

商用航空发动机盘轴类转动件焊接工艺分析

Welding Process Analysis of Disk and Shaft Rotor Component of Commercial Aeroengine

中航商用航空发动机有限责任公司 张露 韩秀峰 王伦

[摘要] 盘轴类转动件作为商用航空发动机的关键重要部件,且为限寿件,直接决定了商用航空发动机的可靠性和成本。随着焊接技术的发展,先进商用航空发动机盘轴类转动件越来越多地采用焊接工艺来代替螺栓连接,以减轻结构重量并提高其可靠性。目前,电子束焊和惯性摩擦焊作为主要焊接方法,在商用航空发动机盘轴类转动件的焊接中发挥着越来越重要的作用。

关键词: 转动件 电子束焊 惯性摩擦焊 商用航空发动机

[ABSTRACT] As crucial, important and life limited components, disk and shaft rotor components determine the reliability and cost of commercial aeroengine directly. With the developing of welding process, it has been used more often instead of bolts to join disk and shaft rotor components in advanced commercial aeroengine, in order to reduce weight and improve reliability. At present, as main welding methods, electron beam welding and inertia welding are playing more and more important role in joining disk and shaft rotor components of commercial aeroengine.

Keywords: Rotor component Electron beam welding Inertia welding Commercial aeroengine

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.096

盘轴类转动件的使用条件苛刻,因此在采用焊接工艺进行连接时,对焊接质量提出了更高的要求。用于焊接式盘轴类转动件的焊接技术除了要满足变形小、无氧化、高强度以及高的焊接尺寸精度等要求外,还应针对商用航空发动机长寿命、高可靠性的特点,保证高的工艺质量稳定性要求。

目前,电子束焊和惯性摩擦焊是商用航空发动机盘轴类转动件进行连接采用的主要焊接工艺。本文介绍了电子束焊和惯性摩擦焊工艺在盘轴类转动件的应用情况,并分析、对比了焊接工艺及焊接接头的组织与性能。

1 盘轴类转动件中的主要焊接工艺

电子束焊和惯性摩擦焊在国内外先进航空发动机

盘轴类转动件中已经有比较成熟的应用,采用上述焊接工艺进行连接的盘轴类转动件主要有:风扇盘、压气机盘/毂筒、涡轮盘轴组件。

表1列出了电子束焊和惯性摩擦焊在国外先进商用航空发动机盘轴类转动件中的应用情况。由表1可知,国外在进行先进航空发动机盘轴类转动件的焊接工艺设计时,对电子束焊和惯性摩擦焊这两种焊接方法有不同的选择。其中,GE公司最先对转动件采用惯性摩擦焊,其发动机中绝大部分转动件,包括风扇盘、压气机转子、涡轮盘轴组件等采用惯性摩擦焊;R.R.公司主要采用电子束焊,但随着压气机压比及出口温度的增加,同时压气机末级盘采用粉末合金,R.R.公司也开始选用惯性摩擦焊,并建立了2000t的惯性摩擦焊生产线,在Trent 1000发动机高压压气机转子、涡轮后短轴和涡轮盘转子组件上均采用了惯性摩擦焊;P&W公司对使用温度较低的转子部件主要采用电子束焊。

2 盘轴类转动件的焊接工艺性分析

材料的可焊性是焊接工艺性分析最重要的考虑因素,针对盘轴类转动件中常用的材料,包括Ti17、IN718等,其电子束焊和惯性摩擦焊的可焊性均较好,可以获得

表1 电子束焊和惯性摩擦焊在国外先进商用航空发动机盘轴类转动件中的应用

| 发动机公司 | 发动机型号 | 应用部件 | 焊接方法 |
|-------|---------------|-------------------------------|-------|
| GE | GE90 | 风扇盘; 2~6级、8~10级高压压气机毂筒 | 惯性摩擦焊 |
| | GENx | 高压压气机转子 | |
| | GP7200 | 高压压气机转子 | |
| | CF6 | 3~9级压气机转子 | |
| | CFM56 | 1~2级压气机盘; 4~9级压气机盘 | |
| R.R. | Trent 600、700 | 1~8级中压压气机转子; 高压压气机转子 | 电子束焊 |
| | RB211 | 高压压气机 1~2级盘; 高压压气机后 3级盘与后轴 | 惯性摩擦焊 |
| | Trent 1000 | 高压压气机转子; 涡轮后短轴与涡轮盘 | |
| P&W | PW2037 | 高压压气机前轴与第1级盘 | 电子束焊 |
| | PW4000 | 风扇盘; 2~8级高压压气机转子; 压气机后 3级盘和后轴 | |

得满足设计需求的焊接接头。

但是,随着新型高温合金、粉末合金(如 U720Li、Rene'88DT、RR1000 等)在转动件中的逐步应用,尤其对于异种材料的转动件,电子束焊工艺难以获得满意的焊接接头,主要原因是:

(1) 新型高温合金中,含有高体积百分比的 γ' 强化相,成分复杂,熔焊时容易形成结晶裂纹、热影响区液化裂纹和应变时效裂纹,而且这一问题随着 γ' 相含量的增加而趋严重;

(2) 异种材料之间的焊接由于组织、熔点、热导率、热膨胀系数等的差异,在熔焊过程中会引起某些化学成分的扩散,造成组织偏析,并可能产生较大的热应力,造成裂纹等缺陷;

(3) 由晶界液化而产生的微裂纹难以避免,而且难以通过无损检测方法检查出来。

惯性摩擦焊的焊接过程是固相焊接,很好地避免了熔化焊过程中产生的裂纹问题和质量检测问题,因此,针对高温盘轴类转动件的同种/异种新型高温合金的连接,惯性摩擦焊成为目前唯一可行的方法。

正是由于在 Trent 1000 发动机中应用了 RR1000 粉末高温合金这种新型高温合金,R.R. 公司采用了惯性摩擦焊工艺连接盘轴类转动件。

另外,在先进航空发动机盘轴类转动件的结构设计中,为了实现减重和降低成本的目的,异种材料的焊接,尤其是新型高温合金的异种材料连接,成为航空发动机中盘轴类转动件之间进行连接的新形式。GE 公司已将异种材料的惯性摩擦焊应用于 GE90 发动机的盘轴类转动件中,该发动机压气机 8~10 级毂筒中,既有 IN718 与 Rene'88DT 异种材料的焊接,也有 Rene'88DT 同种材料的焊接。R.R. 公司也对 U720Li、RR1000 新型高温合金相关同种材料以及异种材料的惯性摩擦焊工艺进行了研究。

可以看出,对于普通的钛合金、高温合金等盘轴类转动件的焊接,采用电子束焊或惯性摩擦焊都是可行的焊接方法。但针对新型高温合金,尤其是新型高温合金异种材料之间的连接,惯性摩擦焊是目前实现转动件焊接唯一可行的方法。

3 电子束焊和惯性摩擦焊接头的组织与性能对比

电子束焊和惯性摩擦焊的焊接机理不同:电子束焊是熔化焊接,而惯性摩擦焊是固态焊接。因此,两种焊接工艺对焊接接头的组织状态、晶粒大小和接头性能也会产生不同的影响。

3.1 钛合金焊接接头的组织与性能对比

航空发动机盘轴类转动件常用的钛合金主要为 Ti-6Al-4V、Ti17、Ti6246、Ti6242 等,其主要应用的盘轴类转动件为风扇盘和压气机低温端。

对于钛合金,采用电子束焊和惯性摩擦焊两种方法获得的接头组织不同,但接头性能差别不大。以转动件中常用的 $\alpha-\beta$ 型 Ti17 合金为例,其电子束焊接头的焊缝区显微组织中 β 相基体上分布着细长针状 α 相, β 晶粒尺寸为 $50\mu\text{m}\sim 120\mu\text{m}$;热影响区显微组织与母材组织一致,平均晶粒尺寸约为 $180\mu\text{m}$ ^[1]。惯性摩擦焊接头为细晶的锻造组织,热影响区组织为 $\alpha+\beta$ 相,并且 β 相呈针状均匀分布在 α 相的基体上,与母材组织相同,焊缝组织为细小的等轴晶,晶粒度小于母材^[2]。Ti17 合金的电子束焊和惯性摩擦焊的接头组织相差较小,其接头性能也差别不大:Ti17 合金电子束焊接头的抗拉强度和缺口敏感性均高于母材;其惯性摩擦焊接头强度稍高于或等于母材强度,塑形略低于母材,接头疲劳性能与母材相当。因此,在航空发动机钛合金盘轴类转动件焊接结构中,电子束焊和惯性摩擦焊的应用均非常广泛。

3.2 高温合金焊接接头的组织与性能对比

在商用航空发动机盘轴类转动件中,应用最为成熟的高温合金是 IN718 合金,随着航空发动机压比的提高,对盘轴类转动件的使用温度和性能提出了更高要求,因此,新型高温合金 U720Li、Rene'88DT、RR1000 等成为高压压气机高温端的重要材料。

3.2.1 同种高温合金的电子束焊和惯性摩擦焊

(1) IN718 合金。

针对成熟盘轴类转动件中的 IN718 合金,国内外分别对其电子束焊和惯性摩擦焊接头的组织和性能进行了系统深入的研究。

在焊接过程中,电子束焊的焊缝区的温度达到母材的熔化温度(约 1300°C),因此,电子束焊接头的组织会发生较大的变化;惯性摩擦焊焊缝则是在强大的摩擦压力和扭矩的联合作用下形成的,热变形金属的动态再结晶过程进行得相当剧烈而充分,其晶粒组织呈细小均匀的等轴晶特征,同时由于焊接时间很短,致使动态再结晶过程充分而动态回复不足,最终得到细晶和超细晶组织。一般来说,在 IN718 合金母材晶粒度相同的情况下,电子束焊接头为粗大的铸造枝晶组织,晶粒会达到 $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$,而惯性摩擦焊的焊缝组织为锻态组织,晶粒度为 $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 。另外,电子束焊接头的热影响区在焊接过程中的温度一般会达到 $700^\circ\text{C}\sim 1200^\circ\text{C}$,即热影响区处于热处理状态,晶粒长大使其成为接头的最薄弱环节;而惯性摩擦焊热影响区很小,且不存在晶粒长大现象,因此对焊接接头性能无明显影响。

由于焊接接头的组织差别较大, IN718 合金在采用不同焊接方法后, 其性能也有较大区别。电子束焊接头由于组织粗大, 通常其拉伸性能、断裂性能、高温断裂韧度均低于母材^[3-5]。而 IN718 合金在惯性摩擦焊过程中 γ' 强化相在邻近焊缝处溶解, 并不会发生沉淀, 其接头的组织仍是与母材相同的锻态组织, 同时晶粒度与母材相近, 因此, 其接头的强度、塑性、显微硬度和高温持久性能一般接近甚至高于母材^[6-7]。

可见, IN718 合金的电子束焊和惯性摩擦焊接头在组织上存在较大差异, 电子束焊接头的粗大组织造成其接头性能低于母材, 而惯性摩擦焊接头的细晶组织使其性能接近甚至高于母材。

(2) 新型高温合金。

由于电子束焊是熔化焊过程, 而新型高温合金 (U720Li、Rene'88DT、RR1000) 中 γ' 强化相的体积百分比比较高, 因此在电子束焊的熔化过程中容易产生各种裂纹缺陷, 而惯性摩擦焊过程是固相焊接, 通过发生塑性变形和流动进行连接, 不会产生熔化, 因此不会产生电子束焊接出现的缺陷问题。

MTU 公司开展多年的粉末冶金高温合金惯性摩擦焊工艺研究, 研究结果表明: 惯性摩擦焊是焊接粉末高温合金的最佳工艺方法, 其中 Udimet700、Waspaloy、IN100 和 Rene'95 粉末高温合金焊接接头的力学性能接近母材或与母材等强。

近几年, 国外先进航空发动机公司针对盘轴类转动件的设计需求, 联合各高校对 U720Li、RR1000、Rene'88DT、IN718 等高温合金同种材料之间的惯性摩擦焊进行了广泛的研究。研究表明: U720Li、RR1000 高温合金在进行惯性摩擦焊时, 由于发生溶解的 γ' 强化相在冷却过程中发生大量沉淀, 使得其在热影响区的硬度和屈服强度较高^[8]。

在国内, 针对新型粉末高温合金 FGH96 的惯性摩擦焊工艺尚处于研究阶段。目前的研究结果表明, FGH96 惯性摩擦焊接头的拉伸曲线与母材基本相同; 焊接接头常温拉伸的断裂位置在接头热影响区细晶组织和粗晶组织的结合处, 其断裂方式为韧性断裂^[9]。

3.2.2 异种高温合金的电子束焊和惯性摩擦焊

为了追求高的压气机效率, 先进航空发动机的压气机末级已开始采用新型高温合金、粉末合金, 因此异种材料的焊接结构成为必要的结构形式。在先进航空发动机盘轴类转动件中, 异种高温合金之间的连接主要涉及到 IN718 合金和新型高温合金之间进行的连接。由于新型高温合金中 γ' 强化相的体积百分比比较高, 成分复杂, 异种材料之间的组织和物理性能方面存在较大差异, 电子束焊可焊性较差, 缺陷不易检测, 接头性能不能

满足设计需求, 因此, 针对异种高温合金转动件, 惯性摩擦焊成为唯一可行的焊接方法。

从国外的研究结果中可以看出, U720Li+IN718、RR1000+IN718 异种材料之间的惯性摩擦焊可焊性良好, 其焊缝中无微小孔洞、微小裂纹和明显的扩散现象^[10]。U720Li+IN718 惯性摩擦焊接头性能一般高于较弱的母材, 低于较强的母材, 例如: 其焊接接头的屈服强度、650℃的疲劳性能高于较弱的母材 IN718, 低于 U720Li; 650℃的延伸率高于 U720Li, 低于 IN718^[11]。RR1000+IN718 惯性摩擦焊接头在焊后热处理后, 硬度高于 IN718 和 RR1000 母材, 但由于晶界的氧化, 裂纹的扩展速率较母材高^[12]。

4 围绕商用航空发动机盘轴类转动件需开展的焊接工艺研究

电子束焊和惯性摩擦焊作为商用航空发动机盘轴类转动件制造的重要焊接工艺, 已经成功应用于国外多种先进商用航空发动机型号, 同时, 国外不断开展对新材料和新结构焊接工艺的研究, 积累了大量试验数据。国内在这方面仍存在较大的差距, 不能完全满足商用航空发动机的研制需求, 需要从以下两个方面进行系统研究。

(1) 新材料 / 新结构焊接工艺的研究。

随着国内大客发动机研制项目的开展, 盘轴类转动件需要采用新材料和新结构以满足商用航空发动机长寿命、高可靠性和低成本等设计要求。但由于国内针对新材料和新结构的焊接技术研究基础较为薄弱, 因此需要尽快针对新材料(如新型钛合金、高温合金、粉末合金)开展相关焊接工艺研究, 包括可焊性研究、组织与性能研究、焊前 / 焊后热处理制度研究等。

(2) 焊接接头性能数据的测试。

盘轴类转动件的载荷条件严苛, 根据商用航空发动机盘轴类转动件的使用条件, 主要对焊接接头的以下性能, 包括拉伸、冲击、扭转、蠕变、持久、疲劳等性能有明确要求, 并且需要通过对焊接接头进行断裂韧性、裂纹扩展等性能的分析, 对焊接结构进行寿命预测。国内目前针对盘轴类转动件焊接接头的性能数据测试不充分, 需要系统地进行接头性能数据的测试, 为焊接结构的设计提供数据支持。

5 结束语

电子束焊和惯性摩擦焊作为商用航空发动机盘轴类转动件制造的重要工艺, 已经成功应用于国外多种先进商用航空发动机型号。随着我国大客发动机研制项目的展开, 对盘轴类转动件的焊接工艺提出了长寿命、

(下转第 115 页)

· 增加滚轮与零件的接触面积,减小零件表面的熔化可能性,减小压痕;

· 滚轮与零件表面消耗的热量可以作用在波纹管与零件之间,提高了电阻热的利用率,有利于焊缝的形成。

3.3.2 试验过程

针对以上两个问题,决定两个方案同时采用一个焊接试验过程来解决。

(1) 试验。重新配套 3 件试件进行试验,采用的焊接规范如表 3 所示。

表3 焊接规范

| 电容 / μF | 充电电压 / kV | 频率 / Hz | 变压比 级次 | 压力 / N | 转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) |
|--------------------|-----------|---------|--------|--------|---|
| 440 | 9 | 12.5 | 2 | 400 | 5 |
| 440 | 9.5 | 12.5 | 2 | 400 | 5 |
| 480 | 9 | 12.5 | 2 | 400 | 5 |

(2) 试验结果。

· 表面质量: 试件焊接完成后,观察波纹管焊缝表面,发现第 1 组规范焊接的焊缝表面光滑,无飞溅、开裂等现象,第 2、3 组规范焊接的焊缝表面有飞溅现象,无开裂。

· 撕裂检测: 焊后对 3 件试件进行撕裂检测,发现第 3 件试件的焊缝成形好。

· 试验结论: 根据试验结果,决定在正式产品的焊接过程中采用第 1 组焊接规范进行缝焊焊接。

3.4 正式产品的焊接

3.4.1 试件焊接

调整好规范后,对两件车配好的试件进行了焊接,焊后进行撕裂检查,发现焊缝成形良好,拉试合格。而且波纹管表面焊缝印迹清晰,基本无飞溅产生。零件表面焊缝压痕深只有约 0.1mm。缝焊好的试件如图 3 所示。

3.4.2 焊后分析

根据调整好的焊接规范,对 5 套正式产品进行缝焊,焊后进行氦检,均不漏气。对其中一套产品进行撕裂检测,焊缝成形良好。

3.5 焊接结论



图3 试件外形

Fig.3 Shape of testing specimen

本次对大厚度比的波纹管(内侧)与零件(外侧)的缝焊研究过程比较复杂,期间通过对焊机的改造、对车配间隙的调整、增加冷却措施和改变滚轮的尺寸等措施来解决试验中遇到的难题,成功实现了缝焊。

在焊接试验过程中,通过对焊接参数的调整,得出一个重要结论: 在缝焊大厚度比的零件与波纹管时,应采用强规范,即大电压、大充电电容、大压力及较大转速。

参考文献

- [1] 赵熹华. 压力焊. 北京: 机械工业出版社, 1989:7-68.
- [2] 陈祝年. 焊接工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 2002: 573-575.
- [3] HB 5282-1984. 结构钢和不锈钢电阻点焊和缝焊质量检验.

(责编 玲犀)

(上接第 98 页)

高可靠性等更高的要求,尤其是新材料在大客发动机转动件中的应用,需要加快焊接技术的研究,实现焊接技术在大客发动机盘轴类转动件中的工程化应用。

参考文献

- [1] 杨磊,赵秀娟,许鸿吉. Ti17 合金电子束焊接接头的性能及组织分析. 理化检验-物理分册, 2006(42):498-501.
- [2] 许鸿吉,尹丽香,魏志宇,等. Ti17 合金惯性摩擦焊接头力学性能与组织分析. 焊接学报, 2009, 30(12):89-92.
- [3] 梁杰. 高温合金 GH4169 焊接接头断裂及疲劳性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [4] Ram G D J, Reddy A V, Rao K P, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 electron beam welds. Materials Science and Technology, 2005, 21(10): 1132-1138.
- [5] 吴冰,左从进,毛智勇,等. GH4169 合金电子束焊接接头 CTOD 断裂韧性 // 中国机械工程学会年会论文集, 2005:528-531.
- [6] 王敬和,祝文卉,胡建新. GH4169 合金大型环件的惯性摩擦焊接. 焊接, 2001(9):36-37.
- [7] 杨军,周昀,楼松年,等. GH4169 合金惯性摩擦焊接头的高温持久性能. 上海交通大学学报, 2003, 37(2):157-160.
- [8] Preuss M, Withers P J, Baxter G J. A comparison of inertia friction welds in three nickel base superalloys. Material Science and Engineering A, 2006, 437: 38-45.
- [9] 何胜春,张田仓,郭德伦. 粉末高温合金 FGH96 惯性摩擦焊接头常温力学性能分析. 航空材料学报, 2006, 26(3):122-125.
- [10] Huang Z W, Li H Y, Preuss M, et al. Inertia friction welding dissimilar nickel-based superalloys alloy 720Li to IN718. Metallurgical and Material Transactions A, 2007, 7(38A): 1608-1620.
- [11] Li H Y, Huang Z W, Bray S, et al. High temperature fatigue of friction welded joints in dissimilar nickel based superalloys. Material Science and Technology, 2007, 23(12): 1408-1418.
- [12] Daus F, Li H Y, Baxter G, et al. Mechanical and microstructural assessments of RR1000 to IN718 inertia welds-effects of welding parameters. Material Science and Technology, 2007, 23(12): 1424-1432.

(责编 一帆)