

国家自然科学基金资助出版

河北省教育厅高等学校学术著作出版基金资助出版

曲轴滚压关键参数设计 理论与数值模拟

QUZHOU GUNYA GUANJIAN CANSHU SHEJI
LILUN YU SHUZHIMO NI

刘荣昌 马淑英 马国清 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家自然科学基金资助出版

河北省教育厅高等学校学术著作出版基金资助出版

曲轴滚压关键参数设计 理论与数值模拟

刘荣昌 马淑英 马国清 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

曲轴滚压关键参数设计理论与数值模拟 / 刘荣昌,
马淑英, 马国清著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 2
ISBN 978 - 7 - 118 - 06709 - 5

I. ①曲... II. ①刘...②马...③马... III. ①曲轴 -
参数 - 设计②滚压(金属切削) - 参数 - 设计③曲轴 - 数
值模拟④滚压(金属切削) - 数值模拟 IV. ①
TH133.5②TG506.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 018579 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 9 3/8 字数 272 千字

2010 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

曲轴作为内燃机中最重要的部件之一,其结构参数以及加工工艺水平不仅影响着整机的尺寸和重量,而且在很大程度上影响着内燃机的可靠性与寿命。近年来随着对内燃机动力性、可靠性要求的不断提高,曲轴的工作条件愈加苛刻,曲轴的强度问题变得更加重要。为了使曲轴的强度设计更加科学,在曲轴的强度和曲轴的合理强化问题上国内外许多学者进行了大量的研究工作,但归纳起来仍存在着以下几方面的问题:①有限元技术是一种计算曲轴疲劳强度的行之有效的办法,但目前曲轴有限元分析模型采用了形式各异的简化原则与方法,边界条件处理方法千差万别,针对具体型号产品的重复研究问题较为严重;②由于曲轴结构复杂,建模时间较长,为了提高效率,印度汽车工业研究院的 Athavale 等人提出了曲轴几何模型参数化的概念,但遗憾的是其仅仅对曲轴的少量结构尺寸进行了参数化处理,对有限元模型的载荷与边界条件、材料性能参数和网格划分参数却只能手工处理,并且通用化程度低——只能针对小型风冷汽油机曲轴;③曲轴圆角滚压强化工艺是一种理想的曲轴表面强化手段,在曲轴强化的工艺方法上有着广阔的发展前途,但国内外在曲轴滚压强化工艺研究上局限于试验研究,设计方法和理论研究的欠缺导致滚压刀具结构设计、滚压工艺参数选择无据可依,在很大程度上限制了滚压质量的提高;④曲轴的强度和强化方法、工艺的选择是密不可分的,然而,已有的曲轴强度分析模型都没有考虑曲轴的强化效应,而只能在疲劳强度或寿命计算时以一个经验性的强化系数来予以修正,这显然在很大程度上影响了曲轴强度分析的准确性和可靠性,也不利于对曲轴的强化效果进行合理的评价。

本书的出发点是围绕并致力于解决上述问题:第2章在对曲轴有限元模型规范化研究的基础上,提出了通用化的分析模块划分方法、模型参数化方法和系统实现方法;第3章在建立圆弧接触线回转体摩擦传动运动学模型的基础上,提出了曲轴滚压刀具结构参数、运动参数优化设计方法,建立了极限滚压载荷和主要影响因素(包括被加工曲轴的结构参数、滚压刀具的结构参数及其配置情况以及材料参数)的数学关系,通过对轴颈滚压和小野式滚压试件的模拟,探讨了滚压工艺参数对残余应力与变形层分布及数值上的影响;第4章基于最佳残余应力理论,通过正交试验方法给出了确定最佳滚压参数的神经网络法;第6章和第7章在曲轴系动力学分析和曲轴显式动力学分析的基础上,通过显式-隐式求解手段将滚压强化和强度分析模型有机地融合在一起,给出了滚压强化效果的评价方法和曲轴滚压后的残余变形的分析计算方法。

本书建立的圆弧接触线回转体摩擦传动运动学模型不仅为曲轴圆角滚压运动和结构参数设计提供了一种优化设计方法,也为该类传动提供了一种减小滑动、提高传动效率的新方法。本书将应力状态和软性系数等概念引入了接触问题,对加工硬化现象中的表层、亚表层和深层给出了公式化的量化描述,而以往的硬化层描述是定性的、模糊的。本书第5章提出的多项式插值的加权平均法推导过程简单、思路清晰,具有明确的物理意义并简化了三角形单元和四边形等参元的形函数推导过程。上述研究成果,本书作者认为是相关研究领域的理论创新,部分内容可替代现有相关教科书传统的内容。

本书得到了国家自然科学基金、河北省教育厅高等学校学术著作出版基金、河北科技师范学院博士基金的资助,在此,作者对以上资助深表感谢。

本书系作者主持承担的国家自然科学基金项目“曲轴滚压关键参数设计理论研究”(50675060)的研究成果,作者在此衷心感谢课题组全体成员的辛勤劳动,作者和薛隆泉教授指导的研究生孙华东、徐国宁、陈建伟、王玉秋分别承担了本书相关内容的研究工作,在此表示

感谢。

作者衷心感谢西安理工大学“机械制造与装备”陕西省重点实验室刘宏昭教授和王忠民教授、燕山大学“亚稳材料制备技术与科学”国家重点实验室赵品教授和刘建华高级工程师、浙江上虞动力机械有限公司刘伯君总工程师、北汽福田汽车股份有限公司汽研一所韩云霄工程师、河北工业大学范顺成教授和卞学良教授等对本书的指导和帮助。

本书可供企业中从事曲轴强度和强化研究与实践的专业技术人员参考使用,亦可供机械设计、汽车与动力机械工程、应用力学等相关专业的科研人员、工程技术人员和硕士、博士研究生参考。虽作者初衷良苦,但毕竟水平所限,书中不妥之处在所难免,希望得到读者和有关专家的批评和指正。

作 者

2009 年 11 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 曲轴的强度研究回顾	1
1.2 提高曲轴疲劳寿命的方法和途径	17
1.3 曲轴圆角滚压工艺	20
1.4 本书的主要内容	26
第 2 章 曲轴的参数化建模与有限元分析	30
2.1 有限元法的理论基础和计算平台	30
2.2 曲轴 CAE 模型的规范化	42
2.3 曲轴 CAE 模型参数化	46
2.4 参数化曲轴有限元分析系统的开发	50
2.5 直列四缸曲轴分析示例	55
2.6 结论	77
第 3 章 滚压基本工艺参数的设计方法	78
3.1 圆角滚压运动及结构参数的优化设计	79
3.2 加载范围与原则的选择和确定	102
3.3 滚压系统设计的基本计算	118
3.4 加工硬化层深度的软性系数描述	122
3.5 曲轴滚压加工的数值模拟	130
第 4 章 确定最佳滚压参数的神经网络法	157
4.1 最佳残余应力理论	157

4.2	曲轴具体工况有限元模拟	160
4.3	曲轴圆角滚压的正交试验	164
4.4	基于 BP 神经网络残余应力的预测	175
4.5	最佳滚压参数的确定	183
第 5 章	多项式插值的加权平均法及其应用	185
5.1	引言	185
5.2	加权平均法的物理意义	186
5.3	单自变量的情况	187
5.4	两自变量的情况	189
5.5	在有限元形函数推导中的应用	192
5.6	结论	198
第 6 章	基于虚拟样机技术的曲轴系动力学分析	199
6.1	基于 Kane-Huston 方法的内燃机动力学建模及仿真	200
6.2	基于虚拟样机技术的曲轴系动力学分析	216
6.3	曲轴的固有动力学特性分析	229
6.4	曲轴系受迫振动分析	235
第 7 章	曲轴滚压的显式动力学分析	255
7.1	滚压过程的显式动力学模拟	255
7.2	考虑滚压强化效应的曲轴强度分析	270
7.3	滚压加工残余变形的有限元分析	275
参考文献		280

第1章 概 论

曲轴是汽车、拖拉机动力装置的核心零件之一,在内燃机的五大件(机体、缸盖、曲轴、连杆、凸轮组)中,曲轴具有结构复杂、加工制造困难、承受载荷较大并且受力状态复杂等特点,其结构参数以及加工工艺水平不仅影响着整机的尺寸和重量,而且很大程度上影响着内燃机的可靠性与寿命。由于曲轴结构复杂、刚性较差,在制造过程中又受到冷热加工等各种因素的影响,因此,处于工作状态的曲轴各部分应力分布是不均匀与交变的,尤其是在曲柄臂和过渡圆角部位会产生严重的应力集中。同时,曲轴的主轴颈、连杆轴颈及其轴承副高速的旋转运动也会造成磨损和发热烧损。曲轴的主要失效形式是疲劳断裂和轴颈严重磨损^[4],为了保证发动机正常可靠地工作,要求曲轴有足够的强度、刚度、耐磨性和平衡精度,所以有必要提高曲轴的强度。

发动机曲轴圆角滚压工艺、设备及其相关技术的研究已经成为当前汽车工业发展,特别是轿车工业发展不可或缺的关键技术之一。但是到目前为止,国内外对曲轴滚压的工艺研究尚不十分充分,如曲轴材料、残余应力状态、滚压工艺参数等因素对滚压层和曲轴疲劳强度的影响方面还缺乏系统的研究,曲轴滚压参数的选取、滚压效果的评价还没有一套科学合理的方法。针对上述问题,本书作者于2007年申报了国家自然科学基金项目“曲轴滚压关键参数设计理论研究”,本书在总结曲轴强度分析和滚压强化已有成果的基础上,主要介绍作者在此方面所取得的工作成果。

1.1 曲轴的强度研究回顾

1.1.1 曲轴的结构形式和材质

如图1-1所示,曲轴主要由3部分组成:①曲轴的前端(或称自

由端)1;②若干个曲柄销 3 和它左右两端的曲柄 4,前后两个主轴颈 2 组成的曲拐;③曲轴后端(或称功率输出端)5。曲轴的曲拐数量取决于汽缸的数目和排列方式。曲轴的连杆轴颈是曲轴与连杆的连接部分,通过曲柄与主轴颈相连,在连接处用圆弧过渡,以减少应力集中。直列发动机的连杆轴颈数目和汽缸数相等。V 型发动机的连杆轴颈数等于汽缸数的一半。

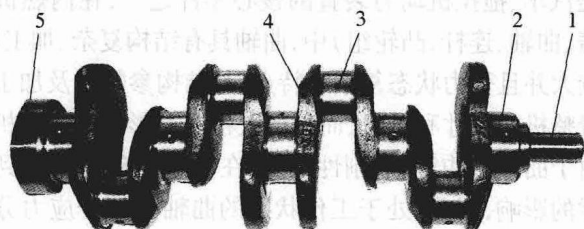


图 1-1 曲轴结构

1—自由端; 2—主轴颈; 3—曲柄销; 4—曲柄; 5—功率输出端。

曲柄是主轴颈和连杆轴颈的连接部分,断面为椭圆形,为了平衡惯性力,曲柄处铸有(或紧固有)平衡重块。平衡重块用来平衡发动机不平衡的离心力矩,有时还用来平衡一部分往复惯性力,从而使曲轴旋转平稳。曲轴前端装有正时齿轮,驱动风扇和水泵的皮带轮以及起动机等。为了防止机油沿曲轴轴颈外漏,在曲轴前端装有一个甩油盘,在齿轮室盖上装有油封。曲轴的后端用来安装飞轮,在后轴颈与飞轮凸缘之间制成挡油凸缘与回油螺纹,以阻止机油向后窜漏。

曲轴的形状和各曲拐的相对位置(即所谓曲拐的布置)取决于缸数、汽缸排列方式(单缸或 V 型)和发火次序(即各缸的做功行程交替次序)。在安排多缸发动机的发火次序时,需保证连续做功的两缸相距尽可能远,以减轻主轴承的载荷,同时避免可能发生的进气重叠现象(即相邻两缸进气门同时开启)以免影响充气;做功间隔应力求均匀,就是说,在发动机完成一个工作循环的曲轴转角内,每个汽缸都应发火做功一次,而且各缸发火的间隔时间(以曲轴转角表示,称为发火间隔角)应力求均匀。对缸数为 i 的四行程发动机而言,发火间隔角为 $720^\circ/i$,即曲轴每转 $720^\circ/i$ 时,就应有一个汽缸做功,以保证发动机做功平稳。

几种常用的多缸发动机曲拐布置和发火次序如下。

四行程直列四缸发动机发火次序——发火间隔角为 $720^\circ/4 = 180^\circ$ ，其曲拐布置在同一个平面内(图 1-1)。发火次序有两种可能的排列法 1-2-4-3 或 1-3-4-2，它们的工作循环如表 1-1、表 1-2 所列。

表 1-1 四缸机工作循环表(发火次序:1-2-4-3)

曲轴转角	1	2	3	4
$0^\circ \sim 180^\circ$	做功	压缩	排气	进气
$180^\circ \sim 360^\circ$	排气	做功	进气	压缩
$360^\circ \sim 540^\circ$	进气	排气	压缩	做功
$540^\circ \sim 720^\circ$	压缩	进气	做功	排气

表 1-2 四缸机工作循环表(发火次序:1-3-4-2)

曲轴转角	1	2	3	4
$0^\circ \sim 180^\circ$	做功	排气	压缩	进气
$180^\circ \sim 360^\circ$	排气	进气	做功	压缩
$360^\circ \sim 540^\circ$	进气	压缩	排气	做功
$540^\circ \sim 720^\circ$	压缩	做功	进气	排气

四行程直列六缸发动机发火次序——发火间隔角为 $720^\circ/6 = 120^\circ$ ，各曲拐在空间上相差 120° ，曲拐布置情况可参见图 1-2。曲拐的具体布置通常采用两种方案，第一种方案的发火次序为 1-5-3-6-2-4，这是目前得到最为普遍应用的方案，其工作循环表如表 1-3 所列。另一种方案的发火次序为 1-4-2-6-3-5，其工作循环表如表 1-4 所列。

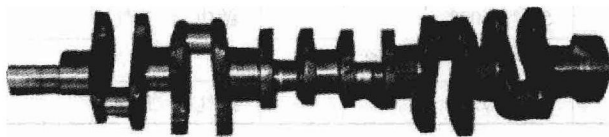


图 1-2 直列六缸发动机的曲拐布置

表 1-3 直列六缸机工作循环表(发火次序:1-5-3-6-2-4)

曲轴转角		1	2	3	4	5	6
0° ~ 180°	0° ~ 60°	做功	排气	进气	做功	压缩	进气
	60° ~ 120°						
	120° ~ 180°		进气	压缩	排气	做功	
180° ~ 360°	180° ~ 240°	排气		做功	压缩		
	240° ~ 300°						
	300° ~ 360°						
360° ~ 540°	360° ~ 420°	进气	压缩	做功	进气	排气	做功
	420° ~ 480°						
	480° ~ 540°		做功	排气	压缩	进气	
540° ~ 720°	540° ~ 600°	压缩					排气
	600° ~ 660°						
	660° ~ 720°						

表 1-4 六缸机工作循环表(发火次序:1-4-2-6-3-5)

曲轴转角		1	2	3	4	5	6
0° ~ 180°	0° ~ 60°	做功	进气	排气	压缩	做功	进气
	60° ~ 120°						
	120° ~ 180°		压缩		排气		
180° ~ 360°	180° ~ 240°	排气		进气	做功		压缩
	240° ~ 300°						
	300° ~ 360°		做功		进气		
360° ~ 540°	360° ~ 420°	进气		压缩	排气		做功
	420° ~ 480°						
	480° ~ 540°		排气		压缩		
540° ~ 720°	540° ~ 600°	压缩		做功	进气		排气
	600° ~ 660°						
	660° ~ 720°		进气	排气	压缩	做功	

四行程 V 型八缸发动机发火次序——缸数 $i=8$, 故发火间隔角为 $720^\circ/8=90^\circ$, V 型发动机左右两列中相对应的一对连杆共用一个曲

拐,所以 V 型八缸机有 4 个曲拐,其布置可以与四缸机一样,其 4 个曲拐可布置在同一平面内,也可以布置在两互相错开 90°的平面内(图 1-3),这样可使发动机得到更好的平衡性。V 型八缸发动机的发火次序为 1-8-4-3-6-5-7-2,其工作循环如表 1-5 所列。

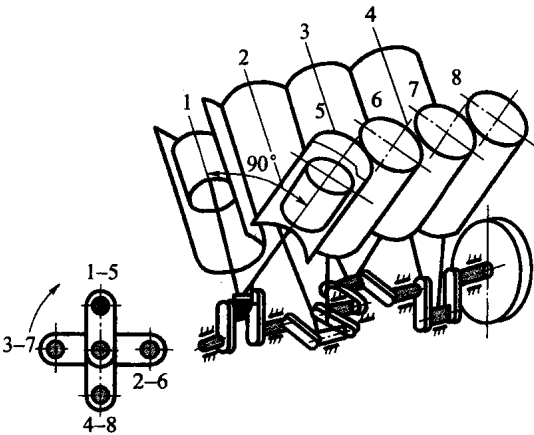


图 1-3 V 型八缸发动机的曲拐布置

表 1-5 V 型八缸发动机工作循环表(发火次序：
1-8-4-3-6-5-7-2)

曲 轴 转 角		1	2	3	4	5	6	7	8
0°~180°	0°~90°	做功	做功	进气	压缩	排气	进气	排气	压缩
	90°~180°		排气	压缩		进气			
180°~360°	180°~270°	排气	进气	做功	做功	压缩	进气	排气	做功
	270°~360°								
360°~540°	360°~450°	进气	压缩	排气	排气	做功	压缩	进气	排气
	450°~540°								
540°~720°	540°~630°	压缩	做功	进气	进气	排气	排气	做功	压缩
	630°~720°								

曲轴的功用是承受连杆传来的力,并由此造成绕其本身轴线的力矩——扭矩,然后通过飞轮驱动汽车传动系,同时还通过正时齿轮驱动配气机构以及其他辅助装置。在发动机工作中,曲轴受到旋转质量

的离心力、周期性变化的气体压力和往复惯性力的共同作用,使曲轴承受弯曲与扭转载荷。为了保证工作可靠,因此要求曲轴具有足够的刚度和强度,各工作表面要耐磨且润滑良好。

曲轴要求采用强度、冲击韧性和耐磨性都比较高的材料制造,曲轴材料使用性能要求的重点是抗弯曲强度、抗扭转强度、耐磨性、内部致密性、外部无缺陷、良好的切削性以及轴颈淬火时良好的淬透性、高的尺寸精度、非加工表面良好的粗糙度。曲轴毛坯的制造方法有锻造和铸造两种,锻造毛坯采用钢材,铸造毛坯采用球墨铸铁为多。锻造曲轴用钢有优质碳素钢、低合金钢、合金钢等。根据发动机的负荷、种类选用不同材料。常用的曲轴材料及其性能如表 1-6、表 1-7 所列。

表 1-6 锻造曲轴常用钢材牌号及性能
(GB 699—88、GB 3077—88)

钢号	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	α_k /N·m/cm ²	HBS
35	530	315	20	45	7	197
45	600	355	16	40	5	229
55	645	380	13	35	5	255
35MnV	835	685	12	45	7	207
35SiMn	885	735	15	45	6	229
45MnB	1030	835	9	40	5	217
40Cr	980	785	9	45	6	207
35CrMo	980	835	12	45	8	229
40CrV	835	595	13	45	7	197
40CrNi	980	785	10	45	7	241
40CrNiMoA	980	835	12	50	10	269
18Cr2Ni4WA	1175	835	10	45	10	269

表 1-7 铸造曲轴常用球墨铸铁牌号性能与组织

牌号	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	HBS	金相组织
QT600-3	600	370	3	190~270	珠光体+铁素体
QT700-2	700	420	2	225~305	珠光体
QT800-2	800	480	2	245~335	珠光体或回火组织
QT900-2	900	600	2	280~360	贝氏体或回火马氏体

1.1.2 曲轴的受力和破坏

曲轴在工作中受力是比较复杂的,要把连杆传来的力转变为扭矩,而把发动机的功率输出去,因而曲轴在工作中将受到不断变化的周期性燃气压力、往复运动的惯性力及回转运动的离心惯性力。其次,相对于一般的轴类零件,曲轴的形状与结构具有高度复杂性,存在较为严重的应力集中现象。再次,曲轴材料特定的化学成分和金相组织通过实验和分析需要满足曲轴在工作载荷下力学性能要求,同时还要求次表面无内在缺陷,表面粗糙度低(无刀痕等)。最后,工作状态下机体的变形、主轴颈和曲柄销处所受面力受到摩擦磨损情况、油膜状态的影响。基于上述,造成曲轴破坏的主要原因是由于金属疲劳破坏造成的,即由于机械零件局部应力最大处,在循环应力作用下形成微裂纹,然后逐渐扩大成宏观裂纹,裂纹再继续扩展而最终导致机械零件的断裂。

曲轴的疲劳破坏可用金属疲劳破坏的有关理论进行解释,金属的疲劳破坏过程可分为3个阶段,即疲劳裂纹萌生、疲劳裂纹扩展和失稳断裂阶段^[5]。

(1) 疲劳裂纹萌生阶段。疲劳裂纹萌生都是由于塑性应变集中所引起,它经常在金属的表面上萌生,主要是金属表面应力往往比内部高,而内部晶粒的四周完全被其他晶粒所包围,而表面晶粒所受的约束则较少,比内部晶粒易于滑移;另外表面晶粒与大气或其他环境直接接触,存在环境介质的腐蚀作用;表面还常常留有加工的痕迹或划伤,疲劳强度降低。该阶段主要分3个过程,即出现滑移线、形成滑移带、形成驻留滑移带。首先金属在循环载荷作用下,在薄弱晶粒上产生范性形变,范性形变在金属表面上留下痕迹便是滑移线。在一定的循环次数以后,出现了硬化和软化,硬化和软化使范性变形不总是在一个滑移面上进行,而是在一个或几个滑移系上的一系列平行平面上进行。同时,又由于循环载荷下范性形变的不均匀性,使范性形变总是集中在一定的地区,这种集中在某些部分的不均匀范性形变,在金属表面上便表现为滑移带。形成驻留滑移带是形成滑移带的继续。一般滑移带可以通过抛光的方法完全去除,而驻留滑

移带则留有痕迹,这是一种微观裂纹的核,当这些痕迹够深时,便成为裂纹。

(2) 疲劳裂纹扩展阶段。该阶段可分两个阶段,即微观裂纹扩展阶段和宏观裂纹扩展阶段。微观裂纹扩展阶段具有一定的结晶学特性。疲劳裂纹在滑移带萌生后,首先是沿着切应力最大的活性面扩展,即沿着与应力成 45° 角的滑移面扩展。滑移带萌生往往有很多条微裂纹,在继续施加循环载荷的过程中,这些裂纹扩展并相互连接。但绝大多数的裂纹很早就停止扩展,只有少数的几条能够超过几十微米的长度,这是微观裂纹扩展阶段。当微观裂纹扩展阶段扩展方向由开始的与应力成 45° 角的滑移面扩展逐渐转向与拉应力相垂直的方向时,疲劳裂纹扩展阶段进入宏观裂纹扩展阶段,此阶段只剩下一条主裂纹扩展,常留下“条带”的显微特征。

(3) 失稳断裂阶段。它是疲劳破坏的最终阶段,是在一瞬间突然发生的,使裂纹扩展达到临界值,造成零件断裂。

金属疲劳破坏的整个过程是渐进式的,是由损伤逐渐累计引起的。它具有以下特点:①低应力性,在循环应力(最大应力)远低于材料的强度极限,甚至远小于材料屈服极限的情况下,疲劳破坏就可能发生;②突然性,不论是脆性材料还是延性材料,其疲劳断裂在宏观上均表现为无明显塑性变形的脆性突然断裂;③时间性,疲劳破坏是在循环应力的多次反复作用下产生的,它要经历一定的时间,甚至很长时间才发生;④敏感性,疲劳破坏的抗力不仅决定于材料本身,还敏感地取决于零件形状、表面状态、使用条件以及环境条件等;⑤疲劳断口,疲劳破坏的宏观断口上,有着不同于其他破坏断口的显著特点,可分3个区,即疲劳源A、疲劳裂纹扩展区B、瞬断区C,如图1-4所示。

常见的曲轴疲劳破坏有以下4种形式及原因。

(1) 曲轴裂纹最初常发生在主轴颈或连杆轴颈与曲柄臂过渡圆角处应力集中严重点,随后逐渐发展成横断曲柄臂的疲劳裂纹^[6]。其主要原因是由于曲轴过渡圆角太小,曲柄臂太薄,过渡圆角加工不完善所致,另外曲轴箱刚度不够也会造成主轴颈变形,引起不均匀磨损(图1-5)。

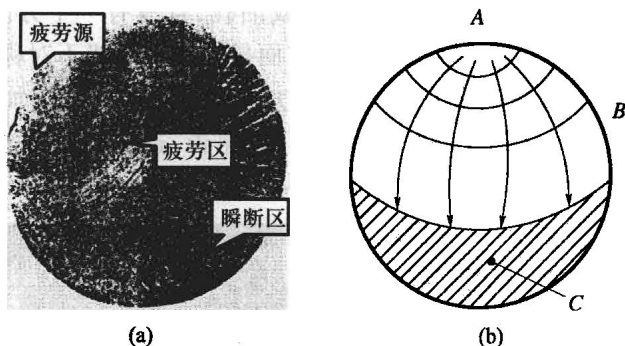


图 1-4 金属疲劳破坏断口

(a) 宏观断口形貌(箭头指处为疲劳源); (b) 疲劳断口示意图。

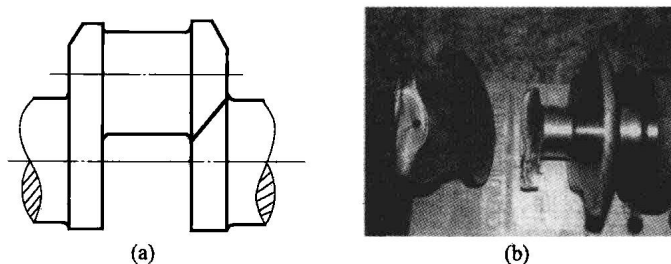


图 1-5 破坏形式 1

(a) 破坏形式 1 示意图; (b) 五十铃 4JB1-T1 发动机曲轴断裂案例。

(在第一主轴颈与连杆轴颈连接的曲拐处断裂)

(2) 曲轴裂纹起源于油孔,沿与轴线呈 45° 方向发展^[7]。其主要原因是过大的扭转振动引起附加应力;加工方面主要是油孔边缘加工不完善,或孔口过渡圆角太小,引起应力集中造成(图 1-6)。

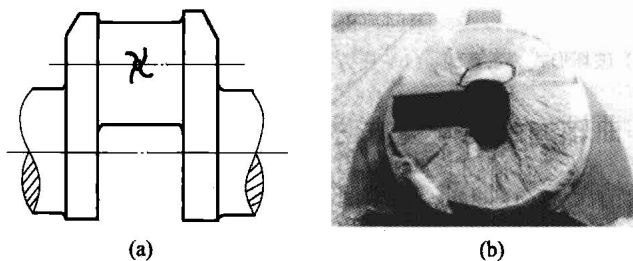


图 1-6 破坏形式 2

(a) 破坏形式 2 示意图; (b) 42CrMo 电渣熔铸曲轴的断裂全貌。