供油管路支架断裂分析与改进

宋庆军 李国臣 孙鑫雨 张青松 张国禹 高东宏

（中国第一汽车股份有限公司研发总院，长春 130013）

摘要：某乘用车供油管路支架在整车强化坏路耐久试验过程中发生断裂，针对试验后的供油管路支架进行工况分析、材质分析、计算机辅助工程（CAE）强度耐久分析、断口分析和外观尺寸分析，其中材质分析和CAE强度耐久分析结果均满足企业标准要求。通过断口分析确定了断裂形式为疲劳断裂，断口起源于零件表面冲压凸台根部圆角（*R*角）处。通过外观尺寸分析和CAE分析确定了该断裂为冲压过程*R*角过小导致产生应力集中所致。通过改进冲压模具结构和工艺参数，解决了零件表面冲压凸台根部*R*角过小的问题，使零件整体特征尺寸与设计数模完全一致，改进后的支架经强化坏路耐久试验后未发生断裂失效。

关键词：供油管路支架 断裂失效 冲压*R*角

中图分类号：U465.1 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260005

Analysis and Improvement of Fuel Pipe Bracket Fracture

Song Qingjun, Li Guochen, Sun Xinyu, Zhang Qingsong, Zhang Guoyu, Gao Donghong

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

Abstract: A fuel supply pipe bracket of a passenger car broke during the whole vehicle's durability test on a rough road. This paper conducts an analysis of the working conditions, material, CAE strength and durability, fracture surface and appearance dimensions of the fuel supply pipe bracket after the test. The material analysis and CAE strength and durability analysis both meet the enterprise standards. The fracture form is determined to be fatigue fracture through fracture surface analysis, and the fracture originated from the *R* corner at the root of the stamped protrusion on the part surface. The cause of the fracture is determined to be stress concentration caused by the too small *R* corner during the stamping process through appearance and dimension and CAE analysis. By improving the structure and process parameters of the stamping die, the problem of the too small *R* corner at the root of the stamped protrusion on the part surface was solved, and the overall feature dimensions of the part were completely consistent with the design model. The improved bracket did not fail during the durability test on a rough road.

Key words: Fuel supply pipe bracket, Fracture failure, *R* corner stamping

1 前言

汽车燃油系统作为汽车运行中的关键环节，在汽车运行中发挥着重要作用[1]。燃油系统主要包括燃油供给系统和燃油蒸发排放控制系统，其中燃油供给系统由燃油箱、燃油泵、燃油滤清器、供油管路、喷油器等构成[2]。供油管路作为燃油供给系统的重要组成部分，用于把燃油从油箱输送到发动机，且精准、高效地供给燃油有助于提升发动机性能。供油管路支架是供油管路系统的主要组成部件，主要作用是将供油管路固定于车身地板上，在车辆行驶过程中会承受不规则的力和弯矩，对结构强度的要求较高。因此，需要对供油管路支架进行全面的材质分析、计算机辅助工程（Computer-Aided Engineering，CAE）强度校核、尺寸分析、路试等，性能试验合格后才具备正式生产

作者简介：宋庆军（1989—），男，工程师，硕士学位，研究方向为金属材料技术。

参考文献引用格式：

宋庆军，李国臣，孙鑫雨，等. 供油管路支架断裂分析与改进[J]. 汽车工艺与材料，2026(9): 25-29.

SONG Q J, LI G C, SUN X Y, et al. Analysis and Improvement of Fuel Pipe Bracket Fracture[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 25-29.

条件。

李俊琦[3]等对某柴油机废气再循环系统(Exhaust Gas Recirculation,EGR)支架与管路断裂问题进行分析,得出EGR冷却器支架局部应力值大于该支架材料的屈服强度是支架断裂的根本原因。李喆[4]等对某车型空调管路支架断裂问题进行原因分析,得出失效真因为动力总成拉拽空调管路导致支架出现应力集中,通过优化零件结构,增强了支架结构强度,解决了支架断裂问题。本文针对某乘用车供油管路支架在强化坏路耐久试验过程中发生断裂的现象,对该问题进行失效分析,以期确定导致支架断裂的真因并实施改进。

2 零件工况分析

供油管路总成结构如图1所示,其中支架与供油管路通过铜钎焊连接,为提高支架刚度,在支架中间区域冲压出凸台结构。供油管路总成实车状态如图2所示,红圈标识区域为管路支架,支架一端连接供油管路,另一端通过螺栓固定于车身纵梁上,车辆在行驶过程中供油管路会发生振动,进而将力和力矩传递到支架上,根据该车型的装配关系可确定支架主要承受垂直于板材表面的弯矩作用。



图1 供油管路结构

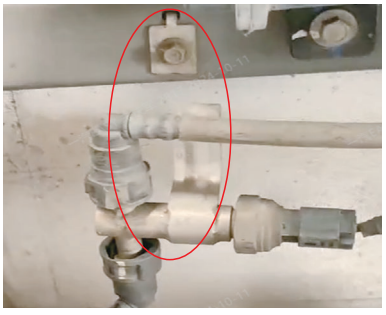


图2 供油管路装车状态

在上述垂直于板材表面的弯矩作用下,支架发生断裂失效,断裂位置位于中部冲压凸台的根部,且裂纹与冲压凸台端部圆弧高度重合,裂纹形貌如图3所示。

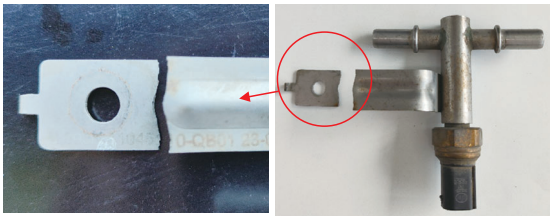


图3 支架裂纹位置及形貌

3 零件性能分析

汽车零部件发生开裂失效问题,一般原因包括产品结构设计不满足使用要求(如CAE分析应力过大)、产品生产加工过程存在质量缺陷等[5]。针对管路支架零件特点,对零件进行材质分析和CAE性能校核。

3.1 材质分析

供油管路支架由304不锈钢经冲压制成,对失效的支架进行化学成分分析,检验结果及技术要求如表1所示,支架的化学成分符合技术要求。

表1 支架化学成分(质量分数) %

元素	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni
技术要求	≤0.08	≤0.030	≤0.045	≤2.00	≤1.00	18.00~20.00	8.00~11.00
实测值	0.042	<0.005	0.009	1.12	0.41	18.27	8.14

对失效的支架进行硬度分析,测得硬度值为187 HV5,图纸规定的技术要求为≤200 HV5,满足要求。

对失效的支架进行金相分析,金相组织如图4所示,为单一奥氏体组织,不存在内部夹杂物和孔洞等缺陷,组织形态符合标准的304不锈钢组织特征。

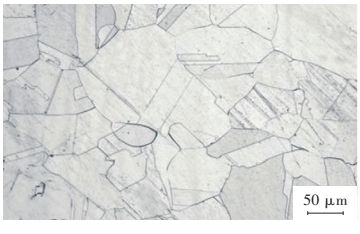


图4 支架金相组织

利用与失效支架同生产批次的钢板原材料加工成如图5所示哑铃型拉伸试样,进行力学性能测试,检验结果及技术要求见表2,试验后的试样如图6所示,支架原材料的力学性能符合技术要求。

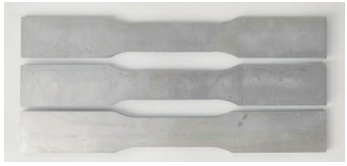


图5　试验前拉伸试样

表2　支架力学性能

项目	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	断后伸长率 A_{50}/%
技术要求	≥520	≥205	≥40
实测值	674、682、678	275、280、276	52.0、51.5、51.5



图6　试验后拉伸试样

综上,支架的化学成分、硬度、金相组织和力学性能满足材质技术标准要求,排除材质因素导致零件失效。

3.2　CAE性能校核

有限元分析可在模拟零件实际工况下,对零件进行受力分析,确定零件的应力分布情况[6]。对供油管路支架进行强度与耐久CAE分析,校核设计方案的强度与耐久性能。仿真分析模型如图7所示,地板纵梁两端固定,用壳单元进行模拟,支架同样用壳单元模拟,地板纵梁与支架之间采用M6螺栓连接,支架与供油管路刚性固定,参考前文材质分析结果,CAE分析时支架的材料参数见表3,强度校核和疲劳校核的计算工况和相应评价指标见表4,载荷作用点为供油管路中心位置。

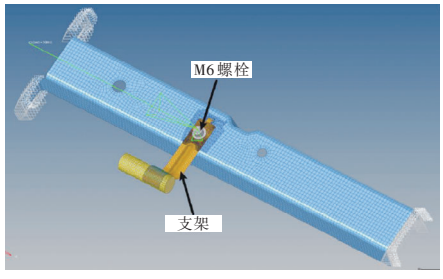


图7　CAE仿真分析模型

表3　支架材料参数

零件	材料	弹性模量/MPa	泊松比	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	断后伸长率 A_{50}/%
支架	304	210 000	0.3	674	275	51.5

表4　计算工况和评价指标

校核内容	校核工况	载荷大小 X	载荷大小 Y	载荷大小 Z	评价指标
强度校核	垂向强度	±5g		−10g	低于材料抗拉强度
	纵向强度			−1g	
	侧向强度		±5g	−1g	
疲劳校核	垂向疲劳	−1.5g~1.5g		−4g~−2g	无限循环次数下疲劳安全系数>1
	纵向疲劳			−1g	
	侧向疲劳		−1.5g~1.5g	−1g	

CAE强度和耐久分析完成后,相应计算结果见表5。强度工况下,支架最大应力为150.6 MPa,小于材料抗拉强度;疲劳工况下,最小疲劳安全系数为4.26,强度和耐久结果均满足评价指标要求。

表5　强度和耐久计算结果

校核内容	校核工况	指标	计算结果
强度校核	垂向强度	应力/MPa	150.6
	纵向强度		127.3
	侧向强度		124.1
疲劳校核	垂向疲劳	疲劳安全系数	4.26
	纵向疲劳		4.78
	侧向疲劳		4.53

综上,管路支架的成分、硬度、金相组织、力学性能和CAE强度、耐久均满足零件性能要求,可排除上述因素导致零件失效。

4　零件断口及失效真因分析

一般疲劳失效分为裂纹源区、裂纹扩展区和

瞬断区3个阶段[7]。管路支架的断口宏观形貌如图8，可见断口呈现出明显的疲劳断裂特征，其中裂纹源位于零件表面，且位置处于零件冲压凸台的凸起一侧，如图9所示，在交变应力作用下，金属的局部区域发生滑移，并在表面产生原子尺寸的微裂纹，形成裂纹源，裂纹源在全部断裂截面中所占面积比例较小，却占据整个疲劳断裂过程的大部分时间。随着交变应力的持续存在，裂纹逐步扩展，形成裂纹扩展区，在该件断裂过程中，裂纹扩展区约占总面积的70%，随着承载面积的逐步减小，零件发生瞬时断裂并形成瞬时断裂区。可见形成裂纹源是导致产生疲劳断裂的主要原因，分析裂纹源的形成真因并制定相应改进措施，可有效防止疲劳断裂发生。

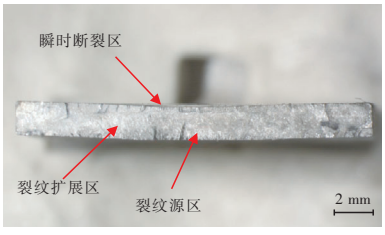


图8 支架断口宏观形貌

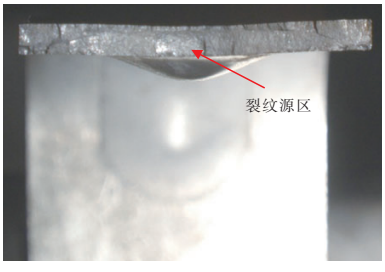


图9 支架裂纹源位置

如前文所述，裂纹源位于零件冲压凸台的凸起一侧表面，对该位置进行表面形貌观察，如图10所示，可见裂纹源位置处冲压凸台的圆角（*R*角）过度不够平滑，冲压凸台与四周平板之间存在形状突变，支架3D数模如图11所示，通过与3D数模对比并进行实际*R*角测绘可以发现，此处3D数模*R*角半径为1.5 mm，实体零件*R*角半径仅为0.36 mm，实体零件冲压凸台的*R*角明显过小，与3D数模结构不一致，因而在零件使用过程中，受交变应力作用，过小的*R*角和形状突变易导致应力集中，当局部应力足够大时会在*R*角处快速萌生初始微裂纹，并且微裂纹快速扩展，最终导致疲劳断裂。

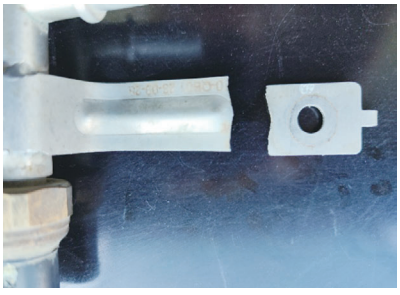


图10 实体零件表面形貌

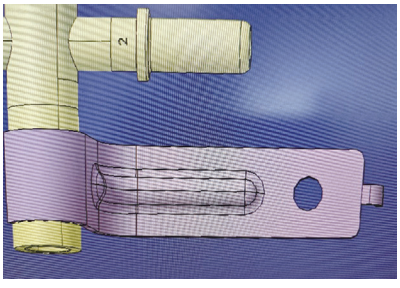


图11 3D数模表面特征

以实体零件的*R*角尺寸进行重新建模，分析在相同的计算工况下过小的*R*角尺寸对供油管路支架强度和耐久性能的影响，CAE计算结果见表6。强度工况下，支架最大应力为216.4 MPa，小于材料抗拉强度，但显著大于3D设计数模条件下的结构最大应力；疲劳工况下，最小疲劳安全系数仅为0.86，不满足疲劳工况的评价指标要求，支架在使用过程中存在严重的疲劳失效风险，也进一步证明凸台*R*角尺寸过小是支架疲劳断裂的根本原因。

表6 强度和耐久性能计算结果

分析内容	分析工况	指标	计算结果
强度分析	垂向强度	应力/MPa	216.4
	纵向强度		198.7
	侧向强度		176.5
疲劳分析	垂向疲劳	疲劳安全系数	0.86
	纵向疲劳		1.72
	侧向疲劳		1.60

5 改进效果

如前文所述冲压凸台*R*角过小为疲劳断裂真因，*R*角过小是冲压过程中冲压模具结构不合理所致，通过优化冲压模具结构和工艺参数，得到了符合3D数模结构的实体零件，如图12所示，可见冲压凸台四周的*R*角明显增大，凸台与四周平板之间平滑过度，无形状突变。将改进后的支架重新

装车后进行强化坏路耐久试验,试验完成后支架未发生断裂。



图12　改进后的支架整体形貌

综上,冲压凸台四周的*R*角过小是导致疲劳断裂的真因,通过优化冲压模具进行*R*角处结构改进后,零件性能满足了试验要求。

6　结论

a.某乘用车供油管路支架在整车强化坏路耐久试验过程中发生断裂,材料成分、硬度、金相组织、力学性能和CAE强度、耐久均满足零件性能要求。

b.零件冲压凸台四周*R*角过小产生应力集中,造成结构疲劳安全系数降低,是导致支架疲劳断裂的主要原因,进行结构优化后,零件性能满足了试验要求。

c.该支架断裂原因,同样适合其他金属板材冲压件,建议后续对于此类产品严格进行外观和尺寸检验。

参考文献:

[1] 甘琳. 汽车燃油系统结构原理与故障诊断分析[J]. 南方农机, 2017, 48(15): 144-145.

[2] 杨聪慧, 张德鹏. 汽车供油系统参数设计[J]. 内燃机与配件, 2017(12): 1-2.

[3] 李俊琦, 王迎波, 李德胜, 等. 某柴油机EGR支架与管路断裂分析与优化[J]. 车辆与动力技术, 2022, 2: 40-44.

[4] 李喆, 刘博, 王俊, 等. 某车型空调管路支架断裂失效分析及优化[J]. 汽车零部件, 2017, 6: 30-32.

[5] 白耀明, 孙洪斌, 杜健. 某车型稳定杆支架开裂分析[J]. 汽车工艺与材料, 2016, 12: 25-28.

[6] 龙先军. 某车型减振器支架断裂原因分析及改进方案[J]. 时代汽车, 2021, 7: 133-134.

[7] 刘丽玉, 高翔宇, 杨宪锋, 等. DD6单晶高温合金振动疲劳性能及断裂机理[J]. 材料工程, 2018, 46(2): 128-133.

AT&M