

使用维修

某型增压器主轴断裂原因分析

马辰生

(中车大连机车研究所有限公司, 辽宁 大连 116021)

摘要: 针对一起增压器主轴变截面处断裂故障, 对主轴断口进行了宏观与微观分析。结果表明: 主轴变截面处过渡圆角加工过小且形成尖锐交面, 是导致主轴发生疲劳断裂的根本原因。通过改进主轴加工工艺, 上述问题得到解决。

关键词: 增压器; 主轴; 断裂; 加工

中图分类号: TK423.5; TK426 文献标识码: B 文章编号: 1001-4357(2021)05-0057-04

Fracture Failure Analysis of a Turbocharger Rotor Shaft

Ma Chensheng

(CRRC Dalian Institute Co., Ltd., Liaoning Dalian 116021)

Abstract: Aiming at the rotor shaft fracture of a turbocharger at variable cross-section, macroscopic and microscopic analysis was carried out on the rotor shaft fracture. The results show that the undersize transition fillet radius and the sharp intersecting surface between fillets at variable cross-section of the rotor shaft is the cause of fatigue fracture. By improving the machining process of rotor shafts, the problem is solved.

Key words: turbocharger; rotor shaft; fracture; machining

0 引言

2016 年 12 月, 某机务段 DF11 型内燃机车在执行牵引任务时增压器发生故障, 导致柴油机转速上不去, 机车被迫停在运行途中, 请求救援。该增压器编号 1-0-099, 为经过了一个运用质保期后第一次检修后的再次运用, 发生故障时走行了 2.55 万 km。按照原铁道部铁运〔2006〕128 号文“内燃机车增压器检修规范”要求: 增压器每经过一个质保期(30 万 km)的运行后, 须进行检修。检修中要对主轴进行无损探伤及配合处尺寸检测等, 检测结果不合格的须要换新。检查 1-0-099 号增压器组装记录, 确认在检修中主轴换新。

众所周知, 增压器属于高速旋转机械, 其基本工作原理是转子旋转带动压气机叶轮旋转, 吸进空气, 从而提高空气压力和密度, 为柴油机提供充足的氧气。主轴是增压器转子的关键零件, 加上轴

承、叶轮、涡轮、套、盘等部件组成转子轴系。主轴通过端部的螺栓、键将回旋运动和转矩传递给叶轮, 同时支承传动件。因此, 主轴在工作中要承受扭矩和弯矩, 尺寸精度要求很高。在主轴的结构设计中应尽量避免应力集中, 提高其疲劳强度; 尤其在主轴截面变化处易产生应力集中, 通常的设计一般在轴变截面处加大圆角半径或者加内凹圆角^[1]。零件的结构设计固然重要, 而要在加工中完整体现及符合设计要求亦十分关键。主轴的变截面过渡段加工一旦达不到图纸要求, 就容易造成应力集中, 运行中会产生裂纹, 严重的将造成主轴断裂。

1 故障现象

对 1-0-099 增压器进行解体检查, 发现: 增压器压气机叶轮与叶轮罩壳相蹭, 转子主轴断成两部分, 压气机端轴承严重磨损, 轴承套偏磨。现场分析认为这是一起由主轴断裂造成的增压器故障。

故障主轴见图1所示,断口附近的轴颈表面出现了偏磨现象,一侧磨损较深(0.36 mm),而另一侧较浅(0.09 mm),断裂位置在变截面轴颈的过渡圆角根部,断面呈径向。

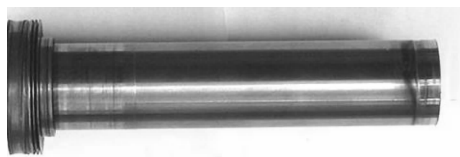


图1 断裂的主轴

该型增压器主轴结构如图2所示。主轴主要分为5个直径段,断口发生在第2、第3直径段的根部(图中方框内)。转子在主轴断裂轴颈附近处的结构如图3所示。轴颈出现偏磨部位为辅止推轴承处。主轴断裂轴颈处与压气机叶轮之间有径向轴承的支撑,所以该处承载的弯矩载荷不大。

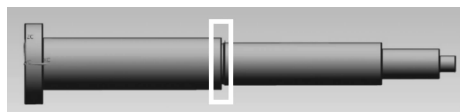


图2 主轴结构

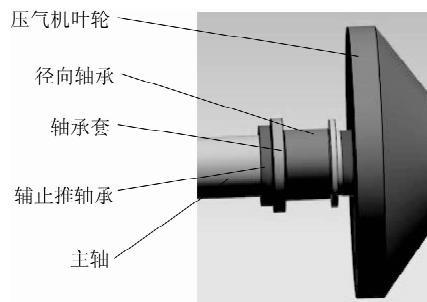


图3 转子局部结构

2 故障原因分析

主轴在转动过程中承受扭矩和弯矩。造成主轴断裂的可能原因有:设计结构不合理,局部产生应力集中;材料加工存在问题。截止发生故障时,该型号增压器已经出厂了10 000余台,在DF8B、DF11内燃机车上运用了10多年,而发生主轴断裂的故障仅此1件,属于偶发事件,说明主轴结构设计是合理可靠的。

根据主轴断裂故障现象,首先对故障主轴断口进行材料理化性能检测分析,然后根据检测结果进行加工尺寸超差影响分析。

2.1 材料理化检测分析

主轴断口SEM形貌(图4)显示:断口较平整,断口表面有明显的疲劳断裂典型宏观形貌特

征,即出现了贝纹线。图4中A、B、C为裂纹源区,D为终断区。

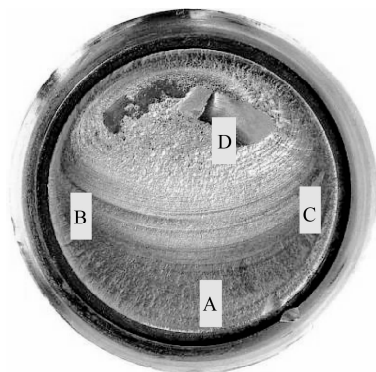


图4 失效主轴断口宏观形貌

从断口表面贝纹线的走向可以确定,该件主轴的裂纹源位于其阶梯轴颈过渡圆角根部,裂纹源为环形圆周,长度约为2/3圆周长。这表明裂纹源区的过渡圆角根部应力较为集中,属于锐缺口。裂纹萌生后,不同位置的裂纹源均沿其径向扩展,终断区约位于1/2圆心处。从整个断口的宏观形貌和终断区面积可以断定主轴断裂前主要承受中等弯曲载荷。由此可以确定该件主轴的失效模式属于中等应力载荷下,带有锐缺口的旋转弯曲疲劳断裂。检查结果显示在A、B、C三个裂纹源区均未见明显的冶金缺陷和锻造缺陷。用电镜观察到在裂纹扩展区出现了疲劳断裂的微观形貌特征——疲劳辉纹,且辉纹间距较短,进一步证实了主轴的失效模式属高周疲劳断裂^[2]。还观察到裂纹源区过渡圆角处机加工刀痕粗糙(图5);同时,测定发现断裂主轴裂纹源区过渡圆角半径是由2个半径0.2 mm的半圆连接而成(图6)。对主轴断口进行的金相检测、化学成分检测和硬度检测均未见异常。

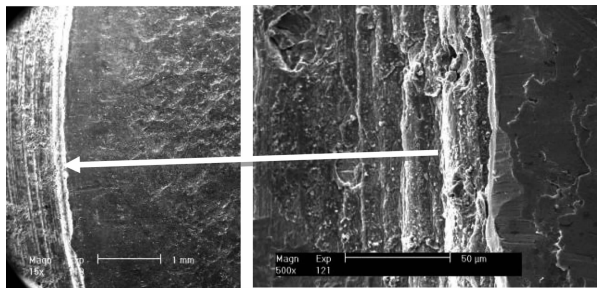


图5 主轴裂纹源区过渡圆角处机加工刀痕

2.2 过渡圆角超差分析

主轴设计中在第2、第3段台阶处加了2个内凹圆角,要求过渡圆角半径为R0.5 mm,如图7所示。故障主轴裂纹处有2个半径为R0.2 mm的圆角,不但尺寸远远小于图纸要求,更主要的是圆角

与小直径部分不相切，形成一个尖锐交面，从而消除了大圆角的有利作用。

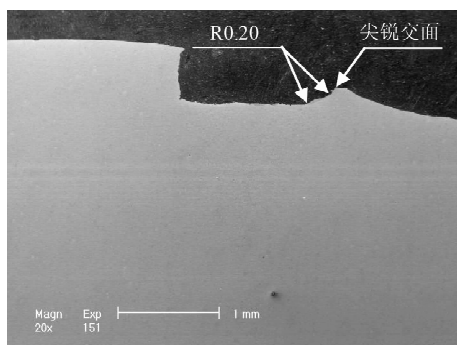


图6 主轴断口处过渡圆角



b) 设计应力(R0.5 mm)

图8 加工、设计应力情况

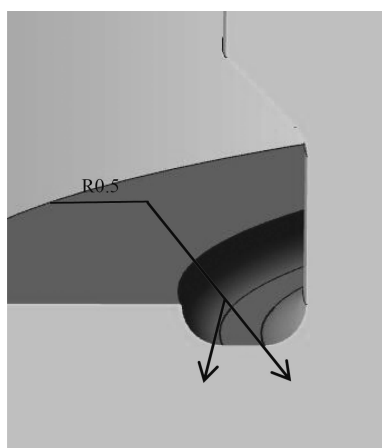


图7 主轴设计圆角尺寸

分别对过渡圆角为设计值 $R0.5\text{ mm}$ ，及过渡圆角为实际加工中形成的 2 个 $R0.2\text{ mm}$ 时的应力情况进行计算分析。结果显示后者的应力是前者的 1.6 倍。 $R0.2\text{ mm}$ 时最大应力集中在尖锐交面处，而 $R0.5\text{ mm}$ 时，最大应力在一个区域内，如图 8 所示。表明：主轴直径变化过渡区经加工后应力激增并严重集中。



a) 加工应力(R0.2 mm)

2.3 失效次序分析

观察发现：在主轴断口裂纹源区对面一侧的轴颈表面有较深的磨损凹槽，而裂纹源一侧的轴颈表面磨损较浅，说明该区域主轴颈表面出现了偏磨现象。在运行过程中增压器主轴处于旋转状态，如果主轴未首先发生弯曲，当主轴颈与辅止推轴承发生异常接触磨损时，应在主轴轴颈一周表面留下相同深度的磨损凹槽，而不会出现偏磨现象。出现偏磨现象说明此时主轴已成弯曲状态。考虑到轴颈表面磨损凹槽距断口较近（约 10 mm ），如果是因为磨损凹槽部位出现了异常接触而引发主轴弯曲，则因为弯矩较小，未必能导致主轴弯曲。事实上主轴剩余残段也并未呈现明显弯曲，说明主轴并不是在弯曲状态下萌生疲劳裂纹的。因此，轴颈表面异常磨损与阶梯轴过渡圆角开裂的形成次序为：过渡圆角开裂→轴颈表面异常偏磨。

2.4 主轴断裂原因

以上分析表明：裂纹源区的阶梯轴过渡圆角半径是由 2 个曲率半径较小的半圆连接而成，而 $R0.2\text{ mm}$ 圆角与主轴第 3 段轴颈没有相切，形成尖锐交面造成应力集中，在外载荷作用下易萌生疲劳裂纹。实际裂纹就是始于尖锐交面处（图 6），主轴断口的宏观形貌特征也证实其圆角根部存在较高的应力集中，两者是导致疲劳裂纹萌生的主要因素^[3]。在裂纹扩展过程中，受弯曲载荷作用裂纹略有张开，在裂纹两侧轴颈形成较小的折角，进而引起偏磨。随着裂纹逐渐扩展，张角进一步扩大，轴颈表面磨损凹槽进一步加深，直至主轴完全断裂。

3 过渡圆角加工超差原因

该主轴由普通车床加工。主轴加工工艺要求对轴颈过渡圆角采用 $R0.5\text{ mm}$ 的刀具一次加工成型。

对加工过程的调查发现:操作者为初次加工主轴,对退刀槽、倒角之类的加工不重视,随意性大,加工两个内凹圆角时没有使用专用刀具,而是使用了普通刀具,通过刀具形状依靠进行 R0.5 mm 的圆角加工,完成后的圆角实际尺寸为 0.2 mm。另外,由于圆角处空间小,刀具排屑不好,加工中刀与屑挤压,屑粘贴于主轴表面,造成表面粗糙度差。且主轴加工完成后也没有对圆角与倒角部分做检查。

4 改进措施

(1) 对增压器主轴加工工艺进行改进,对主轴第 2、第 3 段轴颈过渡处内凹圆角的加工要求必须使用 R0.5 mm 的专用刀具加工。

(2) 加强操作工人技能培训,划分关键零部件及关键部位,强调重要性及加工要求。

(3) 采用数控车床加工主轴圆角及倒角;对表面粗糙度要求进行机加工编程控制;加工时提高轴转速,降低刀具进给速度。

自 2017 年 2 月改进主轴直径突变处圆角加工

工艺以来,未再发生主轴断裂故障。即使在增压器轴承损坏严重、轴承套偏磨严重的情况下,主轴也没断裂。

5 结语

轴类零件在受扭转和弯曲疲劳作用时,最易损坏的区域是轴的表面,而轴直径过渡段情况、油孔的位置和光洁度、键槽的类型和形状等都显著影响应力集中程度和疲劳寿命^[2],因此,加工与检查环节的精细化控制尤为重要。

参考文献

- [1] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [2] 美国金属学会. 金属手册——失效分析与预防: 第 8 版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [3] 何明鉴. 机械构件的微动疲劳 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.

(上接第 56 页)

参考文献

- [1] 胡国洪. 内燃机车柴油机冒黑烟故障的原因与处理 [J]. 机械管理开发, 2017 (8): 190-191.
- [2] 何磊, 唐少华, 何万国. 基于 Viking35 的电液调速器 PID 设定对柴油机调速特性影响的研究 [J]. 柴油机, 2017, 39 (1): 38-41.
- [3] 姚春德, 徐广兰, 韩伟强, 等. 消除柴油机加速黑烟用电动增压器电控系统设计 [C]. APC 联合学术年

会论文集, 2009: 216-224.

- [4] 李林, 徐阳, 王钦召. 某电控柴油机冒白烟原因分析及解决方法 [C]. APC 联合学术年会论文集, 2012.
- [5] 徐建明, 陈长根, 黄志远. 12VE230ZC 柴油机冒黑烟原因分析及处理方法 [J]. 中国修船, 2009 (5): 25-27.
- [6] 王林英, 朱旭聪, 刘丕清. 柴油机一例特殊的冒黑烟故障分析和排除 [J]. 柴油机, 2014, 36 (3): 57-59.