

# 钎焊及扩散焊技术在航空发动机制造中的应用与发展

Application & Development of Brazing and Diffusion Welding Technology in Aeroengine Manufacturing

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 孔庆吉 曲 伸 邵天巍 李文学



孔庆吉

毕业于沈阳航空工业学院。现为沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司二级技术专家,主要从事钎焊及扩散焊工艺技术和型号攻关工作。

随着航空发动机高推重比、高可靠性、长寿命、低成本的设计和制造技术需求的不断提高,新材料、新结构、新工艺越来越多地得到采用,尤其是作为制造工艺手段的焊接技术得到了快速发展。钎焊、扩散焊、搅拌摩擦焊、线性摩擦焊、高能束流焊等先进焊接技术在航空发动机焊接构件中得到发展和应用。其中,钎焊技术和扩散焊技术以其独有的特点

钎焊、扩散焊、搅拌摩擦焊、线性摩擦焊、高能束流焊等先进焊接技术在航空发动机焊接构件中得到发展和应用。其中钎焊技术和扩散焊技术以其独有的特点得到了更大的发展,这主要表现在难以熔焊材料的构件焊接中。为了获得优质或与母材相匹配的高性能接头,目前最为有效的连接方法就是钎焊和扩散焊方法。

得到了更大的发展,这主要表现在难以熔焊材料的构件焊接中。为了获得优质或与母材相匹配的高性能接头,目前最为有效的连接方法就是钎焊和扩散焊方法。当然,钎焊和扩散焊技术在航空发动机焊接构件中实际应用发展的同时,也面临着许多新的技术难题,这些难题成为促进其进一步发展和应用,并在航空工业领域发挥更大作用的巨大动力。

## 钎焊技术

### 1 钎焊技术在国内航空发动机制造中的应用发展状况

在连接材料的方法中,钎焊是人类最早使用的方法之一。第二次世界大战后,由于航空、航天、核能和电子等新技术的飞速发展,以及新材

料、新结构的采用,对连接技术提出了更高的要求,钎焊技术因此受到人们更多的关注,开始以前所未有的速度发展起来并出现了许多新的钎焊方法。钎料品种日益增多,因此,其应用范围日益扩大<sup>[1]</sup>。特别是当今航空事业不断发展,新型号机不断问世,钎焊在航空发动机焊接构件的连接上发挥着越来越重要的作用。目前,真空钎焊、感应钎焊、火焰钎焊、炉中保护气氛钎焊、电弧钎焊等钎焊技术非常广泛地应用于航空发动机重要部件的制造中。

#### (1) 真空钎焊技术的应用。

目前,真空钎焊广泛应用于作为各型号发动机封严构件的蜂窝结构。蜂窝结构由蜂窝芯和壳体组成,壳体材料一般为不锈钢或高温合金,蜂窝

材料一般为 GH536 镍基高温合金薄带材料。它的钎焊是将钎料预置在蜂窝芯格内,然后将蜂窝与壳体组合装配,最后采用真空钎焊方法进行钎焊。钎焊接头强度约为母材的 50%。

压气机成组静子叶片也是采用这种钎焊方法制造的。它由内外环和 10 余个叶片通过真空钎焊连接为一整体,该结构已装机使用数百台。

另外,真空钎焊还应用于涡轮导向器、导流叶片、扩散器、火焰筒、油滤等部件的制造。图 1 为真空钎焊焊接的涡轮导向器、火焰筒。



图1 真空钎焊焊接的涡轮导向器、火焰筒

## (2) 感应钎焊与火焰钎焊技术。

发动机燃油总管和油路导管绝大部分接头采用的都是感应钎焊与火焰钎焊技术。母材一般为不锈钢和高温合金。这些接头是采用银基或铜基钎料,以高频感应加热或氧-乙炔火焰作为热源进行连接。

低温工作的油滤钎焊也可采用火焰钎焊法,所用钎料为软钎料。

## (3) 炉中保护气氛钎焊。

这种工艺技术主要应用于防止基体材料和钎料中易氧化元素烧损的钎焊工艺中。钎料含有高蒸汽压元素 Cu、Mn 的组件钎焊,所用保护气体为高纯氩气,如发动机换热器构件和白铜封严件的钎焊。

## (4) 真空电弧钎焊。

真空电弧钎焊主要应用于航空发动机涡轮叶片叶冠耐磨片的钎焊。这种钎焊方法适合整体加热敏感的

材料或结构以及分步钎焊,操作复杂,工艺参数要求精确,工装调控要求精密。

## 2 钎焊面临的新课题

(1) 第三代特别是第四代新型号发动机结构,出现了许多新材料、新结构的钎焊连接,如 Ti 合金、NiAl 金属间化合物、TiAl 金属间化合物、Ni 基单晶合金等新材料的钎焊等。另外,还涉及 TiAl 金属间化合物与高温合金异种材料的钎焊,需要解决异种材料钎焊所用钎料及装配定位焊问题。这些都是目前比较前沿的钎焊技术问题。

(2) 提高和改善钎焊接头力学性能。一般钎焊接头强度仅为基体母材的一半,是不能满足先进航空发动机连接结构性能要求的。需要改进钎焊材料及工艺技术,使钎焊接头力学性能在原有的基础上得到提高,首先要开展钎焊+扩散工艺的研究工

作,寻求提高钎焊接头强度的新途径。其次,要开发采用新钎料,改善钎焊接头的性能。发动机上许多受力不大的管路件的火焰钎焊连接采用的是铜基钎料,而在研新型发动机的这些管组件大部分需要采用真空钎焊连接,所用钎料为镍基钎料。镍基钎料钎焊的接头虽强度较高,但塑性较差。因此,应开展采用钼基钎料钎焊油路导管及燃油总管研究工作,以提高钎焊接头的塑性。

(3) 要开展真空钎焊修补航空发动机难熔焊材料制造的导向叶片铸造缺陷的修补工艺技术研究,以扩展钎焊的应用领域。由于航空发动机性能的提高,其导向叶片采用了新材料,其中一些新材料含有较多的铝、钛,难以熔焊。这使得导向叶片铸造时产生的超标缺陷不能用常规的熔焊方法实现修补。此类叶片铸

造缺陷采用真空钎焊进行修补则是目前广泛使用的有效方法。开展这项研究工作主要解决的问题是研究确定既有良好工艺性能,又能满足叶片使用要求的钎料和填充缺陷加强毛细作用的合金粉制剂。

(4) 钎焊工艺参数、工艺程序的优化和进一步量化、细化,使其更加完善和更具操作性,这是改进传统钎焊工艺的现实要求。这需要焊接技术工作者通过大量的探索实践和经验积累才能做到。

(5) RoHS (在电子电气设备中限制使用某些有害物质) 指令明确规定了铅、汞、镉、六价铬、多溴联苯和多溴二苯醚等 6 种有害物质的最大限量值。提醒我们今后在钎料的应用和选择上要采用符合 RoHS 指令的绿色环保钎料。因此,开发采用绿色环保钎料也是钎焊技术发展应用的一项重要课题<sup>[2]</sup>。

## 扩散焊

### 1 扩散焊在国内航空发动机制造中的发展现状

扩散焊是在一定的温度和压力下将 2 种待焊金属件的焊接表面相互接触,通过微观塑性变形或通过焊接面产生微量液相而扩大待焊表面的物理接触,使之距离达  $(1\sim 5) \times 10^{-8}$  cm 以内(这样原子间的引力起作用,才可能形成金属键),再经较长时间的原子相互间的不断扩散,相互渗透,来实现冶金结合的一种焊接方法。其独到之处在于:焊接头的显微组织和性能与母材接近或相同,在焊缝中不存在各种熔化焊缺陷,也不存在具有过热组织的热影响区;可操作性强,工艺参数易控制,质量稳定、合格率高;零件变形小;可焊接大断面接头;可焊接其他焊接方法难以焊接的材料<sup>[3]</sup>。特别适合应用于陶瓷材料的连接,这对第四代、第五代发动机的研制具有现实意义。采用扩散焊设备所焊接的零

件如图 2 所示。

北京航空制造工程研究所等相关单位已经较早地开展了扩散焊技术的研究与应用,并已经取得了一定成果。目前,扩散焊技术已在国内航空发动机制造中进入工程化应用阶段。

北京航空制造工程研究所多年研制生产的某重点型号发动机钛合金空心整流叶片,是采用超塑成型扩散连接(SPF-DB)技术制造的,实现了超塑成型工艺与扩散焊技术的结合,该叶片现已累计装机使用百余台。研究所还采用瞬间过渡液相扩散焊(TLP)扩散焊技术应用自行研制的镍基中间层合金 KNi9 实现了氧化物弥散强化高温合金 MGH956 材料的有效连接,高温抗拉强度达到基体的 80%。并在此基础上进行了某机 MGH956 材料的多孔层板结构新型冷却结构的研制。此外,还利用 TLP 扩散焊工艺技术进行了 Ni3Al 合金的扩散焊接试验研究,接头的持久强度达到基体的 80% 以上,在涡轮导向叶片制造中获得了应用<sup>[4]</sup>。

某发动机转子用扩散焊工艺焊接了 0.5 mm 厚的铜板,使转子平面与分油盘间磨擦付能处于较好的工作状态;转子柱塞孔也用此工艺焊铜套,使柱塞与柱塞孔这对磨擦付也能处于较好的工作状态;柱塞座平面也采用了相同的工艺,保证了柱塞座与垫板这对磨擦付良好的工作<sup>[5]</sup>。

## 2 扩散焊技术应用面临的新课题

当今,国外该项技术已广泛应用于 F119、F120、F414、GE90 等发动

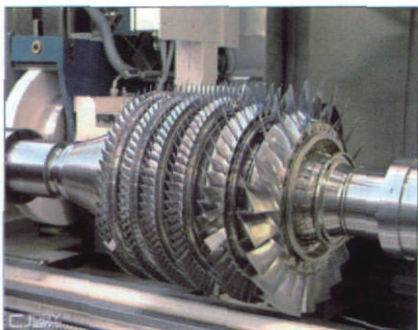


图2 扩散焊所焊接的零件

机中。美国 PW 公司从 20 世纪 70 年代开始针对单晶叶片的高性能连接需求,开发出焊接接头性能优异的 TLP 扩散焊技术。欧美、日本针对 TLP 扩散焊的连接机理、技术工艺特点及工程应用等开展深入研究,使 TLP 扩散焊技术达到工程应用水平,焊接的单晶对开叶片、双联(多联)导向叶片、多孔层板结构等高温新结构经过发动机的试车考核。而国内航空扩散焊工艺及应用还处于研究和初步应用阶段,有许多问题等待解决。

(1) 新材料及其构件的扩散焊。随着国内新型航空发动机工作温度的逐步提高,镍铝基金属化合物、钛铝基金属间化合物和镍基单晶高温合金以及粉末合金、陶瓷和复合材料等难焊材料的连接逐渐增多。扩散焊以其焊接材料范围广且焊接接头强度和成分接近母材而作为首选焊接方法。另外,发动机整体叶盘、单晶对开叶片等新结构的扩散焊需求也越来越强烈。为了迎合当前航空发动机技术的高速发展,开展上述难焊材料和结构的扩散焊工艺与应用研究势在必行。

(2) TLP 用中间层合金的研制开发。国内开展航空扩散焊的研究时间不长,还不具有适用于各种材料 TLP 扩散连接的中间层合金体系,需要较长时间来进行中间层合金的研制开发和技术积淀。

(3) 设备能力需要加强。目前,国内屈指可数的几台扩散焊设备都来自美、德等国家,价格比较昂贵。这些设备基本分布在各大科研院所,且其容积规格仅限于小尺寸构件,对于科研生产型是远远不够的。绝大部分发动机制造企业根本无设备能力,其原因之一是购置设备投资巨大。这种现状不符合现在扩散焊发展的趋势,改变这种现状的最好办法是能够实现扩散焊设备的国产化。

(4) 优化工艺及工艺标准的完

善。国内航空扩散焊目前还处于初步应用阶段,需对工艺及工艺标准逐步地,系统地进行补充、完善。

(5) 可靠检验方法寻求及扩散焊质量验收标准的建立和完善。目前,扩散焊接头焊接质量检查方法采用随机抽查进行金相检查,并配以超声波等无损检测的手段。现在,尚无可靠的无损检测方法检查十分紧密接触的,且晶粒生长未穿过界面不良焊接区域的接头。生产和试验中用超高频( $\geq 50\text{MHz}$ )的超声扫描检测装置来检查,只对明显分离的未焊合和尺寸较大的孔洞才有效。因此,必须开展研究,摸索可靠的检测方法<sup>[5]</sup>。

当前,还没有用于国内航空扩散焊质量验收的标准,需要通过对工艺参数及工艺程序的研究和实际应用积累来建立行之有效的标准。

## 结束语

航空发动机事业的发展必将促进钎焊和扩散焊技术的发展,扩展钎焊和扩散焊技术的应用领域。同时,钎焊和扩散焊技术在不断研究新情况、解决新问题,也必将为航空发动机采用新材料、新结构提高性能提供技术支撑。未来航空发动机材料的焊接将是复合材料的焊接,未来航空发动机结构的焊接将是复合结构的焊接。作为航空焊接技术工作者,需要不懈的努力,创新超越,为我国航空动力的发展做出贡献。

## 参考文献

- [1] 邹僖. 钎焊. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 钟素娟. 应用于 HSPM 体系的有害物质控制技术. 第十七届全国钎焊及特种连接技术交流会论文集, 2009.
- [3] 刘振岗, 郭健, 杨建民. 扩散焊技术的应用. 航空科学技术, 2004 (2): 38-40.
- [4] 李晓红. 先进焊接技术在航空制造中的应用. 航空制造技术, 2008 (13): 26-31.
- [5] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册——焊接方法及设备, 2001.

(责编 淡蓝 小颖)