

某型乘用车变速箱轴承失效原因分析

Failure Analysis on Bearing for Gearboxes of a Certain Type of Passenger Car

供稿|操庆春, 方静 / CAO Qingchun, FANG Jing

内容导读

某乘用车行驶约 1.2 万 km 后, 变速箱圆锥滚子轴承失效。分析确认轴承材料 (GCr15) 成分、纯净度及初始热处理均合格。失效主因是外圈滚道面发生严重粘着磨损。关键证据指向异常高温: 外圈滚道面检测到深度约 1 mm 的“二次淬火层”, 显微硬度极高 (HV 926), 证实其曾经历瞬间超高温 ($>780^{\circ}\text{C}$) 并被快速冷却。硬度梯度显示整个外圈温升显著。综合分析认为轴承外圈与安装座之间发生异常滑动摩擦, 产生局部极端高温, 导致滚道面材料结构剧变和粘着磨损。调查发现, 变速箱飞溅式润滑设计效果不佳, 在特定工况 (如坡道、启动) 下易导致轴承局部供油不足, 加剧摩擦生热。该案例表明, 即使轴承材料与制造工艺合格, 异常的安装配合 (导致滑动摩擦) 或不良的润滑散热条件, 也可能引发严重的高温粘着磨损失效。

轴承钢是钢铁生产中要求最严格的钢种之一^[1], 被广泛应用于滚动体和套圈^[2]。以轴承钢为原料制作的轴承可以在拉伸、压缩、交变等复杂应力状态和高应力值下保持长时间的高速工作^[3], 是机械设备中重要的旋转零件。一旦轴承出现故障, 就有可能导致汽车无法正常运行, 甚至会危及人身安全^[4]。轴承一般由内圈、外圈、滚动体和保持架 4 种基本元件构成^[5]。其中, 内圈与传动轴过盈配合, 工作过程中随轴一起转动; 外圈则多为固定或相对固定, 安装在轴承座或箱体等固定支撑物上^[6]。

鉴于轴承类型、安装部位、匹配要求及变速箱实际应用工况的复杂性, 轴承失效形式多样, 主要

包括疲劳、磨损、点蚀、断裂、烧蚀等^[7-9]。失效分析是通过对失效现象的分析和验证, 找到产品失效原因、挖掘失效本质和规律的一种分析手段, 在提高产品质量、改进开发技术、修复产品及仲裁失效事故等方面具有重要的实际意义。本文针对一款变速箱圆锥滚子轴承在行驶过程中出现的高温粘着磨损现象, 结合失效表现, 运用多种针对性手段对失效轴承进行详细的失效原因分析。

理化检验

变速箱轴承在运行过程中不仅承受着巨大的径向载荷, 还可能承受斜齿轮产生的部分轴向载荷,

并持续受到齿轮的冲击作用。轴承一旦失效，将严重影响齿轮箱的寿命^[10]，其失效模式包括疲劳剥落、烧伤、磨损和偏载等，其中剥落和烧伤为主要失效模式，磨削烧伤、表面非金属夹杂物等对轴承寿命也有一定影响。

某乘用车变速箱用圆锥滚子轴承，其内圈与传动轴过盈配合，外圈则固定在轴承座中，套圈和滚子均采用 GCr15 材料。汽车行驶 11947 km 后，该轴承失效。该产品主要加工工艺为热锻→球化退火→机加工→淬回火→磨加工→清洗→装配。

宏观观察与分析

轴承采用体积分数 95% 酒精超声波清洗后，观

察外圈、内圈及滚子的宏观形貌，如图 1 所示。外圈、内圈及滚子均有不同程度的变色，其中外圈存在严重的粘着磨损现象（滚子与外圈在相对摩擦过程中，接触表面局部发生的金属粘着现象），外圈外侧及滚道面的圆周方向均发生变形，车加工纹路完全消失。推测产品在滚动时，因工作温度过高或受力过大，表面产生高温，导致组织和硬度发生改变，进而造成表面变形，使接触面发生粘着。内圈和滚子虽出现变色，但运转轨迹正常，宏观下未见明显异常。说明轴承失效主要由外圈粘着磨损引起，外圈在失效过程中产生高温，各零部件形貌特征见表 1 及图 2~4 所示。

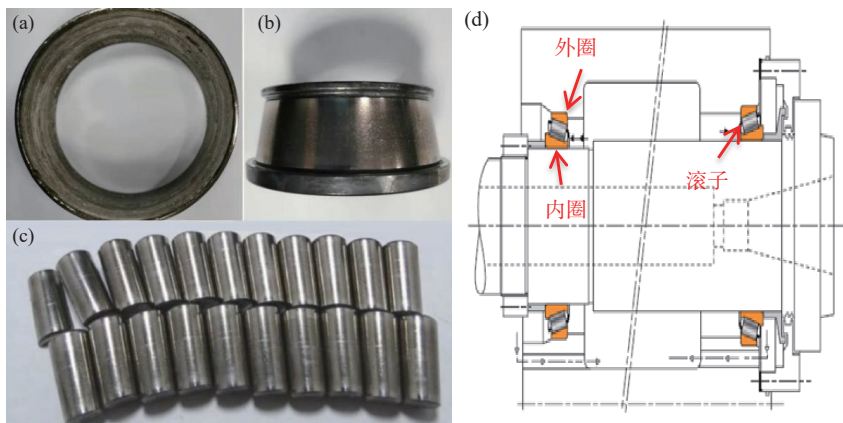


图 1 失效轴承外圈 (a)、内圈 (b) 和滚子 (c) 的宏观形貌及工作示意图 (d)

表 1 轴承零件的宏观形貌

零件名称	宏观形貌
外圈	整体略变黄，两端面和外圈外侧均有不同程度的周向磨痕，内侧滚道面高温塑性变形较严重，存在严重的粘着磨损现象，见图2
内圈	整体完好，滚道面变为黄棕色，运转轨迹正常，内径面（靠大端一侧）可见明显的周向磨损，两端面未见异常，见图3
滚子	21粒滚子整体完好，工作面均呈黄色，大端面均有轻微磨损，小端面均未见异常，见图4

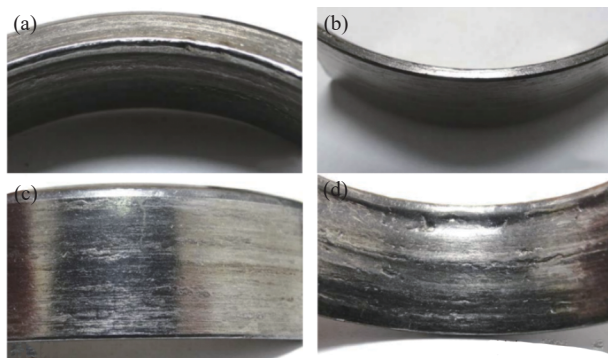


图 2 外圈外观形貌: (a) 大端面; (b) 小端面; (c) 外侧; (d) 内侧/滚道面

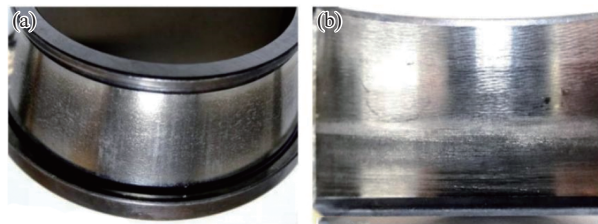


图 3 内圈外观形貌: (a) 外侧/滚道面; (b) 内侧

化学成分分析

使用 OBLF 火花直读光谱仪对轴承外圈进行分析，其元素成分如表 2 所示，化学元素均符合

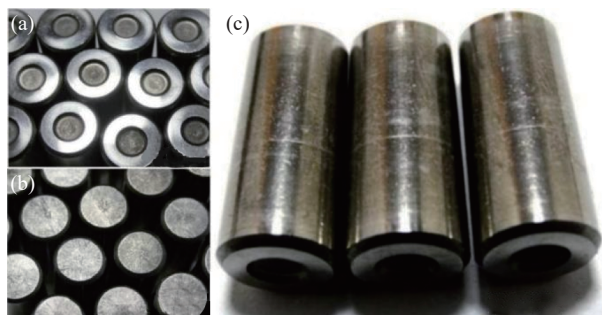


图4 滚子外观形貌: (a) 大端面; (b) 小端面; (c) 滚面

GB/T 18254—2016《高碳铬轴承钢》的技术要求, 避免钢材冶炼成分偏差导致产品失效。

非金属夹杂物分析

由于内圈、外圈、滚子的滚面剥落及磨损情况

无明显差异, 随机选取轴承内圈、外圈的截面位置和 2 粒滚子, 经磨制抛光后采用金相显微镜进行观察。根据 GB/T 10561—2023《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》, 采用 A 法(最恶劣视场法, 即检验样品整个纵向抛光面, 对观察到的每类夹杂物, 按细系和粗系记录与检验面上最恶劣视场相符的标准图片的级别数^[11])对轴承钢中的 A 类(硫化物类)、B 类(氧化铝类)、C 类(硅酸盐类)、D 类(球状氧化物类)和 DS 类(单颗粒球状类)非金属夹杂物进行评级, 其中 A、B、C、DS 类非金属夹杂物按尺寸范围评级, 评级结果见表 3, 未见异常粗大夹杂物。例如, D 类细系 0.5 级表示 D 类夹杂物直径为 2~8 μm, 数量为 1~3 颗。

表2 外圈主要化学成分(质量分数)

%

项目	C	Cr	Mn	Si	P	S	Ti
测量	0.95	1.48	0.33	0.28	0.013	0.0012	0.002
标准	0.95~1.05	1.40~1.65	0.25~0.45	0.15~0.35	≤0.025	≤0.020	≤0.0050
项目	Al	Mo	Cu	Ni	As	Pb	As+Sn+Sb
测量	0.022	0.004	0.029	0.013	0.008	0.001	0.013
标准	≤0.050	≤0.10	≤0.25	≤0.25	≤0.04	≤0.002	≤0.075

轴承钢属于高纯净钢, 且此批产品夹杂物极少, 因此初步排除非金属夹杂物导致产品失效的可能。

表3 非金属夹杂物评级结果

非金属夹杂物类型	内圈等级	外圈等级	滚子等级
A类细系	0	0	0
A类粗系	0	0	0
B类细系	0	0	0
B类粗系	0	0	0
C类细系	0	0	0
C类粗系	0	0	0
D类细系	0.5	0.5	0.5
D类粗系	0	0	0
DS类	0	0	0

硬度分析

随机检测轴承内、外圈和 2 粒滚子的硬度(编号分别为 1[#]、2[#])。由于外圈存在高温粘着磨损现象, 对零件滚道表面和心部均进行显微硬度检测。将样品镶嵌、磨制、抛光后固定于显微硬度夹具, 确保检测面平整且与显微硬度计压头垂直。采用 ATM 显微硬度计检测滚子、内圈、外圈距滚道面 100 μm 处的表面硬度与心部硬度, 试验力为 5 N。按照 GB/T 1172—1999《黑色金属硬度及强度换算值》将洛氏硬度转换为显微硬度, 检测结果见表 4。

检测结果表明: 轴承滚子、内圈滚道表面硬度和心部硬度符合标准要求, 说明内圈和滚子热处理

表4 轴承零件的硬度 HV 检测结果

部位	表面		心部		技术要求
	检测值	均值	检测值	均值	
滚子	815、810、813	812	805、807、801	804	HRC 61~65 (HV 721~822)
内圈	729、738、735	734	727、717、724	723	HRC 60~64 (HV 698~795)
外圈	929、931、939	933	377、389、392	386	HRC 61~65 (HV 721~822)

注: 该技术要求为万向钱潮公司对于轴承零件产品工艺设定要求。

质量符合技术要求，热处理过程正常；外圈滚道表面硬度和心部硬度相差极大，不符合相关标准要求，说明外圈硬度与产品热处理及后续运行过程中的环境温度有关，需进一步检测外圈表面至心部的硬度梯度。

将距滚道面 100 μm 处设为原点，以 300 μm 的步长进一步检测外圈滚道面至外径面的硬度梯度，试验力为 5 N，检测结果如图 5 所示。检测结果表明：外圈滚道硬度呈现先下降后上升的趋势；从表面至距滚道面 1300 μm 处，硬度随与表面距离增加而下降，表面硬度最高为 HV 926，高于技术要求，处于二次淬火马氏体硬度区间；继续增加与表面的距离，硬度持续下降，在距表面 1600 μm 处降至最低 HV 396；超过 1600 μm 至外径面时，硬度再次回升，但始终低于技术要求，外表面最高硬度为 HV 619，处于二次回火马氏体硬度区间。

外圈滚道面硬度极高，说明滚道表面在某段时间温度达到奥氏体温度（760~880 $^{\circ}\text{C}$ ），运行温度极高，同时润滑油对表面进行快速冷却，造成表面发生二次淬火。随着与滚道面距离的增加，温度逐渐降低，二次淬火组织逐渐向二次回火组织转变。此

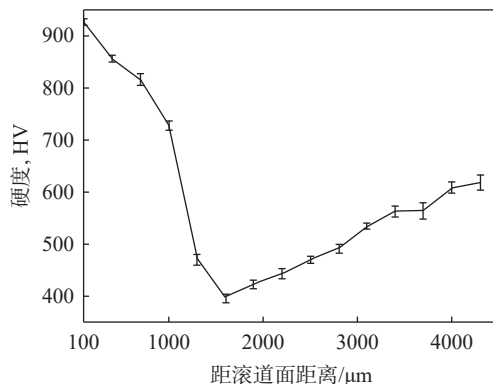


图5 外圈显微硬度趋势

外，外圈外侧温度也较高，根据 JB/T 1255—2014 《滚动轴承 高碳铬轴承钢零件 热处理技术条件》中回火温度与硬度关系表，外径面回火温度在 200~300 $^{\circ}\text{C}$ 。因此，外圈整体发生了高温转变，滚道面为主要高温作用区域。

显微组织

将内、外圈试样及滚子经纵向磨制、抛光、腐蚀后，按照 GB/T 18254—2016 分别检验评定其碳化物的级别及淬回火组织，并观察和分析其剖面的显微组织，评级结果见表 5~6，金相组织形貌见图 6~10。

表5 轴承零件碳化物级别评级结果

项目	网状碳化物	带状碳化物	液析碳化物
实测外圈	0	0	0
实测内圈	0	1	0
实测滚子	0	1	0
标准要求	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 1
客户要求	≤ 2.5	≤ 2.0	≤ 0.5

表6 轴承零件淬回火组织及剖面金相检验结果

零件	淬回火马氏体等级	零件剖面金相检验结果
外圈	2	整个滚道面存在严重的烧伤（二次淬火层+高温回火层），其二次淬火层深度约1.0 mm，为粗大针状马氏体组织；沟道面二次淬火层内有一道深度约0.07 mm的裂纹，裂纹周围可见明显的高温氧化现象；外径面局部存在深度约0.20 mm的烧伤层（二次淬火层+高温回火层），基体组织为淬回火马氏体，见图6~8
内圈	3	滚道面局部有深度约0.07 mm的烧伤层（高温回火层），内径面局部有深度约0.10 mm的烧伤层（二次淬火层+高温回火层），滚道面未见脱碳，见图9
滚子	3	工作面未见烧伤及其他异常，见图10

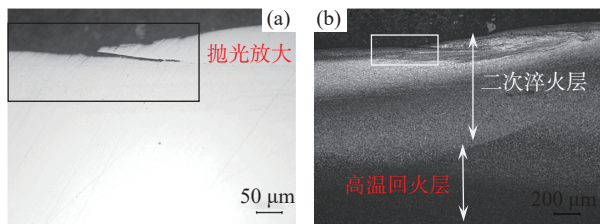


图6 外圈滚道面裂纹形貌：(a) 抛光态；(b) 腐蚀态

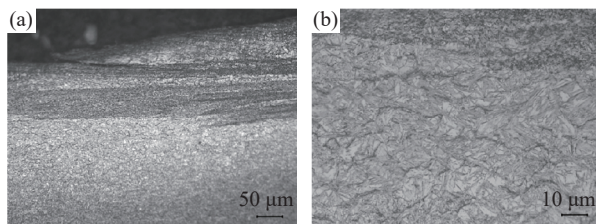


图7 外圈滚道面二次淬火层形貌

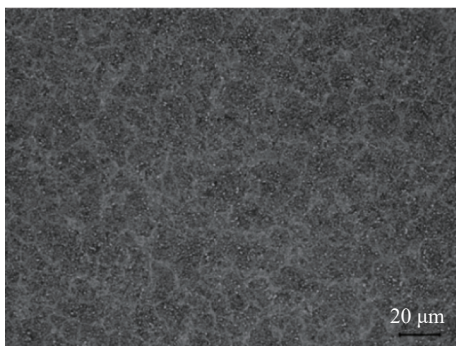


图8 外圈组织形貌

具体检测结果如下。

(1) 外圈滚道面整体可见严重的二次淬火烧伤及高温氧化裂纹(见图6), 外侧局部可见较浅的烧伤层; 外圈整体烧伤, 产品热处理工艺无明显问

题; 滚道面热量源于滚子与外圈剧烈摩擦产热, 外表面热量则由外圈与轴承座相对滑动、剧烈摩擦所致; 滚道面基体组织为淬火马氏体(见图7), 外圈基体组织为淬回火马氏体(见图8)。

(2) 内圈滚道面未见脱碳(见图9(a)), 局部存在二次回火层(见图9(b)), 表明是由环境高温引起的表面浅度烧伤, 烧伤层深度仅0.07 mm; 内径面烧伤较滚道严重, 存在二次淬火层(见图9(c)), 为内圈与轴发生相对滑动、剧烈摩擦造成。

(3) 滚子作为滚动体, 与内圈和外圈均为线接触, 可快速散热冷却, 未发现明显烧伤组织(见图10)。

(4) 轴承套圈表面均无明显脱碳、非马组织等原始缺陷, 产品高温为运行过程中剧烈摩擦产生。

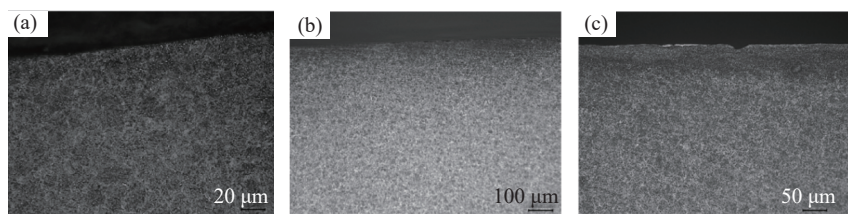


图9 内圈形貌: (a) 滚道面; (b) 滚道面烧伤层; (c) 内径面烧伤层

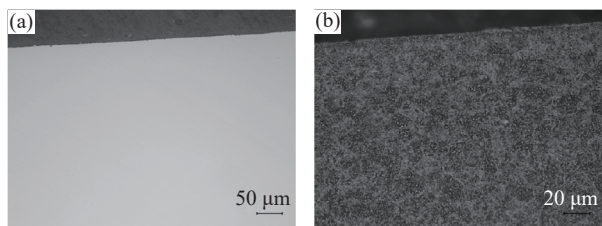


图10 滚子工作面形貌: (a) 抛光态; (b) 腐蚀态

原因分析

宏观观察发现, 轴承内、外圈及滚子均出现变色现象, 其中外圈滚道面存在严重的粘着磨损现象, 外圈外径面、内圈内径面均可见明显的周向划痕, 内圈和滚子工作面运转轨迹均正常, 因此排除装配等原因引发的高温现象; 轴承化学元素、非金属夹杂物、碳化物级别、内圈及滚子的硬度、基体金相组织均符合 GB/T 18254—2016 的要求, 未发现异常, 因此可排除原材料原因引发的失效。

轴承外圈滚道面存在二次淬火层, 深度约1 mm, 硬度最高达到 HV 926, 金相组织为粗大针状马氏

体, 推断滚道表面瞬时高温可达 780℃ 以上, 由截面硬度检测结果可知, 其高温回火层较深; 滚道面至外径面的硬度急剧下降后又缓慢上升, 外径面硬度为 HV 619; 经过 200~300℃ 的高温回火, 外圈热量由滚道面向外径面传递; 内圈滚道面局部存在深度约 0.07 mm 的烧伤层, 轴承内、外圈均可见烧伤, 滚子则无明显烧伤, 可见轴承运转时外圈滚道面产生的异常高温是造成外圈粘着磨损的主要原因。

外圈外径面和端面均存在周向烧伤, 外圈外径面局部还发现深度约 0.20 mm 的烧伤层, 表明其与轴承座发生了相对转动; 内圈内径面也发现局部烧伤, 深度约 0.10 mm, 推测轴承运转过程中内圈与外圈均存在异常转动; 内圈滚道面仅有轻微升温, 外圈整体升温显著且滚道面发生整体粘着磨损, 因此推测轴承外圈与轴承座、内圈与轴间均产生异常滑动摩擦且散热不良, 这是造成外圈异常升温的主要原因。

车辆调查显示, 该型号变速箱采用喷溅式给油方式, 即通过喷头向部件洒溅润滑油, 此方式虽简单且利于结构轻量化, 但润滑效果较差; 外部甩油

很难充分润滑轴承，当车辆上坡或下坡出现一定角度时，易导致润滑不到位，从而降低轴承的散热性能，使高温在轴承内持续积聚难以散出。

结束语

失效轴承的化学元素、非金属夹杂物、碳化物级别等指标均符合 GB/T 18254—2016 的要求，产品质量未见明显异常；轴承外圈滚道面存在粘着磨损，伴有二次淬火层，组织为粗大的针状马氏体；内圈内径面发现存在局部烧伤。综合分析认为，轴承运转时外圈滚道面产生的异常高温是造成外圈粘着磨损的主要原因，轴承内圈与轴间均发生异常滑动摩擦且散热不良是造成外圈异常升温的主要原因。异常高温、散热不良与产品润滑条件、装配情况及运行状态等因素相关，需进一步调查车辆润滑方式、装配及运行状况。

针对产品分析结果与改进建议，公司对车辆运行及装配情况进行审核，未发现明显问题，而润滑条件由某乘用车公司设计决定。公司与乘用车公司交流后得知，该公司此前变更过变速箱设计（一个变速箱内有 4 套轴承），轴承的给油方式从点喷式（变速箱 4 个位置定点给油）更改为喷溅式（变速箱 1 个位置给油，运转后将油喷溅至各轴承表面），导致车辆在上、下坡或刚启动时易出现给油不足的情况。经持续沟通，该乘用车公司最终变更部分变速箱的设计，尤其在轴承游隙及给油量方面

进行了较大调整，最终该类型失效情况减少约 60%。

参考文献

- [1] 袁野, 张群. 轴承套圈裂纹缺陷分析. 金属世界, 2021(3): 49
- [2] 刘红伟, 李锡峰. 轴承钢管内部裂口成因. 金属世界, 2015(1): 56
- [3] 刘艳华, 赵德忠, 李卯华, 等. 提高轴承钢加热产量的工艺控制实践. 金属世界, 2014(2): 47
- [4] 何能胜. 某型特种车辆变速箱圆柱滚子轴承故障诊断 [学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014
- [5] 孙绘琴. 变速箱轴承在线故障诊断的研究 [学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2010
- [6] 姜小荧. 基于小波分析的滚动轴承故障诊断方法的研究及应用 [学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2005
- [7] 张悦. 某变速箱圆锥滚子轴承小挡边断裂失效分析. 哈尔滨轴承, 2018, 39(3): 15
- [8] 孙志旗, 黄金鹏, 杜天义. 某型汽车变速器滚针轴承烧蚀故障分析与改进. 南方农机, 2021, 52(14): 121
- [9] 陆爽. 基于现代信号分析和神经网络的滚动轴承智能诊断技术研究 [学位论文]. 长春: 吉林大学, 2004
- [10] 张旭. 商用车变速箱轴承疲劳失效分析及超声滚压表面强化技术研究 [学位论文]. 济南: 济南大学, 2022
- [11] 李振兴, 李长生, 李忠之, 等. 奥氏体化温度对 GCr15 钢球化效果的影响. 金属热处理, 2015, 40(5): 61

作者简介: 操庆春 (1985—), 男, 安徽省安庆人, 试验工程师, 2016 年毕业于浙江工业大学人力资源管理专业。主要研究方向: 汽车零部件产品疲劳寿命的提高。通信地址: 浙江省杭州市萧山区万向路 1 号万向钱潮股份公司技术中心; E-mail: caoqingchun@jszx.wxqc.com。