

某涡轮支承环连接结构故障分析

王明新¹, 何建元², 肖蔚岩², 张立超²

(1. 海军装备部 北京 10010; 2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 燃气轮机事业部 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 为了解决某涡轮支承环连接结构故障, 本研究在详细描述故障现象的基础上, 从结构角度分析了故障的危害性, 并对故障解决流程进行了规划。通过开展对故障螺钉的金相检查和断口分析、连接位置的结构合理性分析、多工况温度场及强度校核计算, 以及基于上述内容开展的故障复现试验等工作, 验证了分析结论, 查明了故障原因并提出了螺钉装配时停止使用丝和脂, 并用镀银螺钉替代的方案。改进方案通过燃气轮机的整机试车考核证明了方案的合理性。该故障的解决也改善了某型燃气轮机涡轮支承环结构设计, 同时提高了机组的可靠性。

关键词: 燃气轮机涡轮; 支承环连接结构; 故障分析; 试验验证; 改进方案

中图分类号: TK474.7 文献标识码: A

引言

燃气轮机涡轮支承环属于涡轮静子部分, 是涡轮的主要承力件, 也是燃气轮机总承力系统的一部分。涡轮支承环作为转子的支承, 承受了转子的重量、振动以及转子不平衡量引起的惯性力, 涡轮支承环通流部分也承受着高温燃气的作用, 使整体结构承受着气动力和热应力的综合作用。在燃气热冲击的作用下, 涡轮支承环机匣内壁面温度往往高达 700 ~ 800 °C, 而内罩壳、壁板的连接位置温度也高达 600 ~ 700 °C。所以为了保证涡轮工作的可靠性, 涡轮支承环的连接结构需要能够同时承受结构力、热应力及振动情况下, 保证自身结构的可靠性。涡轮支承环结构从连接形式上分为两种, 一种是焊接结构, 另一种为螺纹连接结构, 其中螺纹连接结构使用较多, 适用于薄壁零件的安装, 可避免焊接结构导致的变形过大问题。

本研究针对某型燃气轮机涡轮支承环内罩壳处的螺纹连接结构断裂故障进行了深入分析, 在对连接结构处断裂螺钉进行表面金相检查和断口分析的

基础上, 对该内罩壳连接位置的结构设计、温度场分布及强度储备进行了分析和计算, 并开展了故障复现试验。故障复现试验结果验证了分析结论, 查明了故障原因并提出了解决方案, 该解决方案目前已通过燃气轮机整机试车考核, 作为改进方案在某型燃气轮机上进行了大量应用。

1 故障现象与结构分析

1.1 故障现象

某型燃气轮机在完成耐久性试验后, 在分解涡轮支承环时发现涡轮支承环后部螺钉共 19 件螺钉出现了断裂或裂纹故障, 其中 14 件故障部位在螺钉根部圆弧连接 R 处, 其余 5 件故障部位在螺钉退刀槽, 故障发生位置如图 1 所示, 断裂螺钉如图 2 所示。

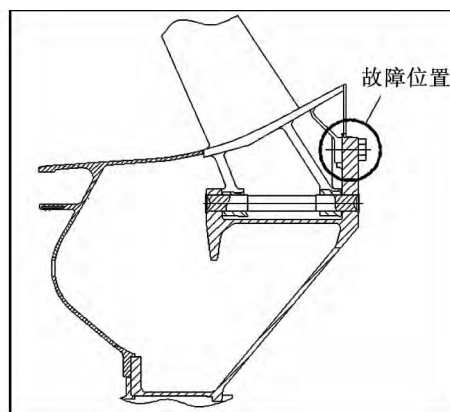


图 1 涡轮支承环故障位置

Fig. 1 Location of the fault occurred in the supporting rings of a turbine

1.2 故障的危害性

燃气轮机是一种连续回转的内燃、叶轮机械式的热机。在涡轮工作区, 燃气流道内的高温、高压燃

收稿日期: 2013-06-05; 修订日期: 2013-06-21

作者简介: 王明新(1979-), 男, 山东青州人, 哈尔滨工程大学研究生。

气推动涡轮转子高速回转进行功率输出,所以燃气轮机通流部分应严禁外物进入以防损伤工作叶片。虽然目前所有燃气轮机机组都有严格的进气过滤措施,但机组内部部件脱落引起的叶片损伤却屡次发生,严重时会造成大量叶片损坏乃至报废,同时损伤其它转、静部件。某型船用燃气轮机机组曾发生过上述故障,导致了机组的返厂维修。

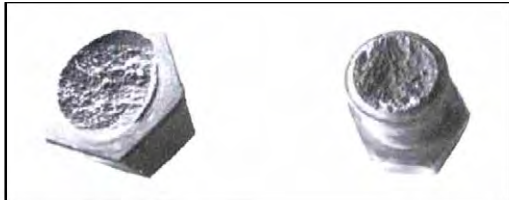


图2 根部圆弧连接R处及退刀槽处断裂的螺钉
Fig.2 Bolt fractured at the location of the transition arc portion R and the recess at the root

从图1可以看出,本次故障发生位置接近燃气通道,脱落的螺钉头部有一定几率随空气系统流路进入主燃气通道,所以为了避免叶片损伤,保证涡轮工作可靠性,必须对故障现象进行排查、分析,查明故障起因并进行有效的改进。

1.3 结构说明

故障发生位置为涡轮支承环内罩壳与支承壳体连接处,如图3所示。该处共装配螺钉33个,螺钉材料为GH202,螺纹规格M12×1.5-6e,螺杆长度30mm,螺钉总长45mm。螺钉装配时先加载72Nm的加压力矩,后续松开后重新加载65Nm的拧紧力矩,螺钉工作温度约700℃,所以安装时螺纹工作表面涂抹高温丝扣脂(牌号为7451)以防粘接。

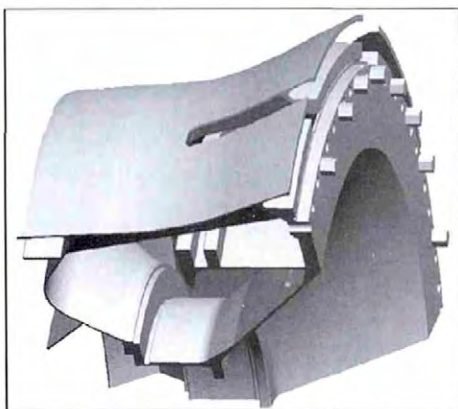


图3 涡轮支承环连接结构
Fig.3 Connection structure of the supporting ring of the turbine

1.4 故障解决流程

故障发生后,为了排查故障原因,准确快速地进行故障分析,研究、制定了此次涡轮支承环连接结构故障解决流程,如图4所示。

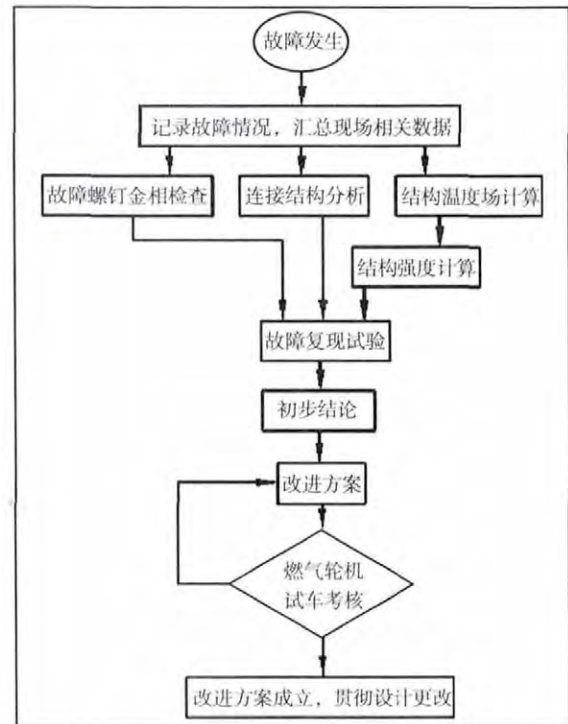


图4 故障解决流程
Fig.4 Trouble - shooting flow path

2 故障螺钉的金相检查

为分析螺钉断裂原因,进行了下列金相检查:

(1) 涡轮支承环后部断裂螺钉断口分析、表面能谱分析和材质分析;

(2) 类似状态螺钉解剖金相检查;

螺钉断裂故障产生后,对断裂螺钉进行了断口分析,如图5和图6所示;表面能谱分析和材质分析,检查结果如图7和图8所示。

从图上看,螺钉断口表现出沿晶断裂特征,但断口边缘区域中存在颗粒相,中心区域很少发现。能谱分析表明,边缘区域断口中沿裂纹存在Pb、Mo的氧化物,形态与成份与断口外沿附着的白色氧化铅/氧化钼颗粒相同。中心区域主要是Ni、Cr的氧化物,同时也存在S峰。总之,2个螺钉断口表现出相同的沿晶断裂特征。断口中心区域是正常氧化组织,但有S的扩散进入。断口边缘区域中存在有Pb、Mo的氧硫化物,成份与螺钉涂抹的7451高温丝

扣脂($\text{MoS}_2 + \text{Pb}_3\text{O}_4$) 相同。

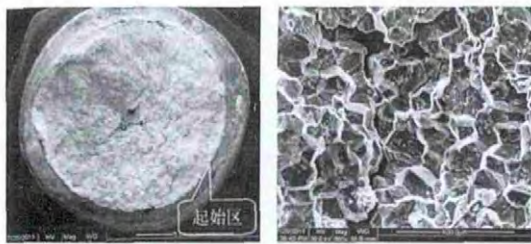


图 5 退刀槽位置断口全貌及形貌

Fig. 5 Whole picture and morphology of the fracture location at the recess

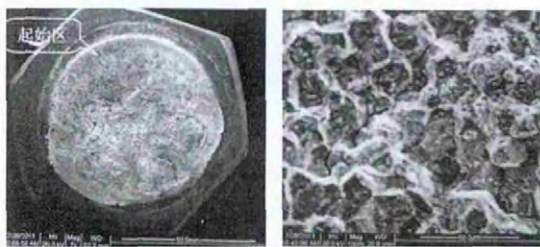


图 6 根部位置断口全貌及形貌

Fig. 6 Whole picture and morphology of the fracture location at the root

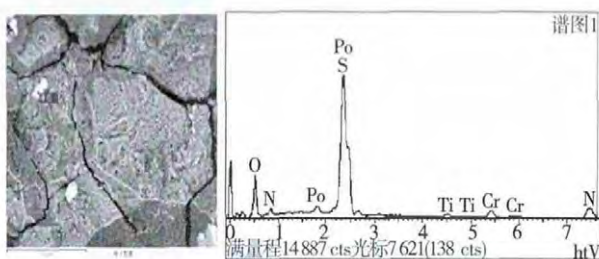


图 7 表面区域能谱分析

Fig. 7 Energy spectrum analysis of the surface area

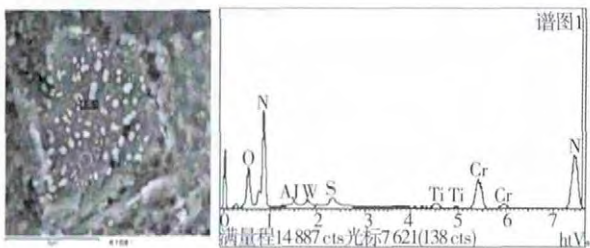


图 8 中心区域能谱分析

Fig. 8 Energy spectrum analysis of the central area

将螺钉沿断裂面纵向解剖,观察纵剖面上的裂纹扩展与组织特征,如图 9 所示。首先对螺钉的纵剖面进行光学显微镜观察,表明裂纹均为沿晶扩展。

随后,对纵剖面进行了扫描电镜观察,无论在裂纹底部或未开裂晶界处,均发现了 Pb 的氧硫化物,表现出强的 Pb、S、O 峰。上述结果证实,Pb、S 等元素可沿晶界扩散到螺栓内部,造成晶界脆化而导致沿晶破坏。



图 9 螺钉纵剖面的沿晶裂纹

Fig. 9 Crack along the crystal direction in the longitudinal section of the bolt

根据涡轮支承环断裂螺钉的结构、装配位置、工作温度及涂抹的丝扣脂牌号,在机组上选取了与其工作条件类似的材料为 GH696 螺钉进行了解剖分析,该螺钉在装配过程中进行了多次拆装。通过无损荧光检测,横、纵剖面组织观察,6 支 GH696 合金螺钉表面与内部均未发现裂纹,也没有热腐蚀现象发生,得出结论:

(1) 发生断裂的螺钉断裂模式相同,属于一定拉伸应力和温度作用下,低熔点金属 Pb 腐蚀损伤引起的沿晶脆性断裂。低熔点金属 Pb 及有害元素 S 来自于螺钉安装时涂抹的 7451 高温丝扣脂;

(2) 7451 高温丝扣脂会对镍基合金 GH202 的螺钉造成晶间腐蚀,而根据对铁基合金 GH696 螺钉的解剖分析,未见对其的晶间腐蚀迹象。

3 结构强度计算分析

根据支承环连接结构(包括支承壳体、壁板罩壳及螺钉),在装配状态下,计算了 3 种工况(1.0 工况、慢车工况及冷态工况)、两种拧紧力矩情况下的结构温度场及应力分布。根据结构建立的有限元模型如图 10 所示,温度场计算结果如图 11 所示。

螺钉工作状态主要承受载荷为预紧力、腔压所产生的力和温度场导致的热变形不协调引起的力,

将温度场计算结果导入后,计算的 3 种工况下螺钉的应力分布如图 12 所示。

得该处的应力小于慢车工况时的应力。表 1 为螺钉不同拧紧力矩、工况下的强度储备系数。

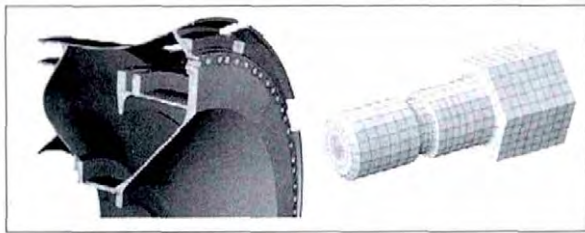


图 10 连接结构整体及螺钉三维模型
Fig. 10 3D model for the whole connection structure and the bolt

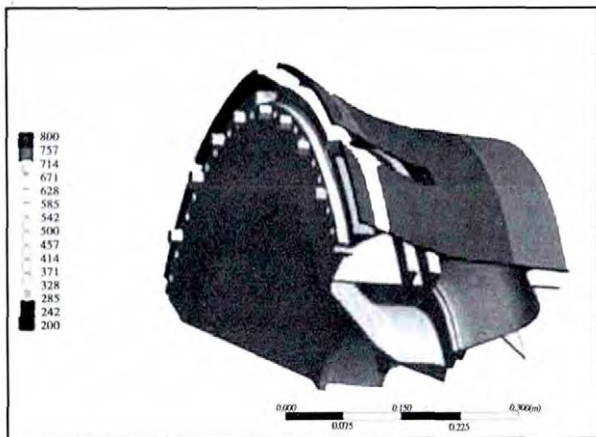


图 11 1.0 工况支承环连接结构温度场分布
Fig. 11 Temperatur field in the connection structure under the full load operating condition of the supporting ring

根据有限元计算结果,无论是冷态工况、慢车工况还是 1.0 工况螺钉应力最大的位置均在退刀槽靠近螺纹一侧。冷态工况时螺钉退刀槽处的应力沿周向均匀分布,最大应力为 505 MPa,平均应力为 238 MPa,最大应力及平均应力小于材料最低屈服强度 550 MPa。慢车工况时退刀槽处的应力分布不均匀,说明在慢车工况时由于支承壳体和内罩壳的线膨胀系数不同导致径向位移不同,使螺钉在退刀槽处产生弯矩,造成该处应力变大,最大应力为 481 MPa,平均应力为 193 MPa,最大应力和平均应力均小于材料的屈服强度。由于温度场的原因,在 1.0 工况螺钉退刀槽处的应力分布也不均匀,退刀槽处的最大应力为 219 MPa,平均应力为 111 MPa,均小于材料屈服强度。在 1.0 工况时由于温度高,螺钉本身的膨胀量变大,导致预紧力产生的应力变小,使

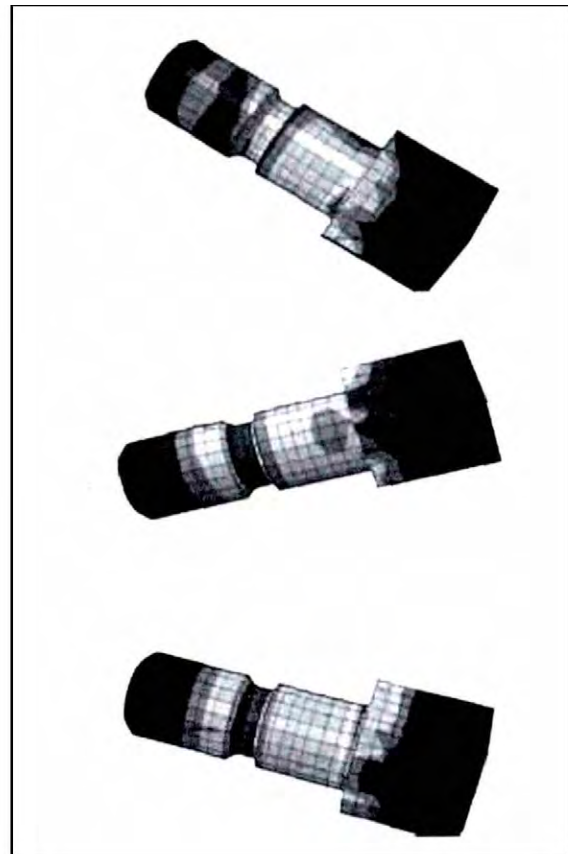


图 12 1.0 工况、慢车工况、冷态工况 3 种工况螺钉应力分布(从上至下)
Fig. 12 Stress distribution of the bolt under the full load, slow speed and cold-state operating condition(from the top to the bottom)

表 1 不同拧紧力矩及变工况下的螺钉强度储备系数
Tab.1 Strength reserve coefficient of the bolt at various tightening moment and under the off - design conditions

工况	拧紧力矩 65 Nm			拧紧力矩 72 Nm		
	1.0	慢车	冷态	1.0	慢车	冷态
储备	4.41	2.69	2.31	4.33	2.22	2.13

强度分析结论:

(1) 从计算结果可以看出,螺钉装配后,在冷态工况、慢车工况及 1.0 工况,螺钉最大应力会随工况变化而改变,主要的应力集中位置为螺钉退刀槽和根部圆弧连接 R 处,与故障螺钉断裂位置一致;

(2) 在安装预紧力、热应力和结构力 3 个方面中影响最大的是安装预紧力,但在 3 种工况、2 种拧紧力矩情况下螺钉强度储备都能够满足使用要求,

不会因为拧紧力矩的加大而产生破坏,所以螺钉本体结构、连接结构从强度储备角度来看不存在设计问题。

4 故障复现试验

通过理化、结构和强度分析工作,可初步判定故障与丝扣脂内低熔点金属 Pb 及腐蚀性元素 S 有关,应通过开展故障复现试验进一步明确故障原因。

4.1 试验方案

按照螺钉实际装配结构设计了试验件,包括螺钉试验件、中间板和连接板,其中螺钉采用与故障螺钉同批生产的零件,中间板和连接板的厚度和材料与原连接结构保持一致,结构如图 13 所示。试验件分为 6 组(共 57 件螺钉)分别进行常规试验、强化试验和新型丝扣脂验证试验。试验过程分为 3 个试验阶段:一次装配阶段 160 h、二次装配阶段 15 h 和三次装配阶段 10 h,试验用设备为可编程一体化箱式电阻炉。

常规试验:试验参数按照实际工作过程,工作温度 700 °C,安装力矩按设计要求施加,装配时涂抹 7451 高温丝扣脂;

强化试验:强化因素为装配力矩(+20%)、拆装次数(+1 次)、工作表面局部破坏及装配涂层(螺钉工作表面涂调和铅粉);

新型丝扣脂验证试验:按常规试验和强化试验方式分别对 3 种新型高温丝扣脂及工作表面镀银的螺钉进行试验验证。

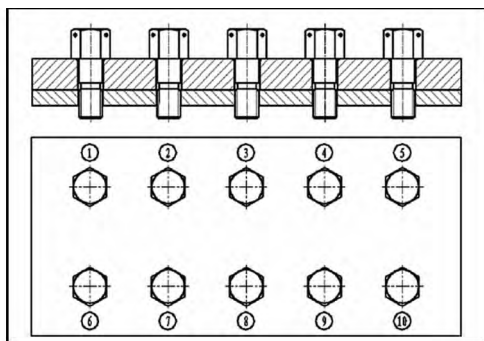


图 13 故障复现试验件
Fig. 13 Failure replay test piece

4.2 试验结果

根据试验大纲要求,进行了 3 个阶段(160、15 和 10 h)共 185 h 的试验,各阶段试验结果如下:

第 1 阶段(一次装配)试验结果:所有螺钉试验件宏观检查外观检查无异常,抽样进行理化分析发

现涂抹 7451 丝扣脂和铅粉的螺钉表面存在 Pb、S 元素附着物,并伴有工作表面晶间腐蚀现象,深度 15 ~ 25 μm;其余螺钉试验件无异常。

第 2 阶段(二次装配)试验结果:5 件涂抹 7451 丝扣脂的螺钉试验件出现断裂现象,其中 1 件断裂位置为 I 号处,4 件断裂位置为 II 号处,1 件螺钉表面存在两处裂纹分别在 I、II 号位置,如图 14 和图 15 所示。抽样进行理化分析发现,涂抹 7451 丝扣脂和铅粉的螺钉表面存在 Pb、S 元素附着物,并伴有工作表面晶间腐蚀现象,深度 20 ~ 30 μm;其余螺钉试验件无异常。

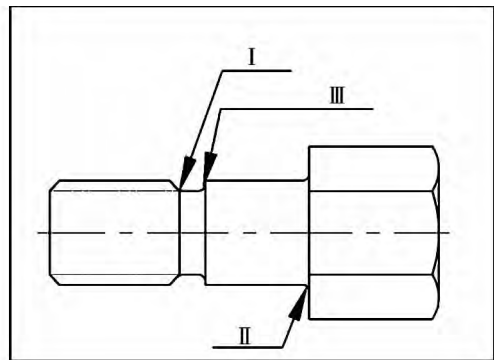


图 14 试验件螺钉故障位置示意图
Fig. 4 Schematic drawing of the failure location of the bolt as the test piece



图 15 I 号、II 号断口位置及裂纹位置
Fig. 15 No. I and II fracture and crack location

第 3 阶段(三次装配)试验结果:共断裂 5 件螺钉(3 件涂 7451, 2 件涂铅粉),4 件断裂位置为 II 号处,1 件断裂位置为 III 号处。理化分析结果与第 2 阶段一致。如图 16 和图 17 所示。

4.3 试验结论

(1) 从试验件螺钉出现断裂的位置与故障螺钉断裂位置对比来看,I 号断裂位置与原故障螺钉头部断裂位置基本相同,都出现在螺杆与螺钉头部圆弧连接 R 位置;II 号断裂位置与原故障螺钉退刀槽断裂位置相近,都位于中部退刀槽,但试验件断裂位

置靠近螺纹而故障螺钉断裂位置靠近螺柱; III号断裂位置与原故障螺钉退刀槽断裂位置一致。



图 16 涂抹 7451 断裂的螺钉及断口 (II号断裂位置)

Fig. 16 Bolt fractured with coating 7451 being applied and fracture location (No. II fracture location)

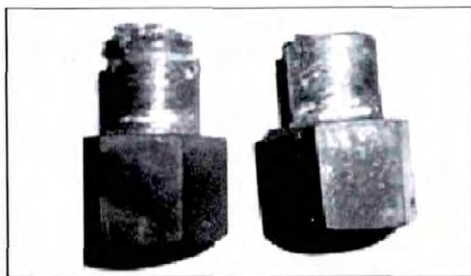


图 17 涂抹铅粉断裂的螺钉及断口 (II号及 III号断裂位置)

Fig. 17 Bolt fractured with lead powder being applied and fracture location (No. II and III fracture location)

(2) 试验件螺钉的金相检查结果是 涂抹 7 451 丝扣脂及铅粉的螺钉表面普遍存在铅元素附着物, 在零件表面形成沿晶腐蚀性损伤; 涂抹其它丝扣脂或镀银的螺钉不存在晶间腐蚀现象, 零件表面无明显附着物。

5 改进方案及整机试车考核

通过相关的分析、计算及故障复现试验确定了故障起因为螺钉工作表面涂抹的 7451 丝扣脂内 Pb、S 元素在高温工作环境中, 对 GH202 合金螺钉在多次拆装情况下造成表面晶间腐蚀, 进而导致螺钉出现断裂现象。

改进方案: 螺钉装配时停止使用丝扣脂, 采用镀银螺钉替代。(注: 螺钉工作表面镀银的方法已在航空发动机上应用, 能够比较有效地解决紧固件的

高温粘接问题)

已将该改进方案应用于多台机组的生产和试车工作, 如图 18 所示。试车考核后的各种检查和理化分析表明, 镀银螺钉工作正常, 未发生异常现象。

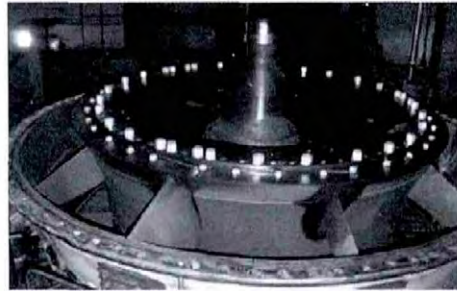


图 18 改进方案在整机试车考核中的应用

Fig. 18 Application of the improvement version in the examination of the trial-run test of the whole machine

6 结 论

通过对某型燃气轮机涡轮支承环连接结构故障螺钉的金相检查、结构分析、相关计算及故障复现试验验证工作, 得到结论如下:

故障的起因来自 7 451 高温丝扣脂内部腐蚀性成分(MoS_2 、 Pb_3O_4) 对镍基合金(GH202) 螺钉在高温工作环境及多次拆装的情况下造成晶间腐蚀, 进而产生断裂现象, 所以为了保证机组可靠性在整机上停用该型丝扣脂, 采用镀银螺钉替代。经过燃气轮机整机试车考核发现镀银螺钉工作正常, 未出现异常现象。

参考文献:

- [1] 王华阁. 航空发动机设计手册 [M]. 北京: 航空工业出版社 2001.
WANG Hua-ge. Aeroengine design handbook [M]. Beijing: Aviation Industry Press 2001.
- [2] 牛利民, 李淑英. 船舶燃气轮机结构 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社. 2007.
NIU Li-min, LI Shu-ying. Marine gas turbine structure [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press 2007.
- [3] 夏松波. 旋转机械故障诊断技术的现状与展望 [J]. 振动与冲击, 1997, 16(2): 1-5.
XIA Song-bo. Current status and prospect of the rotary machine fault diagnosis technology [J]. Vibration and Impingement, 1997, 16(2): 1-5.
- [4] Tony Giampaolo. Gas turbine handbook principles and practices [M]. Philadelphia: Taylor and Francis 2005.

(孙显辉 编辑)

加湿燃烧研究现状 = **Current Status in the Study of the Humidified Combustion** [刊, 汉] XI Dan, WANG Yang, LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hu (National Key Laboratory on Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(1). - 1 ~ 6

Firstly, the authors described in detail the research findings in the humidified combustion of fuel from the following two aspects: one is the influence of the humidification on the combustion characteristics of gas turbine combustors and another is the influence of the humidification on the ignition characteristics and combustible limits of fuel. Secondly, they also analyzed the conclusions currently obtained from the study of the humidified combustion. The air humidification combustion can lower the combustion temperature of the flame, change the chemical reactions during the combustion and heat and mass transfer process and influence the flow field and configuration of the flame, making the flame tend to be unstable and at the same time, to lower the temperature in the combustion zone is favorable to reducing the NO_x emissions and of a major significance for reducing the NO_x emissions from the HAT and IGCC etc. thermal cycles. Finally, the authors pointed out that there do exist some shortcomings in terms of the humidified combustion and gave suggestions for the future studies in this regard on the basis of the foregoing research results. **Key words:** humidification, steam injection, humidified flame, humidified combustion, HAT (humid air turbine)

某涡轮支承环连接结构故障分析 = **Analysis of the Fault Occurred to the Connection Structure of the Supporting Ring of a Gas Turbine** [刊, 汉] WANG Ming-xin (Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), HE Jian-yuan, LIANG Chen, ZHANG Li-chao (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(1). - 7 ~ 12

To solve the supporting ring connection structure of a gas turbine, on the basis of the fault phenomena being described in detail, analyzed were the harms caused by the fault from the viewpoint of the structures and planned was a flow path for remedying the fault. Through a metallographic inspection of the bolt faulted and analysis of its fracture, rationality of the structure at the connection location, a multi-condition check calculation of the temperature field and strength as well as the fault replay test of the above-mentioned items etc., the analytic conclusions were verified, the fault causes identified and an improved version proposed, i. e. when the bolts are assembled, no thread grease should be applied and the above-mentioned bolts should be replaced with silver-plated ones. Through a trial-run check of the whole machine, the rationality of the improved version was proved. The remedy of the fault has meliorated the supporting ring structure design of the turbine part of the gas turbine and at the same time enhanced the reliability of the whole unit. **Key words:** turbine part of a gas turbine, supporting ring connection structure, fault analysis, test verification, improved version