

曲轴断裂失效影响因素与影响机制研究

王晓青, 夏水华

(黄石理工学院机电工程学院, 湖北黄石 435003)

摘要: 以生命期的视角, 对断裂曲轴进行研究, 发现了曲轴生命期中设计、制造、使用三个阶段和材料对曲轴断裂的相关影响因素, 并试图建立曲轴断裂影响因素全集, 对三个阶段和材料对曲轴断裂的主要影响因素和影响机制进行了分析, 为改善曲轴生命期质量提出了建议。

关键词: 曲轴; 断裂; 影响因素; 影响机制; 生命期

中图分类号: TH423.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)01-0033-05

Influence Factors and Influence Mechanism of Crankshaft Fracture

Wang Xiaoqing, Xia Shuihua

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Huangshi Polytechnic College, Hubei Huangshi 435003)

Abstract: Crankshaft fracture is researched and the influence factors, including three stages during service life, design, manufacturing and usage, as well as materials are found out and the whole set of the influence factors are established preliminarily. The main influence factors and influence mechanism is studied, and suggestions are given for improving the quality of crankshaft during its service life.

Keywords: crankshaft; fracture; influence factor; influence mechanism; service life

0 引言

曲轴是活塞式发动机的主要零件, 曲轴断裂轻则必须停机更换, 重则导致机器毁损甚至重大安全事故。曲轴断裂选择简单地更换并不能排除再次断裂的风险, 需要分析导致断裂的因素并加以改进。从个体看, 曲轴断因千差万别, 但当断裂样本数较多时, 就能发现实际存在的曲轴断裂影响因素集。寻求影响因素全集的意义在于: 建立生命期质量目标, 通过遍历集合中的因素, 达到主动改善曲轴生命质量的目的。

实际上, 每一根断裂曲轴都是一个“实验”结果, 弃之可惜。如果仅止于研究某一实验环境对应的实验结果, 遇新的使用环境, 很难有 100% 相符的先例可循, 而忽略那些固定“实验”条件之外的影响因素, 又要承担不可预知的风险。为了建立曲轴断裂影响因素集, 搜集和分析了大量断裂曲轴信息,

这些曲轴来自汽车、摩托车、船舶、工程机械、机车车辆发动机和压缩机、压力机、高压泵等, 曲轴服役环境和受载类型有一定代表性。考察这些“实验”样本, 能够获得可为更一般条件下利用的曲轴断裂影响因素集。本研究的目的正在于此。

1 曲轴断裂影响因素按阶段分类及相关性分析

曲轴生命期可分为设计、制造、使用直至失效几个阶段。曲轴断裂有的是单一因素所致, 有的是一个或多个阶段多因素所致。对 96 根曲轴断裂的影响因素的阶段特征分析后得表 1。

对表 1 中的数据进行处理得表 2。从表中看出, 96 根曲轴的断裂与三个阶段和材料的相关性依次为制造、使用、材料和设计, 其中 70% 的曲轴断裂与制造相关。

表 1 曲轴断裂样本中断裂影响因素按生命期阶段归属分类

断裂 曲轴	单一阶段或材料				二个阶段 + 材料因素组合						三阶段 + 材料	
	制造	使用	材料	设计	制造 + 材料	设计 + 制造	制造 + 使用	设计 + 使用	材料 + 使用	设计 + 材料	设计 + 制 造 + 材料	设计 + 制 造 + 使用
96	37	13	8	3	9	8	7	2	2	1	4	2

表 2 曲轴断裂与设计、制造、使用阶段和材料的相关性强弱分析

相关性分类	与制造阶段相关			与使用阶段相关			与曲轴材料相关			与设计阶段相关		
	独立	组合	计	独立	组合	计	独立	组合	计	独立	组合	计
样本数 96	37	30	67	13	13	26	8	14	22	3	17	20
占样本数/%			70			27			23			21

2 曲轴生命期各阶段影响曲轴断裂的因素

2.1 设计阶段影响曲轴断裂的因素与影响机制

断裂曲轴中，设计阶段对曲轴断裂的影响因素及项次见表 3，项次分布比较分散，较多的依次是根部圆弧、安全系数、扭转振动设计、曲轴材料选择等。

2.1.1 曲轴根部圆弧设计对曲轴断裂的影响

曲轴根部应力集中影响曲轴疲劳强度，根据曲轴动态应力测量可知，连杆颈圆角应力为中间应力的 2.6 ~ 3 倍^[1]。圆角半径越小、圆弧连接光滑程度越差，应力集中越严重。一柴油机曲轴的连杆颈圆根为复合内圆弧设计，这种内圆弧设计虽然使曲轴具有较高结构强度，但不便于磨削，不能保证

圆根处的表面粗糙度要求，圆根处的刀痕在曲轴运用中很容易成为疲劳裂纹源。将曲轴的连杆颈圆根由复合内圆弧改为单一的内圆弧，为弥补因曲柄减薄造成的曲轴强度损失，加大了曲柄宽度，既保证不降低曲轴设计强度，又改善了圆根加工工艺性，将圆根精加工由车削改为了磨削，解决了连杆颈圆根表面存在明显刀痕的问题。圆角处淬硬区设计同样影响曲轴强度。若淬硬带宽度控制不当，边缘距圆角太近，就会在圆角处产生残余拉应力，降低疲劳强度。对某曲轴探伤时发现，一些曲轴圆根处出现形态相同的裂纹，这些裂纹都产生在主轴颈的内圆弧处，距中频淬火的淬硬区约 10 ~ 12 mm，与平衡块结合面的垂线成 45°，裂纹沿周向发展，规律性十分明显^[2]。

表 3 断裂样本中设计阶段对曲轴断裂影响因素及影响项次

项次	根部圆弧设计	安全系数不足	扭转振动设计	选材不当	系统设计缺陷	D ₀ /D 比值	自由端弯曲跳动	尺寸链	孔深	油堵孔卡簧槽	机架刚性不足	油道设计
21	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1

2.1.2 曲轴设计安全系数对曲轴断裂的影响

曲轴断裂样本中，设计时有的只考虑了影响安全系数的常规因素和主要因素，忽略了非常规因素和次要因素，致使设计安全系数不足，给曲轴断裂留下了隐患。

实际上，曲轴承受的除弯矩产生的应力外，还有扭转应力和其他附加载荷产生的应力。曾测得某曲轴断裂柴油机的最高燃烧压力超过 9 MPa，甚至接近 9.5 MPa。这样，按 8.5 MPa 设计的试验所得的安全系数 1.4 就变成了 1.32 ~ 1.25 了。与仅按

最高燃烧压力转换的纯弯矩做弯曲疲劳试验时比较，实际工作中曲轴承受的综合应力要大，有时甚至要大得多。如果以承受的综合应力换算为纯弯矩做疲劳试验，曲轴的弯曲疲劳极限弯矩值就会减小，安全系数进一步减小。此外，受制造工艺技术水平限制，曲轴制造质量存在一定程度的离散性，也影响曲轴的实际安全系数。有国外研究认为，当曲轴制造质量离散性较大时，安全系数不应低于 1.75^[3]。

2.1.3 扭转振动对曲轴断裂的影响

柴油机运转时，曲轴系统受到大小和方向呈周期性变化的气体压力和运动零件惯性力作用，这些力会使曲轴相对于飞轮发生扭转变形而引起扭振，即强制振动。这种振动易在工作转速范围内产生强烈共振，产生较大噪声，加剧与曲轴相连齿轮系的磨损，严重时会导致曲轴扭断。

轴系扭转振动计算结果表明：六列以上活塞式压缩机，由于列数增多和曲轴增长，曲轴的自由扭

转振动频率降低，有可能处于压缩机名义转速范围内，导致曲轴因扭转振动而破坏。六列以上的压缩机扭转振动应力对轴的总安全系数影响比四列以下曲轴的要大得多，所以，设计六列以上压缩机曲轴时，要考虑轴系扭转振动产生的应力^[4]。

2.2 曲轴断裂样本中制造阶段对断裂的影响因素

断裂曲轴样本中，与其他阶段比较，制造阶段对曲轴断裂的影响因素最多，且集中度高，前 7 项影响因素占本阶段总项次的 83%，具体见表 4。

表 4 断裂样本中制造阶段对曲轴断裂影响因素及影响项次

过渡圆角与加工粗糙		热处理工艺与质量		铸锻造质量		装配质量及检测		硬度高韧性低		磨削烧伤裂纹		校直工艺		配合质量结合面积		上下瓦错位	
37		24		10		5		2		2		2		1		1	
轴颈根部未强化	探伤检查	退刀槽	热喷涂应力	工艺孔裂纹	主轴承盖预紧	主轴承孔同轴度	圆根滚压工艺	偏心和振动	电灼伤	轴向间隙小	项次						
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	99						

2.2.1 过渡圆角与机加工质量

表 4 中的数据表明，96 根断裂曲轴样本中，有 37 根曲轴断裂或单独或组合受过渡圆角与加工质量影响。而对某风冷柴油机 36 根曲轴断裂原因分析时发现，绝大部分从圆角处断裂，其中纯属圆角加工不良造成断裂的就有 13 根，占 36%。这一结果从不同角度证明了曲轴断裂与过渡圆角及加工质量高度相关。而圆角过小、圆角加工粗糙、圆弧连接起台或不光滑是曲轴在过渡圆角处断裂的主因。

对断裂曲轴分析中，常见圆角加工质量问题。曾发现一根断轴，其圆角与轴颈相交处不仅不相切还有一个台，曲轴正是沿此台断裂。为验证圆角加工质量对曲轴可靠性影响，选择圆角加工不合格曲轴做弯曲疲劳试验，在同一最高燃烧压力下的安全系数尚不足 1.3，疲劳强度明显降低^[3]。

2.2.2 热处理对曲轴断裂的影响

断裂曲轴分析发现，热处理工艺设计与执行对曲轴断裂的影响项次相当，表明二者对避免曲轴断裂同样重要。

2.2.2.1 热处理工艺设计对曲轴断裂的影响

某球铁曲轴原生产工艺为：铸造-正火-粗加工-细加工-抛光。断裂后，为改善曲轴质量，在抛光工序前增加了对曲轴表面的强化处理-氮化处理。经氮化处理后这种曲轴再没有发生断轴现象。某曲轴断裂前工艺路线安排不合理，曲拐处调质组织被

加工掉，致使该处表层疲劳极限下降。改变加工工艺路线后，将原粗车棒料调质改为粗车出各曲拐后调质，保证各曲拐表层为调质组织。

某汽油机曲轴断裂的主要原因是恰当的退刀槽引起应力集中，其次是感应淬火热的影响导致轴颈变化处回火过度，使曲轴整体硬度及金相组织只达到要求的下限，最终导致曲轴断裂。改善后的工艺为：感应淬火时在轴颈变化(台阶)处同时进行感应淬火，避免该处出现残余拉应力；立铣键槽，使端部为半圆形，这样键槽离轴颈变化处较远，防止因感应加热引起轴颈变化处回火。

2.2.2.2 热处理工艺执行对曲轴断裂的影响

对某柴油机断裂曲轴的硬度测试发现，曲轴表面淬火硬度低于技术要求，导致材料疲劳极限降低约 25%；同时热处理工艺中对曲柄/轴颈圆角处未做淬火处理，从抗疲劳失效的角度考虑，圆角处恰是最需要强化的部位。冶金因素造成材料损伤与轴颈结构特点叠加，在圆角部位容易首先形成裂纹。

一汽油机曲轴按加工工艺过程要求应在锻造成型后进行细化晶粒的正火处理，然后再进行调质处理。但在曲轴断裂后分析，该批曲轴未经正火处理，而是在热锻成型后直接进行调质处理。虽然心部硬度符合技术要求，但并未获得合格的索氏体组织。从该曲轴多个纵、横截面取样观察发现，多处出现网状铁素体，甚至有铁素体聚集成网状、块

状,属不良调质组织,降低了金属基体强度,也给后一工序的表面淬火造成成分不均匀的组织,在外力作用下加剧了断裂的危险性^[5]。下列热处理因素影响曲轴断裂:

- (1) 淬硬层深度及分布不均匀;
- (2) 正火加热和冷却方式不当;
- (3) 温度过高,加热时间太长;温度过低,加热时间太短,造成淬火组织过热或欠热;
- (4) 感应淬火的热影响导致轴颈变化处回火过度。

2.2.3 曲轴铸锻毛坯质量对曲轴断裂的影响

曲轴铸锻毛坯质量缺陷表现多种多样,其影响结果都是降低曲轴疲劳强度。

铸造缺陷(热裂纹、砂眼、白点等)是附加的应力集中点。这些缺陷无法用堵焊来消除,带有铸造缺陷的曲轴不允许用这种方法来修复。当发现有

这种缺陷时,曲轴应无条件报废。最难发现的是圆根表面处存在大的非金属夹杂物状的应力集中点,可以根据曲轴钢材的化学成分和组织确定是否存在这种缺陷。

对一断裂的柴油机曲轴进行金相检验时发现,油孔口的母材组织很不均匀,并有粗大的魏氏组织。这种不正常组织可能是锻造加热不当形成,切削加工时又没有切除。这不仅使孔口强度大为下降,韧性也明显降低。由于油孔口存在较大残余拉应力,又是应力集中区,孔口母材又为脆弱的魏氏组织,在交变应力作用下,形成方向不规则的裂纹群,成为疲劳裂纹源。

2.3 使用阶段对曲轴断裂的影响因素和影响机制

曲轴断裂样本中,使用阶段对曲轴断裂的影响因素见表5,表中前6项因素影响项次占总项次的77%。

表5 曲轴断裂样本中使用阶段对曲轴断裂影响因素及分类统计

润滑剂与 润滑不良	轴承座或 机体变形	轴瓦失 效牵连	减振 失效	寿命管 理不当	超载 超期	燃烧室 进水	修磨使 直径减小
11	5	5	4	3	2	1	1
气缸积 碳爆燃	轻油锤	其他零件 表层脱落	机器安 装不当	磨损	相关零 件开裂	曲轴变形后 校正不当	项次
1	1	1	1	1	1	1	39

2.3.1 润滑与润滑剂不良对曲轴断裂的影响

润滑不良导致曲轴断裂是结果,看上去问题在这里,原因可能在那里、在前一级、在小系统甚至大系统。

一些因素使润滑油膜不易稳定建立,加剧轴颈与轴瓦磨损,造成抱瓦、拉瓦或曲轴拉伤,使轴颈表面产生微细裂纹,成为曲轴断裂的裂纹源。下列因素影响润滑质量:

- (1) 制造和装配误差:箱体主轴孔与曲轴颈配合同轴度超差;轴承润滑的合理间隙不能保证;
- (2) 异物污染润滑剂:如柴油机装配过程遗留或维修后磨合产生的颗粒进入润滑剂;
- (3) 润滑剂不良:使用牌号不符或次质润滑油,特别是夏季使用热稳定性差的润滑油;
- (4) 润滑剂老化。

2.3.2 轴承座或机体变形的影响

机体或轴承座孔变形,致两端轴承孔不同轴,传递动力时,曲轴不仅要克服由传动系传来的阻力矩,还要承受因回转不平稳附加的座孔作用于曲轴

上的反力,使扭转、弯曲变形过大,又加剧曲轴轴颈和轴承的不均匀磨损,导致划瓦抱轴和曲轴断裂。使用中,下列因素会导致轴承座或机体变形:

- (1) 过载使用;
- (2) 修理焊接加热造成机体变形;
- (3) 润滑不良,热积累变形。

2.3.3 减振效果对曲轴断裂的影响

扭振的最大危险是轴段因扭振应力过大而断裂。对某合金钢曲轴的扭振模拟计算中,当减振器刚度增大两倍,其它参数保持不变,计算各轴段扭振应力,发现6~9主轴颈间各轴段应力均超出曲轴扭振许用应力值,而减振器失效相当于刚度显著增大。下列减振器因素将增大曲轴扭振应力:

- (1) 减振器选型不适;
- (2) 减振器质量不合格或失效。

2.4 曲轴材料及毛坯对曲轴断裂的影响因素和影响机制

表6中前5项为曲轴材料及毛坯是影响曲轴断裂的主要因素,占总项次的86.8%。

表6 曲轴断裂样本中曲轴材料对曲轴断裂的影响因素及项次

夹杂物	化学元素 不符标准	疏松、缩 孔和气孔	球铁 质量	偏析	锻造毛坯原 始组织不良	过烧	缺陷	项次
13	7	6	4	3	2	2	1	38

2.4.1 夹杂物影响

曲轴断裂样本中，材料中的夹杂物对曲轴断裂的影响项次达13，在已发现的55项影响因素中占第4位。

从一些曲轴沿晶界开裂的开裂面能谱检测中发现，晶界上存在明显的杂质元素偏聚和严重的非金属夹杂物及异金属夹杂物，破坏了基体组织的连续性，降低了金属间的结合力。在外力作用下，夹杂物和母材的变形能力不同引起塑性变形不一致，致使夹杂物沿最大主应力方向与基体界面分离，使这些区域存在一定的应力集中，成为潜在的微裂纹源^[6]。曲轴的过渡圆角处含有杂质时，应力集中叠加效应更加明显。因此，需要在加工前对毛坯设置相应的检验项目。

2.4.2 化学元素对曲轴断裂的影响

研究证明，金属材料的力学性能与材料的化学成分有关。对一断裂的球铁曲轴的检验分析发现，其脆性断裂与材料的组织有关，90%的珠光体与网状碳化物使材料有很大的脆性，受外力作用时容易脆断，而网状碳化物的形成与材料的成分和冷却工艺不合理有关。首先，成分中Mn含量偏高，增加了向珠光体转变的倾向，Mn元素在凝固冷却时除融入奥氏体中，更易形成碳化物聚集在共晶团的晶界处，最终形成晶间碳化物。并且球铁中Si含量偏低，Cu、Mn等促进珠光体成分较多时，铸件在共析转变时，过饱和的奥氏体冷却不当时也会使碳化物呈网状、半网状沿晶界析出，这些晶界之间的碳化物使铸态球铁韧性下降，脆性增加^[7]。

3 结束语

(1) 包括曲轴在内的零部件的生命期质量目标的实现是包含曲轴的发动机和其他产品生命期质量目标实现的基础。

(2) 曲轴生命期质量受多阶段多因素影响，为保证曲轴生命期质量目标的实现，需要建立和利用曲轴失效影响因素集。

(3) 逐步完善曲轴及同类零件断裂影响因素集，籍以修改和补充相关文献，并引导机械工程师建立具体而不仅是抽象的零部件和整机生命期质量概念。

参考文献

[1] 佚名. 291 型柴油机曲轴动、静态应力测量[J]. 拖拉机, 1979(2).

[2] 白雪寒. 16V240 型柴油机曲轴断裂原因分析及对策[J]. 机车车辆工艺, 1996(2): 45 - 46.

[3] 程绍桐、王致钊、程淑颖. 某四缸柴油机曲轴断裂失效分析及改进[J]. 柴油机配件, 2009(5): 26 - 29.

[4] 万智波. 6M50 型活塞式压缩机曲轴的开裂原因及改进[J]. 化工装备技术, 2005(5): 64 - 66.

[5] 陈丽凤. 156F 汽油机曲轴断裂分析[J]. 冶金丛刊, 2002(1): 22 - 24.

[6] 董世运、石常亮、徐滨士, 等. 重型汽车发动机曲轴断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2009(3): 138 - 142.

[7] 张征义、徐敏权. 厚大球铁曲轴断裂原因分析[J]. 铸造设备与工艺, 2009(5): 24 - 25.

(上接第28页)

7 结 语

综上所述，通过 AVL 的 Excite Designer 软件的应用，经过计算、比较、分析，单缸机平衡轮系、曲轴平衡重的设计能够消除由一次往复惯性力、二次往复惯性力和离心惯性力引起的振动，保证单缸机的平稳正常运行。通过飞轮转动惯量的配置，使单缸机的回转不均匀度达到了规定的要求。

参考文献

[1] 陈大荣. 船舶柴油机设计[M]. 北京: 国防工业出版社,

1995.

[2] 刘永长. 柴油机原理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.

[3] 张绍甫、徐锦康. 机械零件[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[4] AVL 公司. Excite Designer 用户手册[R]. 2004.

[5] 顾宏中. 涡轮增压柴油机性能研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005.

[6] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.