某发动机增压器涡轮轴早期疲劳断裂失效分析

孙晓芬 高勇 冯继军

（东风商用车技术中心工艺研究所，武汉 430056）

摘要：为解决某发动机增压器在运行275 km后出现发动机排烟大、动力不足的问题，通过宏观检查、扫描电镜分析、金相组织观察及硬度测试等方法，对失效涡轮轴进行了系统分析。结果表明，涡轮轴断裂属于大应力集中下的低应力高周疲劳断裂，断裂起源于圆角处因磨削加工不良导致的严重磨痕区域，根本原因为润滑不良导致的轴-轴承干摩擦，使轴承受异常交变应力。研究认为，虽然加工缺陷构成了应力集中源，但异常工况（缺油导致的干摩擦）是引发此次早期断裂的主导因素。

关键词：增压器 涡轮轴 失效分析 应力集中 润滑不良

中图分类号：U446.135+2 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250247

Failure Analysis of Fatigue Fracture in an Engine Turbocharger Turbine Shaft

Sun Xiaofen, Gao Yong, Feng Jijun

(Material and Technology Research Institute, Technical Center of Dongfeng Commercial Vehicle Co., Ltd., Wuhan 430056)

Abstract: To address the issue of excessive engine exhaust smoke and insufficient power occurring after 275 km of operation in a certain engine turbocharger, a systematic analysis of the failed turbine shaft is conducted using methods such as macroscopic inspection, scanning electron microscopy analysis, metallographic observation, and hardness testing. The results indicate that the turbine shaft fracture is a low-stress, high-cycle fatigue failure under significant stress concentration. The fracture originated from a severely scratched area at the fillet caused by poor grinding processing. The root cause is identified as poor lubrication leading to dry friction between the shaft and bearing, subjecting the bearing to abnormal alternating stress. The study concludes that although the machining defect created a stress concentration source, the abnormal operating condition (dry friction caused by oil shortage) is the primary factor triggering this premature fracture.

Key words: Turbocharger, Turbine shaft, Failure analysis, Stress concentration, Lubrication deficiency

1 前言

涡轮增压器作为提高内燃机效率的关键部件，通过利用发动机排气能量驱动涡轮，进而压缩进气，显著提高发动机的功率输出和燃油经济性[1-2]。现代涡轮增压器通常工作在极端条件下，包括高温（涡轮端温度可达950 ℃）、高转速（可达每分钟数万转甚至数十万转）以及复杂的交变应力环境，这种苛刻的工作条件使涡轮增压器成为发动机系统中故障率较高的部件之一[3]。

国内外研究表明，涡轮增压器的常见失效模式主要包括涡轮轴断裂、轴承系统磨损、密封装置失效、涡轮/压气机叶片损坏以及壳体裂纹等[4-5]。其中，涡轮轴作为连接涡轮和压气机的关键传动部件，其失效往往会导致整个增压器功能的完全丧失，甚至引发二次损坏[6]。

在涡轮轴的各类失效形式中，疲劳断裂最为常见，特别是高周疲劳失效[7]。疲劳裂纹通常起源

作者简介：孙晓芬（1987—），女，高级工程师，学士学位，研究方向为失效分析及材料试验。

参考文献引用格式：

孙晓芬，高勇，冯继军．某发动机增压器涡轮轴早期疲劳断裂失效分析[J]. 汽车工艺与材料，2026(2): 39-43.

SUN X F, GAO Y, FENG J J. Failure Analysis of Fatigue Fracture in an Engine Turbocharger Turbine Shaft[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 39-43.

于应力集中区域，如轴肩过渡圆角、键槽、油孔边缘等几何不连续处[8]。材料本身的缺陷（如夹杂物、组织不均匀）、热处理不当导致的硬度异常、表面加工质量不足以及润滑条件不良等因素均会显著降低轴的疲劳寿命[9]。

本文针对一例行驶里程仅 275 km 即发生断裂的增压器涡轮轴开展失效分析。通过宏观观察、微观断口分析、金相检验、硬度测试等多种技术手段明确其断裂机理和根本原因。

2 分析过程

2.1 样品概况与宏观检查

失效增压器在车辆行驶里程为 275 km 时出现发动机排烟大、动力不足的故障现象。图 1 所示为拆解后的失效增压器总体外观，红色圆圈内为拆解的涡轮轴。



图 1 拆解后的失效增压器

经拆解，发现涡轮轴发生断裂。图 2a 为断裂的涡轮轴全貌。图 2b 为涡轮轴断口大头端（热端）一侧形貌，可见约 80% 的断口面已磨损，中间残留部分断面呈灰色且较为平坦。图 2c 为涡轮轴断口小头端（冷端）形貌，绝大部分断口面已磨损，残留断面无明显宏观特征。



（a）轴整体形貌



（b）热端断口



（c）冷端断口

图 2 断裂的涡轮轴

热端叶轮（高温合金）及冷端叶轮（铸铝合金）均出现因与涡轮壁刮擦导致的叶片变形和破裂，但无叶片自身破裂迹象。轴承部件存在明显磨损（图 3），未见其他形式损坏。



图 3 涡轮轴轴承损坏情况

进一步检查断裂涡轮轴，未见宏观弯曲变形，但轴杆中部存在磨糊烧黑的圆周形条带，如图 4 所示。

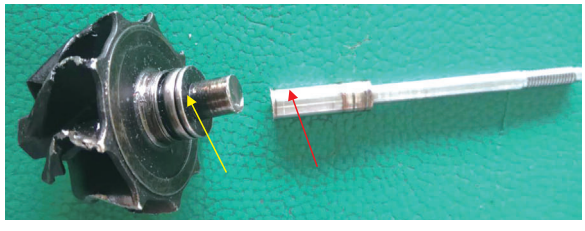
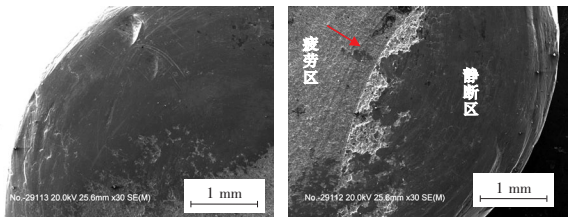


图 4 断裂涡轮轴表面的磨糊烧黑痕迹

综合宏观检查结果，初步判定增压器失效的原因为涡轮轴断裂，其余部件为继发性损坏。

2.2 扫描电镜断口分析

对热端断口进行扫描电镜观察。在低显微倍数下（图 5），可见大部分断面已被磨平，但从残留区域仍可推断断裂全过程。图 5b 左侧显示出清晰的疲劳弧线，右侧尽管大部分断口均被磨平，但残留部分断口完整，断面新鲜干净，可准确判断为最后的静断区，且静断区与疲劳扩展区分界清晰明显。由此推断裂纹扩展由对侧（图 5a 中右侧磨平区）起源。裂纹扩展方向如图 5b 中箭头所示。由此可见，疲劳扩展区中疲劳弧线为反弧形，并由此推断起源处存在某种缺陷导致的应力集中。



(a)整体概貌　　(b)反弧形疲劳弧线

图5　热端断口低倍形貌

在高显微倍数下,疲劳区部分断面较为平坦,右侧区域较为粗糙,如图6所示。

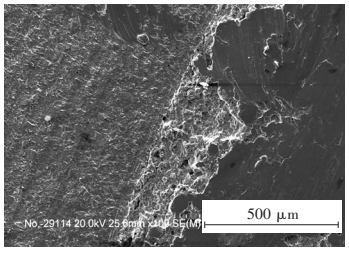
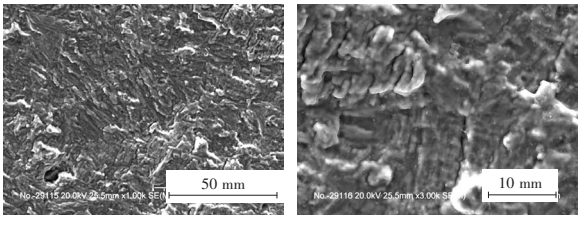


图6　热端断口疲劳区形貌(中倍)

图7所示为疲劳扩展区的微观形貌。由图7可知,断口表面有一层覆盖物,微观细节部分损失,但仍可辨识出疲劳辉纹,且辉纹间距较小,表明疲劳扩展速率较低。



(a)扩展区典型特征　　(b)高倍下的疲劳辉纹

图7　疲劳扩展区微观形貌

对图6中较为粗糙的区域进行高倍观察,如图8所示,可见该区域仍属疲劳扩展区,且处于快速扩展阶段。结合图5b可推断,快速疲劳扩展区面积不足总断面的1/4,瞬断区面积会更小。

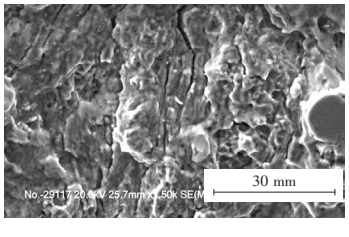
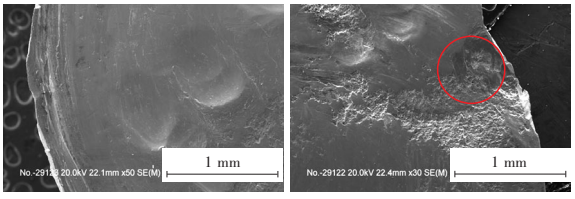


图8　疲劳快速扩展区微观形貌

冷端断口绝大部分区域已被磨平,如图9所示,仅在极少数区域保留有原始形貌。图9b中红色圆框区域内可见发育良好的韧窝特征,该区域为瞬断区,且面积很小,与热端分析结论一致,如图10所示。



(a)整体磨损情况　　(b)残留特征区域

图9　冷端断口微观形貌

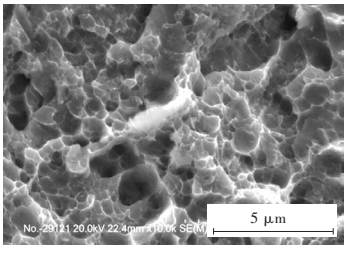


图10　冷端瞬断区的韧窝形貌

由于断口侧面磨损严重,无法直接观察裂纹源区,转而分析断口所在台阶附近的加工状态。图11所示为加工台阶处的低倍形貌,可见明显的加工痕迹。

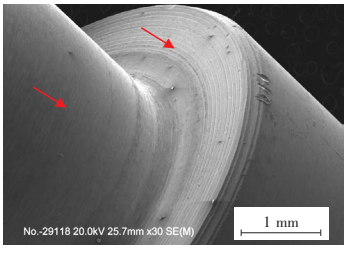
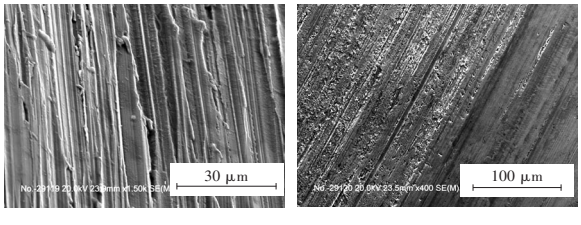


图11　加工台阶处低倍形貌

将图11中的位置进一步放大后可见台阶圆角处存在粗糙磨痕,推测为加工所致,且后续抛光工序未能有效改善圆角处表面状态,如图12a所示。相比之下,光杆部位抛光良好,无磨痕残留,如图12b所示。台阶圆角处粗糙的加工痕迹会降低疲劳强度,但该处未发现疲劳裂纹萌生或扩展,可见断口处即使存在类似的加工缺欠,也不足以导致其产生大应力集中的疲劳裂纹,因此,需进一步分析断口处疲劳开裂原因。



(a)台阶圆角处的磨痕　　(b)光杆部位良好抛光状态

图12　加工表面微观形貌

2.3 金相组织与成分分析

对图4所示黄色箭头所指位置取样进行纵向金相分析。抛光态下评定夹杂物级别为A0、B0.5、C0、D0，如图13所示，结果表明材料纯净度符合要求。

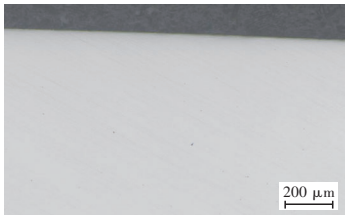
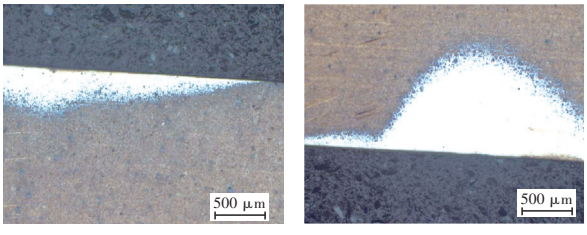


图13 纵向样品抛光态夹杂物形貌

轴杆表面磨糊处可见一层白马氏体组织，如图14所示，层深不均匀，最深处约为800 μm，该白层为磨擦高温所致。



(a)浅层形貌 (b)深层形貌

图14 杆部表面磨糊处的白马氏体层

基体组织为回火索氏体，如图15所示，属于40Cr钢正常调质处理组织。

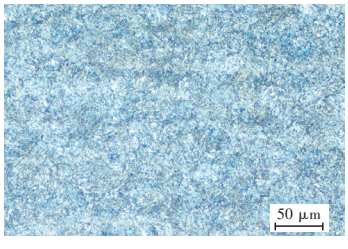


图15 杆部正常区域金相组织

对材料进行X射线能谱分析，结果如图16、表1所示，成分与40Cr钢一致。

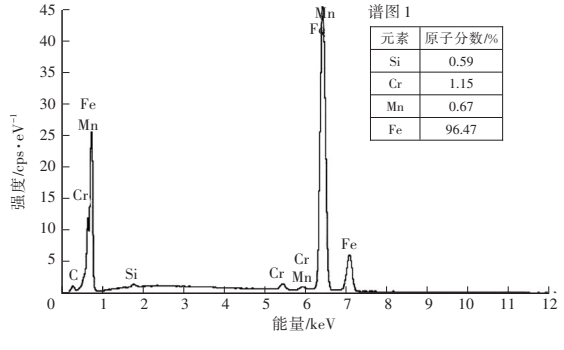


图16 X射线能谱分析位置能谱图

表1 能谱分析结果(质量分数) %

元素	Si	Cr	Mn	Fe
含量	0.30	1.08	0.67	97.70

2.4 硬度测试

对样品进行显微维氏硬度测试(载荷1 kgf)，结果如表2所示。白马氏体区硬度极高，为686.5~703.0 HV1，正常区硬度为390.0~396.5 HV1(约41 HRC)，略高于技术条件要求的36~39 HRC。

表2 硬度测试结果

测试区域	硬度值/HV1	换算洛氏硬度/HRC
白马氏体区	686.5, 703.0, 676.4	59.5, 60.0, 59.0
正常区(基体)	396.5, 390.0, 392.6	41.5, 41.0, 41.0

为验证结果，更换硬度计进行复测，正常区测得硬度值为384.8~407.8 HV0.5，约为40.5~42.0 HRC，与初次测试结果一致，确认其硬度满足技术要求。

3 分析与讨论

综合分析结果表明，涡轮轴断裂是本次增压器失效的原因，其断裂性质为典型的高周疲劳断裂。采用扫描电镜观察，在热端断口上清晰显示出反弧形疲劳弧线，这是疲劳断裂的宏观特征；在微观尺度上观察到了疲劳辉纹，证实了裂纹在交变应力作用下的渐进式扩展过程。值得注意的是，整个断面上疲劳快速扩展区域面积较小，约占断面面积的1/4，而瞬断区面积更小，且在瞬断区观察到了发育良好的韧窝形貌。上述特征表明，该轴在相对较低的异常交变应力作用下，裂纹在圆周大弧度范围内同时起源，经过较多循环周次后发生断裂，属于低应力高周疲劳失效模式。

一个关键的发现是裂纹源附近存在磨糊烧黑痕迹及与之对应的表层白马氏体组织。金相分析表明，该白马氏体层深度不均，最深处深度可达800 μm，其显微硬度极高(700 HV1)，与基体正常的回火索氏体组织(395 HV1，约41 HRC)形成鲜明对比。白马氏体的形成是表层金属在润滑不良条件下与轴承发生干摩擦，瞬间产生剧烈摩擦热并急速冷却(自淬火)的结果。该现象表明运行中

存在“缺油”异常工况,且该异常发生在轴断裂之前。干摩擦不仅导致了局部组织转变和烧伤,还引入了异常且剧烈的附加交变应力,可能是导致涡轮轴断裂的主要原因。

总结上述结果,此次早期断裂失效的根本原因应为加工磨痕或异常运行条件(干摩擦)。尽管台阶圆角处的加工磨痕是严重缺陷,显著降低了轴的疲劳极限,但考虑到以下原因,认为其并非此次失效的唯一或主要原因:首先,如果该磨痕是导致断裂的主导因素,鉴于该零件的批量生产性质,应观察到更高比例的早期失效现象,而市场数据并非如此;其次,断口形貌表明疲劳扩展周期较长,且最终断裂应力水平不高,这与单纯由尖锐缺陷导致的快速脆性断裂特征不符。因此,本文认为“缺油”导致的异常干摩擦是本次失效的主要动因。干摩擦引入了远超设计预期的异常交变应力,且存在固有应力集中(磨痕)的薄弱点,共同导致涡轮轴在极短运行里程内的疲劳断裂。

此外,对材料本体性能的评估也支持这一结论。材料的化学成分与40Cr钢相当,夹杂物评级优良(A0/B0.5/C0/D0),基体组织为正常的回火索氏体。虽然实测硬度略高于技术条件要求的上限,但瞬断区典型的韧窝形貌表明材料仍保持了良好的韧性,且轻微的硬度偏高通常不会降低疲劳强度,反而会使疲劳强度有所提升。因此,可以排除材料冶金质量和常规力学性能问题的原因。然而,加工磨痕作为固有的应力集中源,大幅提高了零件的疲劳敏感性,构成了潜在的安全隐患,在极端工况(如缺油)或长期服役后,极易成为裂纹起源点,可能引发小批量的疲劳失效问题。

综上,本次涡轮轴早期断裂是由异常工况(缺油导致的干摩擦)主导,并受零件固有制造缺陷(圆角加工磨痕)影响的复合型失效案例。基于该结论,需加强对润滑系统的装配与检验流程,确保运行初期良好的润滑条件,优化涡轮轴台阶圆角处的加工工艺规范,提高表面质量,消除应力集中源。

4　结束语

涡轮轴断裂属于大应力集中下的低应力高周疲劳断裂,断裂起源于圆角处因磨削加工不良导致的严重磨痕区域,根本原因为润滑不良导致的轴与轴承之间干摩擦,使轴承受异常交变应力。经分析认为,虽然加工缺陷构成了应力集中源,但异常工况(缺油导致的干摩擦)是引发此次早期断裂的主导因素。

参考文献:

[1] 常雪嵩, 周瑶, 赵达, 等. 发动机增压器蜗壳开裂的原因分析及改进措施[J]. 内燃机与动力装置, 2017, 34(5): 45-47.

[2] 龚君. 欧Ⅲ法规的实施和发动机技术对策研究[J]. 城市车辆, 2006(3): 48-50.

[3] 赵付舟. 车用发动机混合涡轮增压系统的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

[4] 王竹立. 浅谈涡轮增压器常见的失效模式及合理的使用技巧[J]. 内燃机与配件, 2010(8): 29-30.

[5] 刘金星. 涡轮轴疲劳可靠性优化设计方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

[6] 习年生, 钟培道, 陶春虎. 某涡轮轴断裂失效原因与改进措施[C]// 第十届全国疲劳与断裂学术会议论文集, 2000: 169-172.

[7] 柏松. 航空发动机涡轮轴高低周复合疲劳寿命预测方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.

[8] 陈慧, 靳宝宏. 变速器涡轮轴失效分析[J]. 热处理, 2018, 33(1): 50-55.

[9] 涂樱. 涡轮轴早期断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2002(12): 53-54.

AT&M