

气体软氮化球铁曲轴的研究和应用*

上海内燃机研究所

吴能士、倪建白

上海市机械制造工艺研究所

蒋学正、石益仁

前 言

气体软氮化球铁曲轴经过几年的反复试验,现在已经研究成功,并于一九七八年七月正式通过一机部鉴定。

球铁曲轴经过这种途径强化后,疲劳强度得到很大的提高;同时轴颈工作表面又获得了与感应淬火曲轴相仿的优良耐磨性。从而不仅同时解决了当前球铁曲轴出现的断裂现象和早期磨损两大问题,而且为今后设计高强度柴油机球铁曲轴提供了有价值的依据。

一、我国农用柴油机曲轴概况

曲轴是柴油机的重要零件之一。它将活塞的往复运动变成旋转运动,并输出发动机的全部功率。曲轴由于在周期性变化的气体压力、往复运动质量惯性力、旋转运动离心惯性力以及它们的力矩的共同作用下,承受复杂的交变应力,加上圆角等部位的严重应力集中,若设计不周,往往容易导致疲劳破坏。另外,曲轴各轴颈在很高的比压下高速运动,将使曲轴轴颈和轴承发生磨损。因此,整台柴油机的可靠性和使用寿命在一定程度上取决于曲轴的疲劳强度和耐磨性。

在我国中小功率柴油机中,高速农用柴油机占据重要的地位。据有关资料^[1]统计,我国目前农用、拖拉机用柴油机的年产量约为2500~2800万马力,占全国中小功率柴油机总数的3/4以上。因此,农用柴油机曲轴的质量好坏影响很大。我国的农用柴油机从六十年代开始得到很大的发展。当时,限于锻压设备的缺乏,加上大部分农用柴油机生产厂都是中小型厂,生产条件较差,因此,农用柴油机大多选用球墨铸铁为曲轴的材料。据统计,当前我国80%以上的农用柴油机都是采用球墨铸铁曲轴,除485、481、490、4100(北内)、4125等柴油机用锻钢曲轴(其中只有485柴油机曲轴用合金钢,其他都是精选45#号钢)外,90、95、100、105、120、135、160等系列柴油机都用球铁曲轴。实践表明,选用球墨铸铁作为高速农用柴油机曲轴的材料,基本符合我国的国情,只要处理得当,在技术上也是可行的。但是,随着农用柴油机生产批量的日益增加,使用范围的日益广泛,那些强度储备不足的球铁曲轴就发

* 这项研究工作曾得到新昌柴油机厂、苏州动力机器厂等单位的大力协作和支持。

生了断裂现象,同时还出现了球铁曲轴的早期磨损。据调查,这些球铁曲轴的断轴率达0.5~2%,而一般正火球铁曲轴的使用寿命(指第一次大修寿命)约为1000~1500小时。国外农用柴油机曲轴是用碳钢或高级合金钢模锻而成的,很少用球墨铸铁曲轴,而且大多数曲轴进行表面强化处理,再加上加工精度、机油质量、使用水平都比较高,因此曲轴断裂现象很少发生,第一次大修寿命可达5000~7000小时左右。对照以上情况可以看出,我国农用柴油机球铁曲轴的质量是较差的。这不仅危害着农用柴油机的整机质量,而且严重地影响着农用柴油机的实际使用效果。迅速有效地解决这两个问题,是摆在我们面前的一个十分紧迫的任务。

二、提高球铁曲轴质量的技术途径

为了寻求解决球铁曲轴存在问题的有效途径,查明造成球铁曲轴断裂和使用寿命短的原因是十分重要的。为此,我们作了多次专题调查。调查所得的情况表明,球铁曲轴的断裂有如下一些特点:

(1) 大部分曲轴都是在使用几百小时后才发生断裂,而不是在使用的初期就发生断裂。

(2) 曲轴断裂的基本部位是在连杆轴颈过渡圆角和主轴颈过渡圆角的对角线上,也就是通常称之为危险断面(图1)。宏观裂纹多半起源于连杆轴颈过渡圆角处。

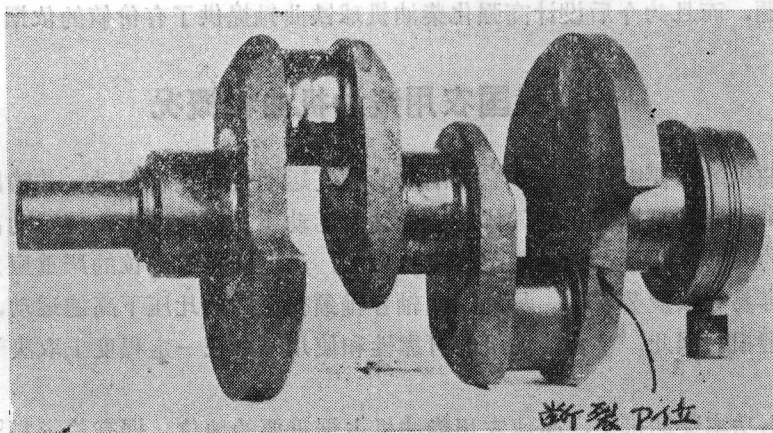


图1 295型球铁曲轴断裂部位

(3) 曲轴断口的宏观特征是可以将断口明显地划分为两个部分:第一部分是裂纹的延展部分,由于应力交变,裂纹反复挤压摩擦而呈光滑表面;第二部分是残留断口的瞬时断裂区,即由于裂纹的延伸发展,断面逐渐收缩而导致最后的脆性断裂,见图2。

从曲轴断裂部位、断裂时间、断口宏观形貌的分析中可以看出,大部分曲轴的断裂属于比较典型的弯曲疲劳破坏,而球铁曲轴弯曲疲劳强度不足则是引起曲轴断裂的主要原因。但是,调查的情况还表明,造成球铁曲轴断裂的原因是比较复杂的,是受多方面的因素影响的,不能简单地下一个方面的结论。例如,实际使用中断裂的曲轴断口和疲劳试验后的曲轴断口都发现,有一部分曲轴断口有明显的铸造缺陷:如疏松、缩孔、夹渣等。实际运转已经证明,一旦在曲轴的危险断面存在严重的内部缺陷时,必然会造成曲轴的破坏。又如,除了曲轴本身的原设计强度储备不充裕这个原因外,与曲轴相关的主轴承盖强度、机体刚度、机

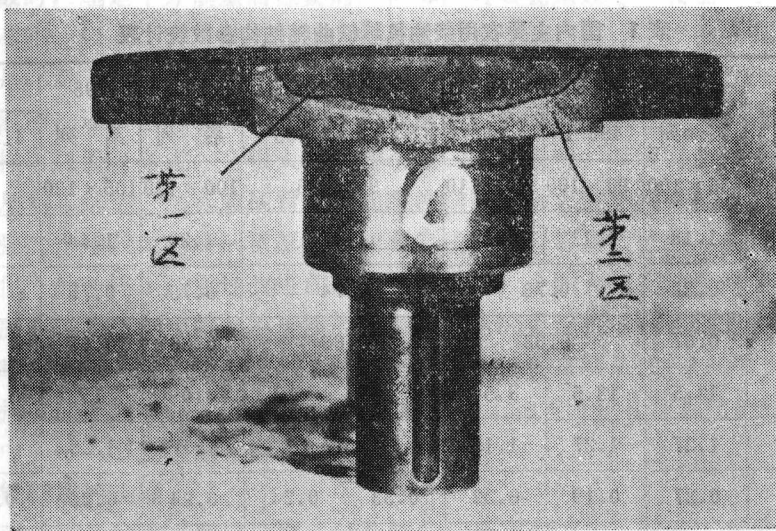


图2 曲轴断口的特征

体主轴承的同心度也会引起曲轴的断裂。此外，曲轴的加工精度、柴油机的配套、机手的使用维护保养不佳都是导致曲轴断裂的可能因素。因此，在抓住提高曲轴弯曲疲劳强度这个关键的同时，也需要注意解决其他一些较为次要的问题。

球铁曲轴使用寿命短的原因有：曲轴加工精度较差、机油质量不合要求、保养不当等，而很大比例的球铁曲轴仅仅经过一般正火处理，未作专门的表面强化处理，以至造成曲轴耐磨性较差，这是球铁曲轴使用寿命短的主要原因。

综上所述，为了解决球铁曲轴的断裂现象，首先应当设法消除铸造缺陷，保证加工精度，确保主轴承盖强度和机体刚度，搞好配套，提高机手技术水平等，而后，把主要目标放在提高球铁曲轴的弯曲疲劳强度上。提高球铁曲轴使用寿命的主要办法则是对曲轴表面进行专门的强化处理。

然而，欲达到提高球铁曲轴弯曲疲劳强度的目的，可以从改进现有曲轴的设计结构、改善球铁的材质性能、采用表面强化新工艺这三方面着手，只有选择合适的技术措施，才能达到事半功倍的收效。为此，有必要对这些技术措施进行综合的分析和比较，以便弄清这些技术措施的利弊和效果。下面简要地逐一分析。

改进曲轴的设计结构

曲轴原始设计的好坏是确保曲轴能否安全可靠工作的基础。这是非常重要的。我们统计的国内主要农用柴油机球铁曲轴的结构参数列入表1。

实际使用已经证明，90、95、100三个系列柴油机球铁曲轴存在着程度不同的断裂现象，而85、105、120三个系列柴油机球铁曲轴基本上能够安全可靠的工作。分析统计表的主要结构参数可发现：表征曲轴强度和刚度的重要参数重叠系数 φ 和柄臂相对厚度 H/D ，对85、105、120系列球铁曲轴来说， $\varphi=1.25\sim 1.29$ ， $H/D=0.26\sim 0.28$ ，而90、95、100系列球铁曲轴 $\varphi=1.17$ ， $H/D=0.19\sim 0.24$ 。由此可见，断轴情况比较严重的球铁曲轴正是那些原始设计时，结构参数选择不当、尺寸过于紧凑以至刚度较差、强度储备不足的曲轴。表2列出了国外一部分缸径同95接近的高速柴油机曲轴的结构参数。

由表2可见，国外高速柴油机曲轴，尽管都用高级合金钢或碳钢模锻，然而他们在确定

表 1 国内主要农用柴油机球铁曲轴结构参数统计表

参 数	机 型	85	90 系 列		95 系 列		100	105	120 系 列	
		系 列	490-1	490	S 195	495	系 列	系 列	4120 F	杭发-6120
D×S		85×100	90×100	90×110	95×115		100×120	105×120	120×140	
S/D		1.18	1.11	1.22	1.21		1.20	1.14	1.17	
d ₁ /D		0.82	0.78		0.74		0.75	0.76	0.79	
d ₂ /D		0.67	0.63		0.69		0.65	0.67	0.71	
A		13.5	13.5	8.5	10		10	15	20	
φ		1.27	1.27	1.15	1.17		1.17	1.25	1.29	
H/D		0.27	0.19	0.22	0.33	0.24	0.24	0.26	0.28	0.27
b/D		1.18	1.54	1.11	1.11	1.09	1.13	1.15	1.29	1.30
r/d		0.61	0.70		0.77		0.62	0.64	0.59	
材 料		QT60-2	QT60-2	45	QT60-2		QT60-2	QT60-2	QT60-2	QT90-2

表 2 95曲轴与国外同类机型曲轴结构参数比较

制 造 厂	机 型	Z × D × S	Ne/n	Cm·Pe	d ₁	d ₁ /D	d ₂
莱阳动力机厂	695	6 × 95 × 115	108/2800	76.2	70	0.74	65
					75	0.79	
三菱(自动)	6DR50	6 × 92 × 100	110/3700	82.8	70	0.76	58
菲 亚 特	800	6 × 95 × 100	100/3000	70.6	76.2	0.80	65
日 野	EC 100	6 × 97 × 113	130/3200	88	74	0.76	60
三菱(自动)	6DS 70	6 × 98 × 120	135/3100	89.5	78	0.80	60
五 十 铃	D500	6 × 98 × 110	130/3300	86.2	76	0.78	64
	6BD1	6 × 102 × 118	160/3200	88.8	80	0.78	64

制 造 厂	机 型	d ₂ /D	H	H/D	b	b/D	A	φ	材 料
莱阳动力机厂	695	0.69	23	0.24	104	1.09	10	1.17	QT60-2
					130	1.37	12.5	1.22	
三菱(自动)	6DR50	0.63					14	1.28	特殊钢
菲 亚 特	800	0.69					15.6	1.28	碳 钢
日 野	EC 100	0.62	21.1	0.27	110	1.13	10.5	1.19	碳 钢
三菱(自动)	6DS 70	0.61					9	1.15	特殊钢
五 十 铃	D500	0.63	21	0.22			15	1.27	特殊钢
	6BD1	0.63	23	0.23	122	1.20	13	1.22	45Cr

曲轴主要参数时，还是十分慎重而稳妥的。例如，其重叠系数 φ 一般也大于1.20，柄臂相对厚度 H/D 也不小。以上说明，精心设计曲轴是十分重要的，设计不周就会造成曲轴的“先天不足”。但是，对于业已大量生产的现有机型来说，其曲轴设计结构的改进，不仅受到“三化”条件的限制，还要考虑现有工艺装备的继承性，加上保有量也很大，因此不能象设计一种新曲轴那样可以通盘考虑，有很大的回旋余地。研究表明，对现有曲轴来说，改进结构设计可以从采用空心结构、加宽曲柄臂、用卸载槽结构、加大主轴颈直径等方面进行，而影响曲轴刚度和强度作用较大的曲柄臂厚度、圆角半径、行程等参数已经不能更动。这样，要在不影响“三化”的前提下，通过改进曲轴的结构设计，企图大幅度地提高曲轴的疲劳强度，借以彻底解决曲轴的断裂现象是不现实的。例如，当95柴油机球铁曲轴的主轴颈从70毫米加大到75毫米时，曲轴的疲劳强度提高7%；而当其曲柄臂宽度从104毫米增大到124毫米时，曲轴的疲劳强度仅提高3.6%。事实证明，已经加大主轴颈直径和加宽曲柄臂宽度的95曲轴，在实际使用中仍然不断发生曲轴断裂。

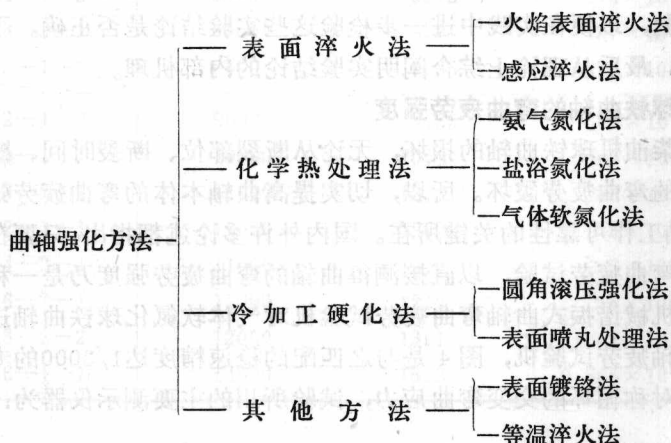
改善球铁材质的性能

稳定改善球铁的材质是解决球铁曲轴断裂的一个重要方面。然而，改善球铁材质主要着眼于消除球铁曲轴的铸造缺陷（尤其是内部缺陷），稳定其内在质量。在此前提下，尽可能地提高球铁曲轴的性能，特别是疲劳强度。但是，通过改善球铁材质，要显著地提高球铁曲轴的疲劳强度也是不切实际的。当前，改善球铁材质性能的主要措施是采用铁模复砂铸造新工艺、使用瞬时孕育工艺、确保较高的珠光体含量、添加微量的合金元素（主要是铜和钼）等。然而，研究证明：铁模复砂铸造的球铁曲轴较一般砂型铸造曲轴的疲劳强度高7%左右；珠光体量大于90%的球铁曲轴的疲劳强度比珠光体量为85%左右的球铁曲轴高7%；而添加微量的铜钼对球铁曲轴疲劳强度的作用不大。因此，单纯依靠改善球铁材质性能来解决球铁曲轴的断裂也是不可能的。

还应当指出，无论是改进曲轴设计结构，还是稳定提高球铁材质，都不能有效地提高球铁曲轴的耐磨性。

表面的强化处理

表面强化处理不会导致曲轴现有外形尺寸的变化，也不会影响现有的工艺装备。通过强化处理，改变曲轴表面的组织和内应力状态，以达到提高曲轴性能的目的。因此，对现有机型的球铁曲轴来说，采用表面强化工艺来解决曲轴的断裂现象并提高其使用寿命，具有特殊的意义。对于柴油机曲轴来说，表面强化方法可以大致综合如下：



表面淬火法中, 火焰表面淬火法已被感应淬火法取代。轴颈的感应淬火(高频和中频)在我国得到相当广泛的应用。使用实践证明, 它对提高曲轴的实际使用寿命具有显著的效果, 但目前采用的生产工艺有待完善。另外, 轴颈感应淬火由于圆角处在淬火的热影响区域内(这是一个呈现拉应力的回火过渡区)使曲轴的疲劳强度有一定幅度的下降。这样, 那些强度储备不足的球铁曲轴就难于采用这一方法来提高其使用寿命。圆角感应淬火工艺国内尚处在试验阶段。冷加工硬化法中, 表面喷丸处理在国内应用很少。圆角滚压强化能显著提高球铁曲轴的疲劳强度, 从而有效解决曲轴的断裂现象。在国外, 圆角滚压强化应用颇广, 国内也已开展不少工作, 并有一些工厂采用圆角滚压强化法。该法的不足之处是不能提高曲轴的耐磨性。其他方法中, 表面镀铬法应用较少。等温淬火处理在国内一部分工厂中得到应用, 它大多限于处理单缸机的较小曲轴。经等温淬火处理后, 曲轴的疲劳强度和耐磨性都能得到一定的提高。但其温度控制比较困难, 工人操作条件较差。在化学热处理方法中, 氨气氮化即一般称为“气体氮化”或俗称“硬氮化”, 由于其处理时间长及成本昂贵而无法应用于农用柴油机球铁曲轴。盐浴氮化法即液体软氮化, 虽然克服了气体氮化的弊病, 而且其原料从有毒到无毒有了发展, 但由于存在氰基污染问题, 加上氮化质量不大稳定, 曲轴清洗困难而大大阻碍了它的推广应用。近几年研究成功的气体软氮化方法, 由于克服了上述两种方法的缺点而受到广泛重视。用气体软氮化强化球铁曲轴的主要优点是:

1) 它既能大幅度地提高球铁曲轴的疲劳强度, 又能显著地提高曲轴的耐磨性, 从而收到事半功倍的综合效果;

2) 气体软氮化处理设备简单、处理时间短, 工艺稳定、成本低, 易在一般中小型工厂推广应用;

3) 工人操作环境安全。

通过以上的综合分析和比较可以看出, 用气体软氮化新工艺来强化农用柴油机球铁曲轴是一条值得重视的途径。对于业已大量生产的现有机型的球铁曲轴来说, 更是如此。据此, 我们对气体软氮化球铁曲轴开展了一系列的试验研究工作。

三、气体软氮化球铁曲轴的试验和研究

关于气体软氮化球铁曲轴的试验研究, 始终是围绕弯曲疲劳强度和耐磨性这两个主要性能展开的, 既进行了大量的宏观试验, 也开展了较为深入的微观研究。与此同时, 还进行了长时间的实际使用考验, 以便在实践中进一步检验这些实验结论是否正确。下面详细介绍各项研究的内容和结果, 最后从理论上综合阐明实验结论的内部机理。

1. 气体软氮化球铁曲轴的弯曲疲劳强度

前已分析、农用柴油机球铁曲轴的损坏, 无论从断裂部位、断裂时间、断口的宏观形貌来看, 属于比较典型的弯曲疲劳破坏。所以, 切实提高曲轴本体的弯曲疲劳强度, 就成为解决曲轴断裂, 提高曲轴工作可靠性的关键所在。国内外许多论述都指出, 只要在有可能的条件下, 对曲轴本体进行弯曲疲劳试验, 以直接测得曲轴的弯曲疲劳强度乃是一种快速而可靠的方法。因此, 我们用机械谐振式曲轴弯曲疲劳试验机对气体软氮化球铁曲轴进行了大量的对比试验。图3就是曲轴疲劳试验机, 图4是与之匹配的稳速精度达 $1/3000$ 的专用控制系统。

试验所加负荷系对称循环的交变弯曲应力, 试验所用的主要测示仪器为:

三级标准测力计;

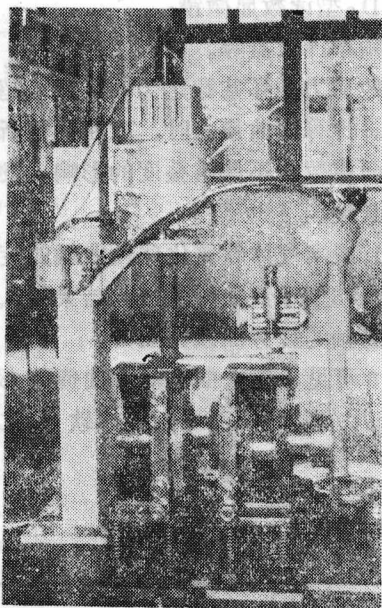


图3 曲轴弯曲疲劳试验机

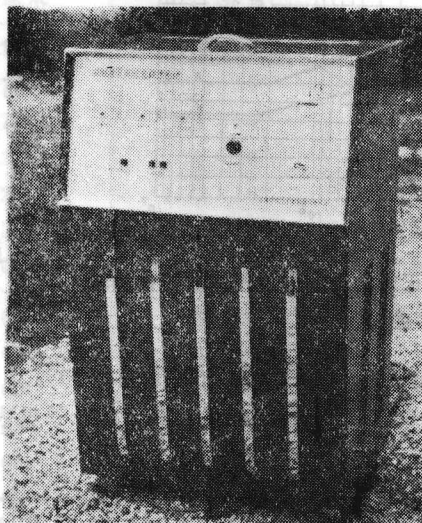


图4 稳速控制装置

表3

曲轴类别和编号		试验弯矩M 公斤—厘米	对应弯曲应力 σ 公斤/毫米 ²	达到循环次数 N	备 注
原 始 正 火 曲 轴	3—1—2	5500	6.00	$>5 \times 10^6$	通过
	7—1—2	6000	6.53	$>5 \times 10^6$	通过
	7—2—2	6500	7.08	$>5 \times 10^6$	通过
	6—1—2	7000	7.63	$>5 \times 10^6$	通过
	6—2—2	7500	8.18	$>5 \times 10^6$	通过
	14—2—2	7500	8.18	$>5 \times 10^6$	通过
	7—1—1	7500	8.18	$>5 \times 10^6$	通过
	3—1—1	7500	8.18	$>5 \times 10^6$	通过
	14—1—2	8000	8.72	2.14×10^6	断裂(无铸造缺陷)
	3—2—1	8500	9.27	1.37×10^6	断裂(无铸造缺陷)
	15—1—1	9500	10.35	0.71×10^6	断裂(无铸造缺陷)
尿 素 气 体 软 氮 化 曲 轴	2—1—2	9000	9.82	$>5 \times 10^6$	通过
	10—1—1	10000	10.9	$>5 \times 10^6$	通过
	13—2—1	11000	12.0	$>5 \times 10^6$	通过
	2—2—1	11000	12.0	$>5 \times 10^6$	通过
	14—2—1	11000	12.0	$>5 \times 10^6$	通过
	6—2—1	11000	12.0	$>5 \times 10^6$	通过
	13—2—2	12000	13.1	1.41×10^6	断裂(无缺陷)
	6—1—1	14000	15.3	0.565×10^6	断裂(无缺陷)

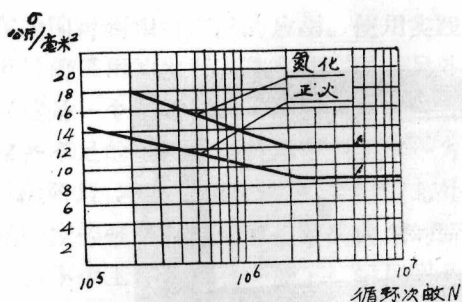


图5 295型正火曲轴和尿素气体软氮化曲轴的疲劳曲线

J X D₂型读数显微镜;

PB₂频率计数器等。

试验的应力循环基数定为 5×10^6 , 超过此数, 即为通过。计算弯曲应力时, 取曲柄臂断裂处的名义抗弯断面模数, 不计重叠度的影响。发现裂纹就作为曲轴断裂。

(1) 尿素气体软氮化球铁曲轴的疲劳强度

(a) 295型球铁曲轴的试验结果列入表3。

两组曲轴的疲劳曲线见图5。

由图5可见, 正火曲轴的弯曲疲劳极限应力

$\sigma = 8.18$ 公斤/毫米², 而尿素气体软氮化曲轴 $\sigma =$

12.0 公斤/毫米², 故后者比前者提高46.5%。

(b) 190W型球铁曲轴的试验结果^[2]见表4。

表4

曲轴类别	曲轴编号	试验弯矩 M 公斤—厘米	达到循环周次 N	备注
正火曲轴	1	6070	$> 5 \times 10^6$	通过
	2	6150	$> 5 \times 10^6$	通过
	3	6220	3.25×10^6	断裂
	4	6380	2.94×10^6	断裂
	5	6675	1.42×10^6	断裂
	6	8050	0.55×10^6	断裂
尿素气体软氮化曲轴	7	9250	$> 5 \times 10^6$	通过
	8	9350	3.49×10^6	断裂
	9	9500	4.46×10^6	断裂
	10	9740	2.94×10^6	断裂
	11	10000	2.06×10^6	断裂

两组曲轴的疲劳曲线见图6。

由图6可见, 对190W型球铁曲轴, 经尿素气体软氮化处理后, 曲轴的疲劳强度提高52%。

上述两项试验结果表明, 以尿素为气源来强化球铁曲轴, 可使曲轴的疲劳强度比一般正火曲轴提高46.5~52%。

(2) 通氨滴醇气体软氮化球铁曲轴的疲劳强度

(a) 295型球铁曲轴的试验结果见表5。

表5中曲轴编号以1开头的是一般正火曲轴;

以2开头的系用570℃×3小时的一阶段加温的氮化曲轴;

以3开头的系用570℃×1小时+600℃×2小时的两阶段加温氮化曲轴。

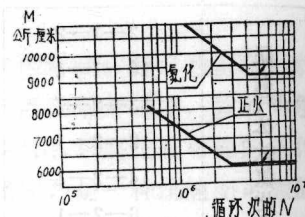


图6 190W型正火曲轴和尿素气体软氮化曲轴的疲劳曲线

表 5

曲 轴 编 号	试验弯矩M 公斤—厘米	对应弯曲应力 σ 公斤/毫米 ²	达到循环次数 N	备 注
1—13—2	8000	8.72	$> 5 \times 10^6$	通 过
1—15—2	8000	8.72	$> 5 \times 10^6$	通 过
1—10—2	8000	8.72	$> 5 \times 10^6$	通 过
1—13—2	8500	9.27	1×10^6	断 裂
1—2—2	8500	9.27	1.42×10^6	断 裂
1—17—2	9500	10.35	1.24×10^6	断 裂
1—10—1	11000	12.00	0.367×10^6	断 裂
2—15—2	12000	13.07	$> 5 \times 10^6$	通 过
2—18—2	12000	13.07	$> 5 \times 10^6$	通 过
2—16—2	12500	13.60	1×10^6	断裂(断口有缺陷)
2—18—1	12500	13.60	$> 5 \times 10^6$	通 过
2—20—2	12500	13.60	$> 5 \times 10^6$	通 过
2—1—2	13000	14.15	1×10^6	断 裂
2—7—2	13500	14.70	0.8×10^6	断 裂
2—16—1	15000	16.32	0.44×10^6	断 裂
2—20—1	12500	13.60	$> 5 \times 10^6$	通 过
3—8—2	13500	14.70	1×10^6	断 裂
3—4—2	13500	14.70	0.785×10^6	断 裂
3—8—2	13000	14.15	1.36×10^6	断 裂
3—8—1	13000	14.15	$> 5 \times 10^6$	通 过
3—4—1	13000	14.15	$> 5 \times 10^6$	通 过
3—9—2	13000	14.15	$> 5 \times 10^6$	通 过
3—9—1	15000	16.32	0.36×10^6	断 裂

三组曲轴的疲劳曲线见图 7。

由图 7 可见,一阶段加热和二阶段加热的通氮滴醇软氮化曲轴较正火曲轴的疲劳强度提高 56% 和 62.5%。

(b) S195 型球铁曲轴的试验结果^[3]见表 6。

两组曲轴的疲劳曲线见图 8。

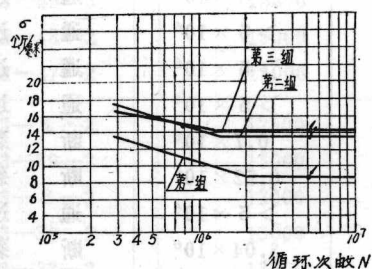


图 7 295 型正火曲轴和通氮滴醇软氮化曲轴的疲劳曲线

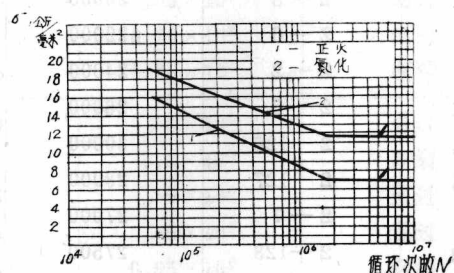


图 8 S195 型正火曲轴和通氮滴醇软氮化曲轴的疲劳曲线

表 6

曲轴类别和编号		试验弯矩M 公斤—厘米	对应弯曲应力 σ 公斤/毫米 ²	达到循环次数 N	备 注
正火曲轴	2—1	16820	10.00	0.675×10^6	断 裂
	2—2	13500	8.02	1.2×10^6	断 裂
	2—3	11800	7.01	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—4	12600	7.49	4.42×10^6	断 裂
	2—6	21900	13.02	0.094×10^6	断 裂
通氮滴醇软氮化曲轴	5—2	20600	12.22	3.2×10^6	断 裂
	5—3	27600	16.41	0.24×10^6	断 裂
	5—4	21200	12.60	0.93×10^6	断 裂
	5—5	21400	12.72	0.93×10^6	断 裂
	5—6	21800	13.02	3.44×10^6	断 裂
	5—7	27600	16.41	0.09×10^6	断 裂
	5—8	27100	16.11	0.167×10^6	断 裂
	5—10	19800	11.83	$> 5 \times 10^6$	通 过
	5—11	19800	11.83	$> 5 \times 10^6$	通 过

表 7

曲轴类别和编号		试验弯矩M 公斤—厘米	对应弯曲应力 σ 公斤/毫米 ²	达到循环次数 N	备 注
铁模复砂铸态曲轴	1—93	11000	6.54	$> 5 \times 10^6$	通 过
	1—97	11000	6.54	$> 5 \times 10^6$	通 过
	1—95	11500	6.83	$> 5 \times 10^6$	通 过
	1—98	11500	6.83	$> 5 \times 10^6$	通 过
	1—96	12000	7.14	4.34×10^6	断 裂
	1—92	13000	7.73	2.48×10^6	断 裂
	1—125	15000	8.92	0.99×10^6	断 裂
	1—126	16000	9.53	0.625×10^6	断 裂
通氮滴醇软氮化曲轴	2—9	15000	8.92	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—4	18000	10.7	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—8	19000	11.3	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—3	20000	11.9	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—6	22000	13.1	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—2	24000	14.25	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—5	26000	15.45	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—126	30000	17.83	0.7×10^6	断 裂
	2—127	28000	16.65	0.52×10^6	断 裂
	2—7	27000	16.05	$> 5 \times 10^6$	断 裂
	2—128	27500	16.35	3.04×10^6	断 裂
	2—129	27000	16.05	$> 5 \times 10^6$	通 过
	2—130	27000	16.05	$> 5 \times 10^6$	通 过

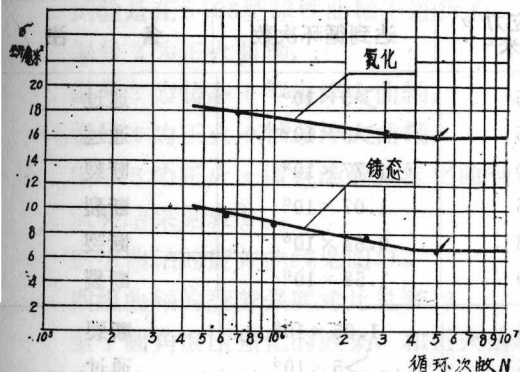


图9 S195型高磷球铁曲轴和气体软氮化曲轴的疲劳曲线

由图8可见,对S195型球铁曲轴来说,通氮滴醇软氮化曲轴的疲劳强度较正火曲轴高68.5%。

上述两项试验结果表明,用通氮滴醇方法强化后,球铁曲轴的疲劳强度可提高56~68.5%。

(3) 高磷球铁曲轴经通氮滴醇软氮化后的疲劳强度

这项试验在S195型球铁曲轴上进行的,这些曲轴系用铁模复砂新工艺铸造,原生铁的含磷量为0.105~0.13%。试验结果见表7。

两组曲轴的疲劳曲线见图9。

由图9可见,对于含磷量大于0.1%的球铁曲轴、经气体软氮化处理后,其疲劳强度也得到显著提高。

(4) 不同软氮化工艺参数对球铁曲轴疲劳强度的影响

试验是在295型球铁曲轴上进行的,采用尿素气体软氮化的方法。试验的分组情况为:

表 8

曲轴编号	试验弯矩 M 公斤-厘米	对应弯曲应力 σ 公斤/毫米 ²	达到循环次数	备 注
1-49-2	11000	12.0	$>5 \times 10^6$	通过
1-34-2	11500	12.55	$>5 \times 10^6$	通过
1-63-2	11500	12.55	$>5 \times 10^6$	通过
1-52-2	11500	12.55	4.9×10^6	断口晶粒粗大
1-60-2	12000	13.07	1×10^6	断裂
1-30-2	13000	14.15	0.62×10^6	断裂
2-50-2	11000	12.0	$>5 \times 10^6$	通过
2-45-2	11500	12.55	$>5 \times 10^6$	通过
2-46-2	12000	13.07	$>5 \times 10^6$	通过
2-8-2	12500	13.60	$>5 \times 10^6$	通过
2-59-2	12500	13.60	$>5 \times 10^6$	通过
2-48-2	13000	14.15	0.75×10^6	断裂
2-47-2	14000	15.25	0.38×10^6	断裂
3-4-2	12500	13.60	$>5 \times 10^6$	通过
3-39-2	13000	14.15	3.5×10^6	断裂
3-3-2	13000	14.15	$>5 \times 10^6$	通过
3-36-2	13000	14.15	$>5 \times 10^6$	通过
3-33-2	13500	14.70	0.95×10^6	断裂
3-24-2	14000	15.25	0.46×10^6	断裂
3-3-1	15500	16.87	0.16×10^6	断裂

(续表 8)

曲轴编号	试验弯矩 M 公斤-厘米	对应弯曲应力 σ 公斤/毫米 ²	达到循环次数	备 注
4-43-2	13000	14.15	$>5 \times 10^6$	通过
4-40-2	13000	14.15	$>5 \times 10^6$	通过
4-6-2	13500	14.70	1.77×10^6	断裂
4-44-2	14000	15.25	1.07×10^6	断裂
4-38-2	15000	16.23	0.64×10^6	断裂
4-55-2	16000	17.40	1.58×10^6	断裂
5-54-2	13000	14.15	1.05×10^6	断裂
5-58-2	13000	14.15	$>5 \times 10^6$	通过
5-35-2	13000	14.15	$>5 \times 10^6$	通过
5-5-2	13500	14.70	0.87×10^6	断裂
5-56-2	14000	15.25	4.5×10^6	断裂
5-58-2	15500	16.87	0.98×10^6	断裂
5-35-1	16000	17.40	0.107×10^6	断裂
5-0-2	13500	14.70	2.24×10^6	断裂

第一组: $570^\circ\text{C} \times 4$ 小时, 油冷。

第二组: $570^\circ\text{C} \times 2$ 小时, 油冷。

第三组: $570^\circ\text{C} \times 2$ 小时, 油冷, 加100克催渗剂。

第四组: $570^\circ\text{C} \times 2$ 小时, 水冷。

第五组: $600^\circ\text{C} \times 2$ 小时, 油冷。

试验结果见表 8。

五组曲轴的疲劳曲线见图10。

由图10可见, 工艺参数在一定范围内变化时, 对球铁曲轴疲劳强度的影响不突出。其中第二组曲轴由于是在试样催渗处理后不久进行的, 尚受到炉内残留催渗气分的影响, 故试验结果不够严格。这一试验带来的启示是: 从软氮化曲轴疲劳强度这个性能来看, 允许软氮化温度范围可以适当放宽, 时间也可酌情调整, 因此, 可以说工艺规范较宽、工艺适用性较好, 这对生产上来说是十分重要的。

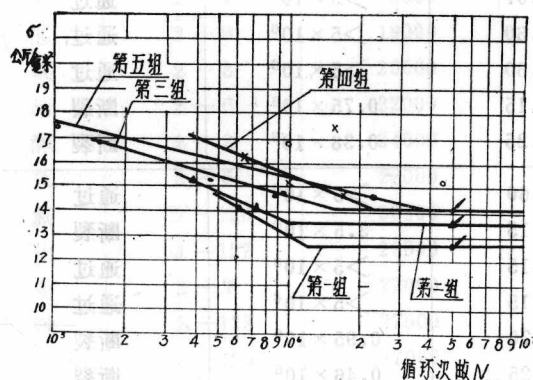


图10 不同软氮化工艺参数下的疲劳曲线

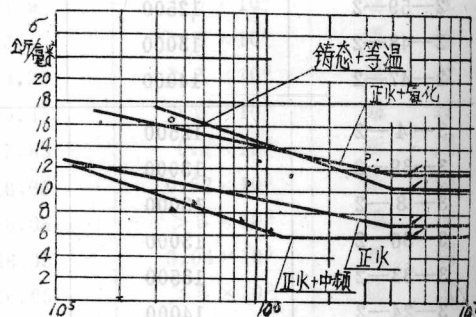


图11 不同强化工艺的疲劳曲线

(5) 不同强化工艺的比较

试验是在S195型球铁曲轴上进行的, 分组情况是:

编号2为正火曲轴;

编号3为铸态+等温淬火曲轴;

编号4为正火+轴颈淬火曲轴;

编号5为正火+通氨滴醇软氮化曲轴。

试验结果见表9。

四组曲轴的疲劳曲线见图11。

四组曲轴的疲劳强度对比见表10。

至于圆角滚压强化的效果, 和正火曲轴相比, 提高幅度达30~60%。圆角滚压强化效果的更大提高受到曲轴变形的限制。

表 9

曲轴编号	试验弯矩 M 公斤-厘米	对应弯曲应力 σ 公斤/毫米 ²	达到循环次数 N	备 注
2-1	16820	10.0	0.68×10^6	断裂
2-2	13500	8.0	1.2×10^6	断裂
2-3	11800	7.0	$>5 \times 10^6$	通过
2-4	12600	7.5	4.4×10^6	断裂
2-6	21900	13.0	0.094×10^6	断裂
3-1	17500	10.4	$>5 \times 10^6$	通过
3-2	22000	13.1	3.0×10^6	断裂
3-3	20200	12.0	3.35×10^6	断裂
3-4	28000	16.6	0.35×10^6	断裂
3-5	17500	10.4	$>5 \times 10^6$	通过
3-6	28000	16.6	0.36×10^6	断裂
3-7	19300	11.5	1.36×10^6	断裂
3-8	18300	10.9	0.84×10^6	断裂
4-1	15500	9.2	0.45×10^6	断裂
4-2	13920	8.3	0.36×10^6	断裂
4-3	21900	13.0	0.086×10^6	断裂
4-7	10100	6.0	$>5 \times 10^6$	通过
4-5	12400	7.4	0.77×10^6	断裂
4-8	11000	6.5	1.1×10^6	断裂
5-2	20600	12.3	3.2×10^6	断裂
5-3	27600	16.4	0.24×10^6	断裂
5-4	21600	12.8	0.93×10^6	断裂
5-5	21400	12.7	0.93×10^6	断裂
5-6	21880	13.0	3.4×10^6	断裂
5-8	27100	16.1	0.17×10^6	断裂
5-10	19800	11.8	$>5 \times 10^6$	通过
5-11	19800	11.8	$>5 \times 10^6$	通过

表 10

编号	工 艺 状 态	通过极限 弯矩M公斤-厘米	疲劳极限 应力 σ 公斤/毫米 ²	疲劳强度 比 %
2	正 火	11800	7.01	100
3	铸态 + 等温淬火	17500	10.41	148.5
4	正火 + 中频淬火	10100	6.0	85.7
5	正火 + 气体软氮化	19800	11.83	168.5

归纳以上五个方面的试验结果, 可以得出

如下一些实验结论:

i. 通过对200多个曲拐进行的本体弯曲疲劳试验证明, 球铁曲轴经气体软氮化强化后, 其弯曲疲劳强度得到大幅度提高, 和正火状态的球铁曲轴相比, 提高幅度达45~70%。其中以尿素为气源的接近下限, 氨气加醇方法靠上限。

ii、与其他强化工艺相比, 气体软氮化球铁曲轴的疲劳强度高于等温淬火球铁曲轴, 也不低于圆角滚压强化的效果, 而现有的中频轴颈淬火工艺, 由于使曲轴圆角处于淬火的热影响区域内, 其疲劳强度反较一般正火曲轴低14%左右。

iii、气体软氮化的主要工艺参数, 从曲轴疲劳强度角度来看, 可以酌情放宽, 以提高该工艺的适应性。

2. 气体软氮化曲轴的耐磨性

由于模拟曲轴和轴承实际工作状态的快速准确的试验装置至今还没有, 而通常的试样耐磨性试验和实际情况差异很大, 因此如何测定气体软氮化球铁曲轴的耐磨性是一个需要考虑的问题。鉴于发动机台架的耐久性试验, 无论从曲轴和轴瓦的匹配状况, 还是从润滑条件和受力状况来看, 都接近实际使用状况。因此获得的试验结果、不仅可以作为定性比较的根据, 而且也可以作为进行定量分析的有价值的依据。但是, 台架耐久性试验(尤其是5000小时以上的耐久试验)要耗费较大的人力、物力, 试验周期也很长。所以, 在一般情况下, 用试样耐磨性试验快速测得一些相对结果, 进行定性的粗略的分析, 作为发动机台架耐久试验方案选择的依据。还是可取的。据此, 我们分别进行了台架耐久性试验和试样耐磨性试验, 以便从气体软氮化球铁曲轴和试样两个方面都获得结果。台架耐久试验除了通常的1500小时试验外, 还进行了5000小时、6000小时、7000小时的耐久性考验, 从中获得比较可靠的资料。试样试验则是用“阿姆斯特勒”耐磨试验机进行的。

(1) 台架1500小时耐久试验

试验是在常州柴油机厂的395型柴油机上进行的, 两台柴油机分别装有正火曲轴和尿素气体软氮化曲轴。395型球铁曲轴的测量位置见图12。

试验结果分别列入表11和表12。

由表11和表12的数据可见, 气体软氮化曲轴主轴颈的最大磨损量为0.008毫米, 一般磨

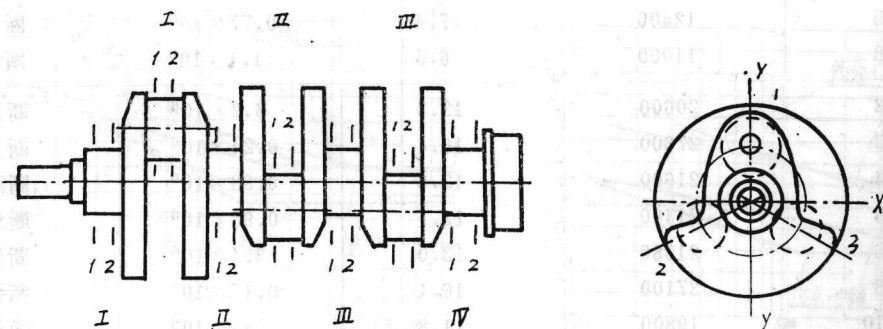


图12 395型球铁曲轴测量位置图

表11 正火曲轴台架1500小时耐久试验测检值

测 量		实 测				磨 损 值
点	方 向	试 验 前	500 小时	1000小时	1500小时	
D _I	1	X—X	-0.005	-0.005	-0.010	0.005
		Y—Y	+0.005	+0.005	-0.005	0
	2	X—X	+0.002	0	0	-0.005
		Y—Y	+0.010	+0.005	+0.005	+0.008
D _{II}	1	X—X	-0.015	-0.015	-0.020	-0.015
		Y—Y	-0.010	-0.015	-0.015	-0.012
	2	X—X	-0.015	-0.010	-0.015	-0.010
		Y—Y	-0.005	0	-0.010	-0.005
D _{III}	1	X—X	-0.005	-0.015	-0.015	-0.010
		Y—Y	-0.008	-0.010	-0.015	-0.005
	2	X—X	0	-0.005	-0.010	-0.005
		Y—Y	0	-0.005	-0.005	+0.005
D _{IV}	1	X—X	-0.010	-0.010	-0.015	-0.010
		Y—Y	-0.015	-0.010	-0.015	-0.005
	2	X—X	-0.005	-0.005	-0.010	-0.005
		Y—Y	-0.013	0	-0.005	+0.003
d _I	1	X—X	-0.008	-0.010	-0.010	-0.005
		Y—Y	-0.005	0	-0.005	0
	2	X—X	-0.015	-0.010	-0.015	+0.005
		Y—Y	-0.010	-0.005	-0.015	+0.005
d _{II}	1	X—X	+0.005	-0.003	-0.005	0
		Y—Y	-0.015	-0.015	-0.025	-0.010
	2	X—X	-0.010	-0.005	-0.010	-0.025
		Y—Y	-0.030	-0.030	-0.035	-0.035
d _{III}	1	X—X	-0.005	0	-0.005	+0.005
		Y—Y	-0.020	-0.028	-0.032	+0.005
	2	X—X	0	0	-0.005	-0.026
		Y—Y	-0.025	-0.025	-0.032	-0.028

测量为0.002~0.005毫米，而连杆轴颈的最大磨损量为0.012毫米，一般磨损量为0.003~0.005毫米；正火曲轴主轴颈最大磨损量为0.007毫米，一般磨损为0.002—0.005毫米，连杆轴颈最大磨损量为0.026毫米，一般磨损为0.003~0.015毫米。因此，从1500小时耐久试验来看，气体软氮化曲轴要优于正火曲轴。

(2) 台架6000小时、7000小时以上的长时间考验

试验是在永康拖拉机厂的S195型柴油机上进行的，二台柴油机分别装有高频淬火曲轴

表12 气体软氮化球铁曲轴台架1500小时耐久试验检测值

测 量		实 测				磨 损 值
点	方 向	试 验 前	500 小时	1000小时	1500小时	
D _I	1	X—X	74.985	74.980	74.980	0.005
		Y—Y	74.985	74.970	74.977	0.005
	2	X—X	74.980	74.978	74.980	0.002
		Y—Y	74.980	74.977	74.972	0.005
D _{II}	1	X—X	74.980	74.978	74.980	0
		Y—Y	74.980	74.975	74.978	0
	2	X—X	74.977	74.980	74.972	0.002
		Y—Y	74.977	74.975	74.975	0.002
D _{III}	1	X—X	74.975	74.975	74.972	0.003
		Y—Y	74.975	74.975	74.970	0.005
	2	X—X	74.975	74.975	74.972	0
		Y—Y	74.975	74.975	74.970	0
D _{IV}	1	X—X	74.978	74.977	74.975	0.008
		Y—Y	74.978	74.975	74.975	0.008
	2	X—X	74.978	74.974	74.975	0.008
		Y—Y	74.978	74.974	74.972	0.008
d _I	1	X—X	64.998	64.990	64.990	0.003
		Y—Y	64.990	64.985	64.980	0.008
	2	X—X	64.998	64.995	64.995	0.003
		Y—Y	64.990	64.985	64.980	0.012
d _{II}	1	X—X	64.990	64.985	64.985	0.005
		Y—Y	64.985	64.985	64.980	0
	2	X—X	64.990	64.985	64.985	0.005
		Y—Y	64.985	64.985	64.980	0
d _{III}	1	X—X	64.990	64.985	64.985	0.005
		Y—Y	64.990	64.985	64.985	0.005
	2	X—X	64.990	64.985	64.985	0.005
		Y—Y	64.990	64.985	64.980	0.005

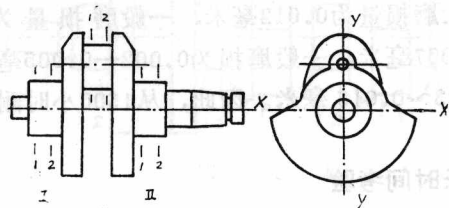


图13 S195球铁曲轴测量位置图

和气体软氮化曲轴。S195型球铁曲轴的测量位置见图13。

试验结果分别列入表13和表14。

综合表13和表14，将主要结果列入表15。

上述结果表明，气体软氮化曲轴具有和高频淬火曲轴大体相仿的良好耐磨性。另外，试验结果还表明，在表面化合物层被磨损后（相当于磨损量超过0.03毫米），里面的扩散层仍有相当好的耐磨性。例如，从5000小时到7000小时期间，主轴颈的最大磨损值增加0.023毫米，连杆轴颈的最大磨损值增加0.025毫米。这一情况对我们深入了解气体软氮化球铁曲轴的耐磨性是很有帮助的。

（3）试样的耐磨性试验

结果列入表16和表17。

表13 气体软氮化球铁曲轴台架7000小时耐久试验测量表

测 量	点	D _I				D _{II}	
		1		2		1	
	方 向	X—X	Y—Y	X—X	Y—Y	X—X	Y—Y
实 测	50 小时	-0.012	-0.012	-0.014	-0.012	-0.009	-0.008
	500 小时	-0.019	-0.018	-0.019	-0.018	-0.016	-0.017
	1000 小时	-0.020	-0.020	-0.020	-0.020	-0.016	-0.020
	1500 小时	-0.020	-0.020	-0.020	-0.020	-0.017	-0.020
	2500 小时	-0.021	-0.024	-0.019	-0.023	-0.017	-0.020
	3500 小时	-0.022	-0.025	-0.020	-0.025	-0.020	-0.024
	4500 小时	-0.030	-0.028	-0.025	-0.028	-0.032	-0.036
	5000 小时	-0.030	-0.031	-0.025	-0.030	-0.032	-0.038
	6000 小时	-0.030	-0.035	-0.028	-0.035	-0.035	-0.042
	7000 小时	-0.035	-0.039	-0.031	-0.040	-0.048	-0.056
至7000小时的 磨 损 值		-0.023	-0.027	-0.017	-0.028	-0.039	-0.048