

柴油机缸套穴蚀

黑龙江省带岭林业干部学校谢天任编著

农业出版社

柴油机缸套穴蚀

黑龙江省带岭林业干部学校

谢天任编著

农业出版社

柴油机缸套穴蚀

黑龙江省带岭林业干部学校

谢天任编著

农业出版社出版 新华书店北京发行所发行
农业出版社印刷厂印刷

787×1092 毫米 32 开本 4 印张 82 千字
1978 年 12 月第 1 版 1978 年 12 月北京第 1 次印刷
印数 1—24,500 册

统一书号 15144·546 定价 0.34 元

前 言

柴油机作为动力装置，在工业、农业、林业、国防战线上得到越来越广泛的运用。近年来，为改善柴油机性能，提高升功率、降低燃油耗率和单位马力重量，特别注意采用增压和提高转速的“强化”技术。但这又给柴油机使用带来一个新问题，即由于强化，缸壁承受气体和活塞冲击加剧，缸套、缸体刚性相对降低，剧烈振动下的缸套穴蚀现象已日益突出起来。目前缸套穴蚀已成为影响高速强载柴油机使用寿命和可靠性的关键问题之一。因此，认真探讨柴油机缸套穴蚀的原因，找到防止缸套穴蚀的方法，对于进一步提高我国柴油机设计制造水平，增加柴油机寿命及可靠性，提高内燃机动力装置的战备能力，具有一定的意义。

为了交流这方面的经验，作者根据近年来的调查研究成果，适当参考国外有关资料，编写了这本《柴油机缸套穴蚀》。本书试图对柴油机缸套穴蚀作一综述，同时，简要地分析缸套穴蚀的原因以及防止缸套穴蚀的方法。

本书在写作过程中，得到许多单位的热情支持，华北农机学院陈光中同志对书稿作了详细审阅，并提出修改意见，特此致以深切的谢意。

由于思想水平和业务能力有限，所作的调查和试验研究工作也很不够，错误和不当之处，恳请同志们批评指正。

作 者 一九七八年二月

目 录

第一章 柴油机缸套穴蚀概论	1
一、柴油机缸套穴蚀问题的提出	1
二、柴油机缸套穴蚀的实例	2
三、柴油机缸套穴蚀的一般特征	4
第二章 柴油机缸套穴蚀的原因	6
第一节 缸套的空泡腐蚀	6
一、缸套在活塞的撞击下发生高频振动	7
二、缸套的高频振动使冷却水中产生空泡	22
三、空泡爆破产生冲击波使缸套疲劳破坏	24
第二节 缸套的电化学腐蚀	28
一、电化学腐蚀理论概述	28
二、柴油机缸套的电化学腐蚀	29
第三节 其他腐蚀及穴蚀破坏中各种物理化学 现象之间的关系	32
一、化学腐蚀	32
二、热化学(氧扩散)腐蚀	32
三、冲刷腐蚀	33
四、穴蚀破坏中各种物理化学现象之间的关系	34
第三章 影响柴油机缸套穴蚀破坏的因素	36
第一节 柴油机零件结构方面的影响	36

一、活塞—缸套配合间隙的影响	38
二、活塞结构的影响	40
三、缸套厚度的影响	44
四、缸套支承形式及上、下止口间隙的影响	47
五、缸套加工精度与装配质量的影响	49
第二节 柴油机冷却系结构及其冷却液特性方面的影响	52
一、冷却工况（冷却水温度）的影响	52
二、冷却方式的影响	53
三、冷却水套宽窄度的影响	55
四、冷却水腔总体布置的影响	55
五、冷却水洁净程度的影响	57
六、冷却水中所含气体的影响	58
第三节 柴油机工况及工作过程粗暴性的影响	58
一、柴油机负荷的影响	58
二、柴油机转速的影响	62
三、柴油机工作温度的影响	62
四、柴油机工作过程粗暴性的影响	63
第四节 柴油机缸套穴蚀破坏一般特征形成的原因	63
第四章 防止柴油机缸套穴蚀的措施	66
第一节 减少缸壁的振动	66
一、尽可能缩小活塞—缸套的配合间隙	66
二、采用油垫活塞	71
三、增加缸套壁厚	72
四、合理设计缸套在缸体上的支承配合	72
五、尽可能使柴油机工作柔和	75
六、提高缸套、缸体和活塞的加工与装配质量	82
七、其他减振措施	85

第二节 合理设计冷却系	85
一、尽可能采用闭式冷却系统	85
二、合理设计水套内腔	85
三、合理组织水流	86
第三节 增加缸套抗穴蚀能力	88
一、改进缸套材料	88
二、提高缸套外壁硬度	90
三、提高缸套外壁的光洁度	90
四、在缸套外壁涂覆涂料	91
第四节 改变冷却液的性质	93
一、添加 NL 乳化防锈油	93
二、添加重铬酸钠及氢氧化钠	94
第五节 采取阴极保护, 防止缸套电化学腐蚀	94
第五章 柴油机缸套穴蚀破坏的计算	98
第一节 柴油机缸套穴蚀破坏计算的意义	98
第二节 柴油机缸套穴蚀破坏的计算方法	99
一、缸套自振频率的计算	99
二、活塞所受侧推力 P_H 的计算	100
三、活塞冲击缸套滞后时间的计算	107
四、活塞—缸套配合间隙改变对冲击强度影响的计算	110
五、缸套振动加速度的计算	111
六、缸套重量绝对损失的计算	114
七、缸套由于穴蚀破坏而更换前最大工作时间的计算	116
附录	118

第一章 柴油机缸套穴蚀概论

一、柴油机缸套穴蚀问题的提出

恩格斯指出：“科学的发生和发展一开始就是由生产决定的”。柴油机缸套穴蚀问题研究的开展，也是由生产决定的。在柴油机未强化之前，缸套穴蚀问题不突出，缸套的破坏主要是内孔表面的磨损及腐蚀。近年来，由于增压和高速，柴油机强化指标（平均有效压力与活塞平均速度的乘积）大幅度提高，柴油机缸套穴蚀现象日益突出起来，成为使用寿命和可靠性的关键问题之一。

柴油机缸套穴蚀，就是指某些水冷、湿式缸套的柴油机缸套外壁及其相对应的缸体壁与冷却水接触的表面产生的局部破坏；这种破坏是以局部聚集的蜂窝状的孔穴群出现的（直径由1毫米到几毫米不等的穴蚀孔）。在某些情况下，从外到里还形成穿透的针状小孔。穴蚀现象严重的缸套，在其内孔表面未达到磨损极限时就需更换。特别需要指出的是：缸套的穴蚀破坏现象与只是因为受电化学腐蚀而被破坏的现象有明显的不同；其不同点见表1。

表1 缸套穴蚀破坏与纯电化学腐蚀的不同点

序号	项目类别	纯电化学腐蚀(锈蚀)	穴蚀
1	材料性质的影响	非氧化材料，如玻璃、黄金不会出现。	非氧化材料，如玻璃、塑料、黄金在电性中和的液体中，在一定条件下(如发生高频振动)也会出现。

(续)

序号	类别 项目	纯电化学腐蚀(锈蚀)	穴 蚀
2	破坏的表面状况	表面留下橙褐色的腐蚀生成物及有铸铁中石墨沉积物的薄层。	表面没有橙褐色的腐蚀生成物, 比较清洁, 常呈现类似高温氧化的红褐色。
3	破坏程度与时间的关系	相对较慢, 形成一层水锈以后, 腐蚀速度就会减慢。	相对较快, 随运转条件的恶化及运转时间的增长而加剧, 蚀孔深度随着柴油机工作时间的增加而加深(从外向里挺进扩展, 直至缸壁穿透)。
4	蚀损破坏的基本原因	电化学反应(详见本书第二章第二节); 采取阴极保护法可以防止(详见本书第四章第五节); 在冷却水中仅能过滤出腐蚀生成物。	空泡腐蚀(疲劳破坏、机械作用)与电化学腐蚀、化学腐蚀(腐蚀破坏、化学作用)等的综合作用(详见本书第二章), 其中以空泡腐蚀为主; 采取阴极保护法, 防锈效果不明显, 而采取减轻缸套振动的措施后, 防锈效果明显(详见本书第四章第一节); 在冷却水中能过滤出腐蚀生成物的同时, 还可以过滤出疲劳破坏剥落下的缸套材料微粒。

二、柴油机缸套穴蚀的实例

国产某些水冷、湿式缸套柴油机, 如表2所列8种柴油机在工作400—1000小时后, 其缸套—缸体都不同程度地发生穴蚀问题。其中以北京内燃机总厂生产的4115型柴油机缸套—缸体的穴蚀情况比较典型。该型柴油机, 严重者工作

表2 国产八种型号柴油机主要技术性能指标

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
机 型 (生 产 厂)	4115T ₁ (北京 内燃机 总厂)	6300CZ-2 (广州柴 油机厂、 广东渔 轮修造厂)	新6105 (南昌 柴油机 厂)	6120 (杭州 汽车发 动机厂)	6160A (潍坊 柴油机 厂)	Z12V 190 (济南 柴油机 厂)	4135G -4 (上海 柴油机 厂)	12V180 ZC (上海 柴油机 厂)
项 目 (单位)								
缸径×行程 (毫米)	115× 130	300×380	105× 120	120× 140	160× 225	190× 210	135× 150	180× 125
额 定 转 速 (转/分)	1600	400	2000	2000	750	1200	1500	1500
功 率 (马力)	50	600	90	160	135	1150	100	1450
平均有效压力 (公斤/厘米 ²)	5.33	8.4	6.93	8.22	5.97	6.9	7	14.38
活塞平均速度 (米/秒)	6.97	5.07	6.5	9.33	5.64	10.5	7.5	10.25
压 缩 比	17	12	17	17	16	13.5	16.1	13.7
燃料消耗率 (克/马力小时)	≤200	≤175	≤185	≤175	180	170±5	≤175	130±5
用 途	拖拉 机、绞 盘机、 发电	渔 船	农业排 灌、康 拜因、 发电	汽 车	车用、 座机	石油钻 井、发 电	车用、 座机	石油钻 井、发 电

300—400 小时后，在其挺杆孔侧（承受侧推力较大的一边），缸体与缸套之间的水套间隙最窄的地方，由上到下发生条状穴蚀穿孔；在缸套的上、下止口，特别是下止口处亦有穴蚀坑；其缸体在缸套上、下配合止口，特别是下止口的肩膀上及水套间隙最窄处与缸套穴蚀的对应位置上亦发生穴蚀。其穴蚀区状况如图 1 所示。

我国目前使用的某些进口柴油机，如 3D6 型柴油机缸套穴蚀现象亦非常严重，其钢质缸套寿命不到 1500 小时便穴

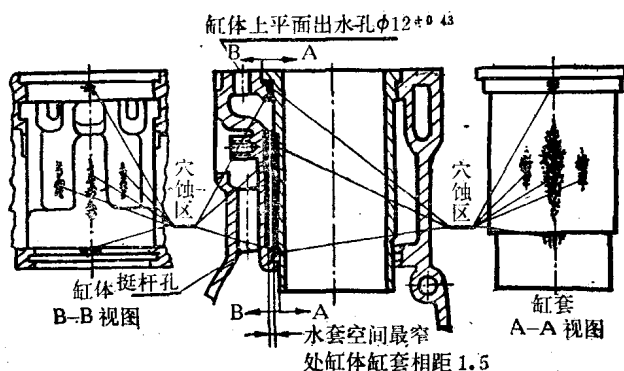


图1 4115型柴油机缸套—缸体穴蚀区状况示意图

蚀穿孔，39Д7型柴油机，工作2000—3000小时后，在连杆摆动平面上方出现片状穴蚀，缸套外壁穴蚀孔深达2—6.5毫米；斯堪尼亚D11型柴油机工作600—1000小时后，在连杆摆动平面与缸套上、下止口处出现点状穴蚀，缸套外壁蚀孔深达3—4毫米，为整个缸套壁厚的1/2左右；6KD43型柴油机在工作3000小时后，最深的穴蚀孔已达9毫米，为整个缸套壁厚的1/2，在工作10000—20000小时后，因穴蚀破坏引起的缸套破裂事故频繁（一半以上缸套破裂）。

由此可见，柴油机缸套穴蚀是一个较为普遍和严重的问题。

三、柴油机缸套穴蚀的一般特征

上述各机型缸套的穴蚀情况的一般特征是：

1. 穴蚀常发生在连杆摆动平面内，多发生在侧推力较大

的一边，并呈蜂窝状集中在缸套的中、下部。

2. 穴蚀常发生在水套狭窄区，缸体在与缸套穴蚀的对应位置上也常发生穴蚀，但缸体穴蚀较轻。

3. 穴蚀发生在缸套上、下止口，特别是下止口与缸体肩胛的配合处（缸体上安装密封圈的凸肩棱沿上）亦常见。

4. 穴蚀随柴油机的结构形式及强化程度的不同而不同。一般是穴蚀随柴油机强化程度的提高而趋严重（某些柴油机，如“潍柴”的老 6160 型柴油机并无穴蚀现象，只是强化后才出现穴蚀问题；又如“广渔轮”制造的 6300 型柴油机由 400 马力强化至 600 马力后，穴蚀变得更为严重）。

5. 穴蚀的发生对柴油机寿命及生产的危害甚大。根据经验，表 2 所列 8 种柴油机中除“杭汽”产 6120 型柴油机在大修时，将缸套转过 90° 后可继续投入第二个大修期以外，其他机型的缸套均因穴蚀严重难以进入第二个大修期，每到一个大修期或远远不到一个大修期就得另换一组新缸套（一般缸套正常的寿命为 3 个大修期，缸套因穴蚀其寿命减为数百小时或一个大修期，仅为正常寿命的 $1/20$ — $1/3$ ，可见穴蚀危害之大）。为了检查穴蚀程度及其更换缸套，经常需要吊缸或拔缸，尤其在采用较大缸径柴油机的船舶及机车上，增加了使用人员的劳动强度。

因此，认真分析柴油机缸套穴蚀的原因，尽快找到解决穴蚀问题的方法，在生产上有着重大意义。

第二章 柴油机缸套穴蚀的原因

柴油机缸套穴蚀是由于“空泡腐蚀”、“电化学腐蚀”和其他腐蚀（“化学腐蚀”、“热化学腐蚀”、“冲刷腐蚀”）综合作用而引起的。

第一节 缸套的空泡腐蚀

由于气缸内压力的循环变化和活塞在侧推力的作用下对缸套的周期性撞击，缸套产生弹性变形及高频振动。这种振动引起冷却水中产生空泡。空泡在振动时受压破裂，产生瞬时高压冲击波。这种冲击波连续反复地作用到缸套的极小面积上，致使缸套金属表面引起急速的疲

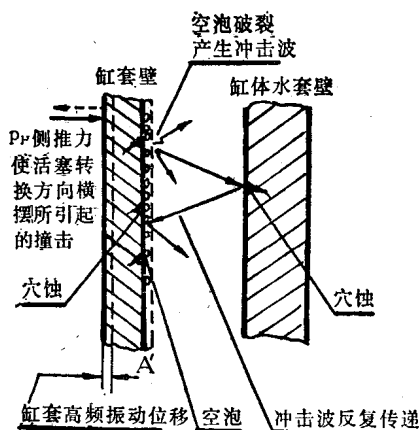


图2 缸套空泡腐蚀大致过程示意图

劳而破坏。这种因缸套高频振动产生空泡而致破坏的过程称之为缸套的“空泡腐蚀”。缸套“空泡腐蚀”大致过程如图2所示。

一、缸套在活塞的撞击下发生高频振动

1. 活塞在侧推力作用下变换方向产生对缸套的撞击

气缸内燃烧压力在柴油机每一工作循环中是变化着的。气缸内燃烧压力随曲轴转角的变化可以用示波测试装置或经过热力计算求出来。图3a即为气缸内压力变化曲线。

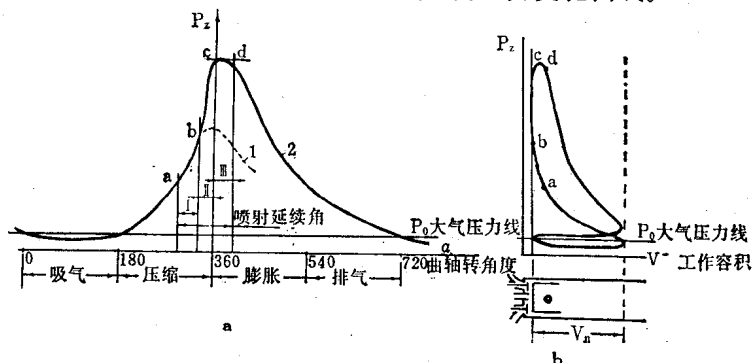


图3 柴油机气缸内的压力变化

a—气缸内压力变化曲线 b—柴油机的示功图

图3a中纵座标为气缸内的压力 P_z ，横座标为曲轴旋转角度 α 。曲线1表示不供油时气缸内压力的变化，如果在上止点前某一点a开始喷油，燃油进入气缸后不能立即燃烧，还要经过一段时间蒸发成蒸汽后才能燃烧，这时气缸内的压力还是沿着曲线1变化，直到b点才开始显著升高，ab这段时期为柴油燃烧的第1阶段，称为“着火落后期”。从b点

起，气缸内某一温度较高地区的燃油开始燃烧，并不断向其他地区扩展。这时燃油还在喷入气缸，因为气缸内温度很高，这些燃油很快就蒸发而燃烧。所以在曲线2上的bc阶段为第Ⅱ阶段，表现在图中为压力急剧的上升，称为“迅速燃烧时期”。从c点开始了第Ⅲ阶段，这时气缸内大部分燃料已燃烧，但喷咀还在继续向缸内喷油，由于活塞已开始向下运动，所以气缸内压力变化很小，直至喷咀在d点停止喷油，气缸内压力才显著下降，所以第Ⅲ阶段称为“缓慢燃烧时期”，第Ⅲ阶段以后至柴油燃烧完毕称为“补燃时期”。以上所述的柴油机燃烧过程的三个时期，最重要的就是着火落后时期。如着火落后时期过长，即燃烧开始得较晚，则在燃烧开始时燃烧室内已积存了数量较多的燃料，这些燃料燃烧起来会使第Ⅱ阶段中气缸压力升高得很快，使曲轴连杆机构承受冲击力，使这些零件很快损坏，同时发出极响的敲击声，即所谓工作粗暴。如果采用自燃温度较低的燃料，就可以缩短着火落后时期，也可以采用较高的压缩比，及选择正确的喷油提前角等方法造成燃油更好蒸发的条件来缩短着火落后时期。除了着火落后时期的长短对气缸内的压力升高有影响外，第Ⅱ阶段的压力升高还与这个时期喷入的燃料供给速度有关。至于第Ⅲ阶段的长短，主要与这个阶段中喷入的燃油量和发动机的载荷有关。

气缸内燃烧压力随曲轴转角的变化关系，还可以根据发动机的示功图（如图3b）来确定。示功图可通过实测或根据热力计算的数据绘制〔示功图是气缸内的压力 P_z 随气缸工作容积 V 的变化曲线， $P_z = \varphi(V)$ 〕；利用一些变换或图

解法，可将示功图改绘成以曲轴转角 α 为横轴标的展开图 $P_z = \varphi_1(\alpha)$ 。

当气缸内的压力随曲轴转角的变化关系求出之后，根据发动机的动力学原理，即可进一步推算出一个工作循环内侧推力的变化情况（详细计算方法见本书第五章第二节《活塞所受侧推力 P_H 的计算》），并可根据计算结果，绘出侧推力变化曲线图。

上海柴油机厂试制的 12V180GC 柴油机的单缸试验机（以下简称 180 单缸机）在额定转速下及 125 马力工况下的侧推力变化见图 4。

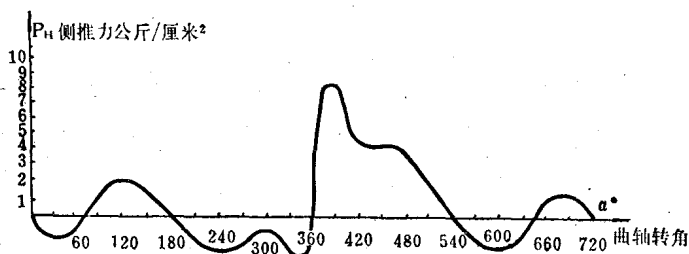


图 4 180单缸机在 1500 转/分、125 马力工况下的侧推力变化示意图

如图 4 所示，侧推力 P_H 最大的时候一般是在膨胀行程上止点以后一个小角度。（但还有另一种情况应该引起注意，对于某些高速柴油机，由于转速很高，活塞、连杆、曲轴飞轮组惯性很大，这时在排气冲程中，由于惯性力的作用，活塞所承向的侧向力比膨胀行程中承受的侧向力还大，因为工作行程中，惯性力部分地被气体压力所抵销，排气行

程中，惯性力的阻力小，所以有的高速柴油机活塞对缸套的撞击最严重处，还会发生在排气行程活塞往上行的时候。）

十分清楚，图4显示了180单缸机在1500转/分、120马力工况下侧推力换向时刻（以曲轴转角度计）在 0° 、 72° 、 180° 、 360° 、 540° 、 648° 。即在柴油机一个工作循环内，活塞的侧推力 P_H 方向（其方向符号的规定见图46）变化6次（四行程柴油机均有此特点）。活塞与缸套配合有间隙，侧推力 P_H 每换向一次，活塞就从缸套的一侧横摆到另一侧，撞击缸壁，从而使缸套产生振动。

2. 缸套单体振动的一般规律

用简单的“敲击法”可以测定缸套单体振动的一般规律。即把缸套倒置于金属平板上，用手锤对着缸套敲击。缸套就产生自由振动（缸套的振动可采用振动仪测量并用示波器作记录）。在敲击的一瞬间，激振能量较大，振动也较强烈，此时的频率（每秒振动的次数叫频率，它的单位是赫芝，常用HZ表示）较高。缸套从最大位移向平衡位置恢复过程中，因激振能量大量扩散和衰减，振动强度逐渐减弱。开始时的振动波形较为复杂，相间或同时出现高频的复合波。经过一段时间后，较高频率的振动随之衰减，并明显出现波节，而剩下一一种较低频率的振动，直至完全消失。

考察缸套在锤击作用下的弹性变形、振动形式与频率，还可以发现缸套的振动在不同频率下振动形式不一样，主要振动形式有以下几种：

①圆周方向的四节点振动（图5），这时，缸套沿圆周方向有2个柱面波。