

汽车发动机右悬置支架及螺栓断裂失效分析

袁成逸, 徐文雷, 胡治春, 冯雪桥, 阳大云

(吉利汽车研究院(宁波)有限公司, 浙江宁波 315336)

摘要: 汽车发动机右悬置支架及螺栓在试验场进行综合耐久试验时发生断裂失效。通过宏观检查、断口形貌、化学成分、金相组织及硬度等测试方法, 分析了悬置支架和螺栓的断裂失效模式, 并采用数值模拟方法进一步分析了断裂失效的原因。结果表明: 悬置支架在交变载荷作用下, 接触面之间发生相对滑移, 导致连接螺栓发生疲劳断裂, 最终导致悬置支架的断裂。

关键词: 铝合金; 悬置支架; 断裂失效; 数值模拟

悬置支架是汽车发动机动力总成悬置系统的核心部件, 它的主要功能是弹性支承发动机, 有效隔离地面向发动机总成传递的振动以及发动机向车身传递的振动^[1-3]。因此, 悬置支架对汽车行驶的安全性、稳定性和舒适性产生很大的影响^[4-6]。

为实现节能环保, 汽车轻量化越来越受到重视。铸造铝合金具有比强度高、成形工艺性能好、耐腐蚀性能优且可回收再利用等特点。因此, 采用铸造铝合金代替传统球墨铸铁制作悬置支架已被广泛应用到汽车行业中。陈云等人对铝合金A356.2的挤压铸造工艺进行了研究, 优化工艺后的悬置支架各项性能指标均满足设计要求^[7]。Dong-ha Kang等人采用先进高真空压铸工艺(HLVD)制造的铝合金A365.0悬置支架与传统压铸工艺相比, 在满足强度与刚度的情况下, 重量可减轻23%^[8]。

某型号汽车发动机右悬置支架及螺栓在试验场进行综合耐久试验时发生断裂失效, 该悬置支架材料为AlSi9Cu3Fe, 主要生产工序: 配料→熔化→保温→浇注→合模→压铸成形→开模取件→去浇口。所用螺栓的材料为35CrMo, 强度等级为10.9级, 主要生产工序: 球化处理→剥壳除磷→拉拔→冷镦成形→螺纹加工→调质处理→表面处理。为查清悬置支架及螺栓断裂失效的原因, 对其进行了理化检验与分析, 并采用数值模拟方法进一步分析了断裂失效的原因。

1 分析方法

采用SX30IS型数码相机进行宏观检查; 采用Teneo型FEI场发射扫描电子显微镜进行微观断口形貌观察; 采用SPECTROMAXxMM16直读光谱仪测试化学成分; 采用Axio M2m型蔡司金相显微镜进行金相组织分析; 采用HBE-3000A型电子布氏硬度计进行硬度测定; 采用ABAQUS模拟软件对发动机右悬置支架进行结构强度的模拟分析。

2 试验与模拟结果

2.1 宏观观察

图1a为断裂发动机右悬置支架的宏观形貌, 悬置支架在A区发生断裂, B区螺栓发生断裂。悬置支架与螺栓法兰面接触区域(B区)宏观形貌见图1b, 可以看出明显的滑移磨损痕迹。B区断裂螺栓的宏观形貌见图1c, 将其拼接在一起可见螺栓发生了弯曲。

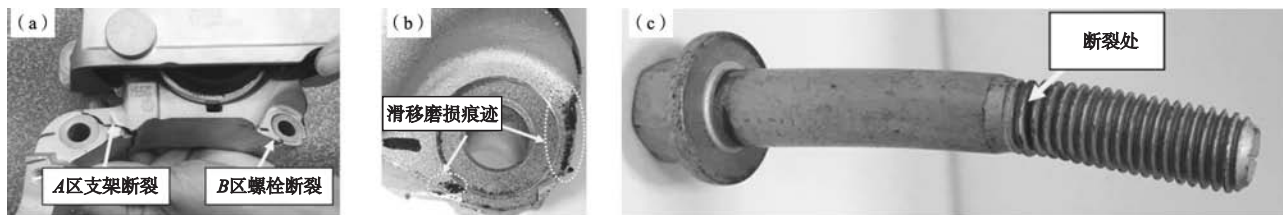
作者简介:

袁成逸(1985-), 男, 硕士, 主要研究方向为汽车金属材料工艺、组织、性能表征及断裂失效分析。
电话: 13382751603, E-mail: 290126204@qq.com

中图分类号: TG245
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2021)05-0615-06

收稿日期:

2020-10-25 收到初稿,
2021-01-05 收到修订稿。



(a) 断裂悬置支架 (b) 悬置支架与螺栓法兰面接触区域 (c) 断裂螺栓

图1 断裂悬置支架与螺栓的宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphologies of fractured mounting bracket and screw bolt

2.2 断口分析

2.2.1 螺栓断口分析

B区断裂螺栓的宏观断口形貌如图2所示, 根据断裂纹理可将断口分成四个区域。螺栓断裂的微观断口形貌如图3所示, 裂纹起始区域1主要以韧窝形貌特征为主(图3a), 符合螺栓弯曲在该区域产生极值拉应力瞬时拉开的断裂特征; 区域2、3的微观断口均为疲劳断裂特征形貌, 见图3b、c; 最终断裂区域4主要以韧窝形貌特征为主。表明螺栓先发生弯曲产生撕裂, 接着发生双向疲劳裂纹扩展, 扩展到一定阶段后在外载的作用下发生断裂。

2.2.2 悬置支架断口分析

图4示出了发动机右悬置支架的宏观断口形貌, 断口截面呈纤维状, 无明显疲劳特征, 人字纹尖端指向裂纹源, 图中标出的类似折叠的断口形貌是由两个裂

纹源扩展汇聚所形成的。

图5为发动机右悬置支架的微观断口形貌, 可以看出裂纹源断口上存在二次裂纹、断裂小平面以及韧窝, 表明发动机右悬置支架是在过载情况下发生的断裂。

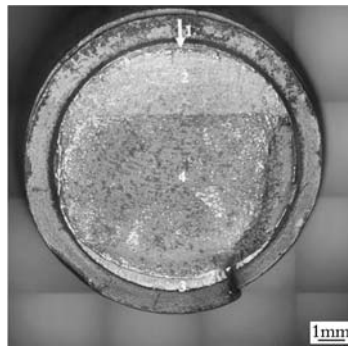


图2 螺栓的宏观断口形貌

Fig. 2 Macroscopic fracture morphology of bolt

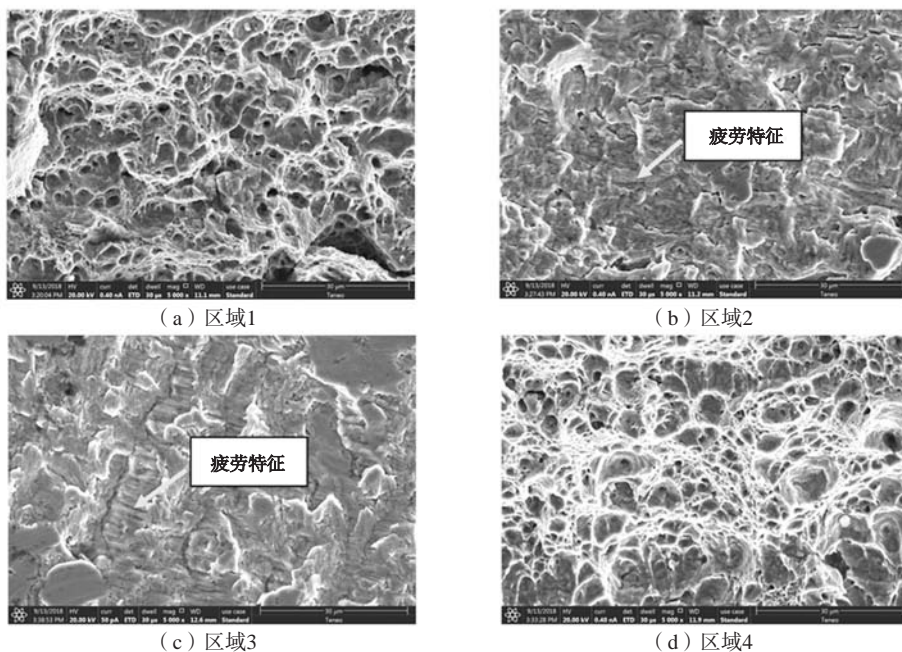


图3 螺栓的微观断口形貌

Fig. 3 Microscopic fracture morphology of bolt

2.3 化学成分分析

2.3.1 悬置支架化学成分分析

断裂悬置支架所用材料的化学成分如表1所示，其结果满足DIN EN 1706: 2010-06的技术要求。

2.3.2 螺栓化学成分分析

断裂螺栓所用材料的化学成分如表2所示，其结果满足GB/T 3077—2015的技术要求。

2.4 金相组织分析

2.4.1 悬置支架金相组织分析

在悬置支架断口附近横向截取金相试样，磨制抛光后用氢氟酸水溶液腐蚀并观察，显微组织包含 α 固溶体、共晶硅、 Al_2Cu 相及 β (AlSiFeMn)相，组织未见异常(图6)。

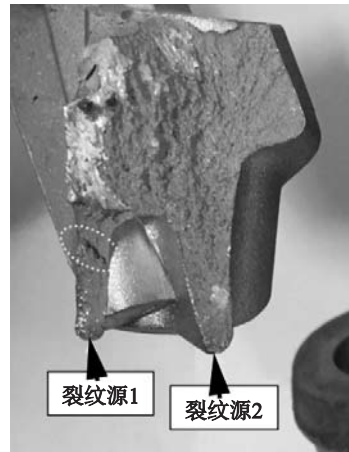
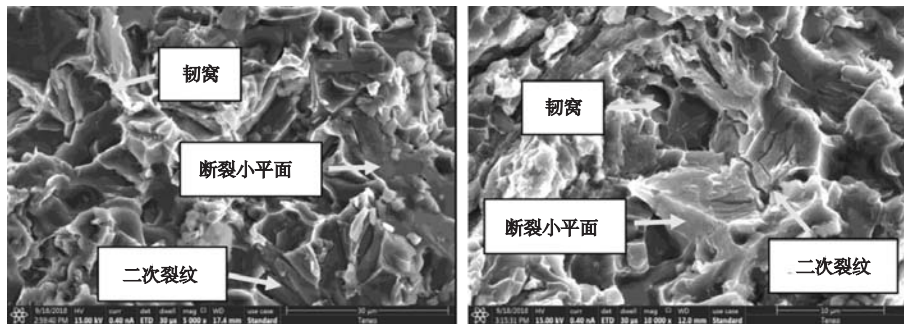


图4 悬置支架的宏观断口形貌

Fig. 4 Macroscopic fracture morphology of mounting bracket



(a) 裂纹源1

(b) 裂纹源2

图5 悬置支架的微观断口形貌

Fig. 5 Microscopic fracture morphology of mounting bracket

表1 断裂悬置支架的化学成分

Table 1 Chemical composition of fractured mounting bracket

项目	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
实测值	9.89	0.76	2.89	0.15	0.20	0.034	0.051	0.93	0.038	0.025	0.034
要求值	8.0~11.0	0.6~1.1	2.0~4.0	≤0.55	0.15~0.55	≤0.15	≤0.55	≤1.2	≤0.35	≤0.15	≤0.20

表2 断裂螺栓的化学成分

Table 2 Chemical composition of fractured screw bolt

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
实测值	0.37	0.29	0.53	0.012	0.016	1.03	0.016	0.23	0.017
要求值	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.030	≤0.030	0.80~1.10	≤0.030	0.15~0.25	≤0.030

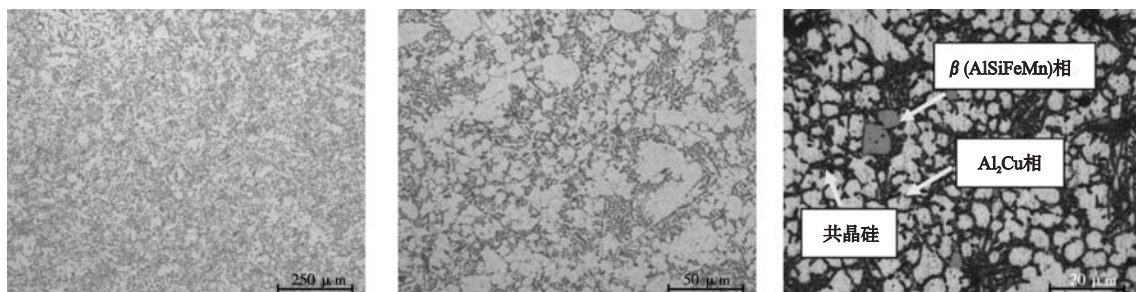


图6 悬置支架的微观组织

Fig. 6 Microstructure of mounting bracket

2.4.2 螺栓金相组织分析

在螺栓断口附近截取金相试样，磨制抛光后用硝酸酒精溶液腐蚀并观察，显微组织为正常的回火索氏体，表面无脱碳现象，螺纹牙底与螺纹收底圆滑过渡（图7）。

2.5 硬度测试

2.5.1 悬置支架硬度测试

断裂悬置支架的硬度测试结果见表3，其结果符合技术要求。

2.5.2 螺栓硬度测试

断裂螺栓的硬度测试结果见表4，其结果符合技术要求。

2.6 数值模拟

采用二阶四面体网络技术对发动机右悬置支架进行网格划分，网格大小为3 mm，输入的材料参数^[9]见表5。

将发动机右悬置支架与橡胶悬置连接的中心点作为载荷的加载点。作用在支架上的载荷根据该试验场采集的路谱确定，主要有三种载荷工况（见表6）。悬置支架螺栓连接的三个点分别采用两种约束方式进行模拟，第一种是三个连接点全部固定约束；第二种是将上述断裂螺栓的连接点不约束，其余两点进行固定约束。

假设发动机悬置支架具有物质的连续性和均匀性，并且为理想的弹塑性体，将上述三种工况下的载荷约束边界条件分别施加到悬置支架上，采用ABUQUS的Standard隐式求解器进行求解，得出的应力

分布见图8。

发动机悬置支架所用材料的抗拉强度极限为240 MPa，根据上述悬置支架的应力分布云图结果对其进行强度校核，详细结果见表7。

表4 断裂螺栓的硬度
Table 4 Hardness of fractured screw bolt

项目	硬度值HV10
实测值	350, 347, 349
要求值	320~380

表5 材料属性
Table 5 Physical parameters of materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(t·mm ⁻³)
AlSi9Cu3Fe	7.4E+4	0.33	2.7E-9

表6 载荷工况
Table 6 Load cases

载荷工况	Y方向/N	Z方向/N
工况1	10 000	0
工况2	0	9 800
工况3	0	-12 700

表7 悬置支架的强度校核结果
Table 7 Strength check results of mounting bracket

载荷工况	约束方式	最大主应力/MPa	评价标准/MPa	校核结果
工况一	第一种	99	≤240	符合
工况二	第一种	145	≤240	符合
工况三	第一种	170	≤240	符合
工况一	第二种	215	≤240	符合
工况二	第二种	225	≤240	符合
工况三	第二种	250	≤240	不符合

表3 断裂悬置支架的硬度
Table 3 Hardness of fractured mounting bracket

项目	硬度值HB
实测值	92, 95, 93
要求值	≥80

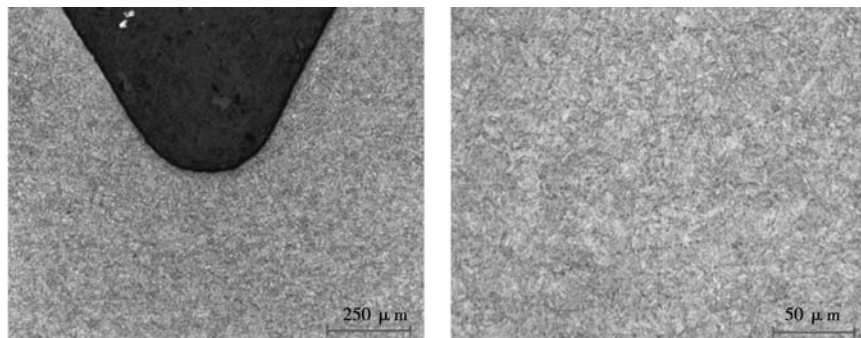


图7 螺栓的微观组织

Fig. 7 Microstructure of screw bolt

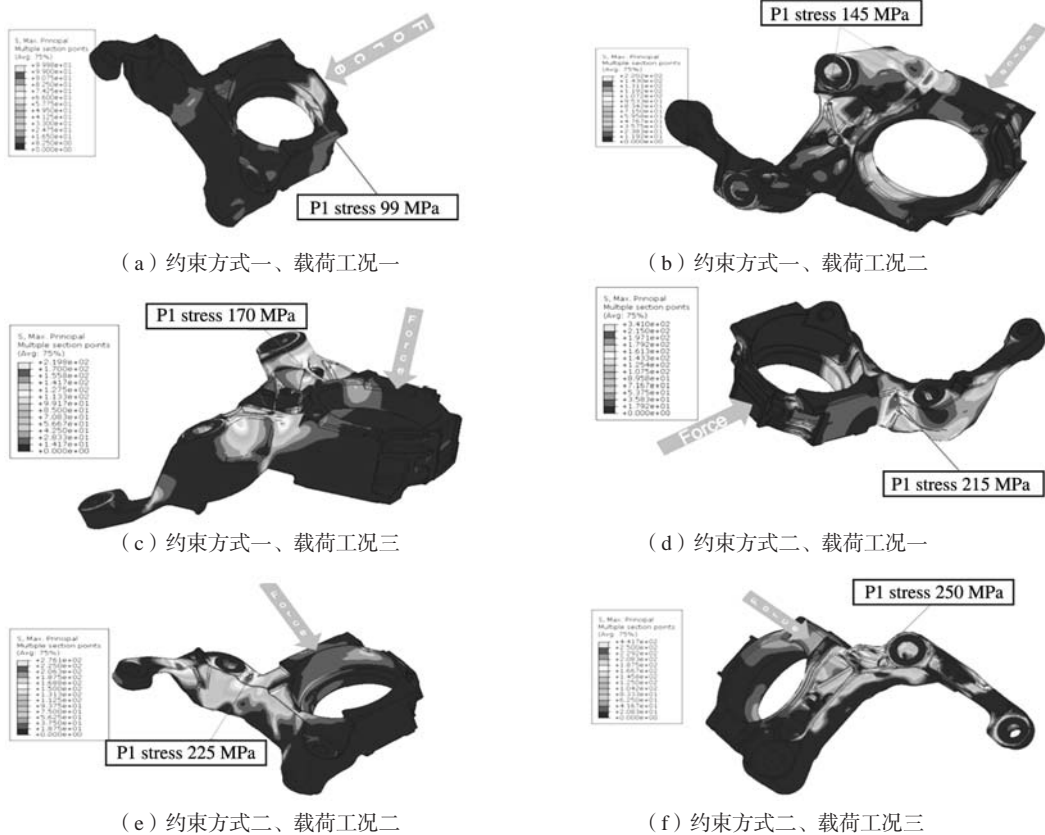


图8 悬置支架的应力分布

Fig. 8 Stress distribution of mounting bracket

3 结果分析与讨论

发动机右悬置支架与螺栓法兰面接触区域(B区)的滑移磨损痕迹(图2)表明连接螺栓在交变载荷下已发生了松动;通过断口分析确认了悬置支架及连接螺栓的断裂性质分别为过载断裂与弯曲疲劳断裂;化学成分、金相组织及硬度分析确认了支架及螺栓所用材质满足技术要求。

对发动机右悬置支架进行数值模拟分析表明悬置支架在载荷工况三约束方式二的情况下校核强度不满足要求,并且应力最大的点与悬置支架断裂的裂纹源位置基本保持一致。从而得出,悬置支架在交变载荷作用下,在接触面之间发生相对滑移导致连接螺栓发生了弯曲疲劳断裂,进而使得该螺栓连接点约束发生

了变化,最终导致了悬置支架的断裂。

因此,要解决发动机右悬置支架及连接螺栓断裂失效的问题,需要改进螺栓的拧紧装配工艺,保证发动机右悬置支架与连接件之间有足够的预紧力,避免在使用过程中螺栓产生松动。

4 结论

(1) 该悬置支架的断裂性质为过载断裂,螺栓松动并发生疲劳断裂使得连接点约束方式产生变化是悬置支架断裂失效的主要原因。

(2) 建议改进螺栓的拧紧装配工艺,以保证悬置支架与连接件之间具备足够的预紧力。

参考文献:

- [1] 陈树勋, 李志强, 韦齐峰. 汽车发动机悬置系统的严格解耦与优化设计研究 [J]. 工程力学, 2013, 30 (9): 177-183.
- [2] 谢展, 于德介, 李蓉, 等. 基于区间分析的发动机悬置系统稳健优化设计 [J]. 汽车工程, 2014, 36 (12): 1503-1507.
- [3] 苏新涛, 陈志. 某车型发动机悬置后支架优化设计和疲劳分析 [J]. 计算机辅助工程, 2011, 20 (4): 49-52.
- [4] 赵艳青, 刘本元, 上官文斌. 汽车动力总成悬置支架的优化设计 [J]. 汽车科技, 2007, 5 (3): 23-25.
- [5] YU Y H, NAGANATHAN N G, DUKKIPATI R V. A literature review of automotive engine mount systems [J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36: 1214-1216.
- [6] 潘孝勇, 柴国钟, 刘飞, 等. 悬置支架的优化设计与疲劳寿命分析 [J]. 汽车工程, 2007, 9 (4): 341-345.
- [7] 陈云, 李杰, 罗继相, 等. 铝合金发动机悬置支架挤压铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 167-173.
- [8] KANG D H, YOON K M, KO Y J, et al. Application of high level vacuum die casting for the automotive parts [J]. SAE Int. J. Mater. Manuf, 2009, 2 (1): 128-133.
- [9] 胡蓉蓉, 杨陈, 袁爽, 等. 某发动机悬置支架的有限元分析 [J]. 现代制造技术与装备, 2015 (2): 1-2.

Fracture Failure Analysis of Engine Right Mounting Brackets and Screw Bolts

YUAN Cheng-yi, XU Wen-lei, HU Zhi-chun, FENG Xue-qiao, YANG Da-yun
(Geely Automobile Research Institute (Ningbo) Co., Ltd., Ningbo 315336, Zhejiang, China)

Abstract:

The fracture failure occurred in engine right mounting bracket and screw bolt of the automobile during the comprehensive endurance test at the proving ground. The fracture failure mode of engine mounting bracket and screw bolt was analyzed by a variety of methods including macroscopic inspection, fracture surface morphology analysis, chemical analysis, microstructure observation and hardness testing. The numerical simulation was also performed to analyze the reason of fracture failure. The results show that the fatigue fracture of the connecting bolt was caused by relative slip between the contact surfaces of the mounting bracket under the alternating load, which ultimately leads to the fracture of the mounting bracket.

Key words:

aluminum alloy; mounting bracket; fracture failure; numerical simulation
