

燃气轮机起动电机超扭保护轴断裂原因分析

薛晨阳, 马玉辉, 吴明昊, 龚旭龙

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150035)

摘要: 超扭保护轴是燃气轮机传动系统的重要部件。某燃气轮机在一次冷吹时, 超扭保护轴断裂。通过化学成分检验、夹杂物分析、强度和硬度校核、运行情况分析、断口的宏观和微观形貌分析等方法, 对超扭保护轴的断裂原因进行了研究。结果表明, 这是由材料内部缺陷导致的疲劳断裂。

关键词: 超扭保护轴; 疲劳断裂; 材料内部缺陷

中图分类号: TK478

文献标识码: A

Cause Investigation on Fracture of Overtorque Protection Shaft of Gas Turbine Starter Motor

XUE Chenyang, MA Yuhui, WU Minghao, GONG Xulong

(National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Harbin 150035, China)

Abstract: The overtorque protection shaft is an important component of the gas turbine transmission system. In the course of cold blowing, the overtorque protection shaft of a gas turbine broke. To investigate the reason for the fracture, many methods are employed such as chemical composition test, inclusion analysis, strength and hardness verification, running condition analysis of the gas turbine, and macroscopic and microscopic appearance observing of the fracture. Results indicate that it is the inner defects that result in the fatigue fracture of the shaft.

Keywords: overtorque protection shaft; fatigue crack; inner defect of material

某船以燃气轮机作为主动力装置, 该燃气轮机通过一台变频起动电机和下部传动箱带动低压气机实现冷吹和起动, 燃气轮机在一次冷吹时起动电机超扭保护轴发生断裂。本研究对超扭保护轴的断裂原因进行了分析, 以期避免发生类似情况。

1 工作原理

超扭保护轴是变频起动电机和下部传动箱

之间扭矩传递和超扭保护的重要部件。起动电机和下部传动箱的传动系统部件组成如图 1 所示。

图 1 中, 起动电机的扭矩通过花键套筒 19、弹性轴 18 和半联轴器 17 传递给超扭保护轴 20, 超扭保护轴 20 将扭矩传递给半联轴器 16、花键套筒 15 和花键轴 21, 在花键轴 21 上固定有离心棘爪离合器的主动半离合器, 主动半离合器带动从动半离合器 12, 进而通过若干齿轮组带动低压转子。

收稿日期: 2023-07-25

作者简介: 薛晨阳, 男, 1989 年生, 研究方向为燃气轮机设计及运行维护。E-mail: 1250816532@qq.com

引用格式: 薛晨阳, 马玉辉, 吴明昊, 等. 燃气轮机起动电机超扭保护轴断裂原因分析[J]. 材料开发与应用, 2024, 39(5): 94-99.

XUE C Y, MA Y H, WU M H, et al. Cause investigation on fracture of overtorque protection shaft of gas turbine starter motor[J]. Development and Application of Materials, 2024, 39(5): 94-99.

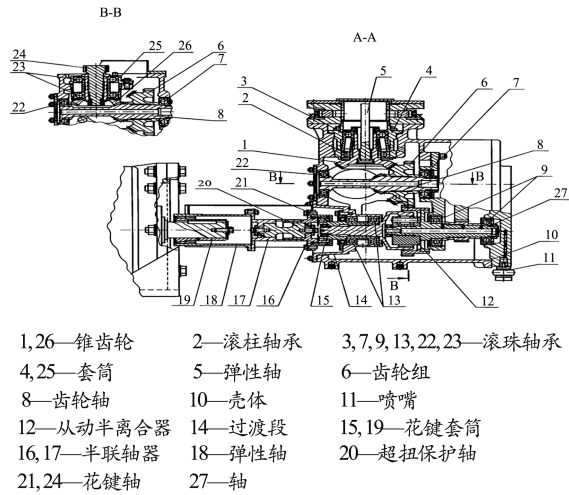


图 1 传动系统部件组成

Fig. 1 Composition of transmission system components

超扭保护轴两端圆柱部分的端面上有两个矩形凸台,两个半联轴器法兰面中央有两个矩形孔,矩形凸台嵌入矩形孔中。矩形凸台中心开有 M10 螺纹孔,两个 M10 的螺栓和垫圈将两个半联轴器与超扭保护轴压紧并连接为一个整体。超扭保护轴有预定的破坏扭矩,该破坏扭矩小于下部传动箱和低压压气机传动装置的破坏扭矩,因此在扭矩过大时,超扭保护轴中间较细的部分会最先被剪断,起动电机和下部传动箱之间的扭矩传递被断开,防止在起动或冷吹过程中下部传动箱和低压压气机传动装置零件因超扭而损坏。断裂后的超扭保护轴如图 2 所示。



图 2 断裂的超扭保护轴

Fig. 2 Broken overtorque protection shaft

2 试验方法

为了查明超扭保护轴断裂的原因,判断燃气轮机是否还能继续运行,从以下几个方面进行了失效原因分析^[1-2]:首先从已断裂的超扭保护轴的右半部分取样,用光谱法分析其化学成分;再使用金相显微镜,对超扭保护轴中的夹杂物进行评级鉴别;之后利用计算公式和布氏硬度计,对材料进行强度和硬度校核,并对其运行情况进行分析;最后进行断口的宏观分析和微观分析,断口的微观分析采用的是日立高新扫描电子显微镜 SU3500。SU3500 采用 3 kV 加速电压、7 nm 分辨率的全新电子光学系统,具有实时立体成像功能和更高的检测效率,可更好地观察样品表面的细微形貌,有效减小对样品的损坏,和常规扫描电子显微镜相比观察精度更高。

3 试验结果与分析

3.1 化学成分分析

该超扭保护轴是采用苏联牌号为 18X2H4MA 的合金钢制造的,对应的国内牌号为 18Cr2Ni4WA。18Cr2Ni4WA 钢是一种具有良好力学性能和淬透性的渗碳钢,其任何截面都可以在空气中淬火,属于马氏体钢,主要用于制造发动机上重负荷和耐磨部件,如齿轮、杆件、套筒、活塞销、曲轴等^[3]。因此选用该材料制造超扭保护轴较为合适。

对超扭保护轴进行化学成分分析,检测结果如表 1 所示。

表 1 材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of materials (w)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	P	S	Fe
0.160	0.290	0.370	1.500	4.400	0.110	0.780	0.011	0.012	余量

根据钢材牌号,零件中应该不含 Mo,而检测结果中 Mo 的质量分数为 0.110%。一定含量的 Mo 能够使钢在淬火过程中更易获得均匀的马氏体组织,增加淬透性,且 Mo 与 C 的结合力较大,能形成稳定的碳化物,抑制回火脆性,使钢材具有更好的综合力学性能^[4],故材料的化学成分不是零件断裂的原因。



(a) 夹杂物级别: A0B2.5C0D0Ds0.5



(b) 夹杂物级别: A0B0.5C0D1.0Ds0.5

图3 夹杂物形态

Fig. 3 Inclusion morphology

由图3可知,夹杂物主要为三类:B类为氧化铝类,黑色颗粒,尺寸较小,呈断续的条带状分布;D类为球状氧化物类,黑色或蓝色,尺寸较小,呈不规则分布;Ds类为单颗粒球状,呈圆形或近似圆形,直径≥13 μm。根据夹杂物的评级可知,材料中的夹杂物并不多,并且独立点状和分散分布的小质点非金属夹杂物对钢的强度的影响不大,因此夹杂物并不是零件断裂的原因^[5]。

3.3 强度及硬度校核

超扭保护轴的外形尺寸如图4所示。按照图纸要求,超扭保护轴的破坏力矩应不小于700 N·m。材料力学中棒材破坏力矩^[3]计算公式为

$$T_{np} = 0.88R_m W_p \quad (1)$$

式中, R_m 为零件的抗拉强度; W_p 为扭转断面的极惯性矩, $W_p = \pi d^3 / 16$; d 为断面处破坏前的直径。

经测试,该超扭保护轴的抗拉强度为1141 MPa,断面处破坏前的直径为16 mm,经计算可知,零件的破坏力矩约为808 N·m。用布氏硬度计对零件进行硬度测试,试验压头直径为10 mm、压力为30 kN,最终压痕直径为3.26 mm,可知其布氏硬度值为350HB。强度和硬度均满足使用要求。

3.2 夹杂物分析

夹杂物相当于材料中存在的缺陷。夹杂物与钢基体之间在可变性、弹性模量及热膨胀系数等性能上的差异是材料内部局部应力升高乃至局部微观开裂的基本原因。因此选择了两处夹杂物较多的位置在显微镜下进行观察,照片如图3所示。

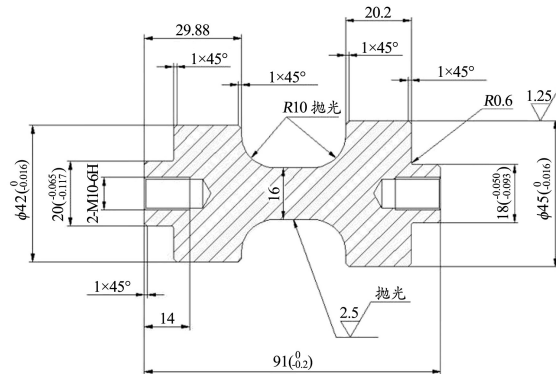


图4 超扭保护轴的外形尺寸

Fig. 4 Outline dimension of overtorque protection shaft

3.4 运行情况分析

超扭保护轴只在燃气轮机起动和冷吹过程中工作,在低压转速超过3800 r/min时,下部传动箱中的棘爪离合器会自动断开起动电机和下部传动箱之间的扭矩传递。每次起动和冷吹过程中,起动电机的工作时间为130 s。故障发生前,该燃气轮机已服役7 a,按照平均每年冷吹和起动合计200次,起动电机累计起停1400次,超扭保护轴累计运行时间约为50 h。因此超扭保护轴的工作特点为起停频繁,但每次工作持续时间和累计工作时间都不长。

超扭保护轴断裂前后低压压气机转子转速的变化曲线如图5所示。图中从低压转速跌落点

延伸出的红色虚线为正常冷吹时继续升高的低压转速。从图中可以看出,在 80 s 的冷吹过程中,超扭保护轴承受扭矩最大的时间应该是前 10 s 和中间的 45~55 s,超扭保护轴断裂时,冷吹过程即将结束,低压转子的加速率已很低,转速已趋于平稳,此时的扭矩显然不是最大的。因此可以得出初步结论,超扭保护轴断裂原因不是超扭。

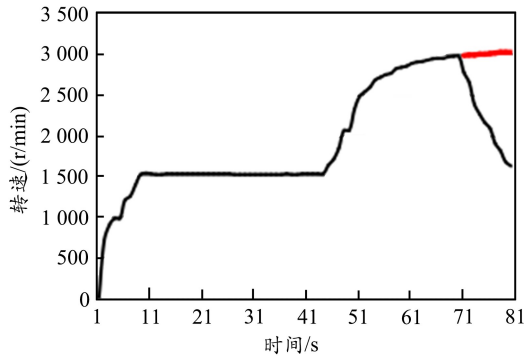


图 5 超扭保护轴断裂前后转子转速变化曲线

Fig. 5 Rotor speed change curve before and after overtorque protection shaft fracture

3.5 断口的宏观分析

断口的宏观形貌如图 6 所示。从图 6 可以观察到,断裂部位与主应力方向垂直,断口呈贝壳状,较光亮,在宏观上几乎看不出塑性变形;断

口几乎可以完全拼合复原(见图 2),对着光线转动可以看到闪光刻面,无剪切唇。断口可以分为 3 个区:裂纹源区、裂纹扩展区和最后断裂区,裂纹源区在图 6 的底部,沿着左右两个方向扩展,在图 6 中可以明显看到平坦光滑的裂纹扩展区,裂纹沿外周向扩展很快,最后在心部断裂,断裂区域比较粗糙。

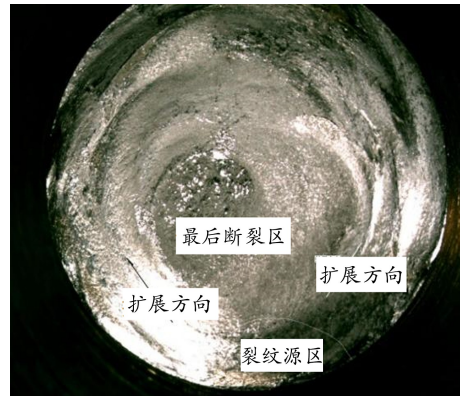


图 6 断口宏观形貌

Fig. 6 Macro morphology of fracture

进一步对裂纹源区进行分析,放大后的断口形貌如图 7 所示,从图中可以看到有多个裂纹源,这些裂纹源从宏观上看来来自于材料内部的孔洞,孔洞类型还需进行断口的微观分析。

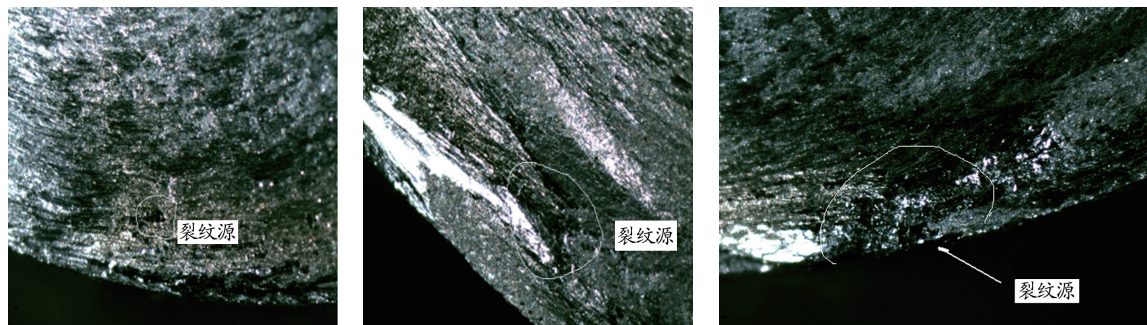


图 7 放大后的断口形貌

Fig. 7 Enlarged fracture morphology

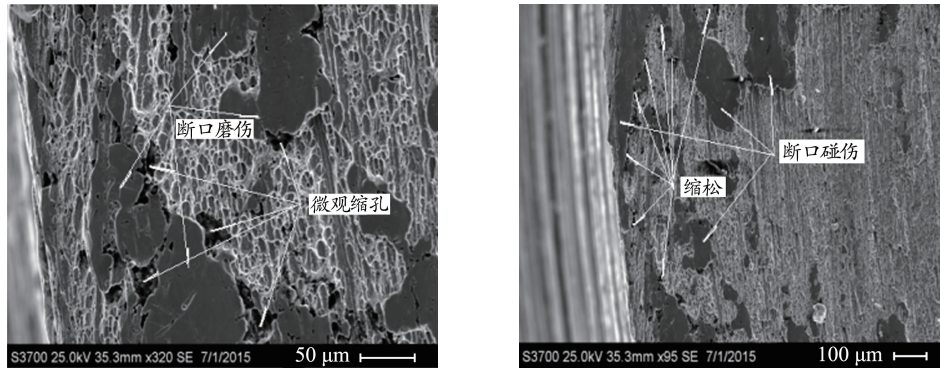
3.6 断口的微观分析

断口的微观形貌如图 8 所示。裂纹源区是疲劳裂纹最初形成的地方,一般为零件表面应力集中或存在缺陷的位置。若在原材料内部有缺陷,也会在表层以下这些缺陷处形成疲劳核心。由图 8 可以看出,在裂纹源区存在明显的缩孔与缩松。缩孔是铸锭浇注冷却时,由于液态收缩和

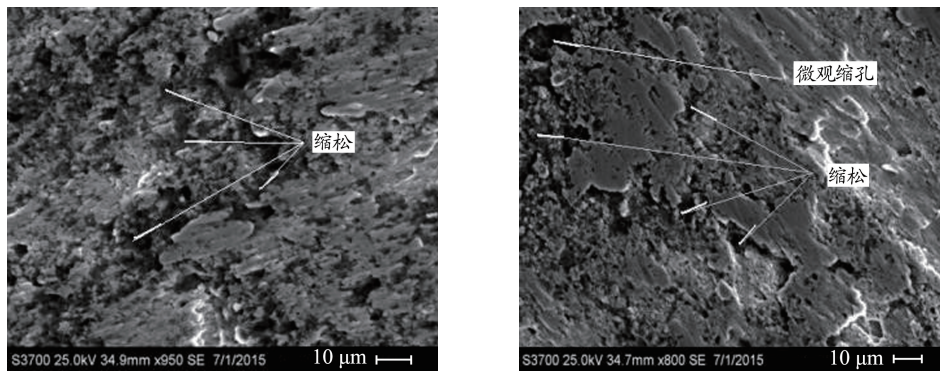
凝固收缩,在铸锭头部形成的缺陷,锻造时因切头量不足而被残留下来。缩松是在铸锭凝固时,部分区域未得到液态金属的补充而形成的孔隙和孔穴,常分散在铸锭壁厚的轴线区域、厚大部位、冒口根部和内浇口附近^[4]。在后续的锻造过程中,因锻造不充分导致材料的变形量不足,缩孔和缩松未被充分锻合。当缩松与缩孔容积相

同时,缩松的分布面积要比缩孔大得多。缩松隐藏于部件的内部,外观上不易被发现,但裂纹多源于这些区域。裂纹源区一般很微小,只有0.1 mm量级的深度,但却能成为稳定的应力集中因素,此后滑移便集中于该处并继续发展,并在中间扩展区形成明显的疲劳条纹。随着疲劳条纹

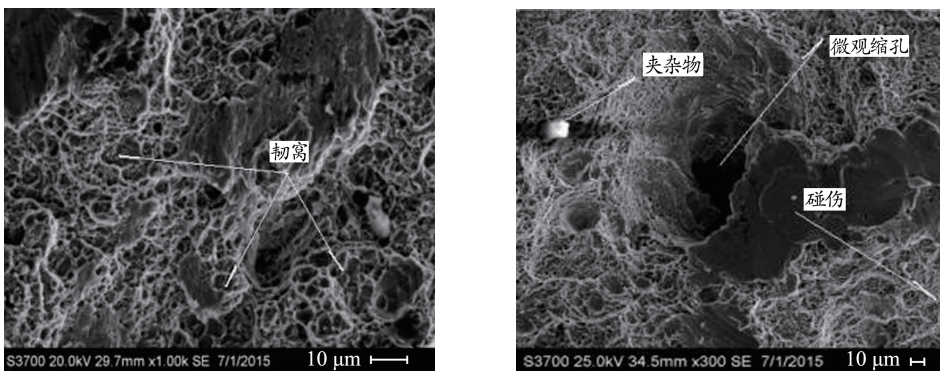
的不断扩展,零件最终发生断裂。而且在材料塑性变形过程中,夹杂物(或第二相)之间的基体金属产生内缩颈,内缩颈达到一定程度后被撕裂,在最后断裂区形成韧窝。对断口的微观分析进一步证明了超扭保护轴断裂属于疲劳断裂。



(a) 裂纹源区



(b) 裂纹扩展区



(c) 最后断裂区

图8 断口的微观形貌

Fig. 8 Micro morphology of fracture

4 结论

本次超扭保护轴失效属于材料缺陷引起的疲劳断裂。由于锻造不充分,原始铸锭中存在的大量缩孔和缩松没有锻合,经反复工作后,在缺陷处发生应力集中而出现裂纹,最后导致零件断裂。

参考文献:

[1] 杨喜昌,史慧琴. 304 不锈钢螺栓断裂原因分析

[C]// 2011 年全国失效分析学术会议论文集. 西安:中国机械工程学会失效分析分会,中国机械工程学会理化检验分会,2011:3.

- [2] 丁言波,杜世昌,奚立峰. 螺栓断裂原因实验与分析[J]. 机械制造与自动化,2011,40(4):67-68.
- [3] 束德林. 金属力学性能[M]. 第2版.北京:机械工业出版社,1995.
- [4] 陈维平,李元元. 特种铸造[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
- [5] 石伟,劳金越,张娜,等. 42CrMo 钢减速机齿轮裂纹原因分析[J]. 金属热处理,2012,37(1):105-106.