

某汽车发动机曲轴失效分析

谢咏馨,曾庆梓*,吴玮,简思聪,段伟
(广东省科学院工业分析检测中心,广东 广州 510650)

摘要: 发动机曲轴是汽车最重要的部件之一,其主要功能是将活塞的往复直线运动转换为旋转运动并输出扭矩,同时将活塞产生的功转变为有用扭矩。曲轴在工作过程中会承受气体惯性力、往复惯性力及扭转惯性力等周期性载荷作用,极易导致失效,且失效往往是突发性的缺乏先兆,一旦发生将会造成重大损失。随着用户对产品质量和可靠性要求的提高,研究曲轴早期失效的原因变得尤为重要。针对某汽车发动机曲轴开裂的失效事故开展了调查和研究,通过对事故发生前期的使用情况及维护保养情况的调查,以及对曲轴的宏观形貌、开裂面的宏观及微观形貌、化学成分、金相组织、连杆颈表面淬硬层深度和基体力学性能等方面的研究,深入分析了曲轴开裂的原因,讨论了失效过程。结果表明,长期承受多种周期性载荷作用,产生应力集中是导致曲轴在最薄弱处发生疲劳断裂的主要原因。这一研究为改进曲轴设计、制造工艺和使用维护提供了科学依据,以提高其可靠性和延长使用寿命。

关键词: 发动机曲轴;失效分析;断裂失效;疲劳断裂;曲轴断裂;金相检验;应力集中;曲轴

中图分类号: U464.12

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2024)04-0680-05

引文格式: 谢咏馨,曾庆梓,吴玮,等. 某汽车发动机曲轴失效分析[J]. 材料研究与应用,2024,18(4):680-684.

XIE Yongxin, ZENG Qingzi, WU Wei, et al. Failure Analysis of an Automobile Engine Crankshaft[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(4): 680-684.

0 引言

发动机曲轴是汽车最重要的部件之一,其主要作用是将活塞往复直线运动转变成旋转运动,同时将活塞所作的机械功转变为有用扭矩^[1]。曲轴在工作过程中承受气体惯性力、往复惯性力及扭转惯性力等周期性载荷作用,从而导致曲轴疲劳和产生裂纹,直至断裂^[2]。曲轴的断裂常发生在连杆颈、主轴承颈和圆角部位^[3],失效模式为弯曲疲劳断裂、扭转疲劳断裂和轴颈异常磨损^[4-7]。因此,曲轴材料需具有足够的强度、高的冲击韧性和疲劳强度等特性。早期发动机曲轴材料主要为42CrMo、40MnB、40Cr等中碳钢^[8],而从上世纪90年代开始使用48MnV、C38N2等机械加工性能更好的非调质钢^[7]。近年来,采用球墨铸铁铸造的曲轴因成本、工艺等优点,显现出了很好的应用前景^[9]。刘玉慧^[10]研究了40Cr发动机曲轴断裂原因,发现断裂曲轴根部直径不符合设计要求,在高转速大强度交变载荷冲击下出现应力集中,导致裂纹产生直至断裂。王凡等^[11]研究发现,42CrMo曲轴轴颈根部有规则的加工刀痕,该刀痕是疲劳断裂的主要原因。孙捷等^[12]对球

墨铸铁曲轴失效进行了研究并发现,曲轴的显微组织及力学性能等均达到了要求,但因轴颈与曲柄过度圆角处机加工痕迹过深而导致弯曲疲劳断裂。本文以某汽车断裂曲轴为研究对象,对其断裂面的宏观及微观形貌、化学成分、金相组织,以及连杆颈表面淬硬层深度和基体力学性能等方面开展了研究和分析。旨在找出曲轴的失效原因,提高其可靠性和延长使用寿命。

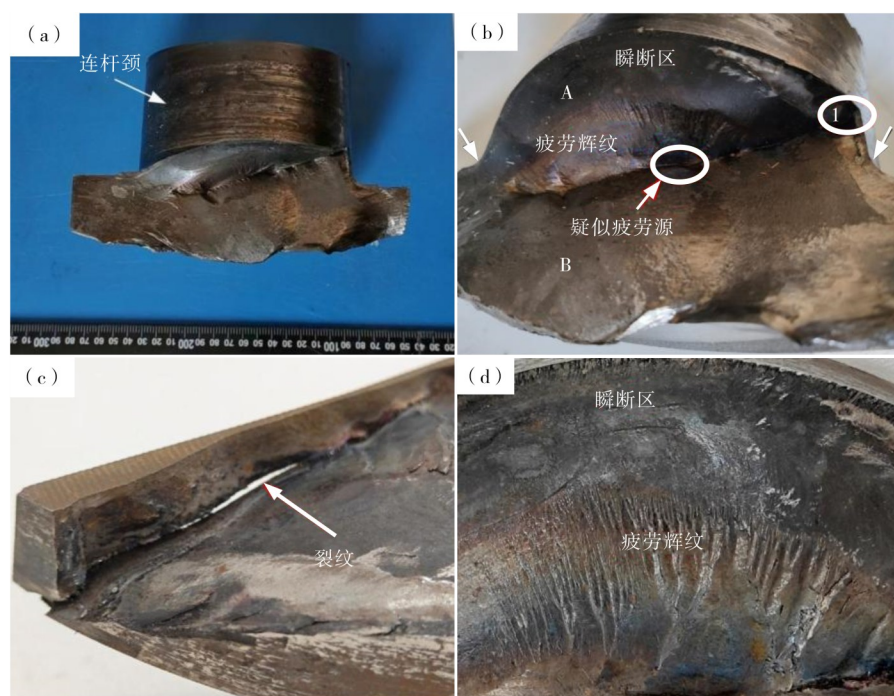
1 宏观形貌

以某汽车曲轴为研究对象,其材质为42CrMoA钢,生产时间为2020年。该曲轴经锻造热处理加工制造而成,连杆颈部位须经中频淬火+回火工序处理。曲轴运行2700h后出现故障发生断裂,失效断裂发生在连杆颈端部圆角处附近。曲轴断口出现约90°的A、B两个断口面,且两断口面相交处出现裂纹,裂纹沿曲轴径向方向扩展,长度约50mm,离连杆颈端部圆角处约15mm处疑似裂纹源。断口A面上出现明显的疲劳辉纹,符合疲劳断裂的形貌特征^[13],断口B面部分已被磨损。图1为曲轴断口的宏观形貌图。

收稿日期:2023-09-18

作者简介:谢咏馨,硕士研究生,研究方向为金属材料的显微组织研究。E-mail:xieyongxin1995@163.com。

通信作者:曾庆梓,本科,助理工程师,研究方向为金属材料的力学性能。E-mail:1245329942@qq.com。



(a)—失效曲轴形状;(b)—断口宏观形貌;(c)—图1(b)圆圈1部位的裂纹;(d)—断口A的局部放大图。

(a)—shape of the failed crankshaft; (b)—macroscopic morphology of fracture; (c)—the crack at the part of circle 1 in Figure 1(b); (d)—locally enlarged morphology in fracture A.

图1 曲轴断口的宏观形貌

Figure 2 Macroscopic morphology of crankshaft fracture

2 理化检验

2.1 成分测试

采用直读光谱仪对曲轴样品进行成分分析,结果列于表1。由表1可知,失效曲轴的成分均在要求的成分范围内,满足国家标准 GB/T 3077—2015 合金结构钢对 42CrMo 钢化学成分的要求。

表1 曲轴的化学成分

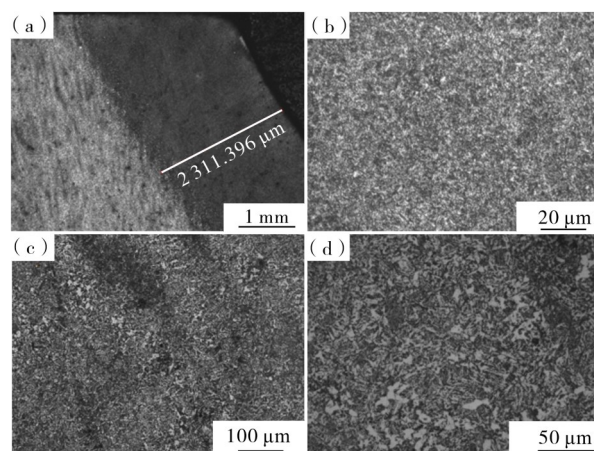
Table 1 Chemical compositions of the crankshaft

组成成分	含量 $w/\%$	
	标准值	实测值
C	0.38—0.45	0.40
Si	0.17—0.37	0.33
Mn	0.50—0.80	0.71
Cr	0.90—1.20	1.06
Mo	0.15—0.25	0.20
Ni	≤ 0.30	0.21
P	≤ 0.025	0.011
S	≤ 0.025	0.002
Cu	≤ 0.20	0.006 8

2.2 金相组织

从曲轴断裂处附近截取样品制成金相试样,其

金相组织如图2所示。从图2可见,曲轴的淬硬层的厚度约为2.3 mm,其金相组织为细小的回火索氏体,心部组织亦为回火索氏体+少量贝氏体,回火索氏体组织比淬硬层粗大。



(a)—高频淬火表层低倍组织, 25 $\times$; (b)—表层高倍组织, 1 000 $\times$; (c)—心部组织, 200 $\times$; (d)—心部高倍组织, 500 $\times$ 。
(a)—high-frequency quenching surface low-power structure, 25 $\times$; (b)—surface high-magnification tissue, 1 000 $\times$; (c)—cardiac tissue, 200 $\times$; (d)—cardiac high-magnification tissue, 500 $\times$ 。

图2 曲轴光学金相照片

Figure 2 Optical metallography of crankshaft

2.3 硬度测试

按照标准 GB/T 5617—2005 钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定,对曲轴淬硬层进行硬度测试。使用 HTB-3000S 布氏硬度计和 HR-150A 洛氏硬度计在制备好的金相试样(连杆颈表面高频淬火部位)上进行硬度测试,结果列于表

2。由表 2 可知:曲轴的心部平均硬度为 273.6 HB,满足技术标准要求;距离表面 1.0 mm 处的曲轴连杆颈淬硬层硬度最大为 50.6 HRC,淬硬层的平均硬度为 47.8 HRC,低于要求的 55—68 HRC。硬度偏低且硬度不均匀是造成曲轴疲劳开裂的主要原因,这与董世运等学者的研究结果相一致^[3,6]。

表 2 曲轴硬度测试值
Table 2 Hardness values of the crankshaft

测量次数	心部硬度(HB)	淬硬层硬度(HRC)	不同位置的硬度值	
			至表面距离/mm	硬度(HRC)
1	285.2	49.3	0.5	47.2
2	255.7	44.7	1.0	50.6
3	277.6	47.3	1.5	47.3
4	262.4	47.2	2.0	38.5
5	287.1	50.6	2.5	26.8
平均值	273.6	47.8	3.0	27.1
要求值	240—320	55—68	3.5	26.2
			4.0	30.0

2.4 冲击测试

采用 JBW-300 冲击试验机,按照 GB/T 229—

2020 标准方法对曲轴截取的试样进行冲击试验,测试结果列于表 3。由表 3 可知,曲轴的冲击吸收能量(KV₂)平均测量值为 46 J,符合要求。

表 3 曲轴力学性能测试值
Table 3 Impact test values of the crankshaft

测试次数	冲击吸收能量(KV ₂)/J	缺口角度/(°)
1	42.0	44.83
2	50.5	45.01
3	45.5	44.92
平均值	46.0	44.92
要求值	≥30	—

2.5 拉伸实验

从曲轴断裂部位截取试样,制成拉伸试样。采用 E64106-G/1000KN 拉伸机,按照 GB/T 228.1—

2021 标准方法进行拉伸试验测试,结果列于表 4。由表 4 可知,曲轴抗拉强度、规定塑形延伸强度和断后伸长率均符合要求。

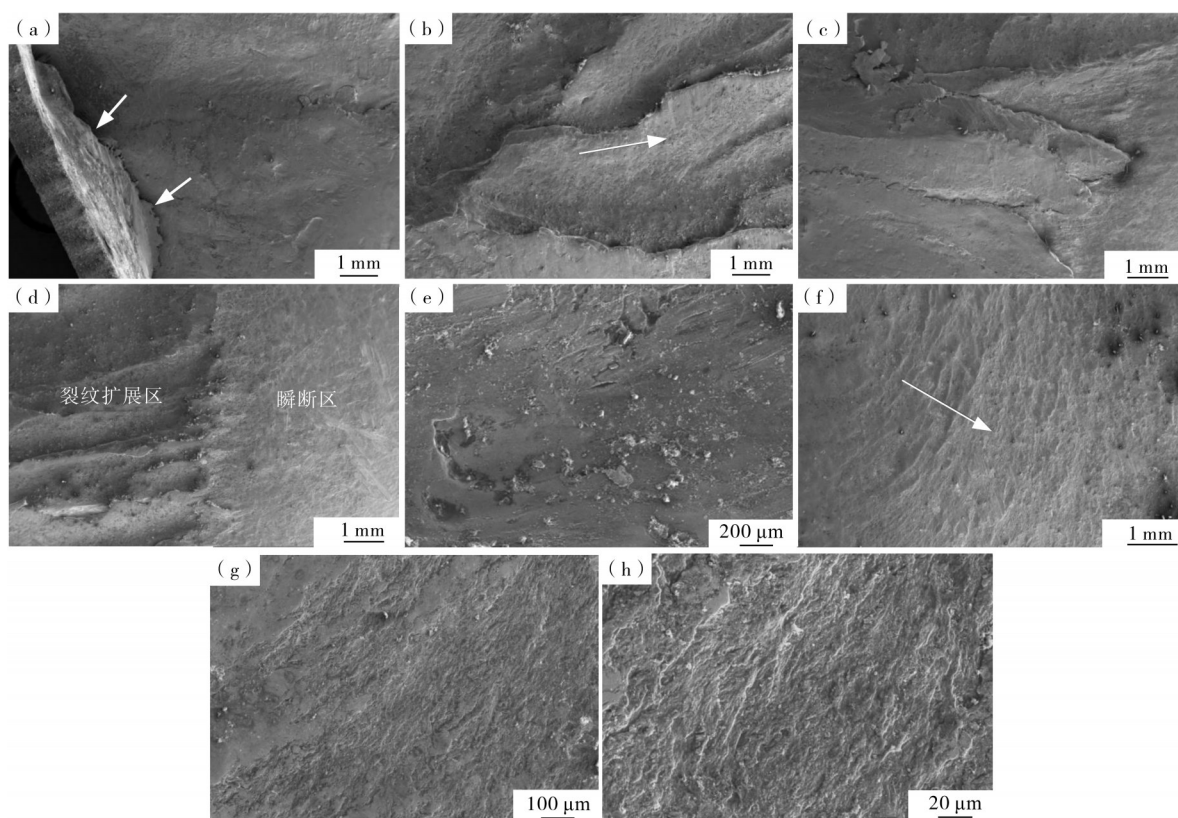
表 4 曲轴力学性能测试值
Table 4 Tensile test values of the crankshaft

测试次数	抗拉强度/MPa	规定塑形延伸强度/MPa	断后伸长率/%
1	900	734	19.0
2	901	730	19.0
平均值	901	732	19.0
要求值	≥800	≥590	≥14

2.6 断口形貌观察

断口 A 的形貌如图 3 所示。从图 3(a)可见,图中箭头所示裂纹为图 1(c)中的裂纹,疑似为裂纹源裂纹。从图 3(b)—(d)可见,图中裂纹为扩展区的

裂纹,裂纹沿扩展方向延伸。从图 3(e)可见,扩展区出现磨损划痕、微裂纹及部分氧化坑。从图 3(f)—(h)可见,瞬断区的形貌类似舌状或台阶状,并且出现磨损划痕、微裂纹及部分氧化坑。



(a)—图1(c)中的裂纹;(b)—(e)—疲劳辉纹区的裂纹;(f)—(h)—瞬断区的形貌。

(a)—cracks in Figure 1c;(b)—(e)—cracks in fatigue striated area;(f)—(h)—morphology of transient fault area.

图3 断口A的扫描电镜照片

Figure 3 SEM photos of fracture A

3 结论

(1)曲轴的化学成分在要求的范围内,同时也满足了GB/T 3077—2015 合金结构钢对42CrMo钢化学成分的要求。淬硬层的金相组织为细小的回火索氏体,曲轴的心部组织仍为回火索氏体,但比淬硬层组织粗大。

(2)曲轴心部的平均硬度为273.6 HB,满足技术标准要求。曲轴连杆颈淬硬层的最大硬度在离表面1.0 mm处为50.6 HRC,淬硬层的平均硬度为47.8 HRC,低于技术要求的55—68 HRC。曲轴的力学性能指标在要求的范围内。硬度偏低且硬度不均匀是造成曲轴疲劳开裂的主要原因。

(3)曲轴的断裂发生于连杆颈端部圆角处附近,此处视为曲轴最薄弱处,曲轴工作过程中承受着弯曲、扭转等周期性载荷作用,这些作用力易在曲轴连杆颈薄弱处产生应力集中,加之连杆颈淬硬层的硬度低于要求数值,因此曲轴长时间承受弯曲、扭转等周期性载荷作用后,易在其最薄弱处发生疲劳断裂,从而产生失效。

参考文献:

- [1] 陈磊,罗维贤,罗海鹏,等.发动机曲轴耐久实验断裂失效分析[J].汽车零部件,2020(2):70-73.
- [2] 渠娜,刘俊杰.某型发动机曲轴小头断裂失效原因分析及对策[J].内燃机与配件,2022(12):38-40.
- [3] 孙捷,王丽远,曹新鑫,等.汽车发动机曲轴断裂失效分析[J].金属热处理,2004(12):79-81.
- [4] 李继山.曲轴电磁感应淬火强化影响数值模拟研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [5] 侯学勤,何玉怀,姜涛,等.内燃机曲轴疲劳断裂失效特征及原因探析[J].内燃机,2014(3):42-45.
- [6] 董世运,石常亮,徐滨士,等.重型汽车发动机曲轴断裂分析[J].失效分析与预防,2009,4(3):138-142.
- [7] 冯继军,郭文芳.汽车发动机曲轴常见的失效形式及原因分析[J].失效分析与预防,2006(2):7-12.
- [8] 《汽车工程手册》编委会.汽车工程手册-设计篇[M].北京:人民交通出版社,2001:133-137.
- [9] 刘光华,张永秀,尹晓舜,等.球墨铸铁曲轴应用前景的评估[J].现代铸铁,2005(1):1-7.
- [10] 刘玉慧.某活塞发动机曲轴断裂失效原因分析[J].航空维修与工程,2017(8):31-33.
- [11] 王凡,闫世春,孙远东,等.发动机曲轴失效分析[J].金

- 属热处理,2015,40(12):194-197.
- [12] 孙捷,王丽远,曹新鑫,等.汽车发动机曲轴断裂失效分析[J].金属热处理,2004(12):79-81.
- [13] 孙明正.汽车曲轴断裂原因[J].理化检验(物理分册),2023,59(3):31-33.
- [14] 韩晓峰,范习民,路明,等.某柴油发动机曲轴失效分析及优化验证[J].内燃机,2012(1):44-46.

Failure Analysis of an Automobile Engine Crankshaft

XIE Yongxin, ZENG Qingzi*, WU Wei, JIAN Sicong, DUAN Wei

(Center for Industrial Analysis and Testing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The engine crankshaft is one of the most critical components of an automobile, primarily responsible for converting the reciprocating linear motion of the piston into rotational motion and transmitting torque. Additionally, it transforms the work done by the piston into useful torque. During operation, the crankshaft is subjected to various periodic loads, including gas inertia force, reciprocating inertia force, and torsional inertia force, making it prone to failure under these conditions. Crankshaft failure is often abrupt and lacks significant early warning signs. Once a failure occurs, it can result in substantial losses. In recent years, there has been increasing emphasis on stability and reliability of product quality. Therefore, it is very important to carry out investigation and experimental analysis of early failure incidents of crankshaft and find out the causes of failure. This paper investigates and studies a failure incident involving the cracking of an automobile engine crankshaft. First, the initial conditions of the accident were investigated, focusing on usage and maintenance records. Next, experimental research and analysis were carried on the macroscopic morphology of the crankshaft, the macroscopic and microscopic morphology of cracked surface, chemical composition, metallographic structure, the depth of hardened layer on the surface of connecting rod neck and the mechanical properties of the matrix. Finally, the causes of the crankshaft cracking were analyzed, and the failure process was discussed. The diagnosis concluded that prolonged exposure to various periodic loads led to the stress concentration and subsequent fatigue fracture occurred at crankshaft's weakest point.

Keywords: engine crankshaft; failure analysis; fracture failure; fatigue fracture; crankshaft fracture; metallographic examination; stress concentration; crankshaft

(学术编辑:孙文)