变速器过渡套开裂失效分析

郝欣欣 陈冠方 纪同圣 肖超 季伟

（中国重型汽车集团有限公司汽车研究总院，济南 250000）

摘要：针对某型号变速器过渡套的早期开裂问题，采用化学成分分析、硬度检验、硬化层深度测定、金相组织与断口微观形貌分析等方法对过渡套进行了失效分析。结果表明，失效主要由两方面因素导致：其一，零件心部组织中存在大量块状铁素体，致使其心部硬度偏低、与相连接的主轴及太阳轮的硬度匹配性较差；其二，内花键齿根处的实际圆角半径低于设计下限，导致该区域应力集中效应加剧。在交变载荷作用下，两效应叠加，最终于内花键齿根圆角处发生开裂失效。据此，从材料热处理工艺优化和关键结构尺寸控制两方面提出了改进措施。

关键词：变速器过渡套 失效分析 硬度 应力集中

中图分类号：U463.212 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260053

Cracking Failure Analysis of Transmission Sleeve

Hao Xinxin, Chen Guanfang, Ji Tongsheng, Xiao Chao, Ji Wei

(Sinotruk Automotive Research Institute, Jinan 250000)

Abstract: To address the premature cracking of a certain type of transmission sleeve, a comprehensive failure analysis was performed using methods including chemical composition analysis, hardness testing, case-hardening depth measurement, metallographic examination and microscopic fractography. The results indicate that the failure was primarily caused by two synergistic factors. Firstly, excessive blocky ferrite in the core microstructure led to insufficient core hardness, resulting in poor hardness compatibility with the connected main shaft and sun gear. Secondly, the actual fillet radius at the root of the internal spline was below the design lower limit, which aggravated the local stress concentration effect. Under cyclic loading, the combined action of these two effects initiated and propagated cracks at the fillet of the internal spline tooth root, leading to the final failure. Based on these findings, corresponding improvement measures are proposed from the aspects of optimizing the material heat treatment process and controlling critical structural dimensions.

Key words: Transmission sleeve, Failure analysis, Hardness, Stress concentration

1 前言

变速器作为车辆动力传输的核心部件，其内部齿轮、轴及连接件的可靠性直接关系到整车的运行稳定性与使用寿命，影响车辆出勤率并带来安全隐患。其中，过渡套作为连接主轴与太阳轮的关键连接件，通常通过花键结构传递扭矩，其服役工况复杂，主要承受交变的扭转应力与一定的弯曲应力。现有关于变速器失效的研究多集中于齿轮、轴类等核心传动零件[1-4]，如夏广明等[1]研究了齿面磨削烧伤导致的变速器中间轴齿轮早期失效，刘胜等[4]研究了原材料冶炼过程中元素在晶界偏析导致的变速器输出轴脆性沿晶断裂。李羽洁等[5]研究分析了由于卡簧疲劳断裂导致的变速器换挡异响，相比之下，关于由连接件开裂导致变速器早期失效的研究则尚显匮乏。为查明失效原因，本文针对由于过渡套开裂导致的某型号变速器故障问题，对开裂的过渡套进行全面理化检验

作者简介：郝欣欣（1996—），女，工程师，硕士学位，研究方向为金属材料开发应用与失效分析。

参考文献引用格式：

郝欣欣，陈冠方，纪同圣，等. 变速器过渡套开裂失效分析[J]. 汽车工艺与材料，2026(9)：19-24.

HAO X X, CHEN G F, JI T S, et al. Cracking Failure Analysis of Transmission Sleeve[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 19-24.

与断口分析，旨在从材料、工艺、结构等多维度揭示其失效机理，并为后续设计改进提供依据。

2 失效件描述

某型号变速器在运行一定时间后发生动力传输故障，经拆检发现过渡套开裂，该批次过渡套共出现4例失效问题，失效具有明显的批次性与早期性。过渡套材质为15CrMo合金结构钢，设计要求表面进行碳氮共渗处理，以提高表面耐磨性和接触疲劳强度，同时心部需保持一定的强韧性以承受载荷。过渡套通过内花键与主轴、太阳轮装配在一起，具体装配结构如图1所示。在运行中三者同步转动，过渡套的核心功能是传递主轴扭矩至太阳轮，从而驱动副箱工作，因此，其主要承受来自主轴的周期性扭转力矩。

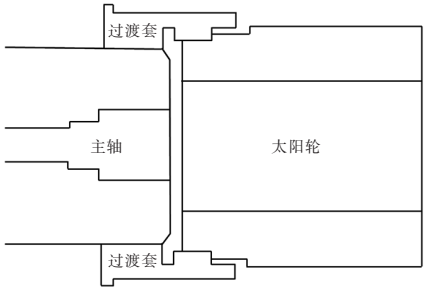


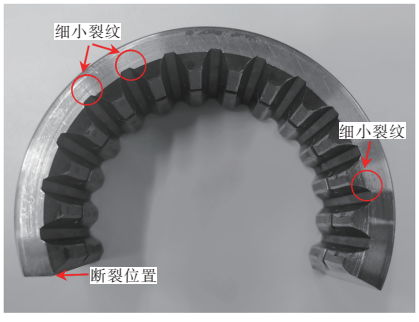
图1 装配结构示意

3 检验分析

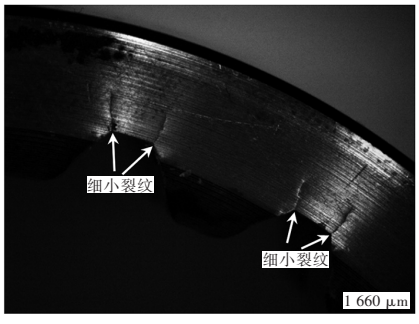
为系统探究过渡套开裂失效原因，对4件失效过渡套（编号分别为1#~4#）进行了一系列理化检验，检验项目包括：化学成分、表面硬度、心部硬度、金相组织、非金属夹杂物、硬化层深度及断口微观形貌观察等。

3.1 失效件宏观形貌观察

所有失效件开裂形貌基本一致，裂纹均发生在过渡套端面附近的内花键齿根圆角处，并向内部扩展。以1#件为例，其断口已磨损，开裂位置及裂纹形貌如图2所示。由图2可见，断裂位于内花键齿根处，且残余未断部分可见多处同样起源于内花键齿根圆角位置的细小裂纹，表明该区域为应力敏感区。放大观察这些细小裂纹的具体形貌，如图2b中箭头所指，可见裂纹已向内部扩展至一定深度，推测其为初始主裂纹出现后变速器继续运行或后续拆解所致的次生裂纹。



（a）整体形貌及开裂位置



（b）内花键齿根圆角处开裂形貌

图2 1#失效过渡套形貌

3.2 化学成分分析

利用ARL3460直读光谱仪对失效过渡套进行化学成分分析，结果见表1。根据表1可以看出，失效件的各元素含量均符合GB/T 3077—2015《合金结构钢》中对15CrMo钢的技术要求，排除了材料错用导致零件失效的可能性。

表1 化学成分分析结果（质量分数） %

化学成分	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
技术要求	0.12~0.18	0.40~0.70	0.17~0.37	0.80~1.10	0.40~0.55	≤0.030	≤0.030
1#	0.148	0.537	0.241	0.844	0.444	0.009 0	0.002 8
2#	0.157	0.542	0.251	0.849	0.444	0.009 1	0.002 8
3#	0.151	0.548	0.245	0.840	0.442	0.010 3	0.003 4
4#	0.151	0.539	0.245	0.841	0.441	0.009 2	0.003 0

3.3 硬度检验

采用华银200HRS-150型数显洛氏硬度计,依据GB/T 230.1—2018《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法》检验失效过渡套的表面硬度和心部硬度,检验结果见表2。所有失效件的表面硬度均符合59~63 HRC的技术要求,心部硬度实测值在21.3~24.9 HRC之间,虽符合图纸20~35 HRC的技术要求,但整体偏低,接近要求下限。

表2 硬度检验结果 HRC

样件编号	表面硬度实测值			表面硬度平均值	心部硬度实测值			心部硬度平均值
1#	59.1	59.0	59.0	59.0	21.0	21.7	21.2	21.3
2#	59.2	59.4	59.3	59.3	21.3	23.6	23.5	22.8
3#	59.1	59.2	59.2	59.2	24.1	24.3	24.7	24.4
4#	59.5	59.3	60.1	59.6	24.8	24.7	25.3	24.9

3.4 硬化层深度测定

利用ATM全自动硬度计,依据GB/T 9450—2005《钢件渗碳淬火硬化层深度的测定和校核》检测过渡套的硬化层深度,检验结果如表3所示,所有失效件的表面硬化层深度实测值均符合图纸0.3~0.5 mm的技术要求。

表3 硬化层深检验结果 mm

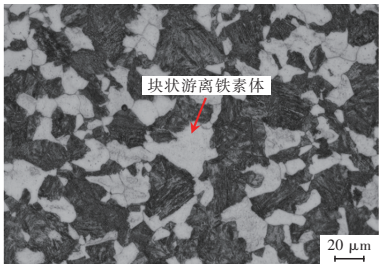
样件编号	技术要求实测值		平均值
	节圆	齿根	
1#	0.50	0.50	0.50
2#	0.50	0.38	0.44
3#	0.48	0.40	0.44
4#	0.46	0.40	0.43

3.5 金相组织与非金属夹杂物检验

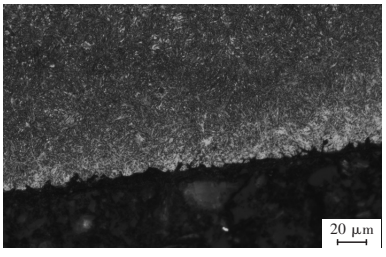
利用蔡司光学显微镜对失效过渡套进行金相检验,金相组织与非金属夹杂物的检验结果汇总于表4。各样件检验结果相近,以2#件为例展示其显微组织,如图3所示。参照QC/T 29018—2025《汽车碳氮共渗齿轮金相检验》标准评定,所有失效件的渗层表面组织(碳氮化合物、残留奥氏体、马氏体)级别均合格,且未发现明显的非金属夹杂物。然而,图3a中显示,心部组织存在大量游离的块状铁素体,其级别高达6级,高于汽车行业标准QC/T 29018—2025中1级~4级的合格级别。

表4 失效过渡套金相组织级别及非金属夹杂物检验结果

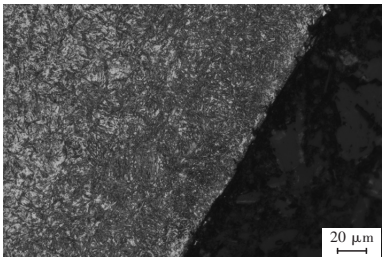
样件编号	心部组织	表面组织			非金属夹杂物
		碳氮化合物	残留奥氏体	马氏体	
1#	6级	1级	2级	2级	无明显非金属夹杂物
2#	6级	1级	3级	3级	无明显非金属夹杂物
3#	6级	1级	2级	2级	无明显非金属夹杂物
4#	6级	1级	2级	2级	无明显非金属夹杂物



(a)心部组织(500×)



(b)渗层表面碳氮化合物(400×)



(c)渗层表面马氏体及残余奥氏体(400×)

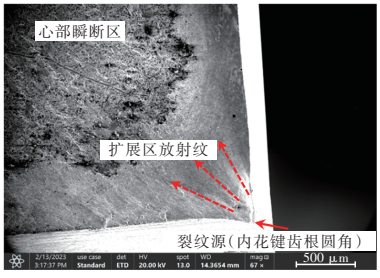


(d)非金属夹杂物(500×)

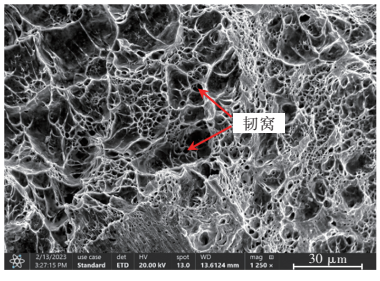
图3 2#失效过渡套显微组织

3.6 断口微观形貌观察

选取断口相对完好的2#和4#件试样，将其断口进行超声清洗后，利用赛默飞Apreo 2S场发射扫描电镜进行断口微观形貌观察。从图4a和图5a可以清晰观察到，裂纹均起源于内花键齿根圆角表面，沿裂纹源向内，在硬化层区域可见裂纹扩展痕迹（因轻微磨损而不甚连续）。将断口心部瞬断区放大观察，如图4b和图5b所示，瞬断区域的微观形貌以韧窝为主，表现为典型的微孔聚集型韧性断裂特征，说明最终断裂为快速过载断裂。

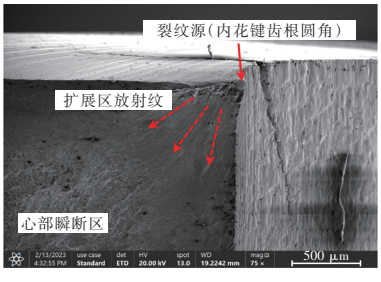


（a）裂纹源区SEM形貌

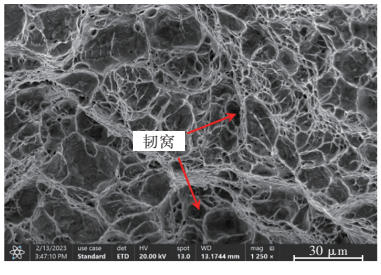


（b）心部区域韧窝形貌

图4 2#失效过渡套断口微观形貌



（a）裂纹源区SEM形貌



（b）心部区域韧窝形貌

图5 4#失效过渡套断口微观形貌

4 分析与讨论

以上理化检验结果表明，失效过渡套的化学成分、表面硬度、硬化层深度以及渗层表面组织均合格，需要关注的是，所有过渡套的心部硬度均处于图纸技术要求的下限，意味着心部强度偏低。根据断口分析结果，结合其早期性、批次性、裂纹源位置及断口形貌重复性高等特点，可以推测该过渡套失效起源于内花键齿根圆角处应力集中部位的早期开裂，在硬化层区域经过一定的扩展，最终快速过载断裂。因此，若要进一步探究其失效的根本原因，需要从影响零件抗疲劳性能的心部硬度和引发应力集中的内花键齿根圆角几何尺寸2个维度进行深入分析。

4.1 心部硬度不足是导致早期失效的内在因素

失效过渡套与主轴、太阳轮的硬度匹配性较差。过渡套的心部硬度要求（20~35 HRC）设定较低，实测值（21.3~24.9 HRC）更是处于该范围的下限。相比之下，与其配合传递扭矩的主轴心部硬度要求为≥30 HRC，太阳轮心部硬度要求为31~43 HRC，两者均大于失效过渡套实测心部硬度，且远大于过渡套的心部硬度要求下限。这种硬度、强度上的不匹配，使得在相同的扭矩载荷下，过渡套成为整个传动链中的“薄弱环节”。此外，心部硬度直接影响零件的弯曲疲劳强度，陈国民[6]指出，对于渗碳/碳氮共渗齿轮类零件，心部硬度存在一个最佳范围，如图6所示，在35~42 HRC区间内，弯曲疲劳强度最高。心部硬度过低，零件的疲劳强度将显著下降。

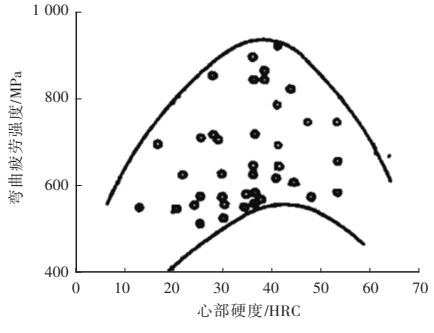


图6 齿根心部硬度对弯曲疲劳强度的影响[6]

心部铁素体的含量对零件的综合性能具有重要影响。金相分析显示了失效过渡套心部存在大量块状铁素体，这与其心部硬度较低相对应。铁

素体是软质相,其大量存在会显著降低材料的硬度、屈服强度和抗拉强度。相关试验表明,心部铁素体组织增多会降低零件的冲击性能和疲劳强度[7]。铁素体含量较多的基体组织对表面硬化层的支撑不如低碳板条状马氏体,这使得零件虽然满足最低心部硬度的技术要求,但未能获得理想的表面与心部强韧性配合,在较高载荷条件下,易使硬化层发生早期开裂。

零件经碳氮共渗处理后,心部出现大量铁素体,主要与其热处理工艺控制有关:

a.淬火加热温度偏低。加热温度未达到或仅勉强达到材料的完全奥氏体化温度Ac3。对于15CrMo这类含有铬、钼等合金元素的钢材,其Ac3点较普通碳钢更高,若加热温度不足,心部原始组织无法完全转变为成分均匀的奥氏体,残留的未溶铁素体在后续冷却中便会保留下来。文献[8]中提到,随着淬火温度的不断提升,心部铁素体的含量逐渐减少。

b.保温时间不足。即使加热温度足够,若保温时间过短,碳及合金元素在心部的扩散不充分,无法实现奥氏体成分的均匀化。在心部某些区域,特别是微观成分偏析带,会因碳含量或合金元素含量较低而难以完成奥氏体化转变,最终以未溶块状铁素体的形式存在。

c.淬火冷却速度不足。当实际淬火冷却速度(如油温过高、搅拌不足、淬火介质选择不当)低于临界冷却速度(指获得完全马氏体组织所需的最小冷却速度)时,奥氏体将在向马氏体转变之前于晶界处率先析出先共析铁素体,并保留下来,最终使得淬火后心部变为“先共析铁素体+马氏体”的混合组织。

除上述核心工艺原因外,材料的淬透性、热处理设备及工装等其他因素也可能导致铁素体过量形成[3,8]。

4.2　内花键齿根处应力集中是裂纹萌生的外在诱因

断口分析一致表明,所有裂纹均起源于内花键齿根圆角处,该结果明确指向几何结构导致的局部应力异常。根据弹性力学理论,在类似轴肩、键槽等截面几何形状突变处,会产生显著的应力集中效应,内花键齿根部圆角处正是此类应力集中敏感区。本案例中,过渡套图纸要求内花键齿根倒圆角$R(0.5^{0}_{-0.3}\ \mathrm{mm})$,其设计意图在于通过合理的圆角使应力过渡平滑。然而,通过对失效件比对测量,如图7所示,发现实际加工获得的齿根圆角半径较小,不足0.2 mm,已低于图纸尺寸要求下限。应力集中系数对圆角半径极为敏感,随着圆角半径的减小,将导致齿根到齿侧的过渡陡峭,应力集中系数升高[9],在变速器交变载荷作用下,此区域产生的局部峰值应力极易超过材料的强度极限。相关研究[10-11]表明,花键类零件圆角过渡处的应力集中是引发断裂的常见原因,而增大过渡圆角半径则是改善应力分布、提高寿命的有效措施。

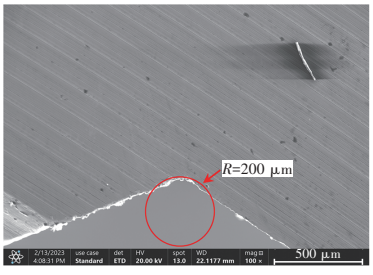


图7　失效过渡套内花键齿根圆角形貌

综合以上分析,该变速器过渡套的早期开裂失效机理可归纳为:在周期性传递扭矩的运行条件下,由于心部硬度偏低、强度不足(伴随过量铁素体组织),使得零件的抗疲劳、冲击性能下降。与此同时,内花键齿根圆角处实际圆角半径偏小,造成了较高的几何应力集中。在双重因素的叠加效应下,齿根应力集中区在远低于设计寿命的循环载荷后,便萌生初始裂纹。裂纹扩展至一定深度后,剩余截面无法承受工作载荷,最终发生快速韧性断裂。

5　改进措施

基于上述失效机理分析,该变速箱过渡套早期开裂的主要原因可总结为心部硬度不足和内花键齿根圆角处应力集中两方面。针对此原因,分别从热处理工艺优化和齿根圆角结构的尺寸控制两个方面制定了相应的改进措施,并已在实际生产中实施。

失效过渡套的原心部硬度技术要求为20~35 HRC,控制范围较宽且下限过低,若产品实际控制硬度靠近下限,则难以满足实际服役条件下的疲劳性

能需求。为匹配主轴和太阳轮的硬度，经分析评估，将过渡套的心部硬度合格范围提升至30~40 HRC，抬高了硬度下限，以增强其抵抗交变载荷的能力。具体工艺改进措施为：优化碳氮共渗淬火工艺，通过适当提高淬火温度，减少心部块状铁素体含量，使心部硬度稳定控制在改进后的30~40 HRC要求范围内。同时，加强管控内花键齿根应力集中区圆角半径，严格按照图纸规定的内花键齿根倒圆角$R(0.5^{0}_{-0.3}\ \mathrm{mm})$尺寸要求，将圆角半径尺寸尽量控制在中上限范围，对每批次产品进行首检和抽检，确保圆角过渡平滑，尺寸合格。改进后的过渡套装车后，经市场跟踪反馈，未再出现同类早期开裂故障，表明失效原因分析正确，改进措施合理。

6 结论

a. 该批次变速器过渡套裂纹源均位于内花键齿根圆角处，心部硬度不足、内花键齿根应力集中区圆角半径偏小是导致其开裂失效的主要原因。

b. 基于失效原因，通过优化热处理工艺，提高了过渡套的心部硬度，实现与主轴、太阳轮的硬度匹配；严格控制内花键齿根圆角的加工质量，将其尺寸控制在图纸要求的中上限，有效降低应力集中，最终保证了变速器过渡套的整体使用寿命和性能。

参考文献：

[1] 夏广明, 邵亮, 张国政, 等. 商用车变速器中间轴齿轮早期失效分析[J]. 汽车工艺与材料, 2019(12): 37-39.

[2] 刘胜, 尹张浩, 仲大伟, 等. 变速箱六档齿轮断裂分析及解决措施[J]. 理化检验-物理分册, 2013(3): 191-193.

[3] 陈慧. 某车用变速器输出轴齿轮断齿失效原因分析[J]. 柴油机设计与制造, 2019(2): 27-32.

[4] 赵君, 贾世川, 张娜. 变速器输出轴断裂失效分析[J]. 汽车实用技术, 2024(22): 93-95.

[5] 李羽洁, 刘银, 张凤格, 等. 变速器换挡异响原因分析[J]. 汽车工艺与材料, 2020(6): 37-41.

[6] 陈国民. 齿轮钢材和热处理质量及其控制(二)[J]. 汽车工艺与材料, 2003(3): 10-13.

[7] 王书艳. 渗碳齿轮心部铁素体对性能影响的分析[J]. 研究与开发, 2020(6): 63-64.

[8] 郝丰林, 王美峰, 陈正国. 渗碳淬火出现块状铁素体的原因分析[J]. 金属加工(热加工), 2024(4): 30-36.

[9] 李丹, 陈伟, 李昌华, 等. 齿根过渡圆角对齿轮弯曲强度的影响[J]. 机械工程师, 2014(1): 190-192.

[10] 徐莎, 张再利, 宫峰, 等. 矿用机械电机转轴断裂失效分析与设计优化[J]. 煤矿机械, 2023(1): 90-92.

[11] 孟祥刚. 滚压成形外花键过渡齿根的 CAE 分析与结构改进[J]. 北京汽车, 2021(1): 52-55.

AT&M