

汽车主减速器轴承早期卡滞失效原因分析

程彬¹, 杨豫博¹, 李金贵², 曹国金³, 王浩¹

1. 洛阳轴承研究所有限公司 河南洛阳 471039
2. 河北鑫泰轴承锻造有限公司 河北邢台 054900
3. 海宁市一特热处理有限公司 浙江海宁 314400

摘要: 详细阐述了汽车主减速器轴承的结构特点、主要损坏形式及其失效原因。通过实际失效案例分析, 排除了轴承冶金、热处理质量的影响因素, 利用轴承零件的纵截面金相和硬度检测结果, 迅速确定了轴承零件变形和温升的热量来源。最终, 通过研究汽车主减速器独特的润滑油路设计, 发现油路断开是导致轴承高温黏着磨损失效的主要原因。

关键词: 汽车主减速器轴承; 失效分析; 黏着磨损

Failure analysis of automobile main reducer bearing early jammed

CHENG Bin¹, YANG Yubo¹, LI Jingui², CAO Guojin³, WANG Hao¹

1. Luoyang Bearing Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China
2. Hebei Xintai Bearing Forging Co., Ltd., Xingtai 054900, Hebei, China
3. Haining Yite Heat Treatment Co., Ltd., Haining 314400, Zhejiang, China

Abstract: The structural characteristics, main damage forms and failure causes of the main reducer bearings in automobiles are elaborated in detail. Through the analysis of actual failure cases, the influencing factors of bearing metallurgy and heat treatment quality are excluded. By using the longitudinal section metallography and hardness test results of bearing parts, the heat sources of bearing part deformation and temperature rise are quickly determined. Finally, by studying the unique lubrication oil circuit design of the automobile main reducer, it is found that the disconnection of the oil circuit is the main cause of the high-temperature adhesive wear failure of the bearings.

Keywords: automobile main reducer bearing; failure analysis; adhesive wear

1 序言

汽车主减速器是汽车底盘系统中的核心部件之一, 在传动系统中起降低转速、增大转矩的作用。当发动机纵置时主减速器还具有改变转矩旋转方向的作用^[1]。主减速器质量的好坏直接影响汽车的噪

声、寿命、能耗, 以及运行的平稳性^[2]。现有研究多是对主减速器轴承按照通用的轴承失效分析思路进行分析, 没有充分考虑该类型轴承的结构、受力及润滑特性。本文将对汽车主减速器轴承的结构特点、主要损坏形式及其失效原因做详细阐述, 为该

第一作者: 程彬, 工程师, 从事轴承金属材料冶金及热处理质量评定、轴承及钢制品失效分析等方面工作, E-mail: chengbinhebi@163.com。

类型轴承失效分析提供技术参考。

主减速器总成作为汽车传动系统中重要的组成部件,随着技术的不断发展,对主减速器总成小型化、轻量化及其空间利用率的要求也越来越高,使得主减速器各组件安装布局变得越来越紧凑^[3]。主减速器结构组成件多,主要由主减速器壳体、主动锥齿轮、被动锥齿轮、螺栓、止动块、调整螺母、安装距调整垫片、主动锥齿轮大圆锥滚子轴承、隔套、预紧调整垫片、主动锥齿轮小圆锥滚子轴承及油封等组成^[4](见图1)。主减速器多采用分离型圆锥滚子轴承来承受较大的径向和轴向联合载荷。因此安装时,需施加预紧力来调整径向游隙,以增强连接的可靠性和紧密性^[5, 6]。

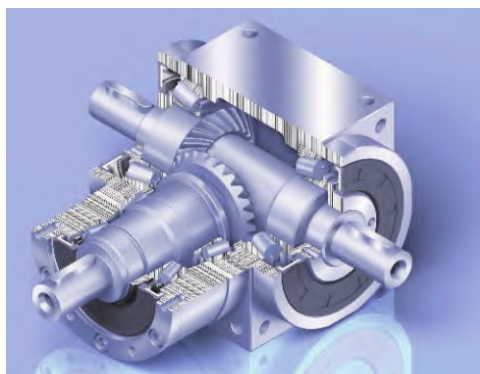


图1 汽车主减速器总成结构

汽车主减速器轴承的常见损坏形式包括:过热、变形、磨损、划伤、卡滞、打滑,以及套圈或保持架断裂等^[7]。由于主减速器轴承所处的工况具有转速高、载荷大以及存在径向圆跳动等特点,因此常会出现滚子打滑、歪斜,以及与滚道和挡边产生剧烈摩擦等现象,进而导致轴承发热和磨损,最终导致其过早失效。主减速器轴承的提前失效与轴承零件材料的冶金质量、热处理质量、磨加工质量,以及轴承安装时与轴的配合间隙、预紧力大小、润滑情况、轴承工作面是否有异物进入、轴或轴承座之间的异常热量传递等因素有密切联系^[8, 9]。主减速器轴承一旦失效,需要相关技术人员逐一仔细排查出准确的失效原因,以便汽车底盘相关生产商尽快进行质量整改,保障车辆的安全运行,减少人员伤害和经济损失。因此,对主减速器圆锥滚子轴承失效原因进行研究分析显得尤为重要。

某公司送检了一套型号为H30306C的早期失效圆锥滚子轴承,用于分析其失效原因。该轴承的套

圈和滚子材料均为GCr15钢。该套轴承安装在重载汽车主减速器中的主齿轮轴外侧,在进行路试试验时,汽车行驶仅5km,前轮就出现卡滞现象,拆解后发现轴承异常,遂要求进行详细的失效分析。

为了确定轴承失效的具体原因,首先对轴承的工作环境 and 操作条件进行了全面了解。通过观察和记录失效轴承的宏观形貌,重点检查了轴承滚道和滚子的磨损痕迹。随后,对轴承各部件进行了金相分析,以了解材料的微观结构和热处理效果。此外,采用硬度和表面粗糙度检测等手段,评估轴承的力学性能是否符合设计标准。

进一步的分析还包括润滑油样本的检测,确定是否存在润滑不良或污染问题。此外,还调查了轴承的装配和使用过程,寻找可能存在的操作不当或安装误差。通过以上方法,力求全面揭示轴承的失效机理,为委托方提供准确的故障诊断和预防建议,确保类似问题在未来得到有效避免。这一详细的失效分析不仅为轴承制造和使用单位提供了重要参考,也为改进轴承设计和生产工艺提供了宝贵的数据支撑。

2 检测分析

2.1 宏观形貌

失效轴承(已拆套)形貌如图2所示。

将轴承清洗后,分别对其零件外观形貌进行观察,发现轴承外圈滚道面呈灰黑色,局部有明显的黏着磨损现象,且靠小端面一侧略严重;外径面、两端面均未见异常,如图3所示;内圈整体呈蓝黑色,整个滚道面和大端挡边处产生严重辗压变形,滚道面对应滚子节距的位置形成较深的辗压凹槽,内径面(靠大端一侧)可见明显的黏着磨损,并存

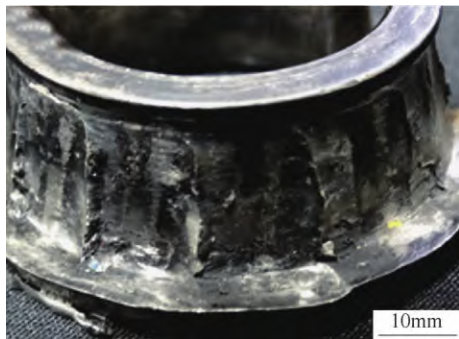


图2 失效轴承外观形貌

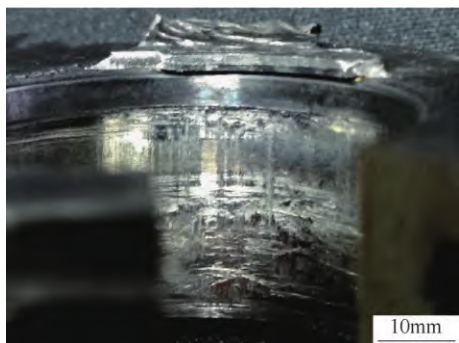


图3 外圈滚道面外观形貌

在轴向擦伤；大端面黏着有已变形的金属碎片，推测此碎片为破碎的垫片；小端面除变色和周向磨损外未见明显异常，如图4所示；11粒滚子（保持架有13个兜孔）均呈蓝黑色，大端面和工作表面均有严重的辗压变形，如图5所示；保持架已严重变形，保持架梁均向一侧产生严重挤压变形，如图6所示。



a) 内圈滚道面及大端挡边

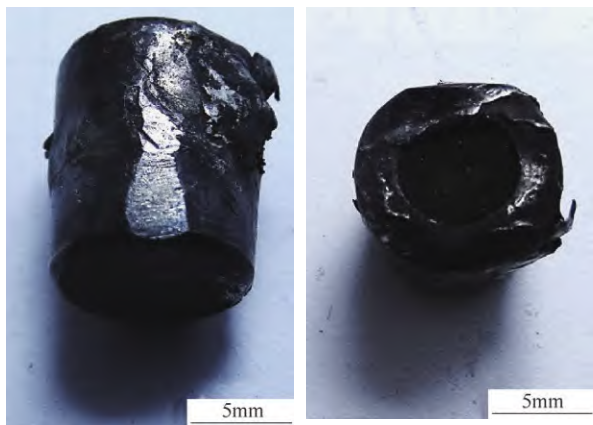


b) 内圈内径面及大端面

图4 内圈外观形貌

2.2 冶金质量检验

(1) 化学成分 采用SPECTRO M9型直读光谱仪对轴承零件分别进行化学成分分析，结果见表1。轴承套圈和滚子的化学成分均符合GB/T 18254—2016《高碳铬轴承钢》^[10]中GCr15优质钢的相关要求。



a) 滚子外径面 b) 滚子大端面

图5 滚子外观形貌



图6 保持架外观形貌

求；轴保持架的化学成分符合GB/T 13237—2013《优质碳素结构钢冷轧钢板和钢带》^[11]中08Al的相关要求。

(2) 非金属夹杂物和碳化物不均匀性 将套圈和滚子切割、磨制、抛光，其形貌如图7所示；按照GB/T 18254—2016《高碳铬轴承钢》^[10]分别对其非金属夹杂物和碳化物不均匀性进行检测，结果见表2。由表2和图7可知，轴承套圈的非金属夹杂物和碳化物不均匀性均符合GB/T 18254—2016中GCr15轴承钢的相关要求；滚子的非金属夹杂物、网状碳化物和液析均符合GB/T 18254—2016中GCr15轴承钢的相关要求，而滚子带状碳化物不符合相关标准要求。滚子带状超标视场位于滚子心部，滚子失效形貌为表面辗压变形，故滚子带状碳化物超标与此次滚子失效无必然联系。

按照GB/T 34891—2017《滚动轴承 高碳铬轴承钢零件 热处理技术条件》^[12]分别对套圈和滚子显微组织进行检测，结果见表3。由表3可知，轴承套圈

表1 轴承零件化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P	S	Ti	Al	Pb
外圈	0.98	0.19	0.27	1.43	0.0120	0.0672	0.0515	0.0135	0.0049	0.0030	0.0039	0.0011
内圈	1.05	0.24	0.31	1.48	0.0177	0.0322	0.0651	0.0168	0.0018	0.0036	0.0058	0.0012
滚子	1.00	0.25	0.34	1.51	0.0573	0.132	0.117	0.0065	0.00067	0.0022	0.0105	<0.0010
GCr15轴承钢 (GB/T 18254—2016)	0.95~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	1.40~1.65	≤0.10	≤0.25	≤0.25	≤0.025	≤0.020	≤0.0050	≤0.050	≤0.002
保持架	0.0371	0.0093	0.199	0.0189	—	0.0282	0.0729	0.0192	0.0131	—	0.036	—
08Al碳素钢 (GB/T 13237—2013)	≤0.10	≤0.03	≤0.45	≤0.10	—	≤0.30	≤0.25	≤0.030	≤0.030	—	0.015~0.065	—

表2 轴承零件非金属夹杂物和碳化物不均匀性检测结果（级）

项目	非金属夹杂物									碳化物不均匀性		
	A		B		C		D		DS	带状	网状	液析
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系				
外圈	0.5	0	0.5	0	0	0	1.0	0.5	0.5	2.0	1.0	0
内圈	0.5	0	0.5	0	0	0	1.0	0.5	0.5	2.0	1.0	0
滚子	1.0	0	1.0	0.5	0	0	1.0	0.5	0.5	3.5	1.0	0
GCr15轴承钢 (GB/T 18254—2016)	≤2.5	≤1.5	≤2.0	≤1.0	≤0.5	≤0.5	≤1.0	≤1.0	≤2.0	套圈≤3.0 滚子≤2.0	1~2.5	套圈≤2.0 滚子≤0.5

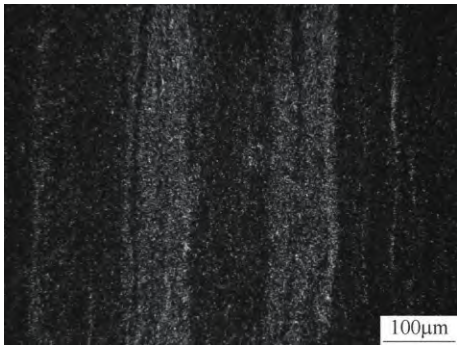


图7 滚子带状碳化物形貌

和滚子的淬火+回火后显微组织均符合标准中的相关要求。

表3 轴承零件显微组织检测结果（级）

项目	屈氏体		马氏体	碳化物网状
	距工作面 3mm以内	距工作面 3mm以外		
外圈	0	0	3	1.0
内圈	0	0	3	1.0
滚子	0	0	4	1.0
GB/T 34891—2017	≤1		1~4	1~2.5

2.3 热处理质量检验

（1）金相及硬度检验 将轴承套圈和滚子均沿纵向切割、镶嵌、磨制及抛光后腐蚀，在金相显微镜下观察轴承零件的组织形貌特征，发现零件表面均存在不同程度的烧伤，如图8~图13所示。

按照GB/T 4340.1—2024《金属材料维氏硬度试验 第一部分 试验方法》^[13]对零件不同部位的硬度分别进行检测，并按照GB/T 1172—1999《黑色金属硬度及强度换算值》^[14]换算成洛氏硬度，根据实测硬度推测了不同部位的相应温升，试验结果见表4。

通过表4、图8~图13可以快速找到零件的主要烧伤部位，确定热量来源。结果表明，轴承套圈和滚子的主要烧伤处均位于工作面，工作面有较大的硬度变化和温升。

2.4 能谱分析

将轴承外圈试样用超声波清洗、烘干后放入JSM-6380LV扫描电镜中进行观察，并采用INCA7582型能谱仪对外圈滚道表面黏附的金属成分进行检测，主要为Fe、C、Mn、Si、Al等元素，其化学成分见表5，能谱曲线如图14所示。经排查异金属成分与08Al钢保持架成分一致，为非基体材料。

表4 轴承零件纵截面金相和硬度检验对应分析表

项目	纵截面宏观形貌	金相检验结果	测试位置	硬度HRC	对应温升/℃	热量来源
外圈		—	①靠小端面	61.5、62.0、62.0	—	—
		②、③滚道面有深度约3.25mm的烧伤层（二次淬火层+高温回火层），表面黏着有外来金属（见图8）	②滚道面二次淬火层	62.5、62.5、63.0	>850	轴承运转时工作面产生的摩擦热
			③滚道面高温回火层	54.0、54.5、54.0	≈300	
		—	④靠大端面	62.5、62.0、62.0	—	—
内圈		①小端面（二淬+高温回火层）烧伤，深度为0.35mm，见图10；⑥内径面（二淬+高温回火层）烧伤，深度为0.25mm（见图11）	①靠小端面	55.5、55.5、55.5	≈300	运转后期内圈与轴异常旋转产生的摩擦热
		②、③、④滚道面与大端挡边内侧（与滚子大端面接触处）存在严重烧伤层（二次淬火层+高温回火层），深度约1.35mm，二次淬火层内可见明显高温氧化现象（见图9）	②滚道面二次淬火层	62.5、62.5、63.0	>850	轴承运转时工作面和挡边内侧与滚子大端面接触位置产生的摩擦热
			③滚道面高温回火层	33.0、34.5、34.0	>400	
			④大端挡边内侧	36.0、35.0、35.5	>400	
		⑤大端面附近组织为高温回火组织（见图12）	⑤靠大端面	46.0、48.5、47.0	>400	大端挡边内侧热量传递
滚子		②滚子工作面有严重高温回火组织转变，其深度约1.0mm，且靠大端方向烧伤更为严重（见图13）	①靠小端面	53.0、52.0、52.0	≈350	热量传递后整体温升
			②工作面组织转变区域	37.0、36.0、36.0	>400	轴承运转工作面和挡边内侧与滚子大端面接触位置产生的摩擦热
			③靠大端面	44.0、43.5、44.0	>400	热量传递后整体温升

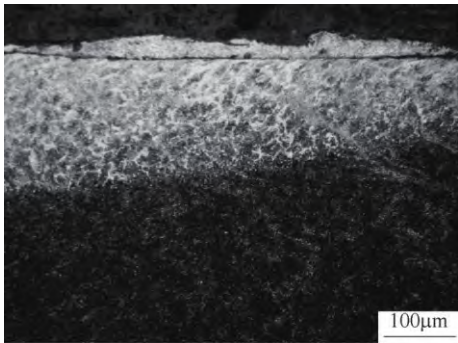


图8 外圈滚道面烧伤层和异金属附着形貌

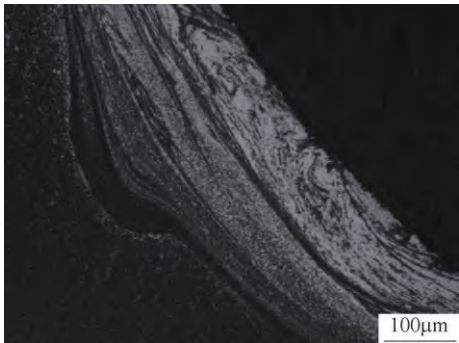


图9 内圈滚道面烧伤层形貌

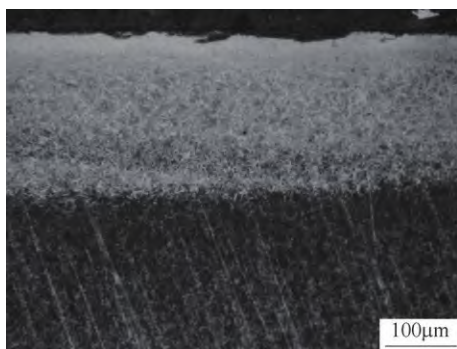


图10 内圈小端面烧伤层形貌

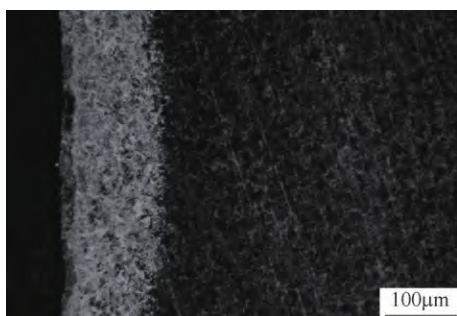


图11 内圈内径面烧伤层形貌

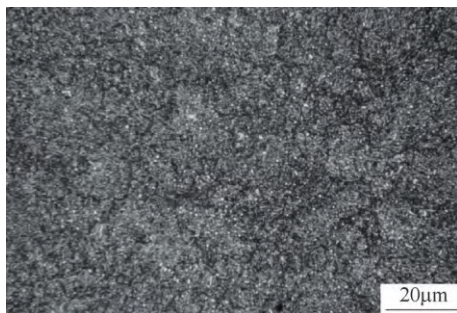


图12 内圈大端面附近组织形貌

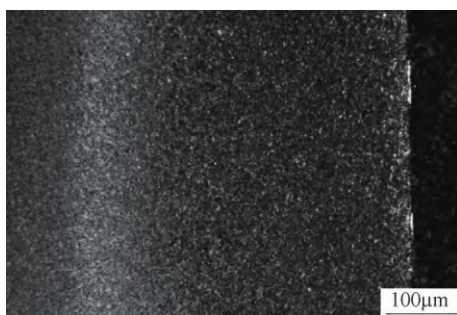


图13 滚子工作面烧伤层形貌

表5 黏附金属化学成分 (%)

元素	C	Al	Si	Mn	Fe
质量分数	5.47	0.31	0.34	0.52	93.36
原子分数	21.08	0.53	0.56	0.44	77.39

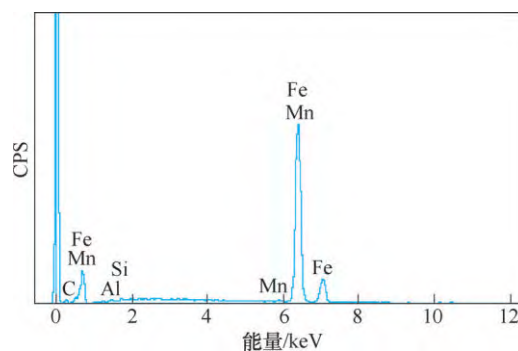


图14 异金属能谱分析曲线

3 分析与讨论

3.1 材料冶金质量与热处理质量检验

在失效分析过程中，排查了轴承零件的材料冶金及热处理质量，除滚子带状碳化物不符合相关标准要求外。其余检验项目均符合相关标准要求。可排除轴承材料冶金及热处理质量不合格因素造成的轴承失效。

3.2 轴承零件的温升与损伤分析

该轴承除外圈外径面无明显变色外，轴承零件其他部位均呈蓝黑色，内圈、滚子工作面 and 保持架均出现较严重的运转烧伤和辗压塑性变形，说明轴承运转时有较高温升。通过对轴承零件截面金相和硬度检测发现，外圈外径面和两端面无明显温升，内圈内径面和两端面的烧伤层较滚道面烧伤层更浅，说明造成轴承发热的热源不是来自与其所安装配合的轴和轴承座。由于轴承各零件的工作表面均有二次淬火+高温回火的严重烧伤层，说明热源来自于轴承自身运转异常产生的摩擦，推断轴承工作表面瞬时温度高达850℃（GCr15钢淬火温度）以上。

在检测中，虽未见油脂实物，但在轴承套圈及滚子表面未见异常划伤痕迹和外来物质，因此可排除轴承装配和安装时异物进入造成异常磨损。

内圈滚道面对应滚子节距位置形成较深的辗压凹槽，说明轴承运转过程中保持架出现卡滞，滚子由绕轴公转变为在内圈滚道面凹槽内自转，运转异常，从而产生温升及黏着磨损^[15, 16]。

3.3 结论

综上分析，可确定该轴承的早期失效主要是由运转异常引起的高温黏着磨损。材料冶金和热处理质量排查、轴承零件的温升与损伤详细分析，确保了诊断结果的准确性。根据汽车行驶里程极短、轴

承黏着磨损严重推断,该汽车主减速器轴承失效是润滑不良所致。

4 润滑系统排查

经汽车主减速器润滑系统排查,发现该重型车辆驱动系统在装配后,主减速器会有一定角度的上仰,导致其轴承位置较高而不容易进行润滑。因为主减速器主齿轮轴外轴承距油面及齿轮均较远,不能靠齿轮带动润滑油的飞溅来实现润滑,所以采取油路引导润滑的措施解决,需在主减速器壳体设计中设置油路,形成引导油路来辅助润滑^[17, 18]。在本车辆主减速器中油路异常断开,造成该主减速器主齿轮轴外轴承润滑不足,运转时产生高温,从而导致黏着磨损失效。

5 结束语

通过对汽车主减速器轴承早期卡滞失效原因的深入分析,结合轴承所在装置的结构、受力及润滑特点,逐一排查了可能的故障因素。采用零件纵截面金相、硬度综合分析法,为黏着磨损失效轴承的热量溯源提供了高效的解决思路,并为类似故障的诊断和预防提供了重要参考。未来的研究可以通过优化润滑系统设计、改进轴承材料的自润滑性能,进一步提升汽车主减速器轴承的使用寿命,从而提高整车性能和可靠性提供技术支持。

参考文献:

- [1] 林巨广, 韩江波, 任永强. 汽车主齿轴承压测设备控制系统的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007 (10): 72-75.
- [2] 薛冰, 宫唤春, 黄东梅, 等. 汽车主减速器圆锥滚子轴承热机耦合分析[J]. 机械设计与研究, 2016, 32 (6): 65-68.
- [3] 李海建. 主减速器总成NVH性能优化分析[J]. 装备制造技术, 2019 (3): 178-182.
- [4] 黄丰云, 周子寒, 朱建国, 等. 基于ADAMS的主动齿轮轴承安装距的振动性能研究[J]. 机械传动, 2016, 40 (6): 42-46.
- [5] 陈德鑫, 李松松, 石兴磊. 乘用车变速器轴承预紧力测试技术及自动调节方法[J]. 轴承, 2013 (12): 42-46.
- [6] 廖鑫, 周献文, 高俊聪, 等. 汽车主减速器圆锥滚子轴承的最佳轴向预紧量[J]. 轴承, 2019 (4): 9-13.
- [7] 贾西亚, 关同立. 汽车主减速器常见故障的分析与研究[J]. 中小企业管理与科技, 2015 (11): 273-273.
- [8] 郭浩, 雷建中, 扈林庄. 滚动轴承接触疲劳失效的影响因素及其研究现状[J]. 失效分析与预防, 2019, 14 (3): 206-211.
- [9] 翟红升, 李志胜, 李丽霞. 62SP齿轮箱轴承的失效分析[J]. 机械传动, 2014, 38 (6): 139-141.
- [10] 全国钢标准化技术委员会. 高碳铬轴承钢: GB/T 18254—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] 全国钢标准化技术委员会. 优质碳素结构钢冷轧钢板和钢带: GB/T 13237—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [12] 全国滚动轴承标准化技术委员会. 滚动轴承 高碳铬轴承钢零件 热处理技术条件: GB/T 34891—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [13] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料维氏硬度试验 第一部分 试验方法: GB/T 4340.1—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] 中国计量科学研究院. 黑色金属硬度及强度换算值: GB/T 1172—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [15] 全国滚动轴承标准化技术委员会. 滚动轴承 损伤和失效术语、特征及原因: GB/T 24611—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [16] 王姗姗, 郭浩, 雷建中, 等. 我国滚动轴承磨损失效分析现状及展望[J]. 轴承, 2017 (10): 58-63.
- [17] 皮彪, 丁上, 王叶枫, 等. 基于MPS的某重型汽车主减速器润滑系统优化与分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43 (1): 98-103.
- [18] 刘海柱, 刘江. 重型汽车桥主减速器的润滑分析[J]. 汽车实用技术, 2016 (6): 156-157.

(收稿日期: 20241220)