

汽车发动机悬置断裂原因分析

Failure Analysis of Engine Mount Fracture

供稿|张静¹, 张涛² / ZHANG Jing¹, ZHANG Tao²

内 容 导 读

作为汽车发动机舱中的重要零件之一, 发动机悬置起着连接发动机与车身、支撑发动机重量和隔离发动机振动的作用。某车型汽车发动机悬置在装配拧紧过程中发生断裂事故。为分析断裂原因, 对断裂悬置的外观、机械性能、金相组织、断口形貌和化学成分等进行了检测, 并分析了其受力情况。导致悬置断裂失效的原因是: 装配拧紧过程中螺栓拧紧顺序异常, 导致悬臂与发动机支承面没有完全贴合, 使得悬臂受到附加弯矩超过其强度导致断裂。根据铝铸件材料的特点, 提出了保证悬臂螺栓的拧紧顺序, 避免了因安装面不平行导致悬臂受力异常引发断裂。

汽车发动机是汽车最主要的振源之一, 对整车乘坐的舒适性和操控稳定性有着很大的影响^[1-2]。现阶段汽车追求高速化和轻量化, 对发动机隔振技术要求越来越高。作为发动机舱中的重要零件之一, 发动机悬置起着连接发动机与车身、支撑发动机重量和隔离发动机振动的作用^[3]。从隔振角度来说, 期望发动机悬置越软越好, 以便将振动过滤到最小; 从支撑角度和发动机舱有限空间考虑, 则希望发动机悬置不至于太软, 最好能使发动机固定不动, 因此悬置既要满足一定的刚性又要有一定的韧性^[4]。目前发动机悬置主要有橡胶悬置和液压悬置两大类, 其外壳和芯部材质一般为铸造铝合金^[5-6], 中间连接处为橡胶或阻尼液。其中液压悬置主要由弓形壳体、支承橡胶总成、悬臂、底座、流道、阻流盘、外膜盖和阻尼液等组装而成。弓形壳体和悬臂一般

选用铸造性能较好的铝硅系合金^[7], 采用低压铸造成型的方式生产^[8]。

某汽车发动机液压悬置在进行装配拧紧时发生断裂, 断裂位置位于悬臂处, 裂纹靠近其中的一个螺栓通孔。该悬置的设计材料为铝硅系铸造铝合金, 牌号为AlSi12Cu, 悬臂抗拉强度要求大于240 MPa, 屈服强度大于140 MPa。为确定该悬置的断裂原因, 对断裂零件及其断口进行了化学成分分析、力学性能分析、金相组织分析、断口宏观分析、断口微观分析和孔隙率分析。

实 验

断口的宏观形貌

悬置的外观及断裂位置如图1所示, 断裂位置

作者单位: 1. 吉林建筑大学城建学院, 吉林 长春 130011; 2. 一汽大众汽车有限公司, 吉林 长春 130011

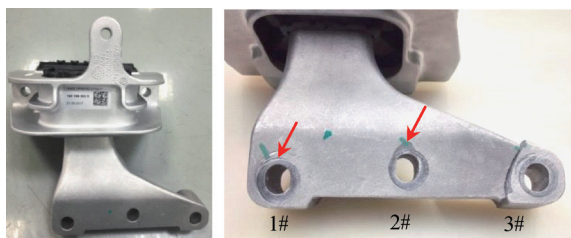


图1 悬置外观和悬置断口具体位置

位于最右侧安装孔的附近，断口贴近右侧螺纹安装孔，裂纹已近裂透整个悬臂。对3个螺栓孔编号1#、2#和3#。如图1中箭头和图2所示，从安装孔的螺栓拧紧痕迹来看，1#和2#拧紧结束时螺帽与悬臂表面有非对称刮擦的痕迹，说明拧紧结束时螺帽受力面与零件表面并非完全平行，而在拧紧过程中螺栓是完全垂直于发动机支承面的，因此初步怀疑拧紧过程异常，使得发动机支承面与悬臂的下表面不平行，悬臂右侧与发动机支承面未完全贴合，使得拧紧过程中悬臂受到异常弯矩。该处的操作卡要求3个螺栓的预紧扭矩均为5 N·m，最终拧紧扭矩为25 N·m。观察生产线操作者实际拧紧顺序，一般预紧顺序为1#、3#、2#，最终拧紧顺序也是如此，但操作卡对螺栓拧紧顺序并无明确规定。

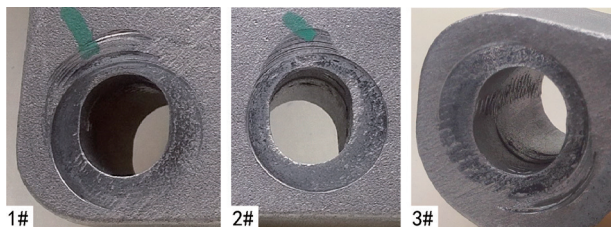


图2 螺栓拧紧刮擦痕迹

表1 断裂悬臂的化学成分(质量分数，%)

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Pb	Sn	Ti
EN 1706	10.5~13.5	≤1.30	0.7~1.2	≤0.55	≤0.35	≤0.10	≤0.30	≤0.20	≤0.10	≤0.20
断裂件	11.86	0.88	1.02	0.13	0.12	0.04	0.03	0.01	0.01	0.04

力学性能测试

◆ 拉伸性能测试

按照GB/T 228的要求，在断裂悬臂取样制作3个拉伸样棒进行材料拉伸测试。制备的样棒直径 $d=5.0\text{ mm}$ ，标距 $L_0=25.0\text{ mm}$ ，将3根样棒分别编号为1#、2#、3#。拉伸试验结果数值如表2所示。3个拉

如图3所示，通过目视观察断口发现，零件断裂前没有明显的塑性变形，无明显的疲劳回纹并且整个断口较平坦。通过断口形貌并结合悬置的安装受力情况可以判断出裂纹扩展方向为点1至点2扩展；1点初始断裂区呈粗结晶状，往2点纤维条状延伸。图2中的1点部位下方为加强筋并且此处边缘圆弧过渡自然，可以确定该区域不存在转角应力集中。断口截面右上角有拧紧结束时操作者标记的油笔印，表明在3#螺栓拧紧过程结束后进行油笔标记时裂纹已经产生，结合图2的螺栓拧紧痕迹可进一步印证拧紧过程中悬置断裂处受力异常。

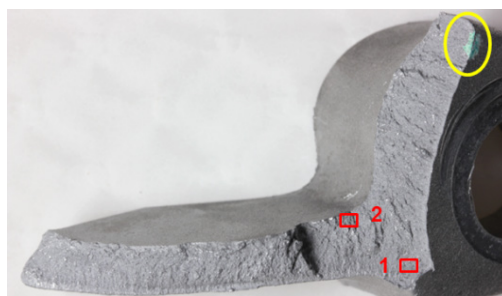


图3 断口的宏观形貌

化学成分分析

在断裂悬臂上取样，采用直读光谱法对零件的化学成分进行分析，并与标准EN 1706中的元素含量要求进行对比。在合金的几种主要化学元素中，硅主要保证合金的流动性，减少疏松；铜与铝生成 CuAl_2 可以使 α 固溶体变形以提高合金的热强性；锰和镁主要起固溶强化作用^[9]。检测结果说明断裂件的各元素含量均在标准的要求范围内，如表1所示。

伸样棒的抗拉强度、屈服强度和伸长率均符合标准要求。

◆ 硬度测试

在悬置横截面取样，采用ZWICK通用硬度计进行布氏硬度测试，测得其硬度为[89, 83, 83] HBW2.5/62.5，满足标准EN1706中材料硬度不低于

表2 失效悬置制取的3根样棒的拉伸结果数值

样品编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
标准值	≥240	≥140	≥1
1#	242	154	1.9
2#	249	147	2.6
3#	256	157	2.0

70HBW的要求。

综合分析材料拉伸测试结果和硬度测试结果，断裂悬臂的力学性能符合标准EN1706对材料强度的要求。

断口微观形貌

取断口处零件经超声波清洗后，采用SEM观察断口微观形貌。图4为图3中位置1断口区域，为解理和准解理形貌的过载断口组织，这是一种在拉应力作用下的脆性穿晶断裂，属于常见的脆性断裂形貌^[10]；随着断裂的延伸，远离起始区域的图3位置2为韧性断口组织，如图5所示。从断口微观形貌上看，断裂初始阶段零件承受较大的应力，零件受力

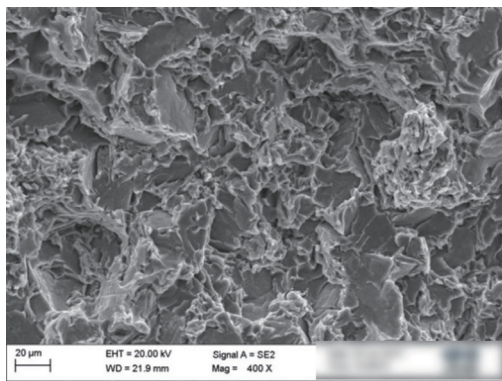


图4 准解理和解理形貌的过载断口

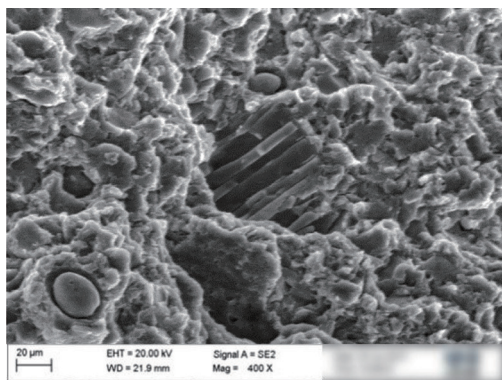


图5 韧性断口组织

开裂后裂纹迅速扩展，断口组织为解理和准解理形貌的脆性形貌；随着裂纹的扩展，大部分应力得到释放，裂纹在较小的应力下扩展速度降低，使得断口得以发生塑性形变，表现为塑性过载断口^[11]。

结合断口宏观形貌及微观组织分析，在拧紧开始时悬臂下表面与发动机支承面未贴合，使得悬臂受到一个向下的弯矩，随着拧紧过程的进行，施加在悬臂上的弯矩超过了悬臂的抗拉强度极限，导致悬臂过载断裂。断口上的油漆痕迹说明拧紧过程结束后，点漆之前，悬臂已经开裂，这也从侧面印证了悬臂是由于拧紧导致的断裂。

金相组织

在断口附近取样磨制金相试样，并与正常悬臂的金相组织进行对比。如图6和7所示，两者金相组织基体均为 α 固溶体，并带有节状的硅化物析出和针状共晶体^[12-13]。析出相高倍组织如图8所示，枝晶为初生 α 固溶体，共晶组织较均匀分布在 α 固溶体之

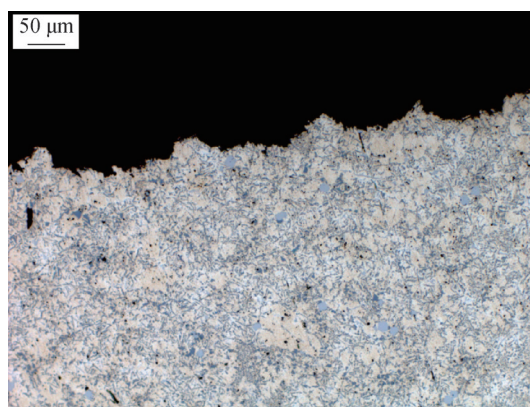


图6 失效件断口区域的金相组织

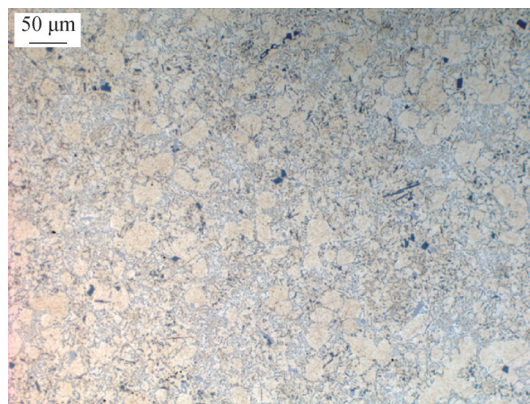


图7 正常零件的金相组织

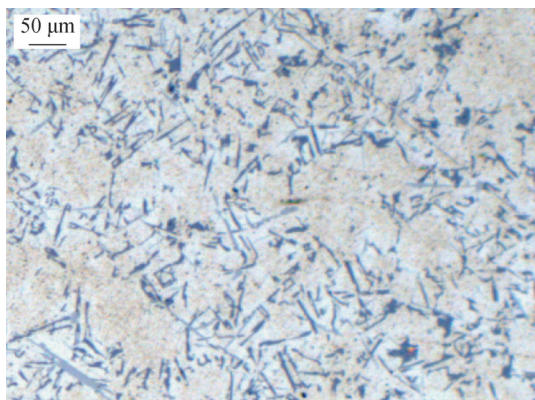


图8 析出相的高倍组织

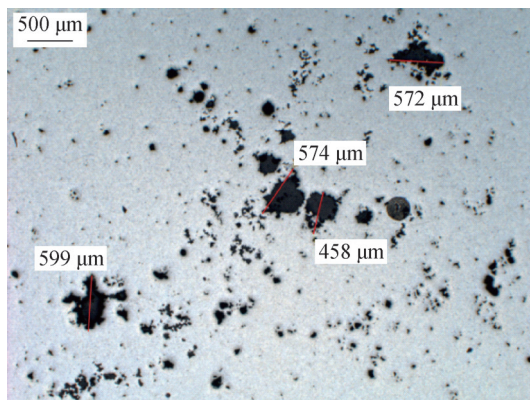


图10 金相法测得的失效件孔隙率

间；断口附近无明显的缩孔、夹渣等铸造缺陷，与SEM观察结果一致。

孔隙率检测

首先使用工业CT对断裂零件整体进行扫描，未发现其中有明显的缩孔等铸造缺陷，如图9所示。在断口附近取样，镶样、研磨后使用金相法测量其孔隙率，测得的最大空隙为0.6 mm，符合图纸要求的最大铸造缩孔1.5 mm的要求，如图10所示。



图9 失效件CT扫描结果

分析与讨论

失效原因分析

(1) 从断口的宏观形貌上看，在拧紧结束时裂纹就已经产生，并且结合悬臂通孔处的螺帽摩擦痕迹看，螺帽与悬臂上表面有非对称的摩擦痕迹，并且目视观察悬臂上表面平整，推断拧紧过程中螺栓与悬臂并不完全垂直；而螺栓与发动机支承面是完全

垂直，进而推得悬臂表面与发动机支承面并不是完全平行的。因此，在拧紧时螺帽与悬臂偏磨会导致悬臂受到附加的弯矩；随着拧紧过程的进行，施加在悬臂上的弯矩超过了悬臂的抗拉强度极限；从悬臂的整体结构来看，3#螺栓区域为整个悬臂最为薄弱的区域，过大的弯矩作用在整个悬臂上，裂纹必然会在3#附近起源，进而悬臂整体发生过载断裂。

(2) 1#、2#、3#螺栓并无明确的拧紧顺序要求，由于螺栓通孔为椭圆形，操作者在拧紧过程时先拧紧1#、2#，可能会导致悬臂与发动机支撑面产生间隙，再拧紧3#时，异常弯矩集中在相对薄弱的3#通孔悬臂附近，导致其断裂。

(3) 悬置的材料化学成分、力学性能和孔隙率均符合设计标准要求；且通过SEM和金相显微观察，未发现断裂位置有任何材料及组织缺陷，断口初始区域为铸造中典型的解理/准解理断裂组织，随着断口的扩大应力得到释放，断裂区域最终组织为塑性断口。

失效原因验证

在模拟拧紧试验台上，按照此处的工艺进行预紧和最终拧紧。预拧紧参数为5 N·m，最终拧紧参数为40 N·m + 90°。首先选择1#、2#、3#顺序进行拧紧10次，发现螺栓通孔内部和悬臂支承面有非对称刮擦痕迹；然后选择1#、3#、2#顺序，发现非对称刮擦痕迹明显减轻。

修改此处的标准操作卡，增加螺栓预紧和拧紧顺序为1#、3#、2#，确保操作者严格按照标准操作卡顺序进行拧紧。连续执行1月后，无新的悬臂断裂

情况出现。

结束语

由于不合理的拧紧顺序导致悬臂下表面与发动机支承面不平行,使得悬臂受到异常弯矩导致其断裂。排查现场生产工艺,确保标准操作卡完全正确且步骤清晰,并且操作者按照标准工艺卡进行操作。对重点拧紧工序进行结果自检和复检,防止失效件流出造成更大的返修成本。

参考文献

- [1] 俞雁,兰凤崇,毛新平,等.汽车发动机悬置支架断裂失效分析.冶金丛刊,2012(1):25
- [2] 戴永谦.发动机悬置软垫断裂模拟[学位论文].大连:大连理工大学,2006
- [3] 丁遂栋,孙利民.断裂力学.北京:机械工业出版社,1997
- [4] 宋树森,李聪,吕兆平,等.悬置支架与连接螺栓断裂顺序的判定与原因分析//2014中国汽车工程学会年会论文集.上海,2014
- [5] 韩茵,陈诗键.铸造铝合金组织对力学性能的影响.理化检验-物理分册,2003,39(11):555
- [6] 付长明,董晨,屈伸,等.汽车发动机悬置支臂断裂失效分析.金属热处理,2011,36(S1):106
- [7] 钟群鹏,赵子华,张崢.断口学的发展及微观断裂机理研究.机械强度,2005,27(3):358
- [8] 崔约贤,王长力.金属断口分析.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998
- [9] 李江,李付国,薛凤梅,等.7050高强铝合金断裂韧性及其影响因素研究.稀有金属材料与工程,2013,42(9):1921
- [10] 廖景娉.金属构件失效分析.北京:化学工业出版社,2011
- [11] 陶艳花.汽车机械零件失效与交通事故关系探析.河南科技,2013(16):80
- [12] 代可香.铝合金的金相分析.化工管理,2013(18):104
- [13] 龚磊清,金长庚,刘发信,等.铸造铝合金金相图谱.长沙:中南工业大学出版社,1987

作者简介:张静(1990—),女,汉,山东滨州人,硕士,吉林建筑大学城建学院助教。研究方向:金属零件分析。E-mail:yingfeng21@126.com。



摄影 高 隼