

商用航空发动机转子部件的电子束焊接

Electron Beam Welding of Rotor Component of Commercial Aircraft Engine

中航商用航空发动机有限责任公司 王 伦 韩秀峰 张 露

[摘要] 现代商用航空发动机具有长寿命、高可靠性等要求,这对电子束焊接头的设计、制造及检测均提出了更高的要求。介绍了航空发动机转子部件电子束焊接结构及接头设计形式、检测要求,指出了针对商用航空发动机转子电子束焊需开展的研究工作。

关键词: 转子部件 电子束焊 商用航空发动机

[ABSTRACT] The target of long-life and high reliability of advanced commercial aircraft engine put the design, manufacture and inspection of electron beam welding (EBW) joint of rotor components of commercial aircraft engine to higher requirement. Design forms and inspection requirements of EBW joint are introduced. Demand of research on electron beam welding of rotor component of commercial aircraft engine is indicated.

Keywords: Rotor component Electron beam welding Commercial aircraft engine

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.102

采用焊接结构替代螺栓连接可以减轻航空发动机重量,同时还可提高转子组件的刚性与强度^[1]。电子束焊由于焊接精度高、焊接接头无氧化、焊缝质量好等特点,被广泛应用于航空发动机转子部件的焊接^[2]。商用航空发动机转子部件受载条件复杂苛刻,且具有长寿命、高可靠性的要求,对焊接部位的质量要求较高。本文介绍了商用航空发动机转子部件电子束焊的主要应用部位、接头设计形式及焊后检验方法。

1 转子部件电子束焊接应用部位

如表 1 所示,R.R. 公司主要将电子束焊应用于中压气机、高压气机转子组件(包括高压气机末级盘与后鼓筒轴)的焊接。P&W 公司除了将电子束焊接应用于 PW4000 的增压级鼓筒、高压气机 2~8 级转子组件、9~11 级转子组件之外,对低压涡轮 2 级盘与 4 级盘也采用了涡轮盘与篦齿环分体锻造,再采用电子束焊连接成整体结构的工艺。

1.1 压气机转子部件电子束焊

表1 商用航空发动机转子部件电子束焊接应用部位

发动机公司	发动机型号	应用部件
R.R	Trent 600、700	1~8 级中压气机转子; 高压气机转子
	RB211	高压气机 1~2 级盘; 高压气机后 3 级盘与后轴
P&W	PW4000	风扇盘;2~8 级高压气机转子; 气机后 3 级盘和后轴

增压级鼓筒选材主要为钛合金,一般采用整体锻件,但大型商用航空发动机增压级鼓筒由于尺寸较大(最大外径超过 1000mm,高度超过 450mm),整体锻造难度大,锻件的组织和性能难以保证。若采用分级锻造再通过电子束焊连接成组件的工艺,不仅可降低工艺难度,还有利于保证该组件的性能,同时也大大降低了制造成本。PW4000 增压级鼓筒即采用了分段锻造,再通过 3 条电子束焊缝连接成整体结构的制造方法。

中压气机、高压气机转子组件选材一般为钛合金和 IN718 合金,这两种合金的可焊性好,采用电子束焊接可实现高可靠的连接。图 1 为中压/高压气机转子电子束焊组件示意图,采用电子束焊工艺进行中压/高压气机盘之间的焊接时,焊接位置可分为以下 4 种:(1)两级盘均不带篦齿,篦齿环单独锻造,最后在篦齿环与前后两级盘之间分别进行焊接(图 2(a));(2)前后两级盘均带篦齿,在两级盘的篦齿中间进行焊接(图 2(b));(3)前一级盘不带篦齿,后一级盘带篦齿,在篦齿之前进行焊接(图 2(c));(4)前一级盘带篦齿,

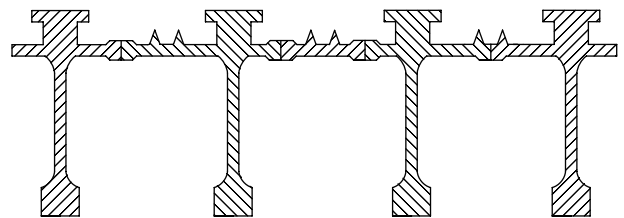


图1 中压/高压气机转子电子束焊组件示意图

Fig.1 Schematic of electron beam welding (EBW) rotor components of intermediate pressure compressor (IPC)/high pressure compressor (HPC)

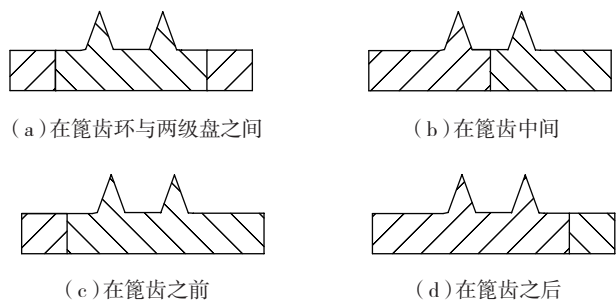


图2 压气机盘间电子束焊位置示意图

Fig.2 Schematic of EBW position between compressor disks

后一级盘不带篦齿,在篦齿之后进行焊接(图2(d))。

高压压气机后鼓筒轴一般为锥形或喇叭形结构,且长度较长,与高压压气机末级盘整体锻造难度较大且成本较高,可采用高压压气机末级盘与后鼓筒轴分开锻造,最后采用电子束焊连接的制造工艺。高压压气机末级盘与后鼓筒轴之间的焊接位置为锥形段,装配和焊接难度较大,可采用锁底止口、对焊接部位进行加厚等方法降低装配和焊接难度(图3),提高焊接接头可靠性。

如图3所示,该处焊缝的焊接方向分为以下两种:与后鼓筒轴表面垂直(图3(a));与转子组件轴向垂直(图3(b))。该部位属于高压转子,且焊接面积较小、焊接部位性能要求较高。为提高焊接部位的可靠性,对焊接部位的性能下降进行补偿,需对焊接位置进行凸台加厚,焊后对焊缝内外表面均进行机械加工,确保焊缝表面光滑、凸台边缘处平滑过渡,避免出现应力集中的现象。

1.2 涡轮机转子部件电子束焊

目前先进商用航空发动机高压涡轮盘一般采用粉

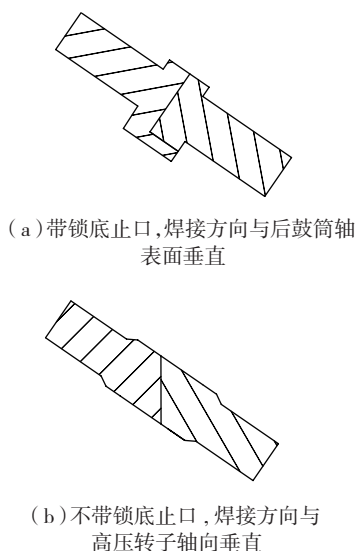


图3 高压压气机末级盘与后鼓筒轴电子束焊接头示意图

Fig.3 Schematic of EBW joint between HPC last stage disk and rear drum shaft

末合金,因此高压涡轮盘与前轴之间的焊接主要采用惯性摩擦焊,较少采用电子束焊工艺。

大型商用航空发动机低压涡轮盘直径较大,若采用低压涡轮盘与篦齿环整体锻造,锻件尺寸大、工艺难度较大且成本较高。若采用篦齿环与低压涡轮盘分体锻造,再采用电子束焊连接的方式,可大大降低工艺难度和制造成本。PW4000 低压涡轮 2 级盘、低压涡轮 4 级盘采用了该工艺:低压涡轮 2 级盘前、后篦齿环分体锻造,再与低压涡轮 2 级盘进行电子束焊连接;低压涡轮 4 级盘、低压涡轮 4 级盘前篦齿环分体锻造,再通过电子束焊进行连接。

2 转子部件电子束焊接接头形式

2.1 带凸台、锁底止口,焊后进行机械加工

如图4(a)所示,该种接头形式的焊接位置留有凸台且焊缝背面带有锁底止口,并要求焊后对焊缝正面、背面均进行机械加工。该种接头形式通过锁底止口降低了装配难度,解决了焊缝背面飞溅、焊缝背面保护等问题,且通过焊透待焊部件(焊至锁底),将缺陷带入锁底焊后通过机械加工去除,进一步提高了接头质量。但采用该接头形式焊后需进行机械加工去除焊缝背面锁底,工序较复杂,且压气机转子组件尤其是高压压气机转子组件盘间间距小、盘心孔径小,这些都给焊缝背面锁底加工带来较大困难。

2.2 带凸台,焊后不进行机械加工

如图4(b)所示,该种接头形式焊接部位内外表面均加厚,且焊后不进行机械加工。采用单面焊双面成形的电子束焊工艺,由于焊后接头内外表面不需要进行机械加工,工序减少,生产效率较高。压气机转子组件盘间间距小、盘心孔径小,若进行焊缝背面加工难度大、效率低,而采用该种接头形式可大大提高生产效率。由于采用该种接头形式焊后无加工余量,对焊接前的组件装

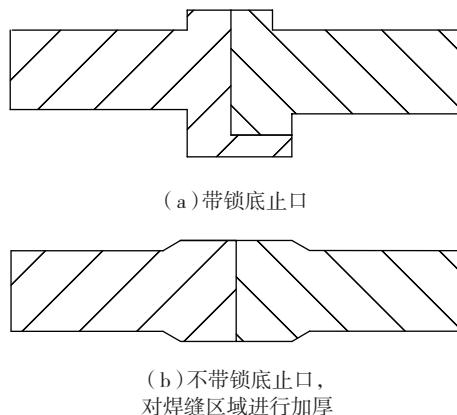


图4 发动机转子部件电子束焊接头示意图

Fig.4 Schematic of EBW joint of aeroengine rotor components

配精度要求较高,且需考虑焊接过程中的焊缝收缩、焊接变形等因素;另外,转子组件尺寸精度、动平衡要求较高,且压气机转子组件往往带有多级焊缝,这都对焊接装配、焊接工艺提出了较高的要求。此外,单面焊双面成形电子束焊工艺必须解决焊缝背面不能焊漏、不能产生飞溅等问题。

采用该接头形式的焊接部位,均通过不同程度的加厚对焊接部位性能下降进行了补偿,而加厚部位的厚度、宽度的确定需通过焊接接头性能测试及结构完整性分析,并根据接头部位的强度设计要求进行计算。此外,由于该接头形式焊后不进行机械加工,焊缝正面、背面均留有余高,因此焊缝成形要求较高,需保证焊缝正面、背面过渡平滑,避免应力集中。

2.3 带凸台,焊后进行机械加工

该种接头形式使焊接部位内外表面均加厚,焊后进行机械加工去除焊缝正面、背面余高,以保证焊缝正面、背面过渡平滑,但加工后焊接部位仍留有凸台。该种接头形式主要应用于焊接面积较小、性能要求较高的部位,如高压压气机末级盘与后鼓筒轴之间、高压涡轮盘与前轴之间等部位的电子束焊缝。

3 转子部件电子束焊焊缝焊后检查

3.1 转子部件电子束焊焊缝焊后检查

商用航空发动机转子部件电子束焊焊缝焊后需进行目视检查、荧光检查及射线检查。目视检查转子部件电子束焊缝表面,要求成形良好,不允许存在裂纹、气孔等缺陷。对于带锁底的电子束焊接头,完成焊缝凸台及锁底加工后即可进行射线检查^[9],不允许存在裂纹、夹杂、未焊透等缺陷。转子部件的电子束焊缝均是荧光检查重点部位,对焊缝区域的缺陷控制要求较高。

3.2 高压压气机转子组件焊缝内表面荧光检测

高压压气机盘间距小、盘心孔径小,均使得焊缝内表面的检查较困难,高压压气机转子组件内腔的清洗及渗透检查均是进行高压压气机转子组件焊缝内表面荧光检测的难点。进行高压压气机转子组件清洗时,需对腹板间内腔进行冲洗,确保内腔清洗干净;清洗并干燥后,将整个转子组件浸入渗透剂中,并朝不同方向往复移动转子组件,确保组件内外表面所有位置均与渗透剂充分接触。针对高压压气机转子组件焊缝内表面的检查,需采用专用探头,确保能清晰地观测到焊缝内表面,并能对缺陷进行测量。

4 围绕商用航空发动机转子部件电子束焊需开展的研究

电子束焊接已广泛应用于国外商用航空发动机转

子部件,并根据接头性能及焊接部位的性能设计要求选取了不同的接头形式。目前,国内在这方面与国外差距较大。针对商用航空发动机研制需求,还需开展以下两方面研究。

(1) 焊接接头性能数据积累。

对商用航空发动机转子部件常用材料的电子束焊接头进行性能测试,主要包括拉伸、冲击、扭转、蠕变、持久、疲劳等性能测试,积累接头性能数据,进行接头性能及结构完整性评价,为接头形式设计提供技术支持。

(2) 焊接接头形式设计研究。

针对商用航空发动机长寿命、高可靠性的特点,以及转子部件电子束焊接部位的性能设计要求,进行接头形式设计研究,确定焊接部位是否需要加厚及加厚部位的厚度、宽度,以及焊后是否需要电子束焊缝正面、背面进行加工,确保焊接接头的可靠性满足使用要求。

5 结束语

商用航空发动机对转子部件电子束焊接头提出了长寿命、高可靠性的使用要求,对电子束焊接头的设计、制造和检测均提出了较高的要求,需要设计人员与工艺人员的充分合作,进行接头性能及结构完整性评价,合理地设计焊接接头,制定合适的无损检测方法 & 缺陷控制要求。

参考文献

- [1] 韩录宽. 电子束焊在航空发动机风扇盘组件中的应用. 航空发动机, 1995(2): 37-47.
- [2] 康文军, 梁养民. 电子束焊接在航空发动机制造中的应用 // 中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会, 2007: 1-5.
- [3] 王一涛. 真空电子束焊及其在航空发动机中的应用. 航空发动机, 2004, 30(1): 47-49.

(责编 谷雨)

(上接第 101 页)

- [8] 许飞, 杨璟, 巩水利, 等. 热输入对铝合金光纤激光穿透焊缝成形的影响. 中国激光, 2014, 41(12): 65-69.
- [9] 刘昕, 雷永平, 巩水利. 焊缝形状对性能影响的层次分析法综合评价. 焊接学报, 2011, 32(1): 29-32.
- [10] 王亚军, 付鹏飞, 关永军. TC4 钛合金电子束焊缝形状特征分类研究. 航空材料学报, 2009, 29(2): 53-56.
- [11] 北京航空制造工程研究所. 航空制造技术. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [12] 姚伟, 巩水利, 陈俐. 钛合金激光穿透焊的焊缝成形(II). 焊接学报, 2004, 25(5): 74-76.
- [13] 许飞. 铝合金激光填丝和电弧复合焊接技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.

(责编 春早)