the product.

Key words: electrical pure iron; skeleton; diffusion welding; deformation

电工纯铁(DT4A)因为具有电磁性能优异和价格低廉的优势,其与不锈钢(0Cr18Ni9)成为线圈骨架类产品最常用的材料组合。线圈骨架类产品是液压舵机上重要零部件,特殊的使用环境决定了类产品需具有焊缝强度高、内部尺寸公差严等特点。而扩散焊因具有接头质量好,焊件精度高、变形小等优点,已经成为线圈骨架类产品的主流焊接方法。扩散焊接是在高温高压下被连接表面相互接触,通过局部发生微观塑性变形或被连接表面产生液相,从而

扩大被连接表面接触,结合层原子间相互扩散而连接的过程,目前已经广泛应用于航空航天的各类产品生产制造中^[1-3]。

目前,国内外对扩散焊的研究主要集中在新材料扩散焊技术、优化工艺及方法和焊缝无损检测等方面。杜双明等^[4]采用过渡液相扩散焊技术对 AZ31B 镁合金和 Cu 进行异种金属焊接,结果表明:在 500℃、40 min、2.5 MPa 条件下, AZ31B/Cu 接头形成了宽度约为 450 μm 的扩散焊区, AZ31B/Cu 接头的显微组织依次为由 α-Mg 和沿其晶界析出相 Mg₁₇(Cu, Al)₁₂ 组成的晶界渗透层、(α-Mg+Mg₂Cu) 共晶层、Cu₂Mg 金属间化合物层、(α-Mg+Mg₂Cu) 共晶层、Cu(Mg) 固溶体。宋欣妍^[5]研究了 6061 铝与钛、钽的真空扩

收稿日期:2023-03-28

基金项目:基础加强计划技术领域基金资助项目(2021-JCJQ-JJ-0181)

作者简介:陈鑫(1993-),男,江苏丹阳人,工程师,硕士,主要从事真空钎焊和扩散焊研究;E-mail:cx179160094@sina.com

散焊连接,利用 Inspekt 100kN 万能试验机和 Hitachi S-3400N 扫描电子显微镜对不同保温温度和保温时间条件下制备的 Ti/6061Al、Ta/6061Al 真空扩散焊试样接头进行力学性能测试和微观组织表征,探究不同制备条件对钛铝、钽铝真空扩散焊试样力学性能和焊缝形貌、元素分布的影响,从而确定最佳的工艺参数,优化其制备工艺。刘松平等^[6]研究了钛合金扩散连接中紧贴型缺陷的超声波检测特性,通过实验分析了超声波反射特征与连接缺陷之间的联系,得出了钛合金扩散连接的典型检测方法和实验结果。郝永魁^[7]利用超声波检测装置对点焊接头进行超声扫查,然后通过专家系统对超声扫查数据进行相应处理,得到点焊接头熔核的 C 扫描图像,利用点焊熔核 C 扫描图像与专家系统内的标准图像对比,达到快速判断熔核质量的目的。

本文开展的扩散焊研究围绕线圈骨架产品进行,集中在电工纯铁(DT4A)与不锈钢(0Cr18Ni9)两种材料的扩散焊连接上。在某新型线圈骨架产品的研制过程中发现毛坯零件扩散焊后高度超差太多,出现了明显的镢粗现象以致无法满足使用要求,具体表现在电工纯铁(DT4A)材料零件变形严重。该材料作为软钢在扩散焊的高温高压下有产生镢粗变形的趋势。因此,针对电工纯铁(DT4A)材料必须进行工艺参数优化来保证扩散焊缝的强度和焊后高度尺寸。

1 线圈骨架毛坯零件扩散焊

1.1 毛坯零件结构

某新型线圈骨架毛坯零件的结构如图 1 所示,总共由 3 个子零件通过圆槽限位的方式连接,其中 2 号零件为不锈钢(0Cr18Ni9)材料,1,3 号零件为电工纯铁(DT4A)材料,3 个子零件总共有 2 条扩散焊缝。为保证扩散焊缝质量,每个单独子零件高度方向的尺寸公差保证在 0.1 mm 以内,3 个子零件装配

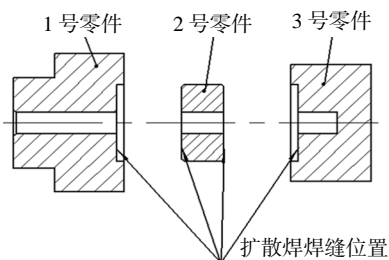


图 1 线圈骨架零件结构示意图

Fig.1 Schematic of the structure of coil skeleton parts

后累加的总高偏差保证在 0.3 mm 以内。

1.2 工艺过程

根据线圈骨架的扩散焊工艺要求,先对 3 种子零件外部进行镀镍预处理,再用丙酮清洗后进行装配,最后进炉摆放在工装上,抽真空加热加压进行扩散焊,如图 2 所示。

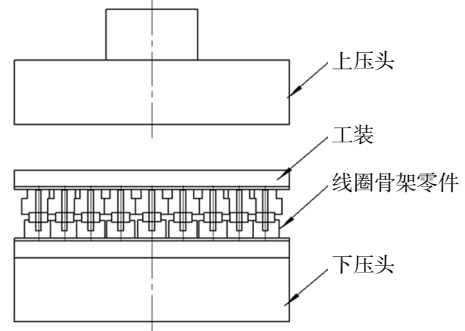


图 2 线圈骨架扩散焊示意图

Fig.2 Schematic of diffusion welding of coil skeleton parts

温度、时间、压力和真空度参数均由 ZRS-50 真空扩散炉设备保证,其主要技术参数如表 1 所示。使用的扩散焊工装为不锈钢和耐压石墨材料,直径与设备压头相同。

表 1 ZRS-50 真空扩散炉技术参数
Tab.1 Technical parameters of ZRS-50 vacuum diffusion furnace

技术指标	规格参数
工作温度 /℃	600~1100
工作真空度 /Pa	$\leq 5 \times 10^{-3}$
炉温均匀性 /℃	$\leq \pm 5$
压力可调范围 /kN	5~500
压头尺寸 /mm	$\phi 300$

考虑到压头面积的充分利用,将该线圈骨架毛坯零件进行铺平摆放,总共一层可以均匀放置 25 件,采用恒载荷统一加压。线圈骨架毛坯零件的焊前高度在 56 mm 左右,考虑到后期机加工需要焊后零件高度要求不得低于 53.5 mm。关于扩散焊缝强度,抽取焊后零件加工标准拉伸试棒做拉伸试验,要求抗拉强度不得低于 200 MPa。

1.3 问题描述

实际生产中发现毛坯零件扩散焊后实物如图 3 所示,上端的电工纯铁(DT4A)材料发生了明显的镢粗现象,得到的高度尺寸在 52 mm 左右,远低于目标值(≥ 53.5 mm),无法使用。此外,试件实际抗拉强度也有所波动,抽检的试件抗拉强度在 210~240



图3 线圈骨架零件焊后实物图

Fig.3 Physical image of the welded coil skeleton parts

MPa 浮动,已经接近极限值。

2 制定措施

2.1 原因分析

观察扩散焊后的毛坯零件可以明显发现,1、3号电工纯铁(DT4A)材料的零件发生了墩粗变形,但在其他型号的线圈骨架产品中也有该材料的使用且所需用的扩散焊参数差别不大,但焊后尺寸并未超差这么多。究其原因还是本型号产品零件中电工纯铁(DT4A)材料占比较大,中间仅有一小段为不锈钢(0Cr18Ni9)材料。而电工纯铁(DT4A)作为软钢在扩散焊的高温高压下有变形风险,因此如何在保证扩散焊缝质量的前提下,控制电工纯铁(DT4A)材料零件的变形便是研究的核心内容。

2.2 方案制定

本文总共分3个步骤对以上问题进行了攻关:

(1) 优化工艺参数

影响扩散焊焊缝强度和零件变形率的主要参数有温度、时间和压力。其中合金元素的扩散主要取决于温度和时间,且温度和时间与零件变形率均为正相关关系。如果想从温度和时间入手改善变形率只能降低温度和时间,但必然会对扩散焊缝质量有影响。而在扩散焊过程中,压力的主要作用是引起待焊表面的微观塑性变形,使相互接触的表面之间形成最大的接触,破碎表面氧化膜并除去污染物,以达到原子间的接近,为扩散连接创造条件,而合金元素的扩散与压力无直接关系^[8]。因此,可以考虑适当降低压力参数,观察焊后的零件高度和试件的抗拉强度能否满足需求。

(2) 更换电工纯铁(DT4A)材料

在优化参数无法解决该问题的情况下,考虑从电工纯铁(DT4A)材料本身入手,厘清高温高压下

材料的变形原理,在不改变产品设计指标的前提下寻找可替换的同种材料。

(3) 添加 Ni 基中间层

合金元素的扩散除与扩散温度及扩散时间有关外,扩散界面两侧元素的浓度差也将直接影响该元素的扩散。通过添加合适的 Ni 基中间层,可以使中间层中的 Ni 与不锈钢和电工纯铁间均形成很大的浓度差,且 Ni 与 Fe、Cr 等元素有较好的冶金相容性,因此可以较快地向两种金属中扩散并具有较大的扩散深度。

3 试验论证

3.1 压力参数调整

在扩散焊过程中,压力的主要作用是引起待焊表面的微观塑性变形,增大接触面积为扩散连接创造条件,因此压力参数虽然不是扩散焊过程中的决定性参数但也会对焊缝强度造成影响,且压力与电工纯铁(DT4A)变形为强相关关系。

调整不同的压力参数,具体为 10、9.5、9、8.5、8 MPa,具体加载方式为恒载荷加压。在不改变其他因素的前提下观察每炉线圈骨架毛坯零件的焊后尺寸和抗拉强度,如图 4 所示。其中,焊后尺寸用游标卡尺对 25 件进行全检并记录最低值,抗拉强度从每炉 25 件中随机抽 2 件制成标准拉伸试棒做拉伸试验,记录抗拉强度的最低值。

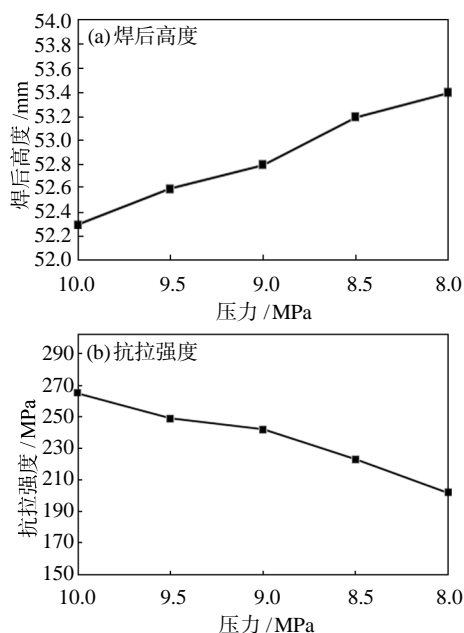


图4 焊后高度、抗拉强度随压力的变化曲线
Fig.4 Curves of height and tensile strength changing with pressure

通过图 4 分析可知,随着压力的降低,焊后高度增大,抗拉强度降低,而当压力调至 8MPa 时,焊后的高度为 53.2mm,还没有达到最低高度要求 53.5mm,而试件抗拉强度已经接近 200MPa,由此可见单纯从压力参数上调整已经无法解决该问题。

3.2 更换材料

扩散焊的高温高压工艺有点类似于特种工艺锻造,通过查阅锻造的相关资料可知,电工纯铁在 900~1000℃存在一个低塑性区(或称红脆区),电工纯铁在这个温度区域进行锻造容易出现碎裂^[9]。而本文中的扩散焊中温度正好在红脆区的范围内,恰好需要利用电工纯铁材料红脆区的低塑性。为了减小扩散焊过程中电工纯铁材料的变形率,需要将电工纯铁材料红脆区的特性发挥出来。相关文献报道电工纯铁材料红脆区的特性与硫元素有关,最常见的解释是 FeS 与 Fe 能够形成低熔点共晶体。而现在通过冶炼高纯度的电工纯铁,控制硫含量低于 0.001%,或者硫不是以低熔点硫化物 FeS 的形式存在,而是绝大部分被高熔点的 MnS 替代,已经可以使电工纯铁的红脆现象消失^[10]。

本文中选择的电工纯铁(DT4A)材料执行 GB/T 6983 标准,其化学成分指标如表 2 所示,硫元素的含量要求为 ≤0.01%,相对来说比较宽泛。为了减小扩散焊过程中电工纯铁的变形率,就必须强化电工纯铁的红脆现象,即在满足标准的要求前提下,硫元素越多越好。

表 2 DT4A 电工纯铁化学成分参考值(质量分数,%)
Tab.2 Reference values of chemical composition of DT4A electrical pure iron (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr	Ni	Cu
≤0.01	≤0.1	≤0.25	≤0.015	≤0.01	0.2~0.8	≤0.02	≤0.1	≤0.05	≤0.05

在此前提下与材料厂家进行了沟通协商,重新订购了一批新的电工纯铁(DT4A)材料,相比旧材料,新材料省去了一道重熔提纯工艺,可以做到在满足标准的前提下,硫元素含量得到提高。对新旧两种材料做元素光谱分析,实测元素含量如表 3 所示。可

表 3 新旧电工纯铁 DT4A 的实测化学成分(质量分数,%)
Tab.3 Measured chemical composition of new and old electrical pure iron DT4A (wt%)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Fe
新	0.0094	0.029	0.157	0.012	0.0054	0.494	0.019	0.0061	99.1
旧	0.0075	0.028	0.126	0.01	0.0031	0.45	0.013	0.0082	99.2

以看出新材料的硫元素含量达到 0.0054%,相比旧材料提高 74%。此外,C、Mn、Al 等元素含量也有一定提升,从理论上说新材料在扩散焊的高温高压下的抗变形能力会有所提升。

将电工纯铁零件换成新材料,并调整不同的压力参数(10、9.5、9、8.5、8MPa),在不改变其他因素的前提下进行扩散焊。每炉线圈骨架毛坯零件的焊后尺寸如图 5 所示。更换电工纯铁材料后,即使在压力为 10MPa 的情况下,焊后高度依然达到了 53.9mm,能够满足使用要求。随机取压力 10MPa 的炉次中毛坯件做拉伸试验,抗拉强度达到了 289MPa。可见,更换材料并没有对扩散焊缝质量造成影响,在满足标准要求的前提下已经解决这一问题。

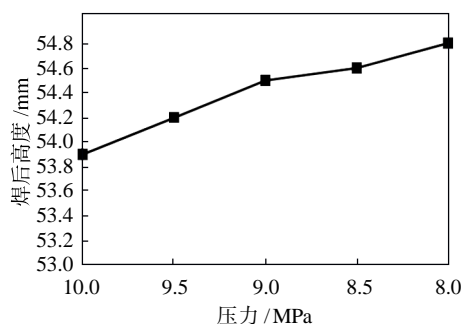


图 5 新材料焊后高度随压力的变化曲线
Fig.5 Curve of the height of the new material after welding as a function of pressure

3.3 添加中间层

前面通过更换新的电工纯铁材料已经解决焊后高度尺寸超差的问题,但库房中剩余的旧零件数量庞大,如果无法使用,报废造成的损失巨大,为此希望通过添加 BNi82CrSiBFe 中间层结合钎焊工艺探索全新的扩散焊参数来解决焊后尺寸超差的问题^[11]。

制作专用的冲裁模具,将箔状钎料冲成毛坯零件待焊面的圆状,在零件装配阶段装填在待焊接面。之后同样将该旧材料的线圈骨架毛坯零件进行铺平摆放,一层均匀放置 25 件。结合 BNi82CrSiBFe 中间层的钎料熔点,参数调整如下:温度 1070℃,时间 30min,压力 5MPa。最后得到的焊后零件尺寸在 55mm 左右,零件变形量仅在 1mm 左右。随机取该炉次的毛坯件做拉伸试验,抗拉强度达到了 323MPa,且断裂位置在母材,如图 6 所示。可见,此时的焊缝强度已经高过了母材的本身强度,扩散焊质量得到了明显提升。

此外,为充分验证添加中间层的扩散焊质量,在扩散焊缝局部位置取样做金相试验,金相照片如图 7



图6 添加中间层的扩散焊拉伸试件
Fig.6 Tensile test piece diffusion welded
with intermediate layer



图7 添加中间层的扩散焊缝金相图
Fig.7 Metallography image of diffusion weld
with intermediate layer

所示。整条扩散焊缝均匀一致,焊缝界面上无明显的氧化物等杂质相,BNi82CrSiBFe 中间层钎焊明显,未观察到未焊合痕迹。综合拉伸试验和金相试验可知,添加 BNi82CrSiBFe 中间层的工艺改良了扩散焊缝质量,很好解决了旧材料焊后尺寸超差的问题。


4 结论

(1) 线圈骨架扩散焊过程中电工纯铁材料发生墩粗变形的程度与材料本身的化学成分尤其是硫元素含量有关,在满足标准的前提下杂质元素尤其其硫元素含量越多,材料高温高压下的刚性越好,变形越小。

(2) 通过添加 Ni 基中间层并优化工艺参数,在

保证焊后毛坯零件变形率的基础上,极大提升了扩散焊缝的焊合率和质量,抗拉强度达到 323 MPa,满足了产品的使用要求。

参考文献:

- [1] 郭夏阳,林建平,孙博. 扩散焊技术的研究进展[J]. 热加工工艺,2014,43(17):15-20.
- [2] 陈永东,于改革,吴晓红. 新型扩散焊紧凑型换热器[J]. 压力容器,2016,33(5):46-55.
- [3] Sabharwall P, Clark D E, Mizia R E, et al. Diffusion-welded microchannel heat exchanger for industrial processes[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications,2013,5(1): 011009.
- [4] 杜双明,刘刚,王明静. AZ31B/Cu 异种金属过渡液相扩散焊接头的显微组织及性能[J]. 中国有色金属学报,2013,23(5): 1255-1261.
- [5] 宋欣妍. 铝与钛、钽的真空扩散焊研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.
- [6] 刘松平,郭恩明,王瑞川,等. 钛合金扩散连接界面完整性超声定量评估[J]. 航空制造技术,2003(5):32-36.
- [7] 郝永魁. 电阻点焊接头超声检测数据评估专家系统研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [8] Aneesh A M, Sharma A, Srivastava A, et al. Thermal-hydraulic characteristics and performance of 3D straight channel based printed circuit heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering,2016,98:474-482.
- [9] 邹光发. 电工纯铁的红脆性分析及其锻造工艺[J]. 航空工艺技术,1980(5):32-37.
- [10] 宗斌,王二平,魏建忠. 工业纯铁锻造过程中“红脆”现象的相图分析[J]. 实验科学与技术,2009(5):25-28.
- [11] 周新生,杨峰,宋阳,等. BNi-2 真空钎焊 0Cr18Ni9 不锈钢钎缝组织及相变机理研究 [J]. 铸造技术,2016,37(10):2208-2210. 

(上接第 59 页)

- [7] Konat U, Zemlik M, Jasiński R, et al. Austenite grain growth analysis in a welded joint of high-strength martensitic abrasion-resistant steel hardox 450 [J]. Materials,2021,14(11): 2850.
- [8] Sharma V, Shahi A S. Effect of groove design on mechanical and metallurgical properties of quenched and tempered low alloy abrasion resistant steel welded joints [J]. Materials & Design,2014,53(1):727-736.
- [9] Niu J, Huang W, Xu J J, et al. Study on property and microstructure in HAZ of high-strength Abrasion-resistant steel [J]. Key Engineering Materials,2006,306/308:947-952.
- [10] 曹鹏军. 金属材料学[M]. 北京:冶金工业出版社,2020:64-65.
- [11] 陈振业,齐建军,龙杰,等. NM400 贝氏体/马氏体双相耐磨钢动态 CCT 曲线[J]. 河北冶金,2021(8):16-20.
- [12] 李辉成,陈淑英,岳旭东,等. Mn 对低碳钢中先共析铁素体生长的影响[J]. 热加工工艺,2014,43(6):23-25. 