

发动机悬置支臂断裂原因分析与改进优化

彭少华

海南海马汽车有限公司 海南 海口 570216

摘要: 市场反馈某车型发动机悬置支臂出现断裂,通过对断裂支臂进行理化检测和特殊工况下的整车模拟试验,查找出断裂原因是发动机铝合金悬置支臂应力集中点处的强度不满足车辆在某些特殊工况下的使用要求。从设计结构对支臂强度进行了改进,对验证标准进行了优化。

关键词: 铝合金;发动机悬置;断裂

前言

在当前节能减排政策驱动下,汽车轻量化设计成为一种趋势,而铝合金材料由于其比强度高、成型工艺性能好、耐腐蚀而得到广泛应用。A380是汽车行业常用的压铸铝合金,因其具有良好的铸造性能而广泛应用于各种汽车零部件。某型发动机悬置支臂即是采用A380铝合金高压铸造成型。

发动机悬置是汽车上的重要部件,起到连接发动机动力总成和车架的作用,用于固定和支撑动力总成,阻隔路面冲击通过车架传递至动力总成,同时也阻隔动力总成的振动传递至车身,从而提升车辆的乘坐舒适性。所有新开发车型在研发阶段都需按照主机厂的验证标准开展多轮道路耐久验证,以确保车辆上市的质量可靠性。

1 断裂调查

此型发动机悬置支臂材料为A380铝合金,成型工艺为高压铸造。根据售后市场反馈,客户在正常用车过程中,通过坑洼颠簸道路时突然出现发动机舱异响,经检查发现是发动机悬置支臂发生了断裂,发生断裂的悬置支臂的几例车辆行驶里程从五千公里至三万公里不等,远低于产品的设计寿命,属于不正常故障。

2 理化检测和工况模拟试验

为查明断裂原因,对断裂的支臂进行了宏观分析、断口分析、针孔度、金相组织、夹杂物、化学成分和硬度等一系列理化检测。此外,为复现故障,在厂内试车跑道上进行了特殊工况模拟试验。

2.1 宏观分析

对售后市场反馈的几例断裂支臂进行了宏观分析,安装支臂的螺栓外形完好、螺纹未见拉伸破坏、螺栓紧固力矩符合要求。

作者简介: 彭少华(1977-),男,主任工程师,主要从事理化试验和台架耐久试验技术研究工作, pengsh@haima.com。

对断裂支臂的宏观形貌进行分析,发现断口均通过第一个螺栓安装孔,如图1所示。几例断裂位置具有较高的一致性和相似度。

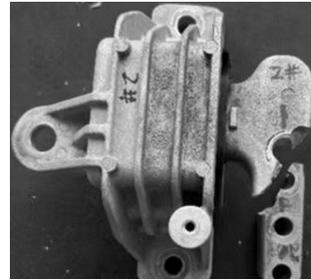


图1 支臂断裂实物图

此外,还发现断裂处支臂螺栓孔安装面存在明显压痕,如上图1断裂处所示。表明紧固螺母法兰面与支臂安装面的契合度偏低。经测量此支臂安装孔孔径为14mm,与之相匹配的紧固螺栓规格为M12,由此可见,孔径与螺栓直径的匹配余量过大,故造成法兰面螺母与支臂安装面的契合度偏低,降低了支臂此处的承载力。

2.2 断口分析

观察整个断口,除边缘有亮白色的磨损形貌外,断面的裂纹都汇聚于图2箭头指向的三个角,利用扫描电镜对断口表面进行微观形貌观察,三个箭头指向处为解理形貌,其余部位为解理和准解理形貌,推断断口为由通孔下边缘起裂的脆性断口。



图2 断口形貌

2.3 金相分析

按照GB/T 13298-2015对支臂断口附近截面进行金相

分析,金相组织为: α 固溶体+共晶硅+少量初晶硅,组织未见异常。

2.4 夹杂物分析

按照GB/T 17359-2012利用SEM-EDS对支臂断口表面进行能谱扫描,结果未发现有夹杂物。

2.5 针孔度分析

按照JB/T 7946.3-2017在支臂断口附近取样进行针孔度分析^[1],在针孔最密集区域内划定10mm×10mm区域,用10倍放大镜进行检验,针孔度评级为2级,符合图纸技术要求。

2.6 化学成分分析

按照GB/T 20975.25-2020对断裂支臂进行化学成分分析,结果见下表1。化学成分符合A380铝合金技术要求。

表1 断裂支臂化学成分(w%)

元素	Si	Fe	Cu	Mn
实测值	8.32	0.81	3.12	0.16
标准值	7.5-9.5	≤ 1.3	3.0-4.0	≤ 0.50
元素	Mg	Ni	Zn	Sn
实测值	0.05	0.02	1.58	0.02
标准值	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 3.0	≤ 0.35

2.7 硬度测试

按照GB/T 231.1-2018对断口附近本体进行了布氏硬度测试^[2],结果见下表2。支臂硬度符合技术要求。

表2 布氏硬度测试结果

硬度标尺	测试结果			技术要求	结论
	1	2	3		
HBW	90.6	87.0	92.0	≥ 80	符合

2.8 工况模拟试验

根据故障出现时客户所述路面状况,在厂内试车跑道上选择部分路况较为恶劣的某颠簸路面,对故障进行模拟复现,并与平路进行了对比测试,如下表3所示:

表3 工况模拟试验

制动车速代码	路况	
	平路	某颠簸路
车速1	未断	未断
车速2	未断	未断
车速3	未断	断裂
车速4	未断	断裂
车速5	未断	断裂

注:车速代码1-5代表车速逐步增大。

结果表明,在某颠簸路面下,当车速达到或超过某一速度时,此时如果采取紧急制动,发动机悬置支臂就会100%发生断裂,且断裂形貌与市场反馈故障件的断裂形貌有较高的相似度,如下图3所示,断口均通过第一个

螺栓安装孔。



图3 工况模拟试验的断裂件实物

3 分析与讨论

A380作为汽车行业常用的铝合金材料,针孔、裂纹是其常见的铸造缺陷,这些缺陷的存在破坏了组织的致密度,降低了组织的力学性能,常常是导致零件断裂失效的主要原因。而本例通过对铝合金支臂的系列理化检测项目分析,并未发现有超出技术要求的材料和铸造缺陷。根据发动机悬置支臂的设计结构,CAE分析结果如下图4所示:



图4 支臂应力云图

支臂拐弯通孔处为应力集中点。

汽车在行驶制动过程中,发动机悬置支臂一方面受到来自路面Z向激励的作用,产生垂直路面向下的作用力 F_z ,另一方面受到动力总成X向惯性力的作用 F_x (悬置支座外壳对支臂的反作用力),两种作用力共同作用于支臂拐弯处,形成叠加载荷。当汽车在平路上行驶制动时, F_z 相对较小,支臂主要承受 F_x 作用力的影响;当汽车以某较高车速在颠簸路面上紧急制动时,此时 F_z 急剧增大,超过了支臂的极限载荷而发生瞬间断裂。这与3.2分析得出的“断口为由通孔下边缘起裂的脆性断口”相符,从表3的模拟验证结果也能得到进一步证明。同时,这一工况也与客户描述的发动机出现异响时经过的路面有颠簸的情况相符。

由此可推断,支臂设计结构强度不满足车辆在某些特殊工况下的使用要求,是导致支臂断裂的主要原因。此外,支臂安装孔径与螺栓直径的匹配余量过大,造成法兰面螺母与支臂安装面的契合度偏低,也会进一步降低支臂此处的承载强度。

4 改进与优化

为提高支臂的承载强度，需对支臂应力集中点从结构设计上进行优化。

4.1 孔径优化

将支臂安装孔孔径由原来的14mm修改为13mm，提高支臂安装孔孔径与紧固螺栓直径的匹配度，同时也能增加此处的应力承载面积，从而提高承载强度。

4.2 结构优化

修改支臂应力集中部位的结构，加大支臂拐弯处的应力承载面积，从而提高支臂的承载载荷^[3]。

优化后的悬置支臂结构及应力云图见图5。

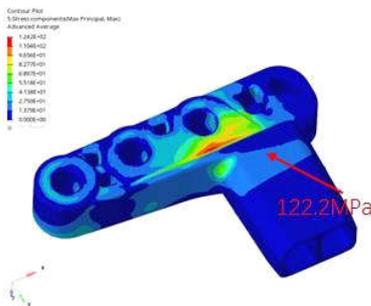


图5 结构优化后的支臂应力云图

下表4为支臂优化前后应力对比，CAE分析结果显示，支臂结构优化后，应力降低了22.6%。

表4 优化前后支臂承受应力对比

应力	优化前/MPa	优化后/MPa	应力降低/%
	157.9	122.2	22.6

优化后的发动机悬置支臂，实物装车后再按照表3的颠簸路面开展了多轮实车验证，均未发生断裂。由此证明上述结构优化措施是有效的。

此外，对道路耐久验证标准中的某些特殊工况路段的试验操作也进行了相应的完善和修改，以更加全面的涵盖客户的用车经历，以期在后续开发车型中提前将各种问题暴露在研发试验过程中，确保量产上市车辆的质量可靠性。

结束语

新开发车型在上市前都需经过充分的道路耐久验证，以确保上市后的车辆不会出现批量性质量问题。在试验场的耐久验证中，车辆会模拟通过各种路面，这些路面基本涵盖了社会上绝大部分的路面状况，在此过程中，验证标准充当了非常重要的角色，也是企业的核心竞争力之一。此次发动机悬置支臂断裂事件暴露出某些特殊工况试验验证的不足，验证标准需要持续完善和优化。

参考文献

- [1]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.
- [2]王琦,铸造针孔和钠变质对ZL101铸铝合金组织和性能的影响,理化检验-物理分册[J].2004,9:443-445.
- [3]马聪,杨梦馨,程强,初红艳.某箱体的铸造工艺缺陷分析与优化设计,铸造,Vol.72 No.5 2023.