

TC17 钛合金线性摩擦焊接叶片单元件焊缝设计

余学冉, 陈云永

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要: 基于 Goodman 曲线, 结合稳态应力分析和模态分析结果, 文中提出了一种判断叶片振动危险点的方法。基于该方法, 文中分析了 TC17 钛合金线性摩擦焊接叶片单元件的焊缝高度和焊接夹角对叶片振动安全的影响。此外, 对于该叶片单元件在 1 阶弯曲模态和 1 阶扭转模态下焊缝高度和焊接角度对叶片振动安全的影响也进行了分析。分析结果表明, 对于某线性摩擦焊接叶片单元件 1 阶模态, 叶片焊接夹角和焊缝高度对叶片振动安全性的影响均达 29% 以上, 而对于 1 阶扭转振动安全性, 焊接夹角和焊缝高度的影响则分别达到了 227% 和 392%。通过 1 阶弯曲和 1 阶扭转模态下的线性摩擦焊缝影响分析, 获得了某 TC17 钛合金线性摩擦焊接叶片单元件焊缝的合适位置。

关键词: TC17 钛合金; 叶片; 线性摩擦焊接; 焊缝高度; 焊接夹角

中图分类号: TG453

0 前言

钛合金整体叶盘在现代航空发动机中获得了广泛的应用^[1]。由于线性摩擦焊接技术可以实现非轴对称复杂截面及异质材料的固相连接, 有效避免熔焊中易出现的偏析、裂纹、气孔等缺陷, 成为目前国际公认理想的航空发动机整体叶盘焊接制造与维修关键技术, 在 MTU 和 Rolls-Royce 等公司的领先推动下, 线性摩擦焊接制造技术从 2000 年之后逐步成功应用于不同型号航空发动机整体叶盘制造^[2-4]。

TC17 钛合金具有强度高、断裂韧度好, 淬透性高和锻造温度范围宽等一系列优点^[3], 在 Leap 和 GE90 等多个型号的高压压气机中得到了广泛应用。目前国内已经针对 TC17 钛合金线性摩擦焊接接头组织与力学性能以及焊后热处理制度对力学性能的影响进行了一定研究^[5-8]。李祚军等人^[9]针对线性摩擦焊接制造的 TC11 和 TC17 异质叶片单元件进行了分析和试验, 由于不同焊缝位置处的叶片振动应力的差异及焊缝位置变化对叶片单元件的振动应力梯度产生的影响, 焊缝位置对于叶片的疲劳寿命有显著影响。

整体叶盘在使用过程中, 除了受到气动力、温度和离心力等随转速变化的稳态应力外, 由于其薄壁结构

的特点, 还容易受到气流激振而产生交变的振动应力^[10]。在评估叶片高周疲劳性能时, 往往通过 Goodman 图来综合考虑稳态应力和交变应力的影响^[11]。根据文献[6-7]研究结果, 热处理前, TC17 线性摩擦焊接头的抗拉强度差异约为母材的 91.8% 左右, 高周疲劳性能约为热处理后疲劳性能的 83% 左右; 考虑热处理后, 焊接头的高周疲劳性能和断裂韧度无法在相同热处理温度达到最优。因此, 通过合理设计线性摩擦焊缝高度和角度, 在综合考虑稳态应力和振动应力的情况下, 可以使得焊缝处于较安全区域, 从而有利于提高线性摩擦焊接整体叶盘的振动安全性。

1 模态应变比及叶片危险点

现代民用航空发动机叶片设计时, 可通过 CFD 计算、传热分析获得叶片表面气动力分布和叶片温度场, 再通过有限元分析软件设置合理的边界和离心载荷, 可较为精确的获得叶片稳态应力分布。但由于叶片所受气流激振力、阻尼难以准确模拟, 因此, 叶片在运转时的振动应力往往难以预估。由于叶片结构阻尼和气动阻尼对叶片振动时的频率和模态应力分布较小, 通过比较叶片上不同位置的模态应变比(即叶片上任意一点许用振动应变与该点的模态应变的比值), 可以获得叶片上最薄弱的位置, 模态应变比越高, 表明叶片发生该阶共振时振动应力占许用振动应力的比值越小, 振动安全性越高。因此, 定义模态应变比 R_{mod} 如下:

收稿日期: 2020-11-11

基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX04010001)

doi: 10.12073/j.hj.2020111001

$$R_{\text{mod}} = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{\text{mod}}} \quad (1)$$

式中: ε_{mod} 为模态应变; ε_a 为许用振动应变, 由 Goodman 图获得, 典型 Goodman 图定义如图 1 所示。

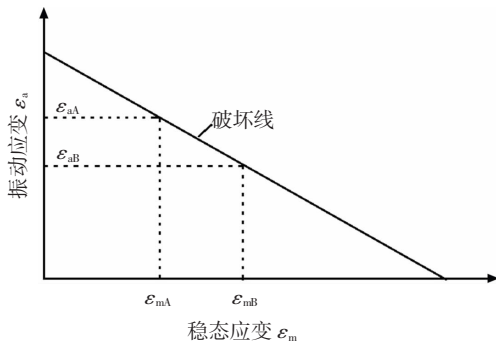


图1 Goodman 图及参数

图1中, ε_{mA} 和 ε_{mB} 分别为叶片上任意两点 A, B 的稳态应变, 可以通过有限元分析获得。

根据模态应变比的定义, 对于叶片任意的两点 A 和 B, 其模态应变比的比值为:

$$\frac{R_{\text{modA}}}{R_{\text{modB}}} = \frac{\varepsilon_{aA}}{\varepsilon_{\text{mod}_A}} / \frac{\varepsilon_{aB}}{\varepsilon_{\text{mod}_B}} \quad (2)$$

式中: ε_{aA} 为 A 点的许用振动应变, 根据 ε_{mA} 从 Goodman 图中获得; ε_{aB} 为 B 点的许用振动应变, 根据 ε_{mB} 从 Goodman 图中获得; $\varepsilon_{\text{mod}_A}$ 为 A 点的模态应变; $\varepsilon_{\text{mod}_B}$ 为 B 点的模态应变。

式(2)进一步调整得到:

$$\frac{R_{\text{modA}}}{R_{\text{modB}}} = \frac{\varepsilon_{aA}}{\varepsilon_{aB}} / \frac{\varepsilon_{\text{mod}_A}}{\varepsilon_{\text{mod}_B}} \quad (3)$$

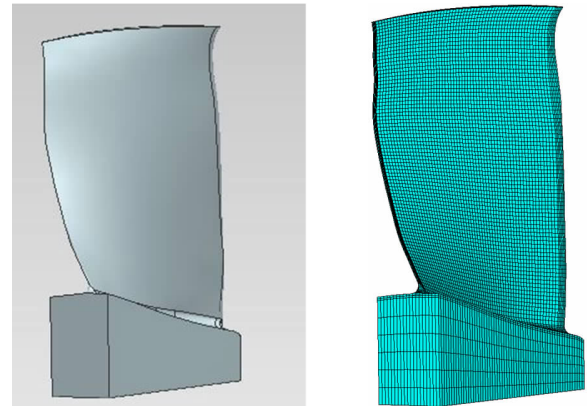
由式(3)可知, 任意两点之间的模态应变比的比值等于任意两点许用振动应变之比和模态应变之比的相除。对于叶片来说, 由于阻尼对模态应力分布的影响较小, 当叶片发生某阶次振动时, 叶片上任意两点之间的振动应变比值与模态应变比值一致。因此, 模态应变比与叶片振动应力储备系数成正比, 从而模态应变比越高的点其振动应力储备越大, 从而高周疲劳失效的风险越小。在确定线性摩擦焊缝位置时, 应尽量避免开振动应力储备(即模态应变比)较小的位置。

2 某型发动机线性摩擦焊接叶片单元件焊缝设计

2.1 叶片单元件参数

以某型发动机线性摩擦焊接叶片单元件为例(为增加考核叶片数, 由线性摩擦焊接整体叶盘更改为叶片单元件), 叶片几何模型和有限元模型如图2所示, 其材料为 TC17 钛合金, 室温下的力学性能见表1, 焊接

前后, 材料力学性能保持一致。稳态应力分析时, 对叶片施加 1 170 rad/s 的离心载荷, 在单元件底面施加全位移约束, 叶片稳态应力分布如图3所示。模态分析时考虑稳态预应力, 其第1阶模态应力分布如图4所示。



(a) 几何模型

(b) 有限元模型

图2 叶片单元件几何模型和有限元模型

表1 TC17 材料力学性能

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
20	4 640	111.5	0.313

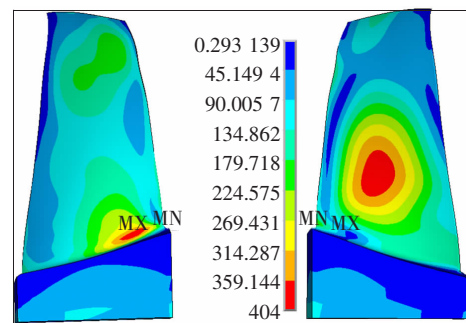


图3 叶片单元件稳态应力(等效应力)分布

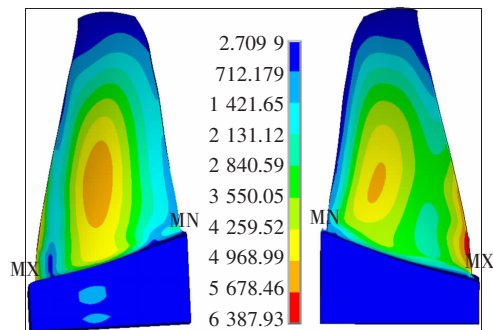


图4 第1阶弯曲模态应力(等效应力)分布

以叶片夹持端部平面为参考平面,定义焊缝高度和焊接夹角如图 5 所示。其中,焊缝高度为叶片进气边焊点距叶片进气边与叶片缘板交点的径向高度,焊接夹角为焊缝与夹持端部平面的夹角,当进气边焊缝高度低于排气边焊缝高度时,焊接夹角为正。

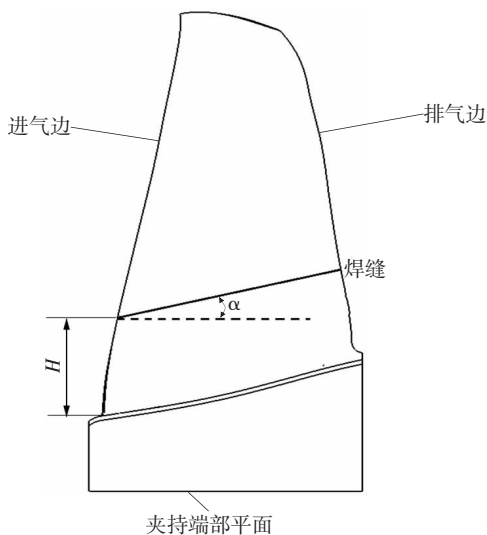


图 5 焊缝高度和焊接夹角定义

根据模态应变比的定义,以典型焊缝位置为例(焊接夹角 18° , 焊缝高度占总叶身高度的比例分别为 5% 和 11%), 叶片压力面焊缝在模态应变比分布如图 5 所示(焊缝与进气边交点为左端, 相对弦长位置为 0%; 焊缝与排气边交点为右端, 对应弦长比例 100%)。

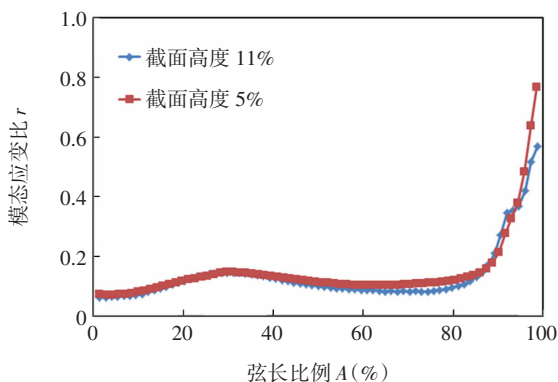


图 6 典型焊缝截面(叶片压力面)模态应变比分布

由图 6 可知,典型焊缝截面处,不同弦长位置的模态应变比是存在差异的,对于 5% 叶高截面来说,由于进气边存在明显的模态大应力区,因此,左端模态应变比较低,而右端因远离模态大应力区并且静应力较小,因此模态应变比较高。11% 叶高截面与 5% 截面类似,但右端模态应变比更高。

2.2 焊缝高度和焊接夹角影响分析

通过对不同焊缝高度处的叶身截面进行分析,不断调整焊接夹角,并提取对应焊接截面的最小模态应变比,可以得到不同焊缝高度对应的最小模态应变比如图 7 所示。

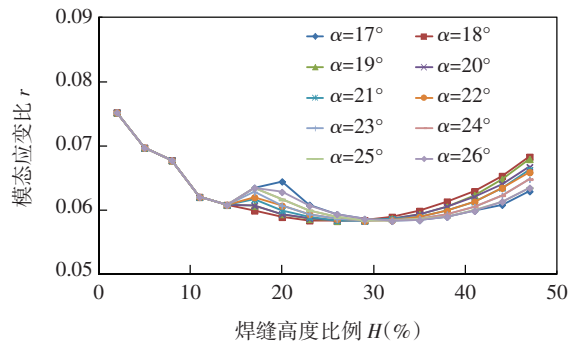


图 7 不同焊缝高度下的模态应变比分布

由图 7 可知,在 2% ~ 50% 叶片高度范围内,不同焊缝高度下的模态应变比差异最大可达 29.3% (最大值 0.075 2, 最小为 0.058 5)。同一焊接夹角下,随着焊缝高度的增加,焊缝位置的最小模态应变比呈现“C”形分布,25% ~ 35% 焊缝高度处的模态应变比最低,而在此区域外,模态应变比则逐渐增大。值得一提的是,在 15% ~ 25% 焊缝高度,存在一处模态应变比局部峰值区域。

类似的可以得到不同焊接夹角下的最小模态应变比,如图 8 所示。

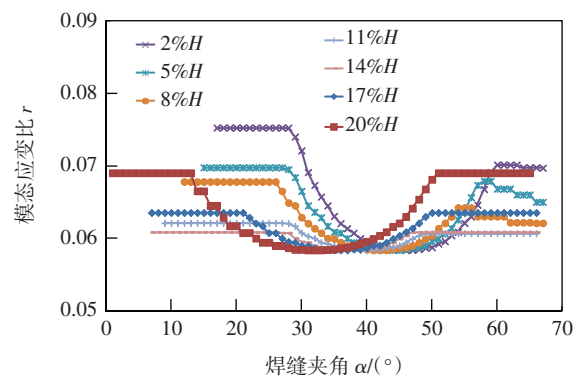


图 8 不同焊接夹角下的模态应变比分布

由图 8 可知,不同焊接夹角对模态应变比的影响可达到 29.6% (最大值 0.075 2, 最小为 0.058)。同一焊缝高度下,焊缝对应的最小模态应变比亦呈现“C”形分布,与图 6 的差异在于,同一焊缝高度下,曲线两端存在模态应变比基本不变的“平台区域”,而中间焊接夹角对应的模态应变比最低。以 5% 焊缝高度

为例,焊接夹角处于 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 最佳, $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 其次,而在 $30^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 之间,模态应变比类似于抛物线分布。综合焊缝位置和焊接角度分析,对于该叶片的 1 阶弯曲振动,宜选择 10% 及以下焊缝高度,焊接夹角不易超过 30° 。

2.3 模态阶次的影响分析

针对 1 阶扭转模态开展分析,依次得到不同焊缝高度和不同焊接夹角下的模态应变比分别如图 9 和图 10 所示。

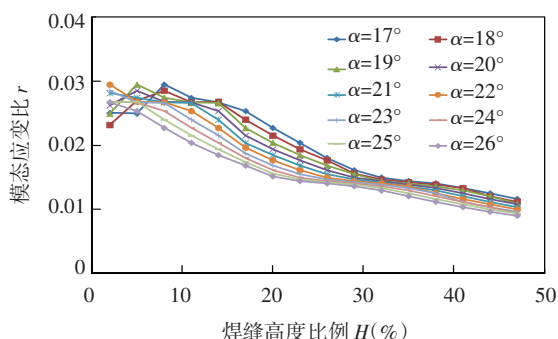


图 9 不同焊缝高度下的模态应变比分布

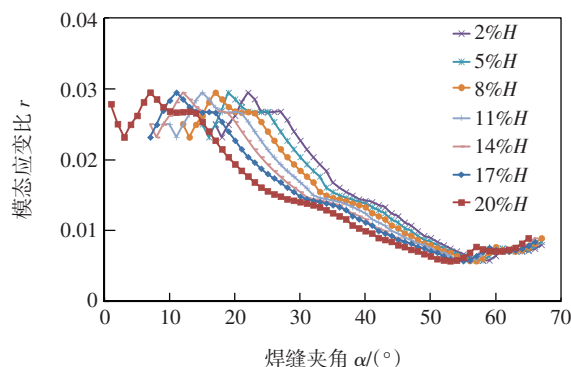


图 10 不同焊接夹角下的模态应变比分布

由图 9 和图 10 可知,不同焊接高度和焊接夹角对模态应变比的影响更大,分别可达 227% 和 392%;对于 1 阶扭转模态,焊缝高度越高,模态应变比越低;焊接夹角在 25° 以下区域存在着模态应变比较高的平台区域。以 5% 焊缝高度为例,焊接角度在 $21^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 范围内较为合适,而当焊接夹角小于 21° 时,角度差异最大可使得模态应变比出现 20% 左右的波动。

3 结论

(1) 线性摩擦焊缝位置对于整体叶盘整体安全性影响较大,文中提出了一种通过计算模态应变比来判断叶片危险点方法,可以用于判断叶片振动安全性。

(2) 基于文中提出的方法,对某线性摩擦焊接叶

片单元件焊缝的焊缝高度和焊接夹角进行了敏感性分析。分析了第 1 阶弯曲模态和第 1 阶扭转模态振型下,模态应变比随焊缝高度和焊接夹角的变化规律,给出了较合适的焊缝高度和焊接夹角。通过分析不同焊缝高度及不同焊接夹角下的模态应变比变化规律,可根据需重点关注的模态选择合适的焊缝位置,使得焊缝区域的模态应变比较高,提高叶片振动安全性。

参考文献

- [1] 黄春峰. 整体叶盘结构及发展趋势[J]. 现代零部件, 2005, (4): 96 - 101.
- [2] 苏宇, 马铁军, 李文亚, 等. 整体叶盘线性摩擦焊接设备研制与发展现状[J]. 航空制造技术, 2016(18): 53 - 57.
- [3] 孙文君, 王善林, 陈玉华, 等. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(18): 63 - 72.
- [4] 张传臣, 张田仓, 金俊龙. TC21 + TC4-DT 线性摩擦焊接接头组织与力学性能试验[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 139 - 143.
- [5] 李菊, 张田仓, 郭德伦, 等. TC17($\alpha + \beta$)/TC17(β) 钛合金线性摩擦焊接接头组织与力学性能[J]. 航空制造技术, 2015(3): 68 - 70.
- [6] 周军, 梁武, 张春波, 等. TC17 钛合金线性摩擦焊接接头组织与力学性能分析[J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 36 - 41.
- [7] 季亚娟, 张田仓, 张连锋, 等. TC17 钛合金线性摩擦焊接接头组织及性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 156 - 160.
- [8] 李晓红, 张彦华, 李赞, 等. 热处理制度对 TC17($\alpha + \beta$)/TC17(β) 钛合金线性摩擦焊接接头组织与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(1): 115 - 120.
- [9] 李祚军, 田伟, 张田仓, 等. 线性摩擦焊接钛合金整体叶盘研制与实验研究[J]. 航空材料学报, 2020, 40(4): 71 - 76.
- [10] 王伦, 潘博, 黄怡晨, 等. 航空发动机转子组件电子束焊变形预测[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 117 - 123.
- [11] 马剑龙, 吴雨晴, 吕文春, 等. 动态风载作用下叶片疲劳损伤的差异化分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 278 - 284.

第一作者简介: 余学冉, 1984 年出生, 硕士, 副主任工程师; 主要从事航空发动机结构强度设计。

(编辑: 曲畅)