

柴油机连杆断裂失效机理分析及改进

焦明裕^{1,2}, 李成艳^{1,2}, 蒋丽媛^{1,2}, 孔龙^{1,2}

1. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决某柴油机连杆在疲劳试验中出现的断裂故障, 观察断口的宏观及微观形貌, 对连杆进行金相组织分析、能谱分析、非金属夹杂物化学成分及含量等级检验, 确定连杆断裂原因, 提出改进措施, 并对改进后连杆进行疲劳试验和整机耐久试验。结果表明: 连杆原材料钢棒中心存在疏松缺陷, 经下料切割及高温锻造后在连杆小头顶部产生氧化铁, 氧化铁在交变载荷作用下成为疲劳源, 导致连杆产生裂纹; 连杆中硫化物夹杂含量过高、长度超限且具有方向性, 使裂纹向外扩展, 加速连杆断裂过程。采取降低钢棒连铸过热度、提高超声波探伤等级、降低硫元素和硫化物含量等改进措施, 改进后连杆顺利通过疲劳试验和整机耐久试验, 未再发生连杆断裂失效故障, 改进措施有效。

关键词: 连杆断裂; 疲劳; 疏松缺陷; 非金属夹杂

中图分类号: TK423.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)04-0104-07

引用格式: 焦明裕, 李成艳, 蒋丽媛, 等. 柴油机连杆断裂失效机理分析及改进[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(4): 104-110.

JIAO Mingyu, LI Chengyan, JIANG Liyuan, et al. Analysis of fracture failure mechanism of connecting rod for a diesel engine and its improvement [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(4): 104-110.

0 引言

作为发动机曲柄连杆机构的重要组成部分, 连杆将活塞的往复运动转变为曲轴的旋转运动, 工作时主要承受气体压力和往复惯性力产生的交变载荷^[1-3]。连杆零部件疲劳试验以拉伸和压缩为基本载荷形式, 模拟其实际工作下的受力情况, 可全面评估连杆的疲劳强度, 是一种较可靠的验证方法^[4-5]。

连杆的可靠性是决定柴油机寿命的关键因素, 然而其断裂问题仍是行业内长期存在的严峻挑战。刘凯等^[6]采用断口分析、金相组织及非金属夹杂物检验等方法分析某连杆断裂原因, 发现连杆螺纹孔根部加工粗糙, 连杆中非金属夹杂物较多且与螺纹根部呈一定角度的带状偏析, 导致应力集中发生断裂; 景国玺等^[7]针对某连杆疲劳试验中出现的杆身部位规律性疲劳失效问题, 通过残余应力测试发现标志字处残余应力较低且应力梯度大是其失效原因; 马强等^[8]针对某连杆锻造折叠缺陷导致的杆身与大头过渡处的断裂故障, 研究锻造折叠缺陷产生的机理, 并通过控制锻造过程进行有效预防。

本文中针对某柴油机连杆在疲劳试验中出现的断裂失效故障, 分析断裂失效机理并提出改进措施, 提高连杆可靠性。

1 故障现象

在某柴油机连杆的疲劳试验中, 采用线性液压疲劳试验台施加正弦交变载荷, 拉伸力为 47.7 kN, 压

收稿日期: 2025-06-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFB2505404)

第一作者简介: 焦明裕 (1991—), 男, 山东泰安人, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为发动机运动件系统设计, E-mail: jiaomy@weichai.com。

缩力为 258.3 kN,试验频率为 20 Hz。当试验循环进行至 450 万次时连杆断裂。观察断裂连杆,发现连杆小头正上方出现裂纹,裂纹方向垂直于小头孔。连杆疲劳试验台、连杆小头裂纹如图 1 所示。

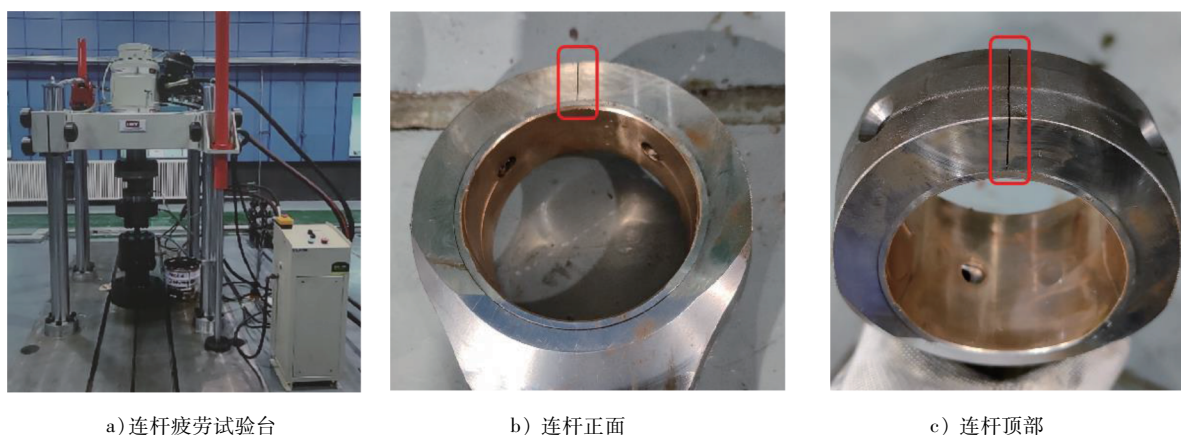


图1 连杆疲劳试验台及连杆小头裂纹

2 失效机理分析

2.1 断口宏观形貌

在连杆小头断口两侧分别取试块,标识为 1#和 2#,从小头顶部毛坯面看,取样示意如图 2 所示。试块断口宏观形貌如图 3 所示。由图 3 可知:断口面无明显塑性变形,两侧断口可见贝纹线,失效模式为疲劳断裂^[9];裂纹源位于连杆小头顶部靠近毛坯面处,裂纹向四周扩展,至小头内孔对角侧瞬断。

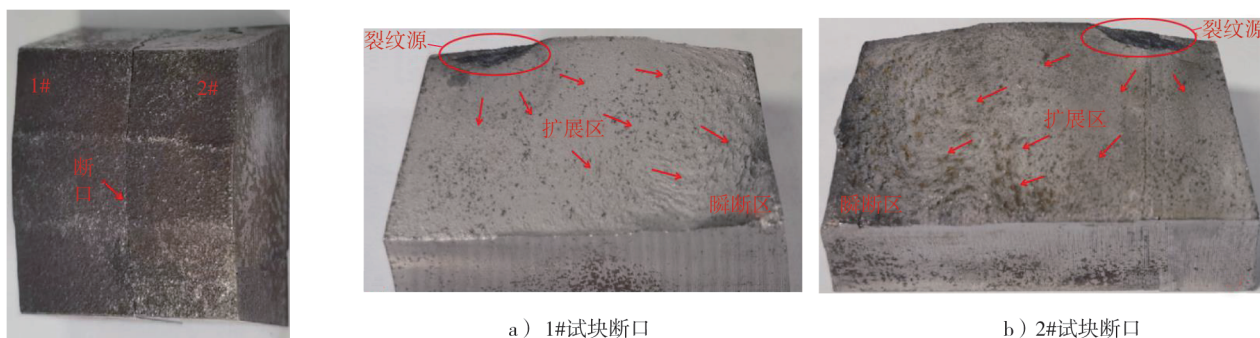


图2 断口取样示意

图3 连杆小头断口宏观形貌

2.2 断口微观形貌

2.2.1 裂纹源区微观形貌

按文献[10]要求,在扫描电镜下观察试块断口,其微观形貌如图 4 所示。由图 4 可知:在连杆小头顶部靠近毛坯面处,存在长约为 7.44 mm、宽约为 1.36 mm 的黑色区域,为裂纹源区。

将试块从裂纹源处垂直于断口方向切割取样,对切割面进行腐蚀后在电镜下观察断裂面形貌。切割示意、切割面裂纹源区域电镜扫描结果如图 5 所示。由图 5 可知:裂纹源区可见明显脱碳现象,表明该处以裂纹的形态经历了高温氧化脱碳过程;切割面上可见两条较大裂纹及多条微

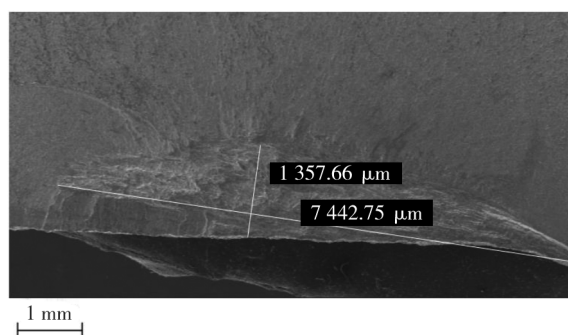


图4 连杆小头断口微观形貌

裂纹。对裂纹区域进行能谱扫描分析,观察到裂纹区域氧元素的浓度较高(表现为高亮着色),推断裂纹的形成与氧化过程密切相关。裂纹区域能谱分析位置及氧化情况如图 6 所示。

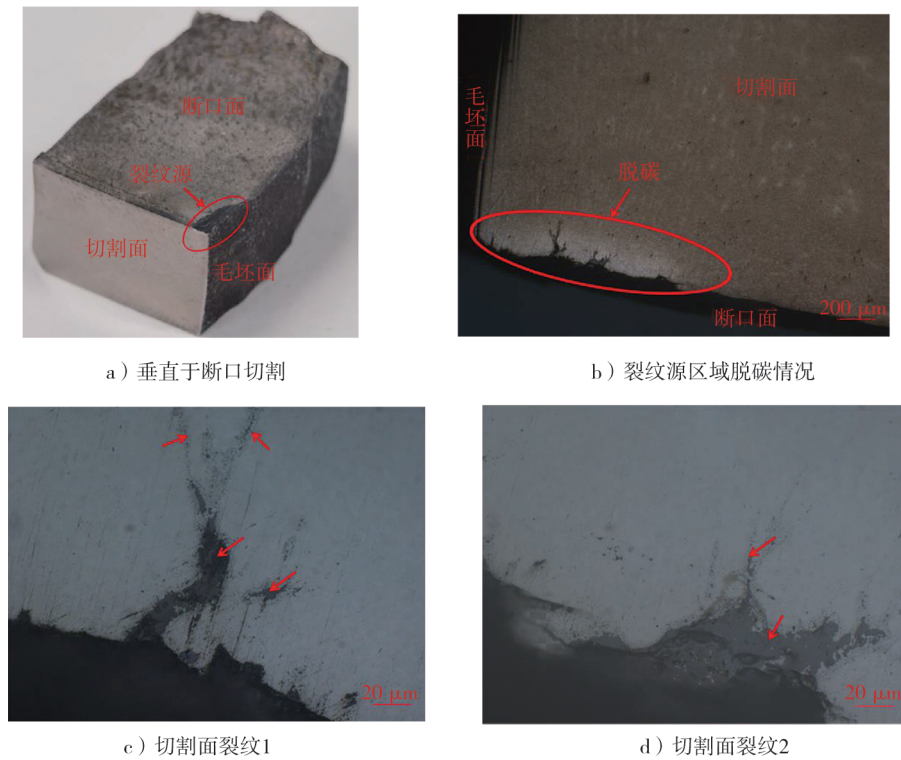


图 5 切割示意及切割面裂纹源区域电镜扫描结果

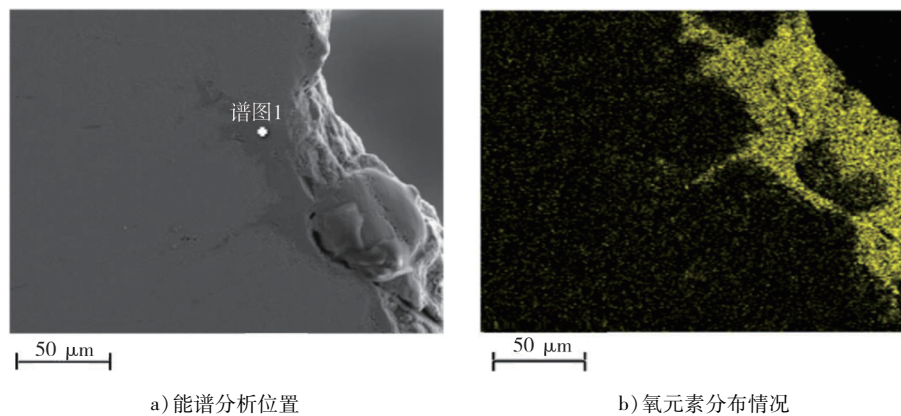


图 6 裂纹区域能谱分析

通过能谱分析,裂纹区域的主要元素及质量分数 w 如表 1 所示。由表 1 可知:裂纹区域中,氧元素、铁元素的质量分数分别为 22.42%、71.33%,表明该区域主要含氧化铁。

表 1 裂纹区域主要元素及质量分数						单位: %
$w(\text{C})$	$w(\text{O})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Mo})$
2.97	22.42	0.04	0.44	2.36	71.33	0.26

2.2.2 扩展区和瞬断区微观形貌

试块断口扩展区和瞬断区的电镜扫描微观形貌分别如图 7、8 所示。由图 7、8 可知:试块断口扩展区和瞬断区存在较多条状夹杂物。

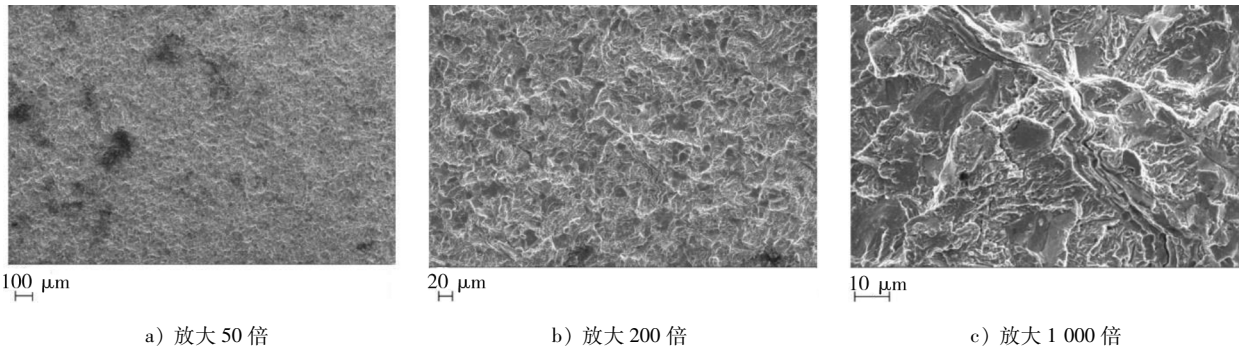


图7 扩展区微观形貌

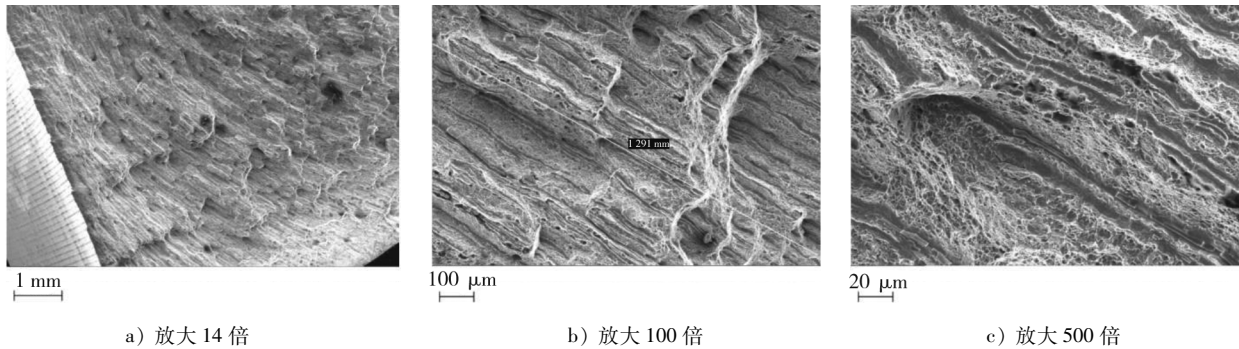


图8 瞬断区微观形貌

按文献[11]的要求对条状夹杂物进行能谱扫描分析,条状夹杂物的元素及质量分数如表2所示,文献[11]规定的硫化物夹杂物长度等级要求如表3所示。由表2可知:条状夹杂物中硫元素、锰元素的质量分数分别为25.24%、43.64%,表明断口各位置出现的条状夹杂物为硫化锰。硫化锰在裂纹源处较少、扩展区渐多、瞬断区大量出现。瞬断区硫化锰夹杂物单条长度可达1.29 mm。由表2、3可知:瞬断区硫化锰夹杂物的长度超出3.0级,不符合要求(不超过2.5级)。

表2 条状夹杂物的主要元素及质量分数						单位:%
$w(\text{C})$	$w(\text{O})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Mo})$
10.41	0	25.24	43.64	13.39	4.23	2.27

表3 硫化物夹杂物长度等级要求						
等级	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
总长度/ μm	37	127	261	436	649	898(<1 181)

对试块垂直和平行于断口的截面进行非金属夹杂物检验,根据文献[11]的要求评定非金属夹杂物含量的等级,结果如表4所示。

表 4 非金属夹杂物含量等级检验结果									
位置	等级								DS 类
	A 类		B 类		C 类		D 类		
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
垂直断口截面	0.5	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
平行断口截面	2.0	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5

由表 4 可知:试块垂直断口截面的细系、粗系 A 类(硫化物类)夹杂物含量均为 0.5 级;但平行断口面的细系 A 类夹杂物含量为 2.0 级,接近限值。

非金属夹杂物检验情况如图 9 所示。由图 9 可知:非金属夹杂物呈条状分布,平行断口截面的非金属夹杂物较多。

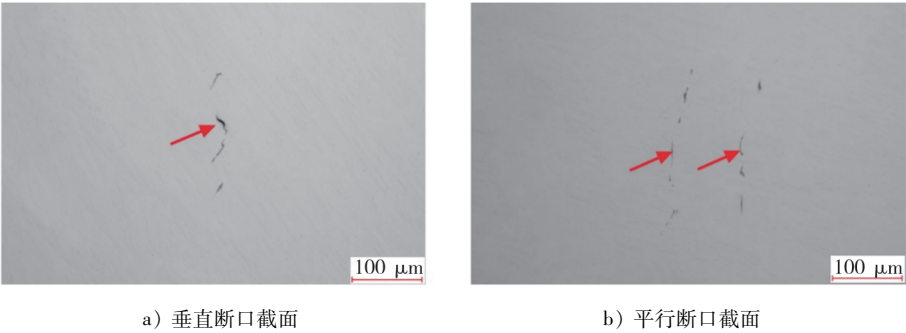


图 9 非金属夹杂物检验情况

2.3 氧化铁产生原因

对本批次连杆原材料钢棒进行超声波探伤,发现有一支轧材在距端部 1.5 m 的中心位置存在单点直径为 1.5 mm 的伤波,波形与中心疏松特征相符。由于缺陷满足文献[12]中 A 级评判标准,即疏松的当量直径不大于 2.0 mm,所以未切除钢棒缺陷部位。

由于钢棒中心存在疏松缺陷,下料切割后疏松孔洞暴露于大气环境中,锻造时钢棒芯部位置与连杆小头顶部对应,在高温环境中,氧气进入疏松孔洞与基体内铁元素反应产生氧化铁,并在锻造过程中将氧化铁弥合在连杆小头顶部的基体组织内。

2.4 硫化物产生原因

连杆材料为 34CrNiMo。对连杆进行化学成分分析,结果如表 5 所示。由表 5 可知:硫元素的质量分数为 0.028%,虽未超出技术要求,但硫元素含量较高是导致硫化物夹杂含量过高的原因。

表 5 连杆主要化学成分及质量分数									单位:%
项目	$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(Cr)$	$w(Cu)$	$w(Mo)$	$w(Ni)$
标准	0.30~0.38	≤ 0.4	0.50~0.80	≤ 0.025	≤ 0.035	1.30~1.70	≤ 0.20	0.15~0.30	1.30~1.70
实测	0.36	0.24	0.73	0.012	0.028	1.63	0.02	0.22	1.61

2.5 连杆失效原因

综上所述,连杆原材料钢棒中心存在疏松缺陷,经下料切割后暴露。锻造时,疏松孔洞中的氧气与基体铁元素在高温下反应产生氧化铁,弥合在连杆小头顶部的基体组织内。试验时,在交变载荷作用下,连杆小头顶部的氧化铁成为疲劳源,萌生疲劳裂纹并扩展,导致连杆断裂失效。连杆化学成分中硫元素含量较高导致硫化物夹杂含量过高、瞬断区硫化物长度超限,长条状硫化物夹杂具有方向性,使裂纹更易扩展,加速断裂过程。

3 改进措施及验证

3.1 改进措施

针对连杆断裂失效原因,并结合生产实际,采取以下 3 条改进措施。

1)将钢棒连铸过程的过热度控制在 20~32 ℃,提高钢材芯部加工质量,降低钢棒中心疏松缺陷产生风险。

2)控制连杆原材料钢棒的疏松缺陷,将超声波探伤质量等级要求提高至AA级,即当量直径不大于1.2 mm。

3)控制连杆化学成分中硫元素的质量分数不大于0.015%,并将硫化物细系等级提高至1.5级。

3.2 改进措施的验证

依照改进措施控制钢棒原材料及连杆生产过程,检验改进后连杆的化学成分和非金属夹杂物含量等级,连杆主要化学成分及质量分数如表6所示,各类非金属夹杂物含量等级如表7所示,非金属夹杂物检测情况如图10所示。

表6 改进后连杆化学成分及质量分数

单位:/%

项目	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Ni})$
标准	0.30~0.38	≤ 0.4	0.50~0.80	≤ 0.025	≤ 0.015	1.30~1.70	≤ 0.20	0.15~0.30	1.30~1.70
实测	0.35	0.25	0.62	0.019	0.007	1.41	0.02	0.21	1.44

表7 改进后连杆非金属夹杂物含量等级

等级								
A类		B类		C类		D类		DS类
细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
0.5	0.5	0	0	0	0	0.5	0	0

由表6可知:硫元素质量分数由改进前的0.028%下降为0.007%,降幅明显。由表7、图10可知:非金属硫化物含量明显下降,细系硫化物含量等级由2.0级提高到0.5级,满足技术要求。

改进后连杆顺利通过疲劳试验,未出现断裂故障,改进措施有效。柴油机搭载改进后连杆,进行整机耐久试验,运行3 000 h,连杆无异常。



图10 改进后连杆非金属夹杂物检验情况

4 结论

针对某柴油机连杆在疲劳试验中出现的断裂失效故障,通过分析断口宏观及微观形貌、金相组织、能谱、非金属夹杂物化学成分及含量等级确定连杆断裂失效原因,提出改进措施并进行疲劳和整机耐久试验验证。

1)连杆原材料钢棒中心存在疏松缺陷,经下料切割及高温锻造后在连杆小头顶部产生氧化铁。连杆在交变载荷作用下,小头顶部氧化铁成为疲劳源,萌生疲劳裂纹并扩展,导致连杆断裂失效。

2)连杆化学成分中硫元素含量较高,导致硫化物夹杂含量过高、瞬断区硫化物长度超限,长条状硫化物夹杂具有方向性,使裂纹更易扩展,加速断裂过程。

3)通过降低钢棒连铸过热度、提高超声波探伤等级、降低硫元素和硫化物含量的改进措施,可有效提高连杆可靠性,改进后连杆顺利通过疲劳试验和整机耐久验证,未出现断裂失效故障。

参考文献:

- [1] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- [2] 袁兆成. 内燃机设计[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2012.
- [3] 柴油机设计手册编辑委员会. 柴油机设计手册[M]. 北京:中国农业机械出版社,1984.

- [4] 吴波,胡定云,王旭兰.大功率柴油机连杆疲劳试验和数值模拟[J].计算机辅助工程,2012,21(4):19-22.
- [5] 程秀围,王红丽,刘长振,等.柴油机连杆的残余应力和疲劳强度试验研究[J].现代车用动力,2024(3):42-47.
- [6] 刘凯,仇立兵,朱奎,等.船用柴油机连杆断裂失效分析[J].内燃机与动力装置,2024,41(2):90-96.
- [7] 景国玺,王延荣,张儒华,等.发动机连杆疲劳强度试验及寿命预测方法研究[J].车用发动机,2013(4):41-45.
- [8] 马强,李志广,李萌,等.连杆断裂失效分析及锻造折叠缺陷控制研究[J].精密成形工程,2023,15(7):219-228.
- [9] 崔约贤,王长利.金属断口分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.
- [10] 上海电子光学技术研究所.扫描电子显微镜试验方法:JB/T 6842—93[S].北京:机械工业出版社,1993.
- [11] 中国钢铁工业协会.钢中非金属夹杂物含量的测定:标准评级图显微检验法:GB/T 10561—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [12] 中国钢铁工业协会.锻轧钢棒超声检测方法:GB/T 4162—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

Analysis of fracture failure mechanism of connecting rod for a diesel engine and its improvement

JIAO Mingyu^{1,2}, LI Chengyan^{1,2}, JIANG Liyuan^{1,2}, KONG Long^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: To solve the fracture failure of a diesel engine connecting rod during fatigue testing, the macroscopic and microscopic morphologies of the fracture surface are observed, and metallographic structure analysis, energy spectrum analysis, non-metallic inclusion chemical composition and content grade inspection are carried out on the connecting rod to determine the cause of the fracture. Improvement measures are proposed, and fatigue and overall durability tests are conducted on the improved connecting rod. The results shows that there is a loose defect in the center of the steel rod used as the raw material for the connecting rod. After cutting and high-temperature forging, iron oxide is produced at the top of the small head of the connecting rod, which becomes a fatigue source under alternating loads, leading to cracks in the connecting rod; the sulfide inclusion content in the connecting rod is too high, the length exceeds the limit, and it has directionality, which causes cracks to propagate outward and accelerates the fracture process of the connecting rod. After taking improvement measures such as reducing the overheating of steel bars during continuous casting, improving the ultrasonic testing level, and reducing the content of sulfur and sulfides, the connecting rod successfully passes the fatigue test and the overall durability test, and there are no more incidents of connecting rod fracture failure.

Keywords: connecting rod fracture; fatigue; porosity defect; non-metallic inclusion

(责任编辑:臧发业)