

DONG
FENG
DONG
FEN
DONG
FE
D



● 第二汽车制造厂
● 中国汽车技术研究中心 编

汽车零部件失效分析及改进

(东风牌汽车)

序 言

一种机械产品能够在市场竞争中立足，并能在国民经济中产生较大的社会效益，除了本身的设计、使用指标必须相对先进、价格必须相对合理以外，还必须具备优良的质量。对质量的评价是多方面的，最基本的要求有两点：

第一是可靠性。其最简单的理解是，用户在产品的正常使用中，不会遇到故障。至少是在相当时期内，不会遇到用户自己难于处置的问题。

第二是比较满意的经济使用寿命。这对于特别昂贵的机器格外重要。例如一台汽车，在相当长的使用期内不需要更换易损备件，而运行的可靠性、经济性仍无明显的衰减，保证小修、中修，特别是大修期规定的间隔里程，进而要求较高的总寿命。

这两点质量要求，往往被机械的个别薄弱环节所破坏。在一台汽车的上万个零件中，少数几种易损件，起着决定该车质量的作用。因此，对故障件特别是对常见、关键故障件的失效分析和改进提高措施，是汽车厂技术工作中极其重要的环节，也是汽车使用管理部门要十分重视的一项技术工作。

全书汇集了第二汽车制造厂东风牌汽车产品在生产和使用环节中出现过的主要零部件早期失效问题及其原因分析，并进一步开发，改进所取得的部分成果。书中旁及有关刀具和辅助材料的失效分析方面的内容。共汇编20篇文章。

上述成果是第二汽车制造厂多年实践积累的技术工作结晶，称之为一个企业的诀窍也并不过分，现在公布出来，供汽车界同行及汽车技术爱好者参考，并以此为促进我国汽车技术的发展作一点贡献。

第二汽车制造厂技术中心的同志嘱我写一序言，根据自己的认识水平，谨写如上，请读者指教。

支 德 瑜

1989年3月20日 于十堰

目 录

1. EQ6100发动机连杆失效分析..... 何光楚 张忠文 (1)
2. 铝锡轴瓦的失效形式和原因..... 李逸民 袁崇伟 (4)
3. 影响曲轴扭转疲劳寿命的某些因素..... 景天义 张柏松 (10)
4. 汽车发动机排气门的失效分析..... 符应鹏 张曼良 李立平 (19)
5. 气阀锁块下沉的原因分析和解决措施..... 赵国平 (24)
6. 排气阀座的失效和机制研究..... 李培亮 覃 琦 (29)
7. 排气管失效分析与改进..... 洪晓光 陈勉己 万仁芳 (34)
8. 对变速箱壳体开裂问题的分析..... 赵春福 (38)
9. 变速箱一档齿轮早期损坏的改进..... 王淑荣 陈恩庭 (42)
10. 后桥减速器齿轮的主要失效形式及其金相分析..... 张惟澄 (48)
11. 喷丸应变线及其影响..... 任安明 (53)
12. EQ240越野车中后桥早期断裂的研究..... 刘国溟 (55)
13. 汽车钢板弹簧的失效..... 毕传普 王会鹤 (61)
14. 转向摇臂轴断裂分析与改进..... 陈守介 曹敦芳 (63)
15. 三销轴的失效分析..... 徐家炽 王会鹤 (66)
16. EQ140汽车车厢横梁的失效与改进..... 王会鹤 (68)
17. 工具失效实例分析..... 陈湘一 (74)
18. 应用铁谱技术诊断EQ6110柴油机磨损工况..... 彭光华 (80)
19. 铸铁疲劳断口的电镜分析..... 李培亮 (87)
20. 对铸钢丸破损机理的探讨..... 张淑珍 李 晓 (90)

1. EQ 6100 发动机连杆失效分析

何光楚 张忠文

连杆是发动机总成中最重要的结构件之一。“二汽”连杆原生产用料为 40Mn 钢，并采用以水作淬火介质的调质热处理工艺。在使用中，发动机中的 6 根连杆，只要其中某一根连杆断裂就要打坏该台发动机。这些发动机断裂连杆的行驶里程少则仅数千公里，多至数万公里。

1. 连杆的断裂特征和断口宏观分析

观察断裂的连杆实物可知：

(1) 绝大多数连杆断在小头，断裂位置多发生在离小头端部 50~70mm 处。如图 1-1 (见图版，下同) 中 A 所示。

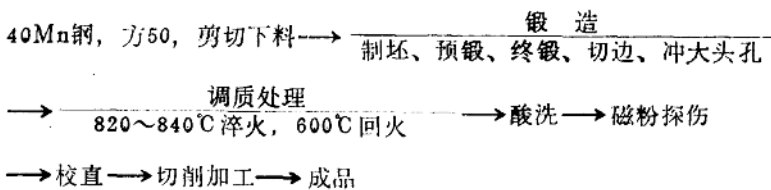
(2) 断裂面与杆身基本垂直。

(3) 所有断口都明显地分为原始裂纹区、疲劳裂纹扩展区和最后断裂区三部分。断口上的黑色区域为原始裂纹，多呈月牙形。原始裂纹区的外部与杆身表面连通，内部紧接疲劳裂纹扩展区，其原始裂纹的内边缘就是疲劳裂纹扩展区的起始线，如图 1-2 所示，其中贝纹状的疲劳裂纹扩展推进线明显可见。

(4) 最后断裂区的面积都很小，这一点说明连杆的工作应力是比较低的。

断口的宏观分析表明：失效连杆的断裂形式均属于以原始裂纹为疲劳源的低应力疲劳断裂。在连杆质量检查过程中，发现了在连杆小头的横向或圆弧形的裂纹，其裂纹位置与使用中的断裂位置二者相吻合，如图 1-1 所示。

2. 连杆的生产工艺过程



从以上生产工艺过程看，连杆原始裂纹的形成可能与以下工艺过程有关：锻造过程、淬火过程和校直过程，究竟是在哪一过程形成？

3. 裂纹特征和成因分析

为了鉴别原始裂纹是属于何种类型的裂纹，我们分别对两种连杆试样作了显微分析。一种试样是使用过程中断裂的连杆，另一种试样是生产过程中检查发现的裂纹连杆。在原始裂纹处截取金相样品，金相磨面垂直于原始裂纹面。金相观察结果表明两种连杆具有相同的裂纹

特征，图 1-3 所示为其一例：

- (1) 裂纹棱角分明，曲折尖细并有分叉；
- (2) 裂纹两侧显微组织无脱碳现象；
- (3) 裂纹内有浅灰色的氧化物。

裂纹周围组织无脱碳的特征表明该裂纹不是锻造折叠，因为在锻造过程中的折叠是有明显脱碳的，如图 1-4 所示。裂纹内有浅灰色的氧化物，表明它不是校直裂纹。

从以上分析中，可以判定连杆的原始裂纹是在淬火冷却过程中形成的应力裂纹。

4. 校直使连杆裂纹扩展

连杆校直工序是在冷态下进行的。为了查明冷却对连杆裂纹发生发展过程的影响，采用了下述试验方法：对校直后经检查发现裂纹的连杆放入 230℃ 的炉中，加热 30 分钟后取出，冷却后立即沿裂纹发展方向将连杆断开观察断口。可见断口明显地分成三个区：黑色区、浅黄色区、银灰色区，如图 1-5 所示。其中黑色区是在校直前就存在的淬火裂纹。浅黄色区是在校直过程中，由于机械应力而使淬火裂纹扩展的区域，该区经 230℃ 加热氧化而成浅黄色，它既不同于黑色的淬火裂纹断

裂面，也与最后断开的银灰色区有明显差别。

用这种氧化留印的方法，我们对 9 根带裂纹的连杆进行了分析，得到了相同的结果，断口上都有黑色区和浅黄色区，而没有单一的浅黄色区。这说明连杆在校直后经磁粉探伤检查所发现的裂纹实质上仍然是淬火裂纹，只不过该淬火裂纹在校直的过程中都有不同程度的扩展，一般扩展深度为 0.2~0.5mm。没有发现不带原始裂纹的单纯的校直裂纹。

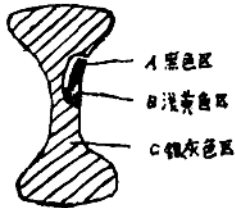


图 1-5 连杆在校直后淬火裂纹扩展示意图。

5. 连杆的淬裂原因分析

如上所述，发动机连杆在使用中的断裂事故，是由于有横向淬火裂纹而引起的疲劳断裂。通常，淬火裂纹的形成因素有三方面：

- (1) 热处理工艺因素 包括淬火加热制度、淬火介质的选择、回火工艺及间隔时间，热处理操作技术、淬火前的原始组织状态等。
- (2) 材质因素 包括选材是否合理和冶金质量。如非金属夹杂物、气孔、疏松、碳化物偏析、微裂纹等。
- (3) 零件的设计因素 如零件的尺寸和结构形状设计。其中值得注意的是发生淬火裂纹的临界尺寸和应力集中造成的易发生淬火裂纹的危险断面。

实际生产中的淬裂现象往往不是单一因素造成的，通常为多种因素综合作用的结果。对照分析“二汽”发动机连杆的具体情况，形成淬火裂纹的原因可能是：

- (1) 连杆用 40Mn 钢制造，以水作冷却介质。水的冷却速度大，淬火应力大，淬裂倾向大。
- (2) 连杆的断裂位置多发生在小头，淬火裂纹走向与小头圆弧轮廓趋于一致。断裂位置正好在厚薄截面突变处，如图 1-6 所示。该处由于截面厚薄差别所引起的组织转变不等等便增大了淬火应力。并由截面突变造成的应力集中，使该区成为易发生淬火裂纹的危险

区。在淬火冷却过程中，当厚薄截面交界处产生的拉应力大到一定程度后，就要出现淬火裂纹。

6. 防止连杆断裂的措施

为了防止连杆的断裂事故，从上述对连杆失效形式和淬裂原因分析中，可以采取如下预防措施：

(1) 防止淬火裂纹的产生。将40Mn钢淬水改为40MnB淬油，减缓淬火冷却速度，降低淬裂倾向。同时，可在不影响连杆使用性能的前提下加大厚薄截面突变处的圆角过渡，降低淬火过程中的应力集中程度。

(2) 加强连杆表面质量检查，不使有裂纹的连杆装入发动机。采用荧光探伤，使裂纹显示更清楚，避免裂纹连杆漏检。

(3) 采用某些合金钢，在锻后空冷态或锻后空冷回火态下使用，避开淬火热处理从根本上杜绝淬火裂纹。

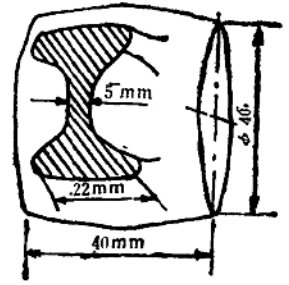


图1-6 连杆小头截面突变处各部主要尺寸示意图

2. 铝锡轴瓦的失效形式和原因

李逸民 裘崇伟

1. 前 言

现已有各种仪器分析方法,可以帮助分析轴瓦的失效形式,但在大多数情况下,根据轴瓦的损坏形貌,用目视检查方法,并检查相关零部件,可以准确判断轴瓦的失效形式和原因,并采取相应解决措施。

但是,人们往往只注意检查单对失效的轴瓦,不注意还应检查全套轴瓦及相关零件(或得不到全套实物),以及发动机润滑、滤清、油料、使用维护等有关情况,以致很难作出准确判断。另外,有关轴瓦失效形式的名词和定义尚不一致,含义有时模糊不清。现根据EQ6100发动机轴瓦损坏的主要形式,整理成本文。

2. 轴瓦失效原因统计

美国一个轴瓦制造公司根据对7000余件实例的统计,得出轴瓦失效的各种原因所占的比例如下:

异 物	43.4%
润滑不良	16.6%
装配不当	12.2%
轴线偏斜	11.7%
过 载	6.7%
腐 蚀	4.0%
不明确或其它原因	5.4%

另外还有一些统计数据与此基本相符,说明轴瓦失效的主要原因是异物混入润滑系中,其次是润滑不足、错装和制造误差。

3. 轴瓦的主要失效形式

根据轴瓦的损坏形貌,并参照一些较为公认的资料中采用的名词术语,可以把EQ6100轴瓦的主要失效形式分成划痕、异物嵌入、磨损、偏磨、疲劳剥落、擦伤、烧熔等七种情况。这种分类方法比按磨损原理分类更具有实用性,便于不同专业人员掌握使用和相互商讨。本文将详细说明各种失效形式的定义、形貌特征和识别方法,以及产生原因。EQ6100发动机采用含锡20%的铝合金钢背双金属薄壁轴瓦,合金层厚度大约为0.3mm。在钢背与铝锡合金之间有0.005mm厚的纯铝层(复合工艺需要),下面将要说明纯铝层对轴瓦的某些损坏形貌特征会有所影响。

另外，汽车发动机轴瓦有巴氏合金、铜铅合金、铝合金三种不同的合金系列，对于不同的合金系和不同的发动机设计型号，轴瓦的主要失效形式不完全相同。例如腐蚀主要是铜铅轴瓦的一种失效形式，铅基巴氏合金很少发生，锡基巴氏合金和铝锡合金有良好的抗蚀性。在EQ6100发动机中，铝锡合金轴瓦不存在腐蚀问题，故本文不予讨论。

(1) 划痕 (见图 2-1 a、b)

定义：轴瓦工作表面沿圆周方向不均匀分布的、粗细不等的、连续或断续沟线。

与巴氏合金相比，铝锡合金容易产生划痕。

轻微的划痕，如果没有因划痕而引起局部擦伤、烧熔、剥落的迹象，通常不会造成发动机故障，可以继续使用。

形貌和识别方法：划痕定义本身就描述了它的形貌，这是最容易识别的一种失效形式。

划痕的粗细通常相当于或更大于轴颈间隙的数量级。它们大多分布在靠近油孔的圆周带区，或储油包的油流下方。在全套轴瓦中，可能随机出现在某些瓦副中；也可能经常出现在某一对瓦副中，此时往往与清洗死角有关。

产生原因：产生划痕的根本原因是异物混入润滑系中和轴颈表面毛刺。异物系指在润滑系中循环的，不是发动机正常磨损所产生的任何外来颗粒。它们包括没有清洗干净的铸造用砂粒、喷丸碎粒、磨头磨粒、钢屑、铁屑、灰尘、泥土、发动机调试用油中的异常超大颗粒，以及由于发动机异常磨损所产生的磨粒。例如，凸轮、挺杆、正时齿轮、油泵齿轮、缸一环组件等均有可能产生大片或块状异常磨粒。显然，异物的存在主要与发动机清洗不净有关。

特别有害的是，在新装配的发动机中，位于滤清器以后，轴瓦进油孔之前的油道中，未清洗干净的异物。这是发动机调试期轴瓦划痕的根本原因。因此根据轴瓦划痕程度评定油道清洁度，更具有实际意义。

机油滤清器旁路或失效也能引起划痕。轴瓦有划痕时，轴颈表面也可能有划痕。

(2) 异物嵌入 (见图 2-2 a、b、c)

定义：外来颗粒在轴瓦工作负荷作用下，被压入并全部或部分埋藏到合金层中，被合金层所“吸收”。

巴氏合金有良好的嵌藏性，对异物有良好的“吸收”能力。铝锡合金仅对细颗粒有一定“吸收”能力，故容易产生划痕。

轻微的或全部的嵌入，只要没有引起局部擦伤或剥落，通常不会使铝锡轴瓦失效。

形貌和识别方法：通常隐约可见或不可见藏入的异物，但在异物周围必定有一圈明显发亮的挤出压平的痕迹。在与轴的旋转方向相反的一侧，嵌入颗粒在轴瓦的工作面上可能留有划痕状的拖尾。细小颗粒可以全部嵌入，大于 0.3 毫米的颗粒只能部分嵌入。

在一副瓦片中，或者在全套瓦中，出现嵌入可能性较大的部位与前述划痕部位相同。

产生原因：与前述划痕产生原因相同。

(3) 磨损 (见图 2-3)

定义：在规定的使用里程以内，轴瓦的磨损超过了限量，使轴颈间隙过大，轴瓦不能再继续使用。

按照磨损机理，由于润滑不足而引起的轴瓦表面擦伤或烧熔，属于粘着磨损的严重状况，通常称为异常磨损，大多发生在轴瓦使用初期或机油压力显著降低时。这里所说的磨损是指磨损寿命没有达到规定里程，但确有一定的使用寿命，没有致命的发热和金属流动迹

象，在本质上主要属于磨粒磨损。

铝锡合金有良好的耐磨性，使用寿命可达到20~25万公里。

形貌和识别方法：正常磨损的轴瓦工作面呈镜面，磨痕轻微，快速磨损的轴瓦工作面光亮，但镜面特征欠佳，通常可以看到有很多相互分辨不清的、非常细密的周向磨痕。

磨损一般不会局限于一副或部分瓦副中，而是同时出现在全套瓦副中。

产生原因：

1) 轴颈表面光洁度差。有人指出在重载高速发动机中，轴颈表面精磨以后再抛光，与发动机清洁度有同等重要的作用。

2) 轴颈表面磨削和抛光方向与其使用时的旋转方向相反。这一点对巴氏合金尤为重要，对铝锡合金也有明显影响。

3) 机油变质，机油滤清器失效或旁路，油中磨粒平衡浓度偏高。

4) 频繁起动，长时间低速运转。

(4) 疲劳剥落 (见图 2-4)

定义：由于交变负荷及其作用周次超过材料本身所能承受的极限而发生的一种损坏现象。

对于任何一种型号的发动机，只要设计和选材正确，不会出现大量的剥落问题。

巴氏合金的抗剥落性能较低，镀有第三层的铜铅合金或铝合金，主要存在镀层剥落问题，铝锡合金有良好的抗剥落性能，在EQ6100发动机中，其疲劳强度有富余，通常不会发生剥落问题。EQ6100发动机第四主轴颈采用了巴氏合金止推片，当有偏载情况时，大多以剥落形式损坏。

有时发现铝锡合金与钢背有分层，这是材料的冶金缺陷的暴露，在本质上不属于疲劳剥落。其形貌与疲劳剥落也有明显区别，凡分层者，在复合面上必然“露铁”。

形貌和识别方法：轴瓦的疲劳剥落也有一个裂纹的萌生和扩展过程。开始是在工作表面出现鸡爪状的微裂纹痕迹，它们垂直于工作面向里扩展，接近复合线之后，转而沿平行于复合线的方向扩展并相互连通，形成虫孔状的小剥落坑，并有可能逐渐扩大为较大的剥落坑。坑的形状不规则，但其周边和底面较光滑，底面一般不露铁。

在EQ6100发动机中，由于轴瓦的设计计算比压值有相当富余，故剥落坑的部位往往与偏载或瓦背某处垫有异物有关。

产生原因：

1) EQ6100发动机轴瓦剥落大多是由于瓦背垫有异物，引起局部应力集中所致。拆检时可以找到异物且瓦背上肯定有异物垫痕。

2) 由于装配不善或制造误差引起局部偏载，可能因偏载产生剥落坑。根据偏载部位，并对有关零件进行必要的测量可以找到偏载的原因。

由于铝锡合金轴瓦用于EQ6100发动机的疲劳强度有一定富余，而其顺应性又较差，故偏载引起异常磨损（擦伤、烧蚀）的可能性往往大于剥落。实际情况正是如此。

3) 由于异物嵌入引起局部应力集中，也可能导致剥落。这种情况下在瓦背相应处没有垫痕，在瓦的工作表面上也不一定有偏载痕迹。

4) 由于工作温度偏高，或由于腐蚀作用使材料疲劳强度变弱，也可能导致疲劳剥落。这种情况在铝锡合金中少见。

(5) 偏磨 (见图 2-5 a、b)

定义: 由于某种原因产生的轴瓦工作表面局部偏载, 使轴瓦工作面在偏载区发生局部不均匀磨损, 偏磨 (或偏载) 区的部位通常与轴瓦最大受载区和最小油膜厚度区的位置不符。在正常情况下, 主轴瓦下半瓦和连杆瓦上半瓦的中部磨损较大。

在发动机磨合期或使用初期, 往往难免有轻微的偏磨痕迹, 但经过一段时间以后, 偏磨现象应基本消失。轻微的偏磨只要没有转变为擦伤或剥落的迹象, 一般不会引起发动机故障, 可以继续使用。

铝锡合金的顺应性比巴氏合金差, 在磨合期或使用初期往往容易显现偏磨痕迹, 且严重的偏磨往往容易发展为擦伤, 甚至烧熔并抱轴。

形貌和识别方法: 在轴瓦工作表面局部区域出现镜面状的磨损区。它与局部擦伤的区别是没有表面金属流动痕迹, 但可能有轻微的细密的磨痕。在与偏磨区相应的瓦背表面没有发热变色现象。

偏磨的部位是分析偏磨 (或偏载) 原因的重要线索。同时要注意检查全套轴瓦, 并对相关零件, 例如曲轴、瓦座、连杆、活塞、活塞销等作必要的测量检查。

产生原因:

- 1) 轴颈、瓦座、活塞销孔的轴线偏斜。
- 2) 轴颈圆角半径过大。
- 3) 曲轴旋转系显著的动不平衡。
- 4) 轴颈圆柱度超差 (例如呈锥形、鼓形、鞍形、阶梯形、油孔周围表面隆起、表面沟槽等) 或瓦座内孔圆柱度超差。
- 5) 连杆弯曲或扭曲。
- 6) 瓦盖错装。
- 7) 瓦厚差超差或轴颈、瓦座内孔失圆。
- 8) 轴瓦压紧量 (或预留压紧高度) 过大或过小, 瓦座内孔超差, 连杆螺栓拧紧扭矩不够, 此时瓦座对口面可能有微动磨损痕迹, 瓦座可能有疲劳裂纹。
- 9) 瓦背垫有异物, 瓦背贴合面不符合要求。

零件上也可能有相应异常迹象, 可以根据实际情况具体分析, 在此不予详细描述。

(6) 擦伤 (常称拉瓦) (见图 2-6 a、b、c)

定义: 由于某种原因而引起的油膜破裂, 使轴颈表面与轴瓦工作表面直接接触, 摩擦发热, 使合金层沿轴的旋转方向发生的局部或大面积的浅表层不均匀流动现象。

擦伤在本质上属于较为严重的粘着磨损现象。与巴氏合金相比, 铝锡合金有较明显的擦伤敏感性, 并容易进一步发展为烧熔甚至抱轴。

磨合期的轻微擦伤, 使用过程中由于某种原因而引起的偶尔轻微擦伤有可能自愈合。

形貌和识别方法: 擦伤的主要特征是“浅表层”金属沿轴颈旋转方向流动 (许多人称这种流动现象为“挤瓦”), 其表面发亮, 但光洁度比正常磨损和偏磨者低, 通常有极细微的朝轴颈旋转方向倾倒的毛刺, 瓦背相应部位可能由于发热而轻微变色。

轴颈表面可能有轴瓦合金的金属转移 (仅用肉眼观察很难看到), 和横向 (与轴颈旋转方向垂直) 裂纹, 金相检查轴颈表层可能有金相组织转变。由于轴线偏斜所引起的擦伤, 可能有曲轴弯曲疲劳裂纹或断裂情况发生。

曲轴弯曲和瓦座偏斜，以及旋转系统的动不平衡负荷是轴瓦擦伤的主要原因之一（特别是在伴有供油不足的情况下）。但表现形式有所不同：曲轴弯曲使轴瓦全周擦伤，轴颈局部弧面偏磨或擦伤，且一般发生在中间主轴颈；瓦座偏心使轴瓦局部弧面擦伤，轴颈全周偏磨损或擦伤。而曲轴转动系动不平衡的表现形式与曲轴弯曲相似，但所在轴颈的位置与不平衡负荷的轴向位置有关。当实测曲轴弯曲方向与轴颈偏磨方向不符时，很可能存在动不平衡负荷的影响。

产生原因：

全套轴瓦的擦伤往往与润滑供油故障和使用维护不当有关，单对或部分轴瓦副擦伤往往与偏载、间隙或装配不当有关。

较轻的偏载引起偏磨，较重的偏载引起局部擦伤。偏载通常是轴瓦擦伤的最普遍的原因。

- 1) 前述偏磨的各项原因（含偏载程度较重时），均可能引起局部擦伤。
- 2) 轴颈间隙太小或太大均可能引起擦伤。
- 3) 划痕和疲劳剥落引起擦伤。
- 4) 干起动（装配时瓦片工作面没有抹油）或频繁起动。
- 5) 长时间或频繁怠速运转时，形成润滑油膜的条件较差，且泵油量也较低，此时在怠速爆发压力的综合作用下，有可能引起连杆瓦上半瓦或主轴瓦下半瓦中间部位擦伤或剥落。
- 6) 爆震或点火提前（特别是强制拖动时）可能引起连杆瓦上半瓦或主轴瓦下半瓦中间部位擦伤或剥落。强制拖动是指超载爬坡时，加大油门但发动机转速不增加。
- 7) 机油压力或流量偏低、油温偏高。
- 8) 机油中混入了燃油、防冻剂、冷却水，机油变质换油不及时。

（7）烧熔（常称烧瓦）（见图 2-7 a、b、c、d）

定义：烧熔是比擦伤更恶劣的粘着磨损所造成的异常磨损现象，它使合金层整体沿轴颈旋转方向流动，部分熔化和挤出。

铝锡合金的开始熔化温度较低，只有 232℃，严重的擦伤发热很容易使其软化，或使其低熔点组分开始熔化。在半熔融状态下，合金层本身的强度完全丧失，在机械负荷和热冲击负荷作用下，使合金彻底损坏。烧熔的最后结果通常是以抱轴的方式造成发动机故障。

形貌和识别方法：烧熔的主要特征是合金层“整体”流动挤出，严重时挤出的金属会堵死油槽，瓦背表面因发热而变黑，在瓦片上或许可以找到其低熔点组分被熔化后挤出的细微“汗珠”。当过热温度接近合金层熔点 232℃ 时，往往有大面积合金层脱落。应当指出，这种脱落现象与疲劳剥落的区别在于没有明显的剥落坑的虫孔状形貌特征，但却有金属流动现象和一些要掉而未掉下的脱落片；与材质分层的区别在于脱落面不“露铁”。

在轴颈表面有较明显的金属转移，并往往有横向裂纹和表层金相组织转变，轴颈表面可能因升温变色。若与轴线偏斜或曲轴弯曲有关，则可能有曲轴断裂事故发生。严重烧熔时可见到瓦背表面与瓦座贴合松动的摩擦痕迹。

产生原因：

前述所有引起擦伤（油膜破坏）的原因，当它们的存在程度更为恶劣时，均导致烧熔。烧熔使轴瓦完全损坏，瓦面上原本可以帮助分析原因的某些线索也被毁掉，如果不全面检查相关零件和使用情况可能会错判。

4. 结 束 语

上述各种失效形式并未包罗万象，但基本上概括了 EQ6100 发动机铝锡轴瓦的主要损坏情况。

各种失效形式（或原因）可能单独发生，也可能重复发生，还可能由一种形式转变成另一种形式。因此，特别是一些损坏程度比较严重的轴瓦查找造成损坏的真实原因较为困难，此时更应详细检查相关零部件，并详细了解车辆使用维护情况。

从某种意义上说，磨损、偏磨、擦伤、烧熔分别表示了不同磨损形式和不同损坏程度。除了划痕之外，铝锡合金轴瓦的使用中的主要问题是擦伤和烧熔，擦伤和烧熔在本质上属由油膜破裂后金属与金属直接接触所造成的严重或异常的粘着磨损形式。有一些名词，例如拉伤、挤伤、烧伤、烧蚀等等，这些大多都涉及到油膜破裂问题，但含义不太明确，各人的理解也可能有所出入。在一些较为公认或权威的资料中，一般均不使用这些名词。

这次，我们根据常见情况，按照轴瓦损坏形貌，把铝锡轴瓦的失效形式分成七类，规定了它们的定义，说明了它们的形貌特征和产生原因。这种分类方法比按磨损形式分类更具有实用性，希望有助于不同专业人员共同分析和解决在实际工作中可能遇到的铝锡轴瓦失效问题。

3. 影响曲轴扭转疲劳寿命的某些因素

景天义 张柏松

东风EQ240型越野汽车在云南、海南岛两地试车过程中，球铁曲轴曾出现过扭转疲劳裂纹。为探索球铁曲轴的抗扭转疲劳性能，1978年进行了第一轮扭转疲劳试验。


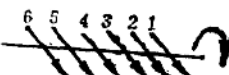
对汽车、拖拉机而言，使用球铁制造发动机曲轴日趋增多。但用锻钢制造者目前仍占相当的比重。锻钢曲轴在扭转疲劳中裂纹的发生发展规律，它与球铁曲轴相比，其扭转疲劳抗力究竟如何等问题尚不十分清楚。

针对上述问题，在第一轮试验的基础上，1979年又进行了第二轮试验。本文系第二轮试验的总结报告，着重对影响曲轴扭转疲劳寿命的某些因素进行探讨。

1. 试 样

本次试验用四种曲轴，它们是CA10型的锻钢曲轴和球铁曲轴，EQ240型的铸态球铁曲轴和铸态球铁中频加热淬火曲轴。试验中所用的单拐试样都是从成品曲轴上切取的，其有关参数如表1所示。

表1 6100曲轴和CA10曲轴单拐试样的有关参数

曲轴型号		6100型(球铁)		CA10型	
				45°锻钢	球铁
表面处理工艺		铸态		中频加热淬火	铸态
淬硬层深				4~6mm	
组织及硬度		珠光体≥75%， 球化率≥3B级	中频加热淬火 2.5~4.5mm 表面马氏体+石墨 球Rc46-58	表面马氏体 Rc52-62	珠光体量≥75% 球化率1A-1B
成分 (%)	C	3.7		0.46	2.52
	Si	2.13		0.26	2.34
	P	≤0.07			0.001
	S	≤0.03			0.013
	Mn	0.71		0.64	0.81
连杆轴颈		φ62		φ62	
油孔夹角θ*1		43°18'		第3拐50°24'，第6拐52°19'， 第1、2、4、5拐57°	
油孔夹角β*2		47°23'		30°	
油孔取向					
备注		*1. 油孔夹角θ，系指如图3-1a所示的情况下，油孔和轴向的投影夹角(锐角)。 *2. 油孔夹角β，系指如图3-1b所示的情况下，油孔和主轴线、连杆轴心连线的投影夹角(锐角)。			

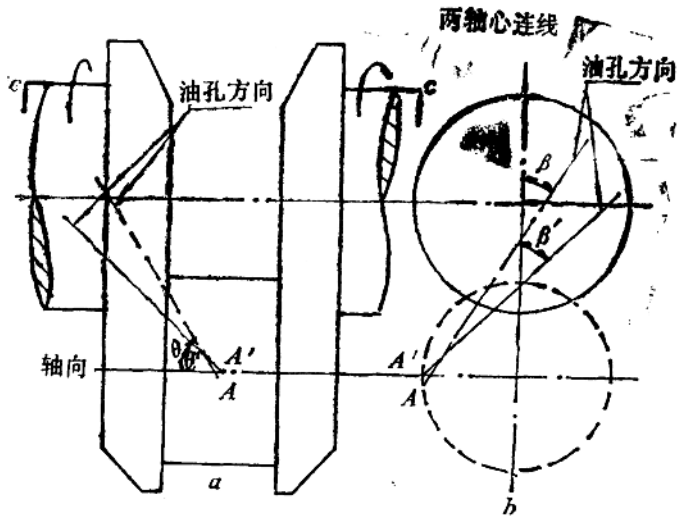


图 3-1 油孔夹角 θ 、 β 和位置示意图

虚线为CA10型曲轴油孔夹角 θ 、 β ，实线为6100型曲轴油孔夹角 θ' 、 β'

为了叙述上的方便，我们把油孔与轴颈表面的交线看作一个椭圆，并且规定，当曲轴在发动机内受到外加扭矩时，若椭圆孔口的长轴与最大拉应力平行，油孔的取向就称为有利取向；与最大拉应力垂直，油孔的取向就称为不利取向。按上述规定，就其整根曲轴在发动机内受到的扭矩来看，CA10型曲轴的油孔取向就全为不利取向；EQ240型曲轴的第1、2、3连杆轴颈的油孔取向为有利取向；第4、5、6连杆轴颈的油孔取向则为不利取向。

然而，对于一个具体的单拐试样来说，只要改变在它上面的扭矩方向，就可以使连杆轴颈上椭圆孔口的长轴和最大拉应力方向平行或者垂直。因此，对油孔只有一种取向的曲轴，当截取成单拐试样进行试验时，就会有有利、不利两种取向。

2. 主要试验结果

本次所使用的试验机、夹具等试验装置以及试验条件、试验方法、寿命评定标准等完全和第一轮试验相同。并且和第一轮试验一样，把产生于油孔口尖角薄壁处，沿轴颈表面发展的裂纹定为裂纹A；把产生于孔口以下的内径处的裂纹定为裂纹B（见图3-2）。

(1) 油孔为有利取向和不利取向的疲劳寿命

当试验应力为977kPa时，油孔取向对扭转疲劳寿命的影响见表2。

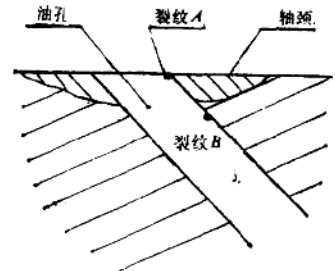


图3-2 裂纹A、B示意图

表 2

CA10 锻钢曲轴油孔取向对扭转疲劳寿命的影响

交变应力幅 977kPa

试验号	油孔取向	试验周次	轴颈表面所能见到的裂纹 A	轴颈表面所能见到的裂纹 B	静扭断之后的断面(注)
01*	有利	10^7	未见	未见	裂纹 B 在内壁产生其大小为 1
02*	有利	10^7	未见	未见	" " 为 1.2
03*	有利	10^7	未见	未见	" " 为 1.4
1*	不利	2.9×10^6	22 mm	未见	" " 为 5.2
6*	不利	3.75×10^6	>10 mm	未见	" " 为 4.8
3*	不利	5.1×10^6	13.5 mm	未见	" " 为 3.5
22*	不利	8.8×10^6	2 mm	72 mm	沿裂纹 B 断开其大小为 6.5

注: 静扭断之后的断面, 系以 01* 试样的面积为 1, 并以此为基准比较而来的。

从表 2 看出, 油孔为有利取向时, 尽管试验周次达 10^7 周次, 不仅全都没有在表面产生裂纹 A, 而且静扭断之后的断面上, 裂纹 B 扩展的面积也比不利取向时小得多。

(2) 油孔夹角 θ 和 β 对扭转疲劳寿命的影响

CA10 曲轴六个连杆轴颈上的油孔夹角 θ , 图纸规定有三种不同的角度 (见表 1), 油孔夹角 β 虽然图纸规定为 30° , 但是实际测量发现, 有的小于 30° , 有的大于 30° , 往往在 $29^\circ \sim 35^\circ$ 范围内波动。不同的油孔夹角 θ 和 β , 对曲轴扭转疲劳性能的影响见表 3、表 4。

表 3

油孔夹角 θ 对扭转疲劳性能的影响

交变应力幅 977kPa

试样号	油孔夹角 θ	产生裂纹 A 的周次	全部试验周次	裂纹 A 的长度
1*	$50^\circ 24'$	0.93×10^6	2.9×10^6	22 mm
6*	$52^\circ 19'$	2.2×10^6	3.75×10^6	>10 mm
3*	57°	3×10^6	5.1×10^6	13.5 mm

交变应力幅 798kPa、

试验周次 $N = 5.2 \times 10^6$

表 4

油孔夹角 θ 、 β 对裂纹 B 面积大小的影响

试样号	油孔夹角 θ	油孔夹角 β	裂纹 B 的面积	备 注
8*	57°	35°	1	裂纹 B 的面积以 8* 试样的面积为 1 单位, 其余以 8* 为基准比较而得
13*	$52^\circ 19'$	29°	1.8	
9*	$50^\circ 24'$	29°	6	

从表 3 看出, 在交变应力幅同为 977kPa 时, CA10 锻钢曲轴, 油孔为不利取向时, 随着油孔夹角 θ 的角度增大, 产生裂纹 A 的周次增加, 即疲劳寿命长。

从表 4 看出, CA10 锻钢曲轴试样油孔为不利取向, 交变应力幅为 798kPa, $N = 5.2 \times$

10⁶周次时, 随油孔夹角 θ 、 β 的角度增大, 裂纹 B 的面积变小。

裂纹 B 产生于油孔内壁淬硬与非淬硬的交接区, 难于准确观察和及时发现。因此, 在用静力扭断之后, 从裂纹 B 的面积大小间接判定产生裂纹 B 的周次。在材料、工艺、油孔取向、交变应力、试验周次都相同的情况下, 油孔夹角 θ 、 β 角度大者, 裂纹 B 的面积小, 这可间接说明产生裂纹 B 时的周次是, 扭转疲劳抗力好; 油孔夹角 θ 、 β 角小者, 裂纹 B 的面积大, 这可间接说明产生裂纹 B 时的周次低, 疲劳抗力差。

(3) CA10曲轴和EQ240曲轴油孔为不利取向时扭转疲劳试验结果比较 (见表5)

表5 CA10曲轴和EQ240曲轴油孔为不利取向时扭转疲劳试验结果

型号	材料	表面状态	试验应力	出现裂纹 A 的周次	静扭断后的断面
CA10	45° 锻钢	中频加热 淬火	896.7kPa	$2 \times 10^6, 0 \rightarrow, 0 \rightarrow,$ $0 \rightarrow, 0 \rightarrow, [注]$	全都有裂纹 B , 未达轴颈
	球铁	铸态		$0 \rightarrow, 0 \rightarrow, 0 \rightarrow$	全都没有裂纹 B
EQ240	球铁	中频加热 淬火	842.8kPa	0.027×10^6 0.18×10^6 0.2×10^6	全都有裂纹 B , 未达表面
	球铁	铸态		1.7×10^6 2×10^6 1.1×10^6	全都没有裂纹 B

注: $0 \rightarrow$ 表示超过 5×10^6 周次未出现裂纹 A

从表5看出, 凡是表面经中频加热淬火的, 不论是锻钢还是球铁曲轴试样, 在表中给定的高应力或低应力下均产生裂纹 B , 而铸态球铁曲轴试样, 一般只产生裂纹 A 而无裂纹 B 。

同样是经过中频加热淬火的曲轴CA10锻钢, 比EQ240的扭转疲劳抗力要优。

轴颈经中频加热淬火的曲轴扭转疲劳抗力, 比不经加热淬火的要差。

从表5还看出, CA10型球铁曲轴的扭转疲劳抗力既比CA10型锻钢的高, 也比EQ240型曲轴高 (包括铸态和淬火的)。

除此而外, CA10型锻钢曲轴较EQ240型曲轴有更优良的过负荷性能 (见图3-3)。

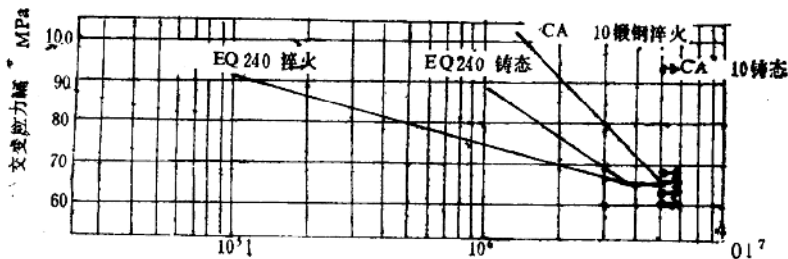


图3-3 EQ240曲轴, CA10曲轴过负荷性能比较

注: CA10锻钢曲轴的过负荷持久值, 系按每种应力水平中的五个点的最低寿命点描出。

(4) 扭转疲劳中CA10锻钢曲轴裂纹的发生和发展特征

CA10锻钢曲轴, 油孔为不利取向时, 裂纹 A 有发展得较长的 (从孔口到几乎接近圆角

根部),也有发展得较短的,仅4 mm左右即停止。在轴颈表面上,和轴向约成 45° 角的裂纹A和裂纹B之间,一般都约有2 mm的间距(图3-4),用静力将有裂纹的试样扭开,全部不沿裂纹A断开,而沿裂纹B断开(即使尚未发展到轴颈表面的比裂纹A的断面积小得多的裂纹B),疲劳断口呈扭卷曲状。淬火的EQ240型曲轴,裂纹A和裂纹B在发展过程中或者重合,或者有比CA10型的小得多的间距。用静力将有裂纹的曲轴试样扭开,看到一个具有台阶、同时含有裂纹A和裂纹B的断口,相当于CA10型曲轴的扭卷曲状而言,整个断口基本平直。

另外,将裂纹B间隔的那部分轴颈去掉后,显露出只有裂纹A的断面,这个断面在离孔口约4 mm左右的区段,是从油孔内壁到轴颈表面都穿透的形式断裂的,而在距孔口较远的区段,仅在轴颈表面以下2~3 mm裂开(图3-5)。

关于裂纹A、B产生的先后次序,本次试验既有裂纹A先于裂纹B产生的,也有裂纹B先于裂纹A产生的。如7#试样,裂纹A长达10 mm以上,静扭断之后看到,裂纹B刚在内壁产生,21°、5°、14°等。虽然它们的轴颈上都没有产生裂纹A,但是,静扭断之后发现,裂纹B已在油孔内壁产生并发展。所以,对轴颈经过淬火的曲轴,决不能认为轴颈上没有产生裂纹A,就断定油孔内壁上没有裂纹B了。

轴颈经淬火的曲轴,不论是CA10锻钢的,还是铸铁的,在扭转疲劳中都有裂纹A和裂纹B产生。没有淬火的曲轴,不论是CA10球铁还是EQ240球铁曲轴,都仅有裂纹A产生而不会产生裂纹B,由此看来,会不会在油孔内壁上产生裂纹B的关键,是曲轴轴颈的表面是否有淬火强化层。

裂纹B产生于油孔的内壁,在发展过程中,主要受到最大拉应力和应力集中的影响, EQ240型曲轴的油孔夹角 θ 为 $43^\circ 18'$,具有应力集中的油孔走向和最大拉应力几乎近于垂直,疲劳裂纹沿油孔走向发展,静扭断之后的断面基本是平直的,而CA10曲轴的油孔夹角 θ 为 $50^\circ 24'$ 、 $52^\circ 18'$ 、 57° 三种情况,具有应力集中的油孔走向和最大拉应力的不垂直度,随着油孔夹角 θ 的增大而增大。裂纹在发展的初期,受油孔壁上的应力集中的影响大,基本上沿油孔走向发展。裂纹B在沿油孔向圆角根部及孔口发展的同时,还要向轴颈表面发展,此时,油孔应力集中的影响逐渐减小,拉应力的影响增大,裂纹B的走向和拉应力面逐渐趋于一致,从油孔壁到轴颈表面的整个断面为扭卷曲状,油孔夹角 θ 越大,断口的扭卷曲特征越突出。

裂纹A和裂纹B的发生和发展,受到材料、工艺、残余应力,应力高低、交变应力的不对称度、油孔结构和位置等多种因素的综合影响,使得EQ240型淬火曲轴和CB10锻钢淬火曲轴的裂纹发生、发展特征不完全相同。

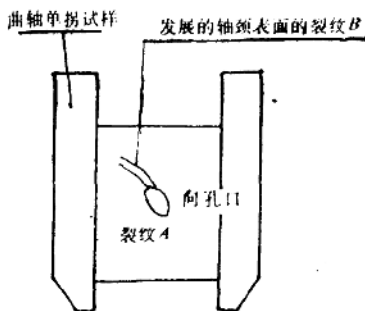


图3-4 裂纹A和裂纹B有约2 mm的间距

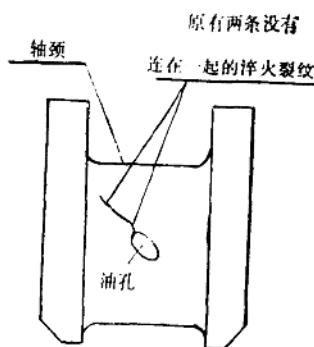


图3-5 裂纹A的断口图