

汽车变速器输出轴断裂失效分析与优化研究

葛成荣, 李炯, 徐伟, 韩东序

常州工业职业技术学院机械与交通学院 江苏常州 213164

摘要: 汽车变速器是动力传递系统的核心组件,其可靠性直接影响汽车的行驶性能。某型汽车变速器在设计和加工过程中严格遵循相关规范,但在海试过程中出现了输出轴断裂失效的严重问题。通过对输出轴的设计方案、加工工艺、静扭性能试验以及微观形貌(电镜扫描)等多因素的分析,系统地揭示了其失效形式和根本原因。研究发现,输出轴断裂属于少见但关键的失效模式,往往未得到充分关注。针对这一问题,提出了系统的优化改进措施,为类似失效案例提供了重要的参考依据。研究结果不仅有助于提升汽车变速器的可靠性设计水平,也为后续相关产品的研发和改进提供了科学指导。

关键词: 变速器输出轴; 断裂失效; 静扭试验; 电镜扫描; 优化

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.04.010

变速器是汽车动力系统中的关键部件,主要由输入轴、输出轴和齿轮系统组成。其中,输出轴的主要功能是将转矩和转速传递给推进轴、驱动螺旋桨或其他推进装置。因此,变速器输出轴是汽车动力传递系统的核心部件,研究其断裂形式并分析原因对汽车变速器的结构优化和可靠性提升具有重要意义。

董雪娇^[1]等采用扫描电镜和常规检验方法分析水泵轴的断裂原因,指出中间轴断裂主要是不合理的热处理降低了轴的耐腐蚀性和韧性,导致沿车削加工刀痕产生应力腐蚀裂纹,进而断裂。李艳^[2]等和Zhao L H^[3]等的研究案例中,轴的设计造成局部圆角应力集中。

周利东^[4]等指出滚筒轴滚筒轴发生脆性疲劳断裂、轴断裂处过渡圆角半径较小、断裂处产生应力集中失效的情况。史志刚^[5]等的研究中主轴基体材质和熔覆质量不合格产生裂纹。范景峰^[6]等和耿翌杰^[7]指出轴发生断裂的主要原因是轴颈处的应力集中现象。谢纳冰^[8]等的案例中应力集中和焊接缺陷是造成轴疲劳破坏或断裂失效的主要原因。徐钦华^[9]等和张杰^[10]等研究结果显示失效工件内部存在的冶金夹渣和非金属夹杂物、腐蚀疲劳是产生疲劳裂纹的萌生源。殷志碗^[11]等的研究结果显示驱动轴外表面石墨分布较少,且二次渗碳体呈网状分布是导致驱动轴疲劳断裂的根本原因。王欢锐^[12]等和

曹蕾蕾^[13]等指出锻造过程中的表面和加工过程中的应力集中导致失效。

总之，已经有很多文献对变速器输出轴断裂原因进行研究，研究结果显示输出轴的断裂与材料特性、设计加工和装配方式相关，很少有文献指出变速器输出轴会因为未受到过载保护装置的过载保护而断裂，本文首次提出过载保护失效的关联机制。

输出轴的设计与加工

1.输出轴的设计

机械结构的设计与加工需要遵循相应的行业规范^[14~16]，对于承受转矩的轴类结构通常需要满足扭转强度条件。由于输出轴花键处为结构薄弱位置，因此，输出轴花键处的扭剪应力需要满足

τ_T = (T_n / W_T) d [τ_T]

式中 τ_T——扭剪应力 (MPa) ；
T_n——轴承受的转矩 (kN·m) ；
W_T——抗扭截面系数 (mm³) ；
[τ_T]——轴的许用扭剪应力，取412.5MPa。

此外，花键轴经常承受周期载荷，因此也需要满足疲劳安全系数

S_{cd} = (S_σS_τ / √(S_σ² + S_τ²))

式中 S_{cd}——疲劳安全系数；
S_σ——轴向疲劳安全系数；
S_τ——切向疲劳安全系数。

以上两个参数计算公式为

{ S_σ = (σ₋₁ / (K_σσ_a + ψ_σσ_m))
S_τ = (τ₋₁ / (K_ττ_a + ψ_ττ_m))

式中 σ₋₁——零件对称弯曲疲劳循环极限；
K_σ——正应力条件下有效应力集中系数；
σ_a——零件危险面处的变应力；
ε_σ——尺寸影响分数；
β_σ——表面质量影响分数；
ψ_σ——疲劳等效分数；
σ_m——零件危险面处的平均应力；
τ_m——扭转应力。

下标为τ的表示切应力条件下系数。

2.输出轴的校核

前面介绍了设计输出轴时用到的相关准则，现在将输出轴的具体参数予以展示，并与规范值进行比较。案例中输出轴材料为20CrMo，表面硬度为（61±3）HRC，渗碳层深度为0.5~0.8mm（550HV1），心部硬度为32~48HRC。技术参数见表1。

表1 输出轴技术参数表

参数	T _n / (kN·m)	W _T /mm ³	σ ₋₁ /MPa	K _σ	σ _a /MPa	ε _σ	β _σ	ψ _σ	σ _m /MPa	τ ₋₁ /MPa	K _τ	τ _a /MPa	ε _τ	β _τ	ψ _τ	τ _m /MPa
值	1294.5	3638.3	490	1.75	172.2	0.83	1.3	0.2	0	304	1.6	41.23	0.89	1.3	0.1	41.23

根据表1，计算得到输出轴承受的扭剪应力τ_T=355.8MPa，安全系数S_{cd}=1.669，以上两个参数均符合设计要求。

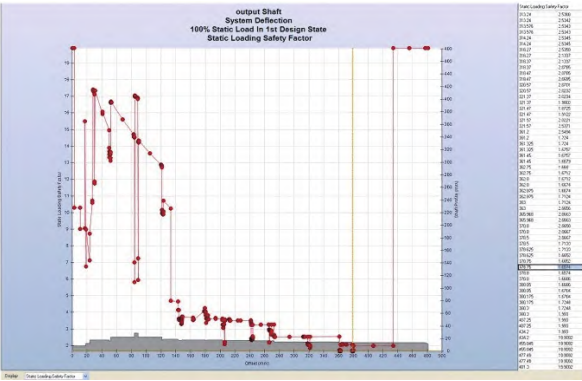
进一步在Masta中模拟输出轴真实使用工况，分析得到输出轴的静态安全系数和疲劳安全系数，如图1所示。

图1a表明输出轴静力安全系数最小值为1.6574，大于设定要求值1.4。图1b显示输出轴疲劳安全系数为最小值1.4798，大于设定要求值1.2。仿真结果表明：静态安全系数和疲劳安全系数都符合设计要求。

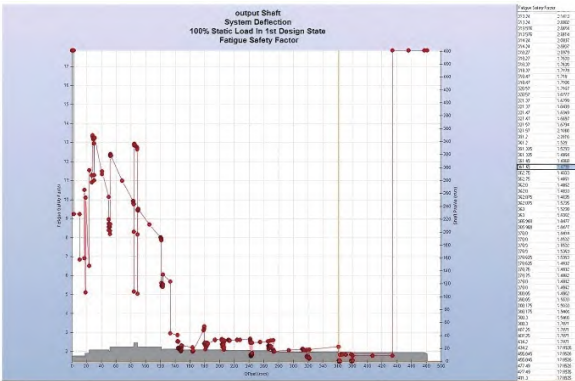
3.输出轴的加工

前面的分析显示，输出轴承受的转矩和疲劳不足以引起结构失效，这里将对输出轴的加工过程进行分析。

输出轴的加工一般包括锻造制坯、正火、精车加工和热处理。对各环节的跟踪结果显示每个环节都严格按照规范执行，输出轴的直线度，表面处理及硬化都符合要求。以扭转角度为横坐标，输入转矩为纵坐标绘制输出轴静扭试验曲线，如图2所示。



a) 静态安全系数



b) 疲劳安全系数

图1 仿真校核结果

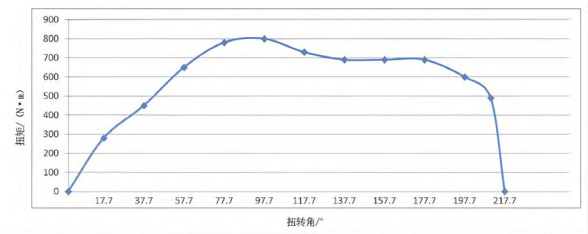


图2 输出轴静扭试验曲线

从图2可以看出，曲线在坐标（92.7°，797.1N·m）处出现拐点，这表明当输入转矩达797.1 N·m时，输出轴才断裂失效。由于发动机能提供的最大转矩为290 N·m，因此，设计的输出轴有2.5倍后备系数。这再次证明案例中输出轴的断裂失效与设计加工无关。

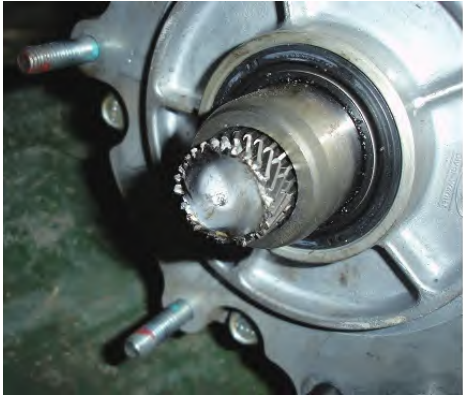
失效原因分析

1.失效形式宏观分析

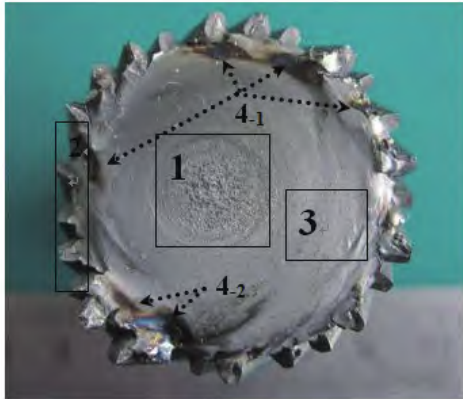
通过对多个失效变速器输出轴的观察和分析，发现其失效主要集中在输出轴花键收尾处，即与结合套连接外的部位，如图3a所示。图3b展示了断口宏观特征形貌，其中，区域1呈银灰色，有清晰放射棱线，表面粗糙，呈现脆性快速断裂特征，表明该区域为为瞬断区；区域3为暗灰色，相对平坦，表面较粗糙，有细腻的韧性纤维状断裂特征，说明该区域为裂纹扩展区^[17, 18]；区域4为疲劳源区。因输出轴受到转矩的作用，故出现了多个疲劳源区。

2.失效形式微观分析

宏观形式确定了输出轴断裂的位置及断口形貌，



a) 断裂位置



b) 断口形貌

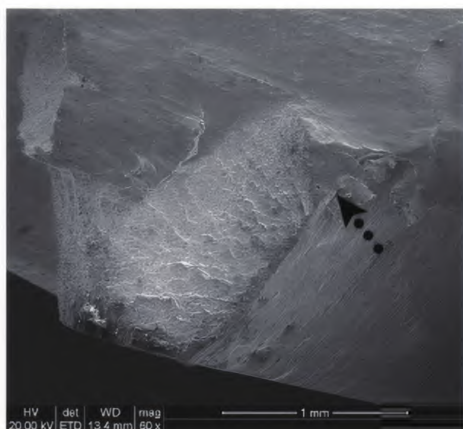
图3 输出轴断口位置及形貌

但还不足以确定断裂的具体原因。由于电镜扫描可以对组织进行形貌和断口分析，确定材料元素种类和含量，展示晶体结构，接下来将对输出轴断口进行电镜扫描，从微观形式进一步解释断裂原因。

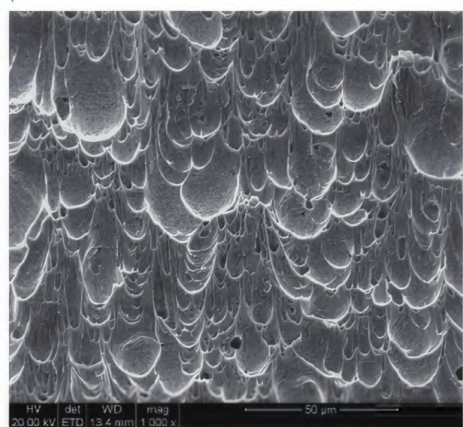
将失效变速器输出轴的断口置入扫描电镜里进行观察，得到图4。图4表明输出轴失效是从花键齿面形



a) 第一组低倍SEM形貌



b) 第二组低倍SEM形貌



c) 高倍SEM形貌

图4 断口扫描结果

成，呈现为多源断裂特征，这一多源断裂主要由输出轴承受扭转载荷造成低周疲劳。断口形貌具有韧窝特征，心部微观组织特征为贝氏体+低碳马氏体+少量的铁素体组织，由于渗碳淬火时输出轴心部为低碳马氏体，而低碳马氏体具有微观韧性断裂特点，这说明心

部组织具有良好的微观韧性。

接着，对失效起始处花键齿面的断口进行扫描，电镜扫描结果显示微观形貌呈现为沿晶断口，次表面呈现为沿晶+准解理断口特征，如图5所示。同样，在渗碳淬火时输出轴表面为高碳马氏体，而高碳马氏体具有微观脆性断裂。图5表明断口特征与零件的热处理状态相一致。

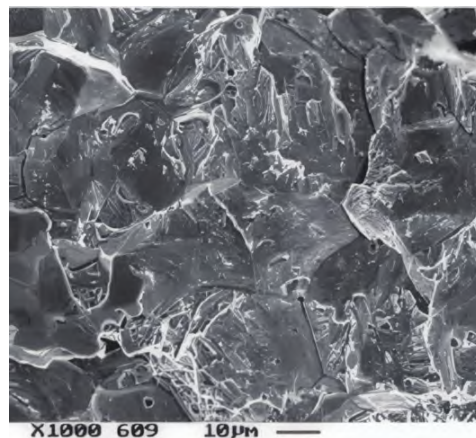


图5 沿晶断口微观形貌

从以上的分析可以得出，输出轴的设计和加工都满足相关规范，输出轴的断裂具有低周疲劳特征。根据试验失效时的转矩分析^[19-21]，试验时实际载荷超过零件的设计极限强度，而此时传动系统中的过载保护装置因后备系数过大没有对变速器进行过载保护。

明确变速器输出轴断裂原因之后，提出以下优化措施：

- 1) 改进输出轴原材料的性能。
- 2) 增大花键根部R角，减少应力集中。
- 3) 降低过载保护装置的后备系数。

通过改进输出轴原材料的性能、增大花键根部R角（应力峰值降低约23%），减少应力集中，经过计算，输出轴原材料总成静扭强度增加了约16%。同时，降低过载保护装置的后备系数，在变速器输出轴超过承担能力之后对其进行必要的保护，优化后的变速器输出轴再也没出现断裂情况。

结语

以某汽车变速器在跳挡路试过程中出现的输出轴断裂为研究对象，论述了输出轴的设计与加工过程，通过对输出轴断口的形貌及电镜扫描分析，得到以下

结论:

1) 规范的设计与加工有利于提高零部件性能。静扭试验结果表明输出轴能承受的转矩远远大于设计值,电镜扫描结果显示断裂形式符合热处理之后材料的特征。

2) 低周疲劳是输出轴满足设计加工要求之后依旧失效的重要因素。本案例中输出轴的设计与加工均满足规范,电镜扫描结果显示输出轴的断裂主要由低周疲劳造成。

3) 车辆设计过程中要统筹整体与局部。本案例中尽管输出轴零件的设计与加工满足规范,但过载保护装置未能实现对传动系统的过载保护导致变速器输出轴断裂。

参考文献:

- [1] 董雪娇, 吴安术, 杨大巍, 等. 40Cr水泵轴断裂失效原因分析[J]. 铸造, 2021, 70 (11): 1345-1349.
- [2] 李艳, 向东, 韦尧中, 等. 铸造桥式起重机卷筒轴断裂失效分析[J]. 机械设计与制造, 2024 (04): 351-356+360.
- [3] Zhao L H, Xing Q K, Wang J Y, et al. Failure and root cause analysis of vehicle drive shaft[J]. Engineering Failure Analysis, 2019 (99): 225-234.
- [4] 周利东, 曾雪林, 杨秀峰, 等. 带式输送机滚筒轴断裂原因分析[J]. 煤炭技术, 2021, 40 (11): 193-195.
- [5] 史志刚, 冯铁玲, 刘雪峰. 某风电机组主轴断裂原因分析[J]. 热力发电, 2022, 51 (12): 186-192.
- [6] 范景峰, 梅二召, 董振波. 汽车传动轴轴颈断裂分析与优化[J]. 机械, 2020, 47 (7): 7-14.
- [7] 耿翌杰. 某型内燃机车曲轴失效分析[D]. 辽宁: 大连海事大学, 2024.
- [8] 谢纳冰, 杨娜, 瞿喜强, 等. 黄化机搅拌轴断裂成因及疲劳寿命[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47 (6): 44-50, 65.
- [9] 徐钦华, 彭志贤, 李明扬, 等. 铁路棘轮补偿用不锈钢销轴开裂失效分析[J]. 材料保护, 2020, 53 (11): 154-159.
- [10] 张杰, 闫渊, 吴峰. 高含硫天然气净化装置再生塔底贫胺液泵泵轴失效分析与试验研究[J]. 流体机

械, 2020, 48 (10): 54-58.

- [11] 殷志碗, 汤葱葱, 李广州, 等. 螺杆式制冷压缩机球墨铸铁驱动轴断裂失效分析[J]. 材料保护, 2020, 53 (8): 149-152.
- [12] 王欢锐, 周彬, 刘荣, 等. 某商用车前轴早期疲劳断裂失效模式及原因分析[J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 192-197.
- [13] 曹蕾蕾, 康凡军, 郭城臣, 等. 变速箱中间轴焊接结构多轴疲劳寿命分析方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34 (13): 1605-1610, 1627.
- [14] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [15] 吴世权, 李俊斌, 宋春, 等. YL33000型烟气轮机非典型叶片断裂分析及优化改造[J]. 机械设计与研究, 2024, 40 (4): 177-179, 186.
- [16] 崔庭琼, 李以农, 张运涛, 等. 非对称传动系统主轴断裂机理分析与结构优化研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41 (18): 104-112.
- [17] 张文涛, 刘凯歌, 郭培锐, 等. 某圆柱滚子轴承内圈断裂故障原因分析及工艺优化[J]. 轴承, 2021 (11): 42-46.
- [18] 章德发, 赖修. 汽车用60Si2Mn钢前稳定杆断裂分析及优化设计[J]. 机械工程材料, 2020, 44 (8): 88-92.
- [19] 郝梓超, 陈恩伟, 丁凯, 等. 地铁B型车轴端接地系统部件断裂原因分析及部件优化[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (4): 74-77.
- [20] 姬芳芳, 刘东亮, 李志永, 等. 地铁车辆轴箱吊耳断裂分析及优化[J]. 机械强度, 2022, 44 (2): 461-467.
- [21] 李强, 邓熠, 杨伟, 等. 航空发动机用齿轮泵齿轮轴疲劳断裂分析与优化设计[J]. 机床与液压, 2024, 52 (8): 208-212. **AUTO1950**