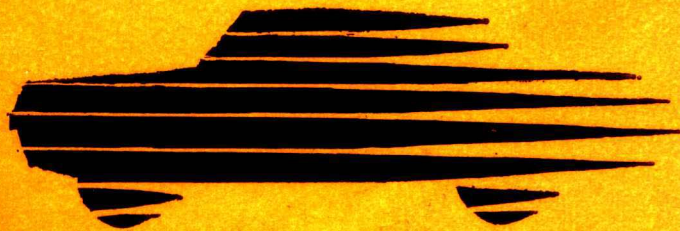


汽车

发动机的磨损和寿命

〔苏〕M·A·格里高里耶夫
H·H·波诺马廖夫



吉林人民出版社

汽车发动机的磨损和寿命

〔苏〕 M.A. 格里高里耶夫 著
H.H. 波诺马廖夫

张兴礼 译

戴 激 校

吉林人民出版社

内 容 提 要

书中研究了汽车发动机寿命的问题。依据发展趋势拟定出最合理的结构,以提高主要零件的耐磨性;研究了磨料磨损、腐蚀磨损和机械磨损的规律性,拟定了出气缸磨料磨损的数学模型;阐述了发动机在耐磨性方面进行快速试验的方法。

本书可供从事汽车工业和汽车运输方面工作的工程技术人员参考,对使用和修理人员也有一定参考价值。

ИЗНОС И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М. А. Григорьев, Н. Н. Пономарев

(根据苏联莫斯科机械制造工业出版社1976年版译出)

汽车发动机的磨损和寿命

М. А. 格里高里耶夫 著
〔苏〕 Н. Н. 波诺马廖夫

张兴礼 译

戴 敬 校

*
吉林人民出版社出版
吉林省新华书店发行
通辽教育印刷厂印刷

*
787×1092毫米32开本 9 5/8印张 字数: 213,000字

1980年9月第1版 1980年9月第1次印刷

印数: 1—10,670册

书号: 15091·160 定价: 0.85元

译 者 的 话

提高汽车发动机的使用寿命，对于发展国民经济具有重大的意义，这一点已受到国内外极大的重视。

通过设计合理的结构，采取合理而经济的加工方法，正确地使用和维护保养等，可以使发动机寿命延长很多。延长发动机的使用寿命，从而可以大量节省配件方面的消耗，节省修理工时，并且提高了车辆的运输能力，这对于加速国民经济的发展是很重要的。

本书综合苏联、美国等国家大量使用试验、道路试验和试验室试验的资料，着重介绍了汽车发动机故障的特点、磨损机理、零件磨损后对发动机性能的影响，研究各种使用因素（发动机工作的工况、冷启动的方式、所采用的滤清系统的效果等）对磨损的影响、发动机和零部件快速磨损的试验方法及磨损值的测量方法。同时，详细地研究了发动机零件的磨料磨损（此种形式的磨损占发动机总磨损的绝大部分）和某些计算方法，并拟定了气缸磨料磨损的数学模型，借以评价某些结构和使用因素对气缸磨损的影响。列举了大量试验结果，论证了在低的热状况下气缸磨损的特点，否定了传统的概念——即气缸上部以腐蚀磨损为主的观点。该书对于发动机的磨损方面进行了较为系统完整的论述，对于从事内燃机研究、设计、制造及使用维修方面的工程技术人员有一定参考价值。

在翻译此书的过程中，得到了席德华等同志的大力帮助，在此谨表示衷心的感谢。

目 录

序 言	1
第一章 发动机使用的可靠性	4
第一节 发动机故障的特点	4
第二节 发动机的寿命	14
第二章 发动机零件的磨损	22
第一节 摩擦和磨损时金属表面和原子-分子相互作用的性质	23
第二节 发动机零件磨损的特点	32
一、曲轴滑动轴承	35
二、气缸活塞组零件（气缸、活塞环、活塞）	38
三、配气机构零件	47
第三节 零件的磨损强度	49
第四节 零件磨损对发动机工作性能的影响	58
一、机油的烧损	59
二、曲轴箱窜气	62
三、机油压力	63
第三章 使用条件对发动机零件磨损的影响	68
第一节 汽车发动机工作的工况	69
第二节 负荷和速度工况对零件磨损的影响	83
第三节 发动机的热状况和冷起动	96
一、当发动机热状况下降时零件的磨损	99
二、冷发动机起动预热期间零件的磨损	110
第四节 在发动机中采用抗磨的尼莱吉斯特高镍铸铁镶套	

的试验	122
一、尼莱吉斯特高镍铸铁镶套对汽车发动机使用中磨损的影响	123
二、尼莱吉斯特高镍铸铁镶套的耐腐蚀-机械磨损的性能	125
三、尼莱吉斯特高镍铸铁镶套的磨料磨损	132
第五节 空气含尘率和机油、燃油的污染	137
一、空气含尘率	138
二、燃油和机油的污染	138
三、改进发动机的灰尘防护系统,降低零件的磨损	147
四、改善空气过滤系统和燃油过滤系统,分别对零件磨损的影响	151
第六节 使用条件对总磨损量影响的评价	155
一、发动机在正常热状况下工作时气缸的磨损	156
二、发动机降低热状况时气缸的磨损	160
三、汽车在工作班间停放后起动,对发动机气缸磨损的影响	161
四、由于磨料粒子进入发动机而引起的气缸磨损	163
第四章 发动机零件磨料磨损的特点	165
第一节 磨料粒子和零件表面的硬度对磨损的影响	166
第二节 磨料粒子的尺寸对零件磨损的影响	168
第五章 计算零件磨料磨损的某些方法	177
第一节 用比表面积作为灰尘磨料性质的指标	177
第二节 气缸的磨料磨损特点和计算	189
一、活塞环在气缸壁上的压力	191
二、气缸工作表面的磨料灰尘浓度	193
三、在气缸中活塞环对磨料粒子的粉碎	207
四、气缸磨料磨损的解析公式和计算方法	211
五、几种型号发动机的计算磨损和试验磨损的比较	215
六、活塞环的数量	219

七、镀铬气环	220
八、实际磨损和通过计算得到的磨损之间的定量关系	221
第三节 分析某些因素对气缸磨料磨损的影响	223
一、压缩比	224
二、活塞行程和气缸直径的比 $\frac{S}{D}$	225
三、发动机的负荷	226
四、曲轴转速	227
五、点火提前角	229
六、喷油提前角	231
七、沉淀在气缸壁上的磨料灰尘量	232
第四节 防止污垢粒子进入机油可靠地保护发动机摩擦副	233
第六章 汽车发动机在低热状况下工作时气缸的 磨损特点	240
一、活塞环压力对气缸磨损的影响	248
二、气缸-活塞环摩擦副润滑条件的影响	249
三、冲入曲轴箱的废气对气缸磨损的影响	253
四、燃油对气缸磨损的影响	254
五、机油质量对气缸磨损的影响	256
第七章 发动机、部件和零件可靠性的快速试验	259
一、发动机台架试验	264
二、发动机快速台架试验	265
三、无发动机台架试验	277
第八章 不拆开发动机测量零件微小磨损的方法	283
一、零件表面活化的方法	284
二、在光电分光计上对机油油样进行光谱分析的方法	292
参考文献	298

序 言

目前，提高产品质量是一个重要问题。提高汽车发动机寿命对国民经济有重大的意义，这已引起发动机制造厂和科学研究机构的广泛重视。

从技术角度看，提高寿命需要解决许多方面的问题，其中之一就是结构的研究，它应该做到用最小的代价来提高发动机零件的耐磨性，首先是气缸活塞组零件的耐磨性。

从实际经验可知，有很多不同方法，可以使发动机零件耐磨性有不同程度的提高。例如：发动机气缸的耐磨性，可以通过改善发动机工作的转速、负荷和热状况的稳定性来提高；也可以通过采用耐磨材料，改善燃油和机油的质量，有效地防止硬粒子进入发动机，以免引起磨料磨损等措施来提高。必须从各种各样的方法中，选取在使用条件下最合理的措施，花费最少，而效果又最好。因此，必须弄清楚影响零件磨损的主要因素。上述问题在工作上是值得注意的。

传统的观点认为，热状况的下降是引起气缸活塞组零件腐蚀-机械磨损的因素。然而，这一点与大量的试验结果不符，它不能解释腐蚀-机械磨损，而苏联和其它国家发动机制造厂的经验表明，降低磨料磨损可以使零件获得较高的耐磨性。这些情况迫使人们重新研究以往关于腐蚀-机械磨损的见解，而这些见解在过去曾经作为使用条件下发动机磨损的主要原因。因此重新分析研究了以前试验的资料，并进行了

一系列新的专门的试验研究。

研究结果表明，现代苏联生产的载重汽车发动机，一半以上的磨损都是由于磨料粒子引起的。因此，目前进一步提高零件耐磨性的主要潜力是降低磨料磨损，其主要措施是采用空气滤清器、燃油滤清器和机油滤清器，保护发动机防止灰尘粒子进入，以及将所有可能往发动机内渗灰的地方进行密封。随着零件磨料磨损在总磨损中减小的同时，其它形式的磨损的相对值也将随之增加。

了解零件磨损规律性，首先是磨料磨损的规律性，可以在很大程度上简化并能加速提高发动机寿命的研究工作。因此，苏联汽车研究所拟定了一个气缸磨料磨损的数学模型。用这个数学模型，可以用计算的方法，评价某些结构和使用因素对气缸磨损的影响。还可以从理论上探讨过滤效果对磨料磨损的影响，以及加入发动机气缸内的石英灰粒子的分散组成与磨料磨损的关系。

当发动机热工况降低时，研究气缸磨损的特点，由此获得的结果将用最新的观点来评价这种形式的磨损。

决定发动机寿命的因素之一，是正确选择机油的品种。当所采用的机油不符合结构要求的情况时，会使气环失去运动性，堵塞油路，特别当冷起动时能擦伤摩擦表面。这些故障所引起的严重后果，是迫使发动机进行大修。

实际上，机油本身对零件磨损的影响直到最后也不明显。有些试验数据是互相矛盾的，因而它们都不能作为解决这个问题唯一的依据。

在温度和压力不断变化的润滑条件下，摩擦和磨损是和物理基础相联系的综合复杂的问题，机油对无故障性和耐磨性的影响，对发动机机油提出的要求等等，这本身就是独立

问题，它远远超出了本书的范围，因此，本书对它涉及的很少。然而这并不能认为作者对于这个问题认识不足，作者认为近年来关于机油对发动机寿命的影响是估计不足的。

写此书时，大量利用了苏联汽车研究所在试验室内进行的发动机可靠性试验的研究资料。

第一章 发动机使用的可靠性

提高汽车和发动机的可靠性，从可能取得的最好的经济效果来说具有头等重要的意义。产品的可靠性包括无故障性、耐久性、修理的方便性和保存性(ГОСТ 13377-67)。

对于被修理的产品来说，最广泛采用的无故障指标，是发生故障前的工作时间、故障数量参数(параметр потока отказов)和无故障工作的概率。

第一节 发动机故障的特点

根据可靠性理论，故障产生的原因可以分为以下几种形式：

1. 使用初期引起的故障——磨合期的故障。它的出现取决于制造和装配质量，以及制造厂检查的不严格而引起的。汽车发动机，磨合期间产生的大量故障，在试运转期间消除；

2. 零件磨损引起的故障。这种故障在使用一定期限后不可避免地要出现，并直接影响机件老化过程。汽车发动机的这些故障大致可以分为：(1)由于曲轴连杆机构主要零件的磨损所引起的故障，这些零件在发生故障前运转的时间，就决定了发动机的寿命(耐久性)、(2)由于次要零件的故障所引起的失效，它们的使用期限相当短，并不决定发

动机的寿命；

3. 由于不利的因素而引起的意外故障：如零件材料内部隐藏的缺陷，超过了计算应力和热负荷等原因，从而使零件损坏。³⁾出其不意的故障的名目是相当多的。

在分析某些汽车发动机故障特点时，作者还发现另一些故障，并假设称它们为系统故障。这些故障，是由于该发动机所固有的结构和工艺上的缺陷所引起的。因此，当发动机工作到一定时期时，某些零件发生过早的极限磨损和损坏。在大多数情况下，系统故障集中在某一行驶里程，在这个范围之外或者很少或者根本没有。有系统故障的零件很少，它不超过一个或几个零件。原则上来说，对于大批生产的、成熟的发动机结构，不应当有系统故障。

上述故障分类方法并不是唯一的方法。在实际应用中还采用其它一些分类方法，它们是以另外一些故障性质为基础的。例如，在使用中故障可分为：可以预见的（заявочный）、线性的（линейный）、道路的等。

从量的方面来说，产品的无故障性可以用故障数随行驶里程分布的规律来表征。知道了概率密度规律，可以确定无故障的主要指标，它们是：

1. 无故障的平均工作时间（行驶里程） L （公里）。

2. 在行驶里程为 L （公里）的距离内，无故障工作的概率 $P(L)$ 。

3. 故障数量的参数 $\omega(L)$ ，即是在某一行驶距离间隔内的故障数量与在这个间隔内工作过的时间之比。

根据可靠性理论，理想系统的故障数量的参数（故障强度）与行驶里程的关系表示于图 1 内。并人为地将它分作三个阶段。

第一个阶段，即磨合期，出现大量的磨合故障，其多少由不同的生产因素来决定。因为每一次故障被排除后，在较短

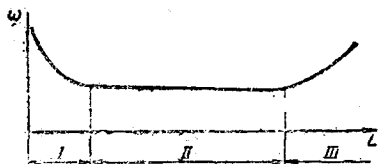


图1 故障数量的参数与行驶里程
(工作过的时间)的关系

I-磨合期；II-正常使用期；
III-故障数量提高期。

的期间内就使故障的总数，很快减少到某一固定值。第二个阶段的特点，是故障数量的参数保持在恒定的水平上，相当于正常使用期。在这个期间，出现的多半是意

外的故障。第三个阶段，意外的故障和由于磨损引起的故障开始叠加，故障数量的参数值很快增加。

对于发动机来说，符合所画出的故障数量参数变化图的很少。实际上，由于发动机零件耐磨性的差异，在第二个阶段结束前很久，由于耐磨性较差的零件的磨损（如气门磨损、挺杆出现麻点、风扇皮带断裂等），所引起的故障，就开始叠加在意外故障上。此外，由于系统故障的出现，使故障强度有时会在某一个行驶区间内急剧增加，而系统故障则是由于发动机制造的工艺过程暂时受到破坏而引起的。

现在来分析研究一下各个使用阶段的故障分布规律。在研究各种装置、机构和系统的故障分布情况时，它们大部分都符合魏布尔(W. Weibull)分布规律、正态分布规律和伽马(Gamma)分布规律。

但是，在可靠性理论中，故障的分布规律却以指数分布规律为主，它是伽马分布的特殊情况，而意外故障也服从于伽马分布规律。按指数规律分布，产品无故障工作的概率为

$$P(L) = e^{-\omega L}.$$

式中 ω ——修理产品的故障数量参数（故障数/公里）。

发生故障的概率

$$Q(L) = 1 - P(L) = 1 - e^{-\omega L}.$$

指数分布——单一参数的，即是它仅仅由一个参数 ω 的值来决定，该值在本分布规律中是定值。

依据指数分布的性质，到出现故障时平均工作过的时间

$L_{cp} = \frac{1}{\omega}$ ，因此无故障工作的概率，用下列公式表示：

$$P(L) = e^{-\frac{L}{L_{cp}}}.$$

故障分布的指数规律，可以用在仅有意外故障的发动机工作期间，或者用在从全部故障分出来的意外故障中。当试验 N_0 发动机至预先规定的行驶里程，评价到出现故障时平均工作过的时间

$$L_{cp} = \frac{LN_0}{\sum m_i},$$

式中 m_i ——在发动机全部试验过程中记录下的故障总数量。

故障数量参数从 L 到 $(L + \Delta L)$ 区间应为

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} m_{i(L+\Delta L)} - \sum_{i=1}^{N_0} m_{iL}}{N_1 \Delta L},$$

式中 N_0 、 N_1 ——分别为试验开始和结束期间，参与试验的发动机数量。

如果故障数量参数 ω ，按试验数据计算是定值，则故障为指数分布。因此，以数量而言， ω 将表示发动机的意外故障。

利用上述原则，进行整理发动机在使用中和试验场试验中，故障分布特点的试验数据。

在图 2a 中表示载重 5.5 吨的载重车发动机, 在普通使用条件下, 行驶十万公里所出现的意外故障和磨损故障的数量参数。在行驶的初始阶段, 发动机无故障工作的概率取决于意外的故障, 以后随着行驶里程逐渐增加, 由于磨损引起的故障占有优势。磨损故障的数量参数, 随行驶里程的增加而不断增加, 这反映了零件的自然磨损过程。

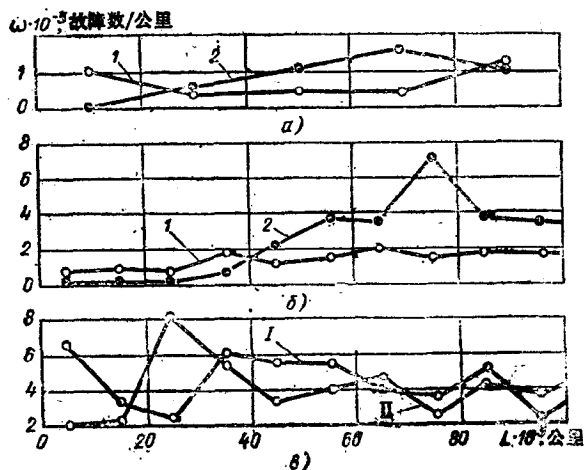


图 2 发动机故障数量参数与行驶里程的关系

a-载重汽车在城市条件下使用(A型发动机); b-载重汽车在苏联中亚的南部地区使用(A型发动机); c-轿车(出租汽车)在城市条件下使用(B型发动机); I-第一组; II-第二组; 1-意外故障; 2-由于磨损而引起的故障。

在整个行驶里程内, 意外故障的数量参数实际是定值, 这证明了使用时故障的指数分布规律。8~10 万公里这一行驶距离除外, 这是因为确定故障的真实原因有困难, 看来只能将一部分由于磨损引起的故障当作意外故障来处理。在所

列数据内没有包括磨合期的故障，因为在这个期间的磨合故障早已被消除了。

对于同一型号的发动机，在另一地区使用，其意外故障和磨损引起的故障的数量参数与前面相似（图 2. 6, 表 1）。随着行驶里程的增加，意外故障数量参数增加的趋势不显著，看来，这反映了由于零件磨损和材料疲劳而引起的损坏对故障的某些影响。但是，这个影响不明显，实际上可以认为，意外故障数量参数在行驶十万公里的距离内是个常数，并且平均等于 1.35×10^{-5} 故障数/公里。

表 1. 发动机的参数

名 称	发 动 机 型 号				
	A	B	B	Г	Д
	汽 油 机			柴 油 机	
气缸的布置和缸数	V8	V8	直4	V6	V8
工作容积（升）	6.0	4.25	2.45	11.15	14.86
额定功率（马力）	150	115	75	180	240
额定功率时的转速（转/分）	3200	3200	4000	2100	2100
最大扭矩（公斤力·米）①	41	29	17	67	90
最大扭矩时的转速（转/分）	1700	2300	2000	1400	1400
汽车载重量（吨）	5.5	4.0	—	—	—

名 称	发 动 机 型 号					
	E	Ж	И	K	Л	M
	汽 油 机					
气缸的布置和缸数	直4	直4	直4	直4	V4	直6
工作容积（升）	1.36	1.48	2.45	1.20	0.885	3.48
额定功率（马力）	50	75	98	62	27	70
额定功率时的转速（转/分）	4750	5800	4500	5600	4100	2800
最大扭矩（公斤力·米）①	9.3	11.4	19.2	8.9	5.1	20.5
最大扭矩时的转速（转/分）	2730	3400	2300	3400	2600	1500
汽车载重量（吨）	—	—	—	—	—	—

① 原文为：公斤力-厘米，有误。——译者

行驶距离在三万公里之内，磨损故障数量参数等于零，以后开始急剧增加。行驶到八万公里以后，这个数值有某些下降，这是由于汽车运输公司缺少必须的备件，尽管这些零件需要更换，但仍然不能及时更换这些磨损的零件①。

另外一例是，引用了两组轿车发动机行驶十二万公里的故障数量参数（图 2.6）。在这种情况下，两组的故障数量参数，表现为指数分布，它正是意外故障的特点；在这种

情况下没有磨损故障。

在某些情况下，与上述情况不同，故障分布同指数分布有本质差别。作为第一个例子，研究载重量为 4 吨的载重汽车发动机的故障数量参数的变化情况，它同时具有磨损故障和意外故障（图 3）。此外，在试验中记录排气系统相同零件和气门的故障。行驶到七万公里，这些零件的故障数量参数大致是固定的，而行驶七万至十一万公里，它增加了 4~5 倍。按照前面的分

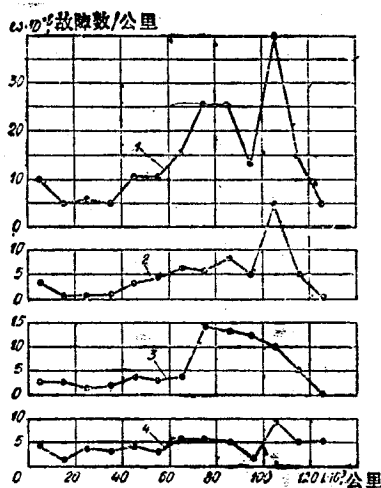


图 3 B型发动机故障数量参数与工作过的时间(行驶里程)的关系

- 1-总的故障；2-磨损结果引起的故障；
3-系统的故障；4-意外故障。

① 这些磨损了的零件虽然应当更换，不更换会影响到发动机的性能，但尚未达到不更换就会引起大量故障的程度。由于发动机使用到这个行驶里程，其质量最好（参看11页正文第四行的一段），因而故障数量参数有所下降。——译者