

某型燃气轮机涡轮导向器裂纹故障分析

周韧峰

(中国航发集团湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002)

摘要：某型燃气轮机试车后分解检查发现涡轮导向器出现裂纹，于是对涡轮导向器进行了相应的外观、体视镜、微观、金相组织和硬度检查，根据检查结果分析认为裂纹断口性质主要是由热应力导致的脆性断裂；随后对裂纹产生的原因进行了分析，确定了导致裂纹的主要原因是涡轮导向器温度分布不均和结构连接限制了其自由膨胀；在此基础上对涡轮导向器结构进行了改进，并通过了试验验证改进方法有效，为燃气轮机类似故障的排除提供了参考。

关键词：涡轮导向器；裂纹；故障分析；改进

0 引言

涡轮导向器是燃气轮机主要的涡轮静子零件，工作条件十分恶劣，特别是第一级涡轮导向器紧接在燃烧室出口，直接与高温高压燃气的接触，温度高且分布不均、热应力大，因此导向器常常会出现受热不均、膨胀受限等因素导致的变形、裂纹等问题。某型燃气轮机在车台完成工厂试车后分解检查，发现一级涡轮导向器内安装边螺栓孔处出现多条穿透性裂纹（具体位置见图 1）。

1 检查和分析

1.1 外观检查

一级涡轮导向器内环内壁出现明显温色，并且径向有一侧明显偏高；为了便于检查和分析，在一级涡轮导向器内安装边切割出了有代表性的试样。

1.2 体视镜检查

试样贴合面靠内圆侧可见 3 条裂纹，张口方向（裂纹

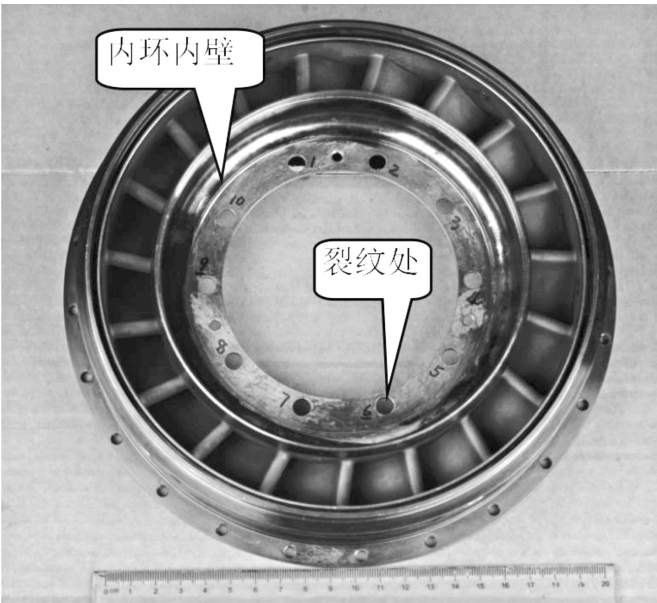


图 1 导向器裂纹位置示意图

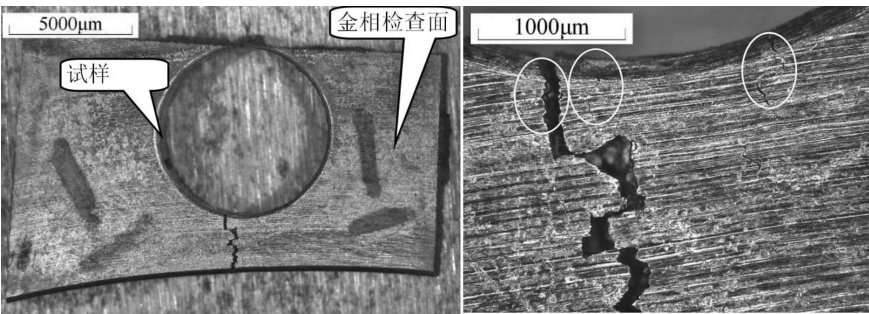


图 2 试样及裂纹示意图

起始方向）均从螺栓孔边缘；已断裂的主裂纹曲折延伸至内圆，发展方向大致为径向；其余两条发展方向大致也为径向，向内圆延伸。内圆面可见主裂纹斜轴向发展，完全贯穿内安装边（见图 2）。

检查试样靠内圆侧主裂纹的断口，发现主裂纹起源于贴合面与螺纹孔倒角处，先扩展形成一个大致平坦的近似扇形区；再从贴合面和螺纹孔的另一台阶面上的次源扩展（伴随着大量滑移带出现，属大应力），断裂面较前期的扇形区粗糙；主裂纹总的扩展方向是从贴合面与螺纹孔倒角处向另一贴合面与内圆的倒角（见图 3）。

1.3 微观检查

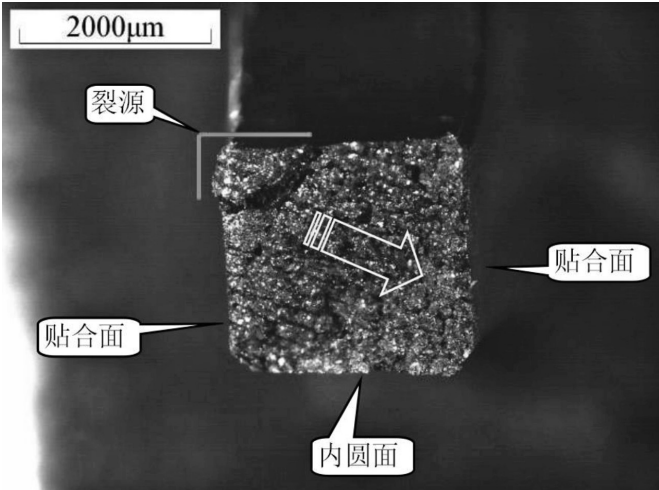


图 3 断口示意图

将试样靠内圆侧断口放入扫描电镜中检查。检查发现试样断口裂源在图 4 的右上角台阶外侧倒角处,呈线源特征,然后转向另一台阶,再在另一个台阶线性次源扩展;同时线性裂源和次源的微观形貌为拉长韧窝特征。源区往内可见碳化物连续脆性断裂特征,碳化物(脆性相)之间的基体可见少量疲劳条带特征和大量小韧窝特征,而且疲劳条带的扩展方向比较杂乱。

整个断面仍保持铸件特有的枝晶组织断裂形貌,裂纹的裂源和次源都呈现拉长韧窝撕裂的微观形貌,而断面内部有反复摩擦痕迹和少量疲劳条带特征。结合体视镜检查结果,分析认为断口性质为主要由热应力导致的脆性断裂。

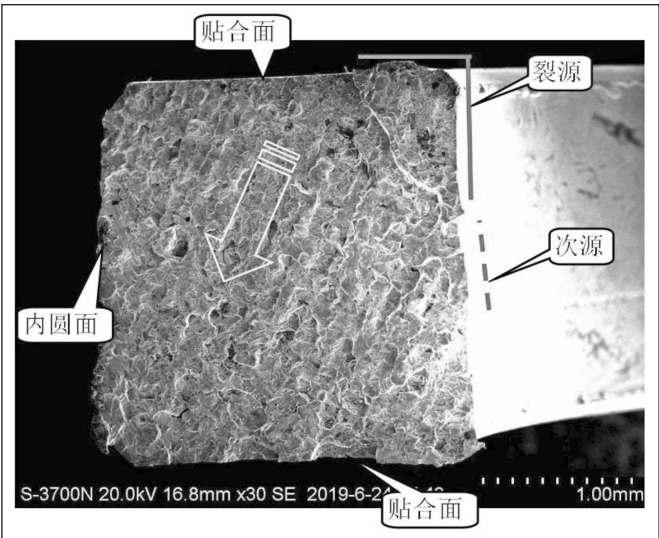


图 4 断口全貌

1.4 金相检查

金相试样腐蚀后可见铸造枝晶形态、骨骼状和块状碳化物。显微组织主要由 γ 基体、 γ' 相、 $(\gamma+\gamma')$ 共晶和碳化物组成,为正常的铸态组织,大小符合《中国高温合金手册》的常规范围。

1.5 硬度检查

在试样贴合面上进行了硬度(HRC)测试,结果为 HRC38.3,符合《中国高温合金手册》的常规值范围(铸态 HRC36~39)。

通过上述检查可知,零件金相组织和硬度满足相应要求,结合微观检查和体视镜检查结果,分析认为断口性质主要是由热应力导致的脆性断裂。

2 故障原因分析

2.1 零件简介

一级涡轮导向器是涡轮部件的静子部分,位于燃烧室出口,由内外环及 26 片叶片组成,叶片和内外流道采用无余量精密铸造的方法加工,材料为高温合金 K403。一级导向器采用 6 个径向销钉与前涡轮机匣定位,前涡轮机匣采用锻造机加成形,通过后安装边用 24 个螺栓与后涡轮机匣连接,止口定心机匣前端和导向器内环前端分别与燃烧室蜗壳

出口内外环搭接。同时一级导向器内安装边与压气机中的焊接组件连接,通过止口定心,10 个螺钉连接(见图 5)。

2.2 故障原因分析

导向器结构设计时需留有足够的径向和轴向膨胀空间,一般设计成一端固定、一端能自由伸缩。由上述零件结构介绍可知,该前涡轮机组组件(含一级涡轮导向器)采用通过后安装边用 24 个螺栓与后涡轮机匣连接(一端固定),止口定心,前端与燃烧室蜗壳出口搭接(一端自由伸缩)的方式。但是一级导向器内安装边还与压气机的焊接组件通过止口定心,10 个螺钉连接,该连接方式会导致内环安装边在受热时不能自由膨胀,进而产生较大的热应力。

该一级涡轮导向器为整体结构,由于该燃气轮机燃烧室结构形式(单罐火焰筒+蜗壳)的特殊性,会导致燃烧室出口温度分布不均。由导向器温度分布图和径向变形图(见图 6)可以看出导向器各部位的温度和变形差异较大,其中外环处变形最大,而内环处变形最小,故导向器内、外环存在较大的应力;同时由于导向器内环安装边前后(图 5 中 A、B 腔)都有冷却气体,故导向器内环与内安装边存在较大的温差及变形量,故而存在较大的热应力。

根据以上分析,导致导向器内环安装边螺栓孔处产生裂纹的主要原因是:

- (1) 一级涡轮导向器为整体式结构,工作时一级导向器各部位的温度和变形差异较大,因而导致导向器内外环以及内环与安装边之间会产生较大的热应力;
- (2) 由于导向器内安装边与焊接组件采用止口定位、螺钉联接的方式,限制了导向器内安装边的自由膨胀,且螺纹孔处更容易产生应力集中,故而导致导向器内环安装边螺栓孔处产生裂纹。

3 故障复现

鉴于此故障的发生,生产装配了一台新燃气轮机,装配前对涡轮导向器进行荧光检查,特别检查了导向器内安装

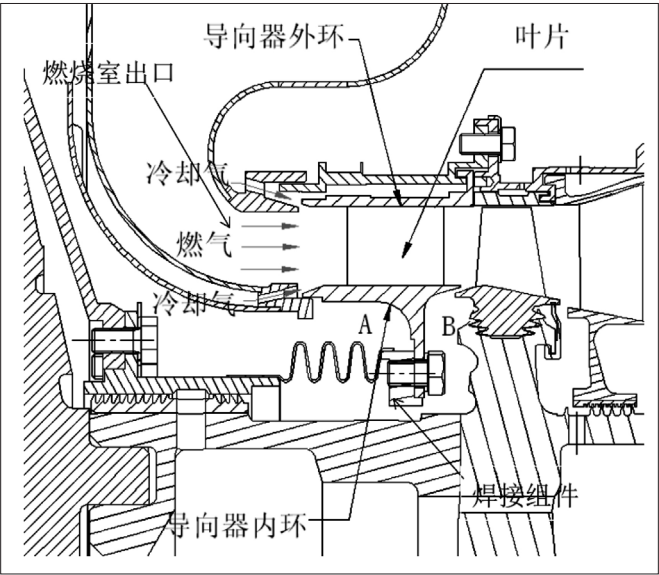


图 5 涡轮结构示意图

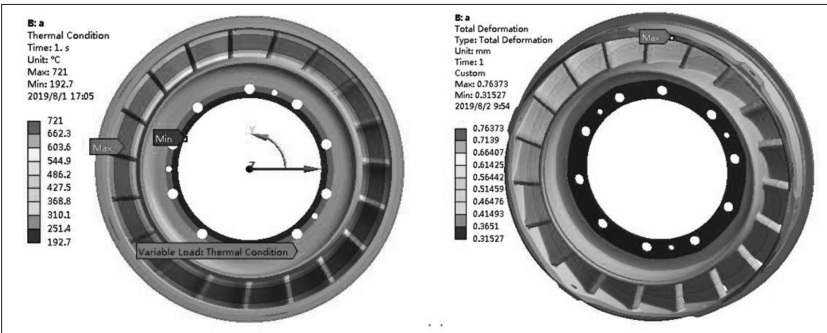


图 6 导向器温度场分布和径向变形图

边处，无裂纹。新燃气轮机在试车台完成了工厂试车，试验过程中运行正常，试验时长 2.5h。试验后对新燃气轮机进行分解检查，发现一级涡轮导向器内安装边螺栓孔上出现了多处裂纹。

4 改进方法及验证

4.1 改进思路

鉴于导向器内安装边螺栓孔裂纹产生的原因，可以采取以下两种改进方法：

- (1) 取消螺栓连接；
- (2) 增加内安装边的膨胀自由度。

由于整机结构连接需要，螺栓连接不能取消，因此，改进的方向主要是增加导向器内安装边的膨胀自由度，确保导向器工作受热时能有膨胀的空间。

4.2 改进方法

参考相关发动机的高温部件，为保证零件受热能自由膨胀，减少工作时的热应力，结构设计上采用开止裂槽（热

应力释放槽），止裂槽根部开止裂孔的方式。

为了解开槽前后以及开槽尺寸对导向器内安装边应力分布的影响，故设计了多种尺寸的止裂槽进行了对比计算，计算结果表明止裂槽越深、止裂孔直径越大，螺栓孔和止裂孔处的应力越小。考虑到一级涡轮导向器与焊接组件连接处需将 A、B 气腔隔开，故最终确定止裂孔中心所在圆直径最大为 $\Phi 113\text{mm}$ ，止裂孔直径为 $\Phi 4\text{mm}$ ，槽宽 2.4mm。导向器改进前、后的差异见图 7。

4.3 试验验证

将一件涡轮导向器进行按上述改进方案进行了加工，即在导向器内安装边上开止裂槽（热应力释放槽）；导向器加工完成后安装于燃气轮机进行了验证试验，试验的进行了 9 个小时（10 次启动），试验完成后，对燃气轮机进行了分解检查，并对一级涡轮导向器进行了荧光检查，检查结果显示无裂纹（见图 8）。

由上述试验结果可知，原一级涡轮导向器试验时长 2.5h 分解检查即有裂纹，而改进后（开热应力释放槽）的一级涡轮导向器经过 9h 试验后分解检查无裂纹，故可说明此改进方法有效。

5 结语

本文结合一级涡轮导向器裂纹断口的宏、微观观察，金相组织和硬度检查结果对裂纹故障产生的原因进行了分析，并采取了相应的改进方法和试验验证，主要得出以下结论：

- (1) 导向器温度分布不均导致热应力大、内安装边连接处不能自由膨胀是导致裂纹的主要原因；通过对导向器改进设计，增加热应力释放槽，达到了排除故障的目的。
- (2) 在燃气轮机设热端部件过程中，要特别重视零件热膨胀问题，尽量保证零件各部分受热均匀，同时确保零件受热后有一定的膨胀空间，从而减少工作时的热应力，保证燃气轮机稳定安全可靠的工作。

参考文献：

[1] 航空发动机设计手册编委会. 航空发动机设计手册第 10 册 [M]. 北京：航空工业出版社, 2002.

[2] 忻建华, 钟芳源. 燃气轮机设计基础 [M]. 上海：上海交通大学出版社, 2015.

[3] 刘长福, 邓明. 航空发动机结构分析 [M]. 西安：西北工业大学出版社, 2006.

[4] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京：中国标准出版社, 2001.

[5] 徐志刚, 吕凤军, 陈良峰, 陈荣. 涡桨发动机涡轮导向器内环失效分析 [J]. 金属热处理, 2011(S1):20-23.

[6] 徐昌顺. 某型发动机涡轮导向叶片故障探讨 [J]. 装备制造技术, 2006(003):97-98.

作者简介：周韧峰（1988-），男，汉族，湖南永州人，硕士研究生，工程师，研究方向：燃气轮机涡轮设计。

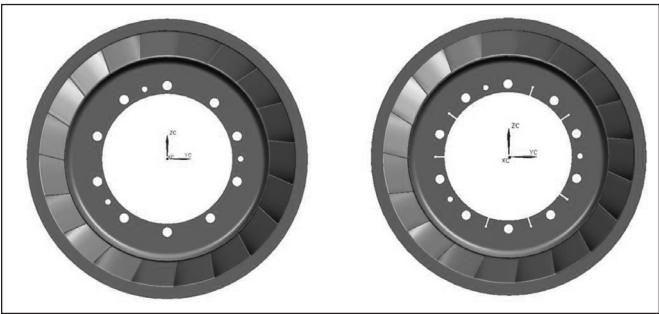


图 7 导向器改进前、后对比

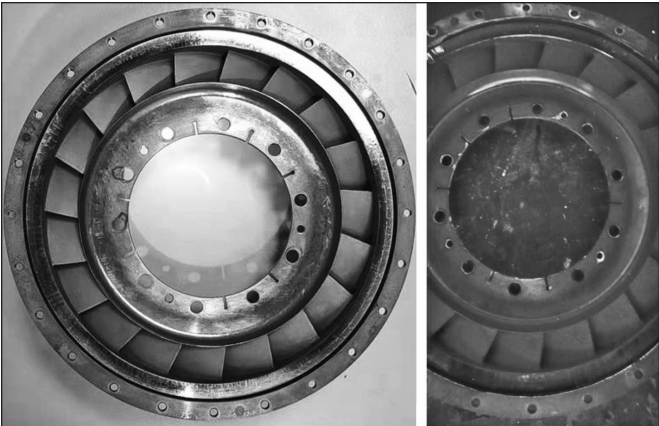


图 8 导向器荧光检验结果