汽车悬架推力杆支架失效分析

□ 东风汽车集团有限公司/陈然　胡赞　杨丽卉　张月　黄文长

某试验车行驶1.9万km后出现悬架系统推力杆支架开裂故障。为探寻推力杆支架开裂原因，对失效件进行断口宏观分析、金相组织分析及硬度检测。结果表明，推力杆支架开裂的根本原因是螺栓安装沉孔圆角过小且加工刀痕粗大引起的应力集中，从而造成支架疲劳开裂。而支架底座基体存在粗大柱状枝晶偏析和上贝氏体组织，加速了裂纹的扩展，导致推力杆早期疲劳开裂。

推力杆主要应用于重型汽车的双桥平衡悬架上，它的应用提高了重型汽车特别是重型专用汽车轮胎的接地性，保证了各种工况下两桥或多桥之间载荷的均衡性。推力杆支架一端连接推力杆球头，另一端连接驱动桥壳。汽车在紧急制动时，平衡悬架推力杆支架受力最大。

某车型道路试验行驶1.9万km后出现推力杆支架开裂，开裂位置在支架底座螺栓安装孔边缘，裂纹贯穿整个底座。本文运用失效分析基本方法对其进行失效分析。

推力杆支架材料为ZGD650-830，主要工艺过程：浇注→开箱→热处理→加工沉孔→涂防锈黑漆。

失效原因

1.宏观及断口分析

（1）断口宏观。推力杆支架开裂位置在底座螺栓安装孔附近，裂纹进一步扩展将导致底座脱离安装孔。裂纹沿螺栓孔边界向内部延伸直到底部，如图1所示。4个安装孔平面均未见螺栓松动造成的磨损痕迹。为了更好地固定螺栓，在该支架底座4个安装孔上加工出一个与螺栓法兰面相配合的环形平台，裂纹位于环形平台边界处。加工的环形平台在底座表面形成一个沉孔，最深处约3mm。沉孔根部并未做倒角处理。

打开裂纹观察断口，断口锈蚀严重，呈现出多源疲劳断裂特征。疲劳源位于螺栓孔安装平面边缘处，可见明显一次疲劳台阶，台阶较发达且深入断口2/3左右。疲劳台阶为疲劳断口的基本特征，一次疲劳台阶出现在疲劳源区。发达的疲劳台阶表明该区域应力集中程度较大。由于断口锈蚀较严重，疲劳弧线不是很明显，但仍可辨别。疲劳弧线是裂纹扩展过程中，其顶端的应力大小或状态发生变化时在断面上留下的塑性变形痕迹。断口疲劳扩展区较平滑，打开断口形成的瞬断区位于支架底部，瞬断区占整个断面约5%，如图2所示。

用脱漆剂去除断口周围的黑漆，观察疲劳源附近的表面。表面可见环状刀痕中间分布着鱼鳞状加工痕迹。这些鱼鳞状刀痕的产生通

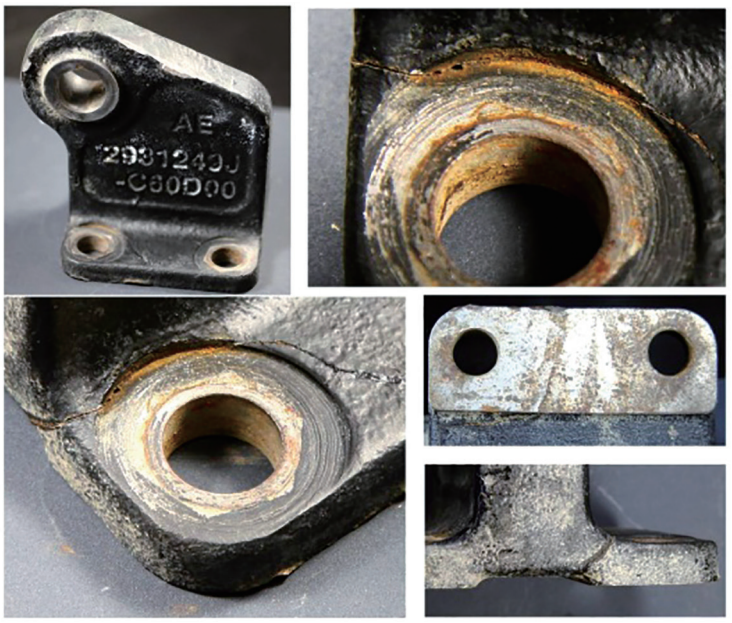

图1　推力杆支架裂纹形貌

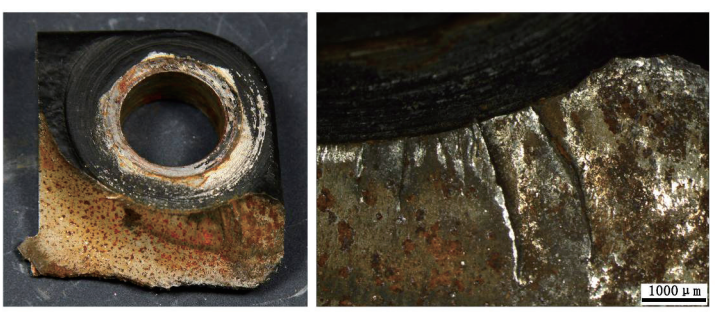

图2　推力杆支架断口形貌

常与加工过程中刀具颤动有关。裂纹源处的疲劳台阶正好起源于环状刀痕最外侧，如图3所示。

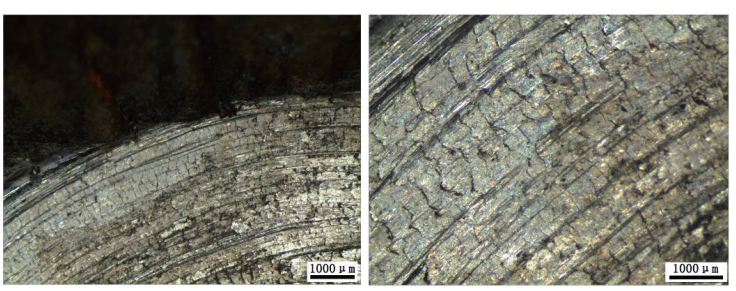

图3　疲劳源附近沉孔平面形貌

（2）断口微观。在扫描电镜下观察断口，疲劳源区的疲劳台阶清晰可见，多源疲劳特征明显。高放大倍数下，疲劳辉纹与扩展方向垂直。扩展区的二次裂纹较丰富，表明裂纹扩展过程中材料局部韧性较差，如图4所示。

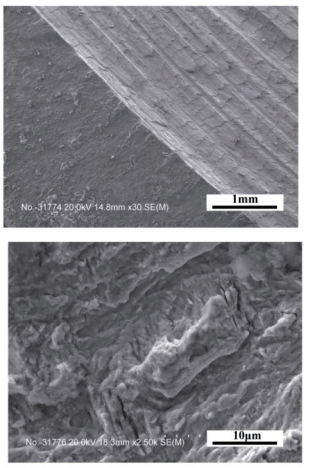

图4　疲劳源区和扩展区形貌

2.粗糙度检测

使用激光共聚焦显微镜对沉孔平面进行粗糙度检测，结果表明该粗加工表面粗糙度值的Ra=116 μm，如图5所示。表面质量越高，构件的疲劳极限越高。推力杆支架表面加工质量较低，这将显著降低其疲劳极限，导致早期疲劳开裂。

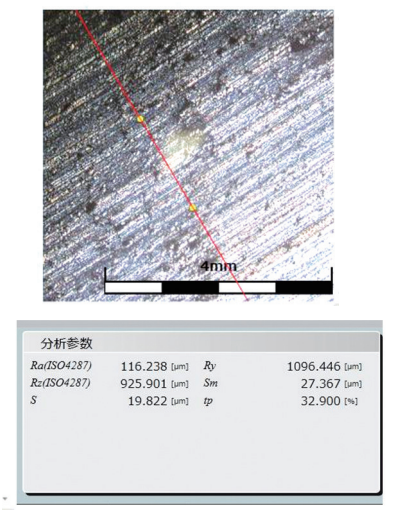

图5　沉孔平面粗糙度

3.金相分析

沿断口垂直面取样观察金相，疲劳源区金相组织和基体金相组织一样，均为上贝氏体+回火索氏

体。金相试样在较低倍数下观察，可见明显粗大柱状枝晶偏析，如图6所示。粗大枝晶偏析对支架力学性能影响较大，严重降低材料塑性和韧性。粗大枝晶偏析存在表明支架在进行调质处理前并未进行退火处理，或处理不充分。铸钢ZGD650-830调质处理希望得到的组织是回火索氏体。大量上贝氏体出现在ZGD650-830铸钢件中属于不正常组织。上贝氏体的形成与淬火时支架冷却速度较慢有关。上贝氏体的渗碳体是以片状分布在界面，很大程度上降低了材料的塑性和韧性。在载荷作用下，碳化物与贝氏体、铁素体首先分离，产生微裂纹，然后裂纹进行扩展。

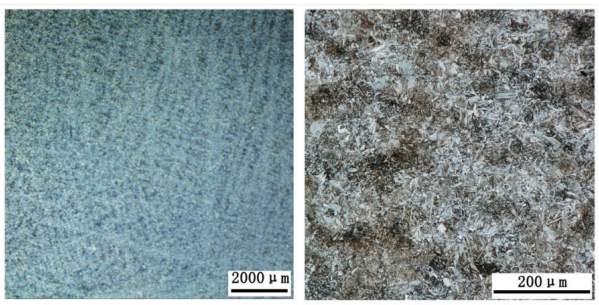

图6　推力杆支架失效沉孔基体金相组织

4.硬度检测

在推力杆支架基体上选取5个点检测维氏硬度，值均为295HV0.5，根据GB/T 33362—2016换算抗拉强度为950MPa，高于GB/T 14408—1993 对抗拉强度的要求，见表1。

表1　推力杆支架硬度检测结果

零件名称	实测硬度值HV0.5	换算抗拉强度/MPa（根据GB/T 33362－2016）	判断
推力杆支架	273/289/294/301/317（均值295）	950	偏高

在推力杆支架底座上取样，使用电火花直读光谱仪检测其化学成分。检测结果表明S、P含量符合GB/T 14408—2014对ZGD650-830的要求，具体成分见表2。

表2　推力杆支架化学成分检测结果（质量分数）　（%）

w_t	C	Si	Mn	P	S
检测值	0.315	0.77	1.061	0.0221	0.0081
ZGD650－830	—	—	—	≤0.040	≤0.040

5.有限元分析

根据推力杆支架实际受力情况，应用CATIA软件进行推力杆工作状态下应力分布有限元分析（见图7）。输入边界条件，计算结果表明在沉孔根部存在应力集中，且最大应力σ_{max}=426MPa，最小应力σ_{min}=25MPa。

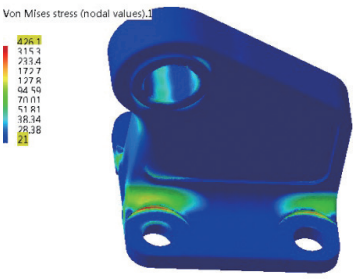

图7　失效沉孔根部应力最大时推力杆支架应力分布

分析讨论

1）根据断口分析和支架受力情况可知，该推力杆支架开裂属于拉压疲劳开裂。在疲劳源区沉孔根部发现了大量且发达的一次疲劳台阶，表明此处应力集中程度较大。应力集中是指零件局部区域的最大应力值比平均应力值高的现象。观察沉孔根部表面状态，发现环形粗糙的加工痕迹；沉孔根部半径较小进一步增强了应力集中程度。因此，推力杆支架疲劳开裂主要原因是不正确的加工造成的应力集中。

2）观察断口垂直面上的金相组织可知，该推力杆支架基体组织存在严重枝晶偏析和上贝氏体组织。与要求的回火索氏体相差较大。这种不正常的组织促进了裂纹的扩展，加快了开裂速度。

3）校核疲劳强度。根据非对称循环下构件的疲劳强度条件式为

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta}\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} \geqslant n \quad (1)$$

式中　n_σ——推力杆的工作安全因数；

n——推力杆的设计安全因素，对于推力杆较重要的受力部件，规定n=2；

σ_{-1}——对称循环交变应力材料持久极限；

β——表面质量系数；

ε_σ——尺寸系数；

K_σ——有效应力集中系数；

ψ_σ——为敏感系数；

σ_m——平均应力。

根据推力杆支架沉孔附近表面加工质量、沉孔尺寸、沉孔形状、材料及受力状态等查询《抗疲劳设计手册》，取β=0.7，ε_σ=0.95，ψ_σ=0.25，K_σ=2.2。

根据经验公式

$$\sigma_m=0.23(\sigma_s+\sigma_b) \quad (2)$$

推力杆实测的硬度值换算为σ_b=950MPa。推力杆支架材料为ZGD650-830屈强比取0.75，换算得σ_s=712MPa，代入得σ_{-1}=382MPa。

$$\sigma_\alpha=(\sigma_{max}-\sigma_{min})/2 \quad (3)$$

$$\sigma_m=(\sigma_{max}+\sigma_{min})/2 \quad (4)$$

有限元分析所得最大应力σ_{max}=426MPa，最小应力σ_{min}=25MPa。所有数值代入计算得n_σ=0.54<2，故推力杆支架疲劳强度不满足要求，经过一定的工作周期后，在沉孔根部必然发生疲劳断裂。

4）与生产厂家沟通后得知，推力杆支架定义了热处理后金相组织要求为回火索氏体，但未定义沉孔加工表面粗糙度和沉孔根部的倒角。故推力杆支架开裂根本原因是零部件设计阶段的失误造成的。

改进建议

1）推力杆支架调质处理前增加均匀化退火处理，消除枝晶偏析；提高淬火冷却速度，消除上贝氏体组织。

2）增加螺栓安装沉孔根部倒角定义或将沉孔改为凸台，降低表面粗糙度。

结语

1）推力杆支架是单向拉压疲劳开裂。

2）推力杆支架裂纹起源于沉孔根部，沉孔根部半径过小和粗大的加工刀痕是导致疲劳开裂的原因。

3）推力杆支架基体异常的金相组织加速了裂纹扩展。

4）推力杆支架材料化学成分符合要求。AUTO1950

（上接第52页）

位置所受的力在悬置螺栓处和壳体螺栓孔位置处分别进行加载和有限元分析。

有限元分析数据显示：螺栓位置的最大应力为37.258MPa。根据表1数据，螺栓的抗拉强度为1 205MPa，螺栓强度满足实际要求，也符合实际路试的状况。壳体螺栓孔位置处的最大应力为41.637MPa，与表2的数据对比可发现，壳体实际的强度要求满足路试工况下壳体螺栓孔处所受的强度。材料强度：根据提供的报告，得到屈服强度为108MPa。

经过受力计算和有限元分析，在不考虑壳体材料缺陷的情况下，螺栓拧入壳体内的有效深度为21mm，壳体螺纹牙所能承受的力可以满足整车路试工况的受力要求。

表1　联接螺栓实测力学性能数值　（单位：MPa）

10.9级螺栓	技术要求	检测结果
抗拉强度	≥1 000	1 205
屈服强度	≥900	1 023

表 2　变速器壳体实测材料力学性能数值（试棒检测）

检测项目	技术要求	检测结果
耐力/MPa	≥154	165
伸长率（%）	≥1.4	2.2
抗拉强度/MPa	≥228	235

改善后的试验验证

为验证上述所分析的问题，将壳体浇铸口位置调整至其他非直接受力的部位，重新压铸壳体，并对壳体进行金相分析，未发现上述壳体材料缺陷。将壳体重新装配变速器并装车重新进行路试，路试试验一次性通过。

结语

在变速器壳体模具开发时，壳体厂家可能对实际装车的使用工况不是特别了解，需要跟模具厂家沟通到位，特别要求浇铸口不能留在重要受力部位，以免浇铸时产生的气泡、夹渣等影响受力部位的强度；同时，在选择安装螺栓及确定有效螺纹长度时，必须经过受力计算和分析，以保证有效螺纹能够满足特殊工况下的受力。AUTO1950