

学汇百川 德济四海

活塞环-气缸套摩擦磨损试验技术

Friction and Wear Testing Technology of Piston Ring – Cylinder Liner

大连海事大学 船机修造工程实验室

徐久军

2020.11.1 济南



目 录

1. 摩擦磨损问题的认识
2. 摩擦磨损试验的分类
3. 摩擦磨损试验的模拟问题
4. 摩擦磨损试验方法
5. 单缸机台架验证

活
塞
环
、
气
缸
套
摩
擦
副

1. 摩擦与磨损问题的性质

摩擦——决定了效率——油耗

全世界2/3能源消耗在克服摩擦

低摩擦技术——重要

磨损——决定了寿命（耐用性）和可靠性（异常磨损）

三种典型失效形式：疲劳、腐蚀、**磨损**

很重要！

柴油机机械损失：
10%左右
其中>50%：
活塞环-气缸套摩
擦副

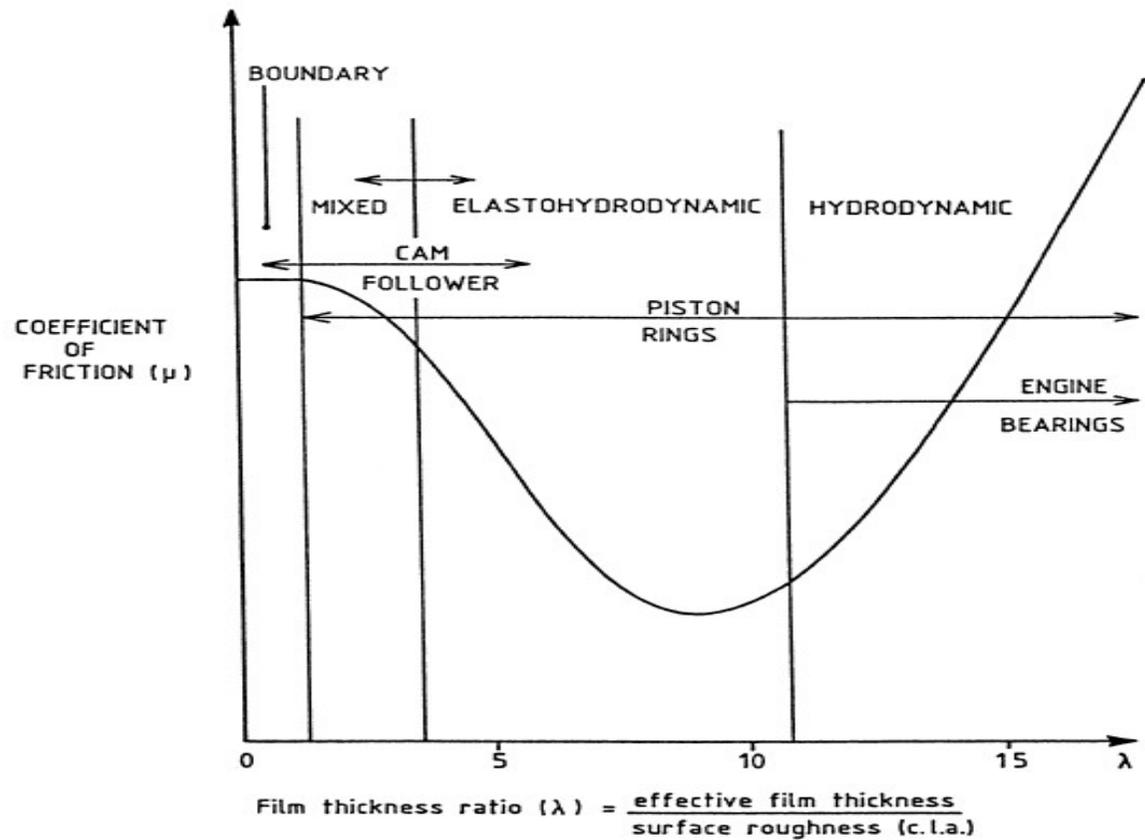
摩擦与磨损与润滑:

流体摩擦

混合摩擦

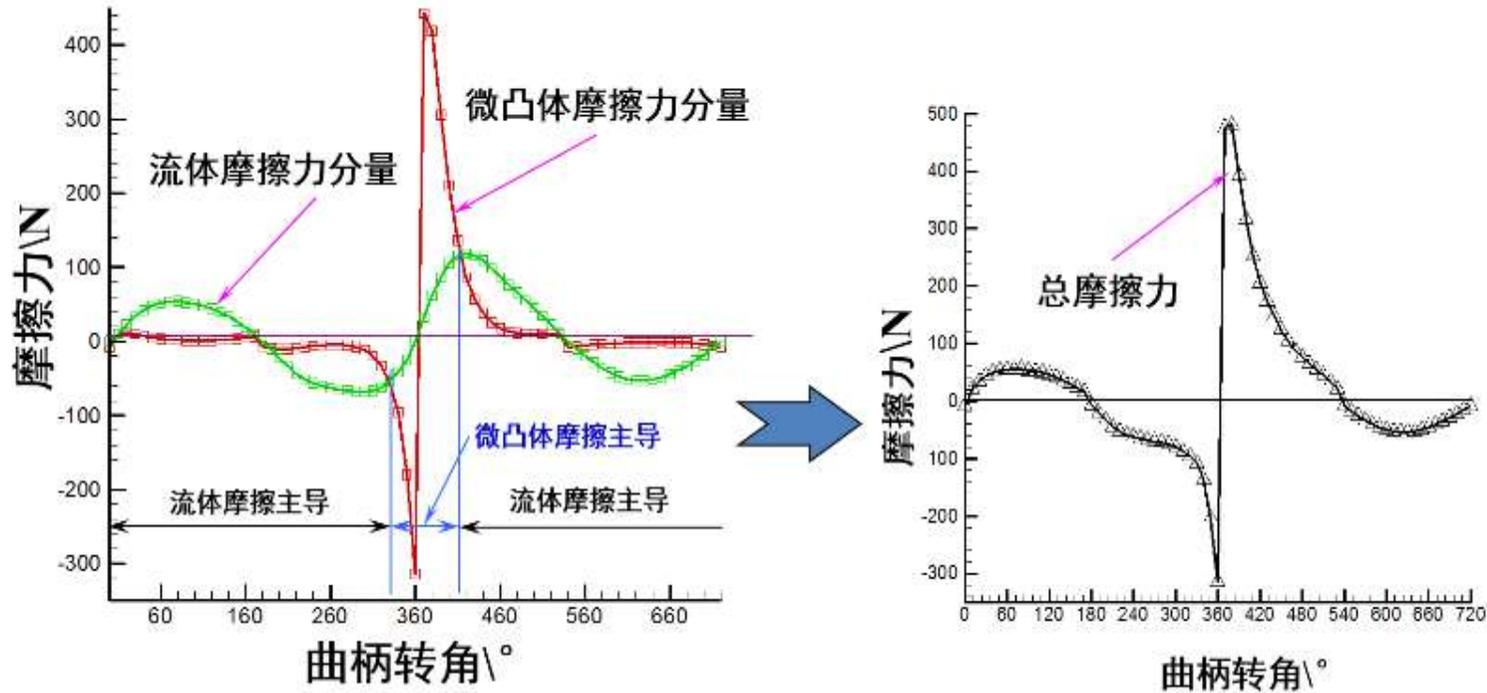
边界摩擦

磨损



发动机典型摩擦副所处润滑状态

活塞环-缸套的摩擦力分布



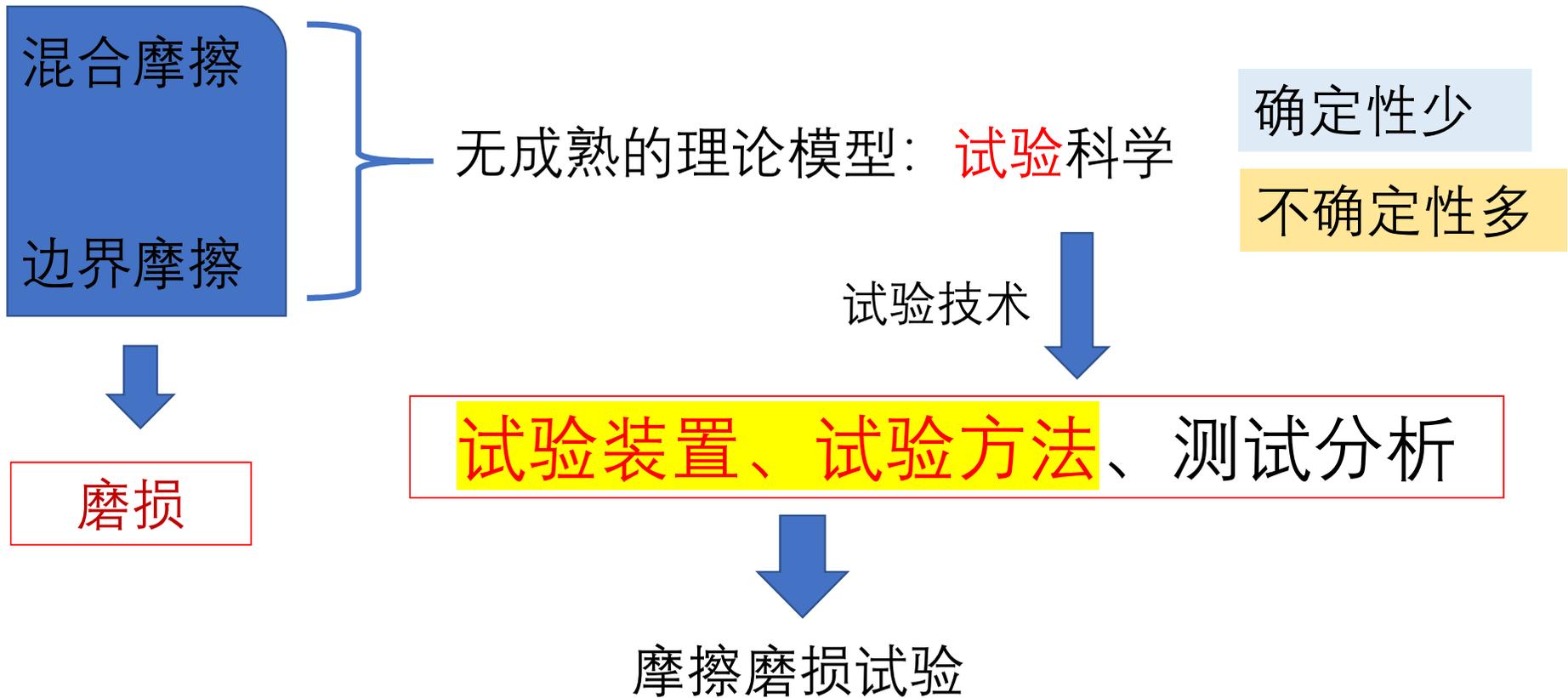
规律:做功行程上止点附近区域以**微凸体摩擦为主导**，其它区域以**流体摩擦为主导**。

控制: **上止点附近**控制**微凸体**摩擦磨损，微结构、材料、润滑油添加剂及润滑特性

其它区域控制**流体摩擦**: 润滑油特性、配副几何尺寸、微结构

研究摩擦与磨损的手段?

流体摩擦 → 基于雷诺方程的流体润滑数值模拟与试验验证



2. 摩擦磨损试验的分类

系统的级别高，模拟性好，

试验过程复杂，结果离散度大

试验分类		试验件形式	试验平台	试验目的	优点	缺点	备注
实验室试验	一般性试验	试样形状尺寸匹配试验机	通用摩擦磨损试验机	材料摩擦磨损机理一般规律	试验条件易控制、结果重复性好、试验周期短、成本低	试验条件单一，模拟性差	材料及表面改性技术常用
	模拟性试验	含活塞环和/或气缸套工作表面取样	试验机匹配试验目的需要的试样形状尺寸，并模拟典型工况	零部件摩擦学性能快速评价	同上。保留零件的表面特征、接触特征，模拟实际工况	实际工况的确切模拟比较困难	常用但规范性不够
	零部件试验	活塞环气缸套零件	用真实零件、模拟典型工况的试验机	零部件摩擦学性能快速评价	同上。采用真实的零部件，可获得更多信息	同上，试验平台更复杂	使用较少
	单缸柴油机专项性能台架试验	活塞环气缸套零件	改制的单缸柴油机	发火或者倒拖状态下的摩擦磨损性能	接近真实工况，且台架工况条件可控	试验设备的技术性强，维护成本高	浮动缸套、透明缸套等单缸发动机用于专项测试
	单缸柴油机台架试验	活塞环气缸套零件	单缸柴油机台架	可靠性耐久性考核	接近真实工况，且台架工况条件可控	零件的影响因素复杂，试验周期长成本高	柴油机设计用
	多缸柴油机台架试验	活塞环气缸套零件	多缸柴油机台架	可靠性耐久性验证	接近真实工况，且台架工况条件可控	零件的影响因素复杂，试验周期长成本高	柴油机设计制造用
使用试验	活塞环气缸套零件	装备柴油机产品的车船	在使用条件下综合性能考核	完全真实工况	影响因素十分复杂，周期更长，成本更高	柴油机设计定型用	

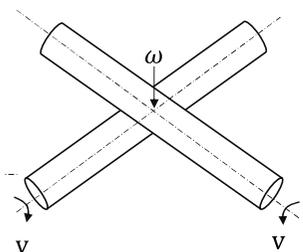
系统级别低，模拟性差，

试验过程简单，

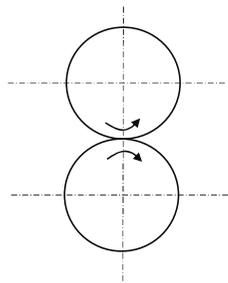
结果稳定性好

构成摩擦磨损试验的试验链

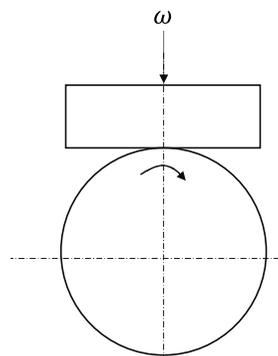
(1) 试样一般性试验



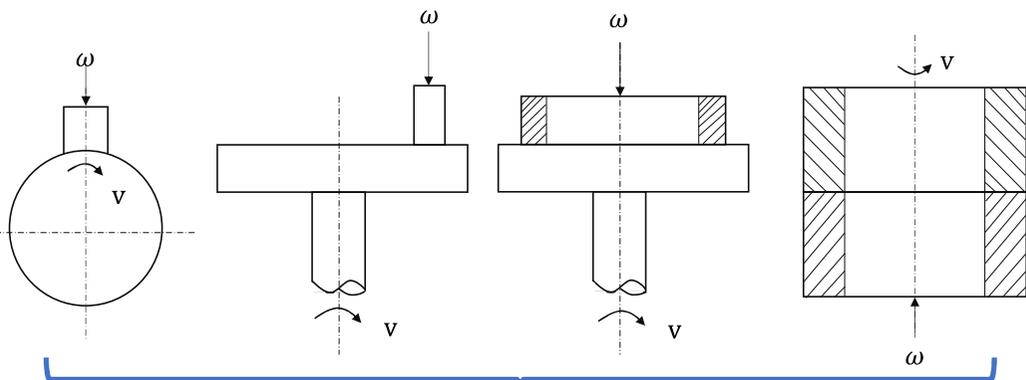
点接触、滑动



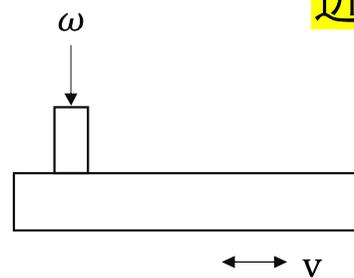
线接触、滑动和滚动



线接触、滑动



面接触、滑动



面接触、往复运动

活塞环和气缸套开发初期，筛选出相对性能更好的候选材料和表面处理工艺。

有的厂家进行了各种各样的改进。

评价的摩擦副的信息不足，不能完全反应实际应用时的性能。

(2) 单缸/多缸柴油机台架试验



单缸柴油机台架

能够开展多种工况条件下柴油机供油系统、燃烧系统的性能分析与匹配设计验证试验，对**活塞环-气缸套的配副特性和可靠性**进行接近真实工况的试验考核。



多缸柴油机台架

常规性能试验、耐久性考核试验及特种性能试验，可以对**活塞环-气缸套摩擦副**进行真实工况条件下的实机考核与验证。

(3) 使用试验



在现场条件下进行

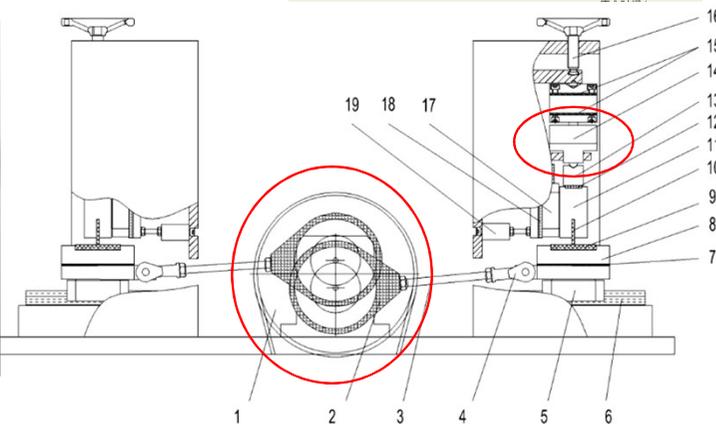
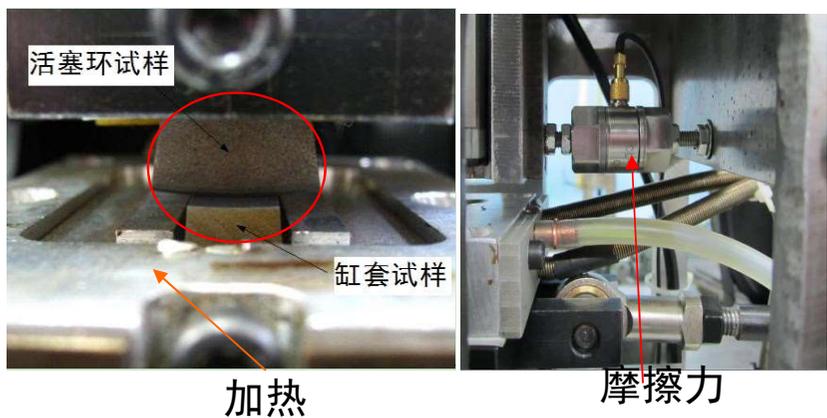
一是对**实机进行监测**，了解其运行可靠性和确定必须的检修方案；

二是对新开发的机器设备或某一部分零件的**耐磨性进行实机考核**，为后续进一步优化做准备。

介于一般性试样试验——单缸机台架试验之间的模拟性试验？

- 有利于低成本、高效率地开展磨损规律研究，单缸机考核的目的减小到性能验证，减少单缸机的工作量。
- 试验结果与单缸机试验之间，有良好的一致性

(1) 试样模拟性试验



合理确定模拟
准则的试样模拟
性试验可以作为
活塞环或者气缸
套批量投产、配
机选型或者多批
次产品性能稳定
性的快速评价手
段，甚至试验所
得的数据可以直接
用于工程设计

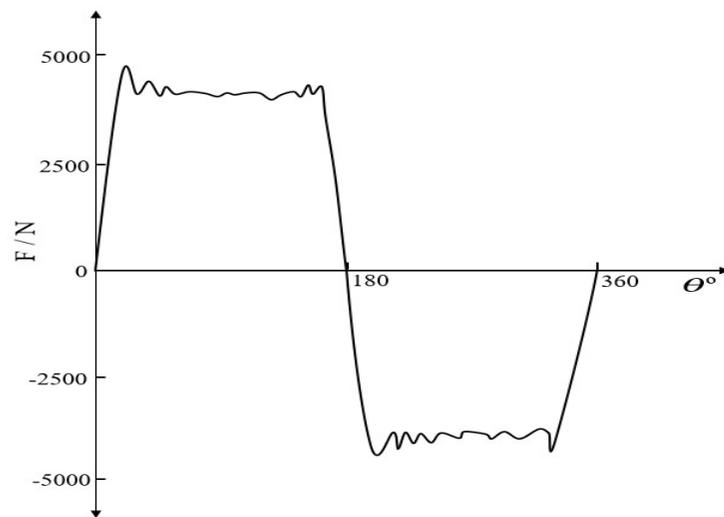
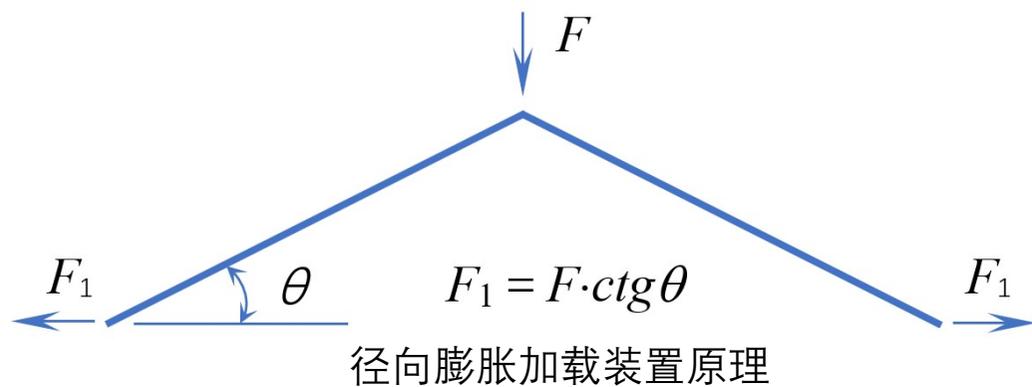
(2) 零部件级摩擦磨损试验



活塞环-气缸套零件级别试验机主要为**径向膨胀加载摩擦磨损试验机**。

试验机采用实际使用的**活塞环和气缸套**为试验件，**摩擦副接触状态、往复运动形式、接触面载荷、温度、润滑**等条件与柴油机基本一致。

摩擦力变化规律反映了气缸套-活塞环在相对运动过程中的**实时变化**



(3) 专项性能台架试验——透明气缸套倒拖柴油机台架



主要结构为单缸柴油机，**气缸套改为石英玻璃**，移除缸盖，加长连杆，采用电动机倒拖，**驱动活塞组件在透明气缸套内往复运动**，**安装平台可90°旋转**。采用**荧光诱导法测量活塞环与气缸套之间的润滑油膜厚度**。

不同转速下第I~V道活塞环的油膜厚度

油膜厚度/ μm	200 r/min	400 r/min	600 r/min	800 r/min
第I道环	12.75	17	21.25	17
第II道环	12.75	17	21.25	25.5
第III道环	17	21.25	34	42.5
第IV道环	12.75	17	29.75	34
第V道环	12.75	17	21.25	29.75

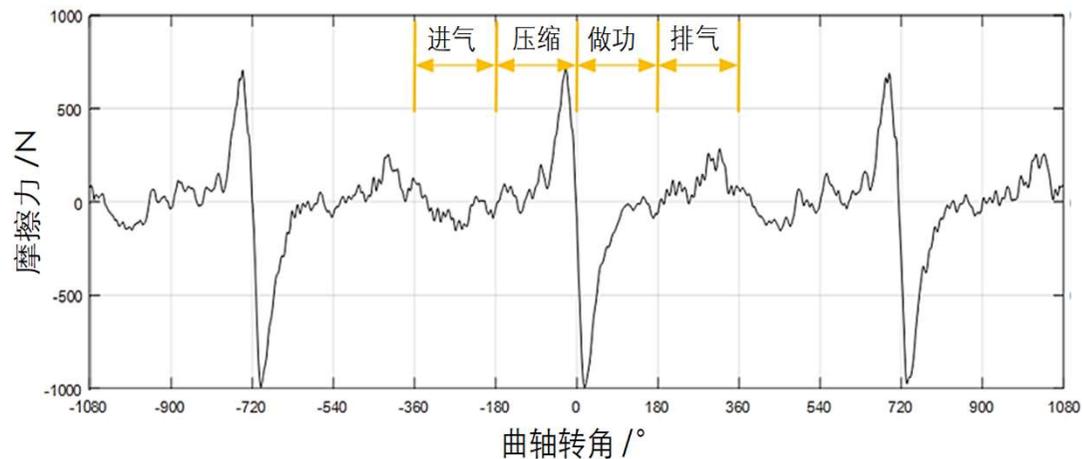
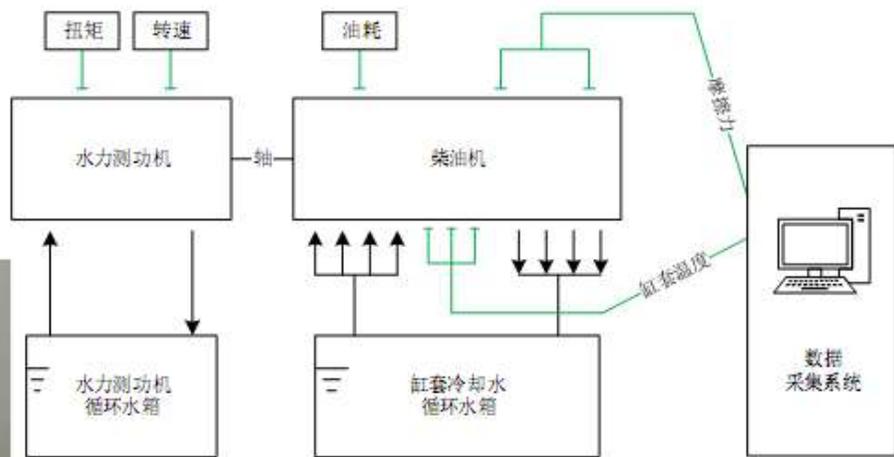


(4) 专项性能台架试验——浮动气缸套单缸柴油机台架

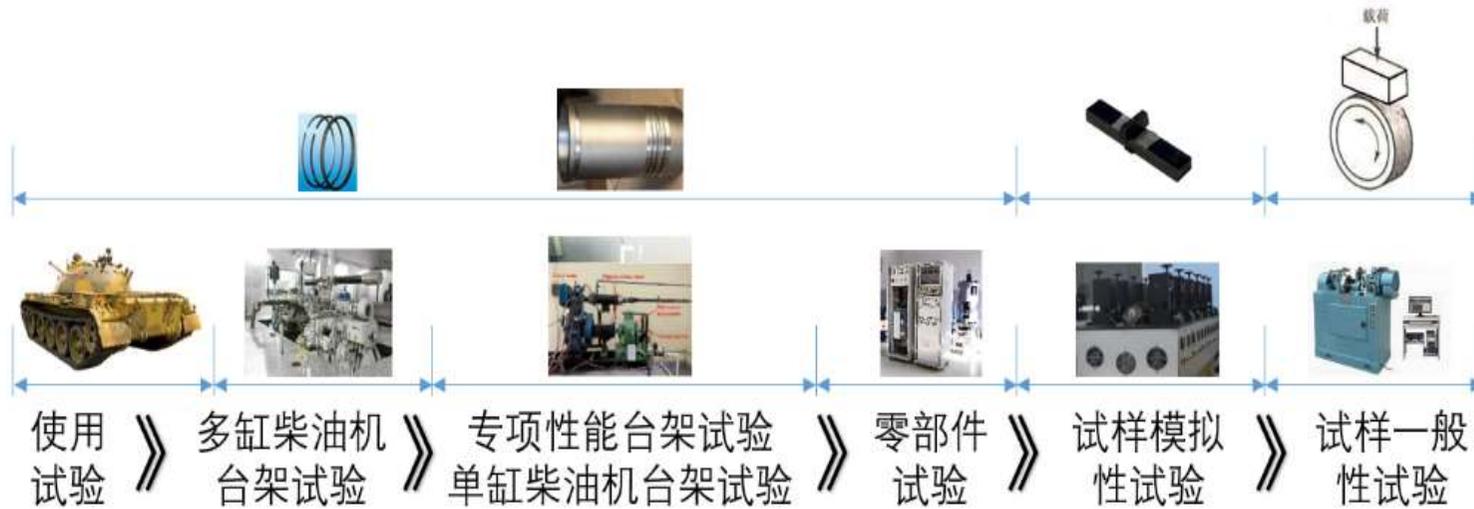


用于研究**活塞组件结构、气缸套表面结构和润滑油性能**对摩擦功的影响规律。

该台架解决了三个关键技术，一是**气缸套与气缸盖之间的浮动密封**，二是**摩擦力的测量**，三是**活塞侧推力的平衡**。



浮动气缸套柴油机台架测得的典型摩擦力曲线



上述几种类型试验各有特点，在**新产品**的摩擦磨损性能研究中，通常**先在实验室进行充分的试样试验或零部件试验**，然后**单缸机和多缸机考核验证**，最后进行**使用试验**，必要时利用改制的单缸柴油机台架进行**专项性能验证**，从而构成一个“**试验链**”，这样可抓住主要问题，优化试验环节，减少试验时间、降低试验成本。

3. 摩擦磨损试验的模拟问题

(1) 谁——谁的模拟？

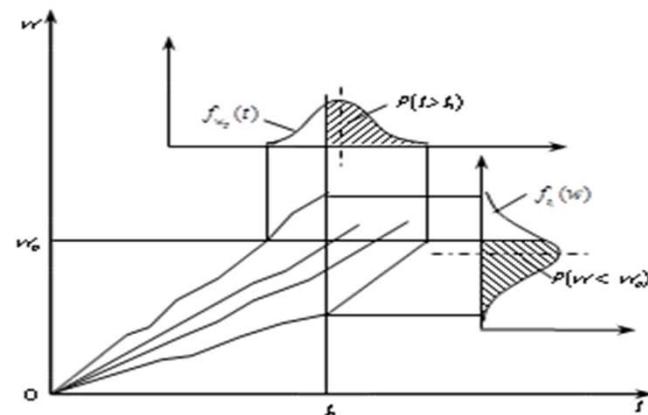
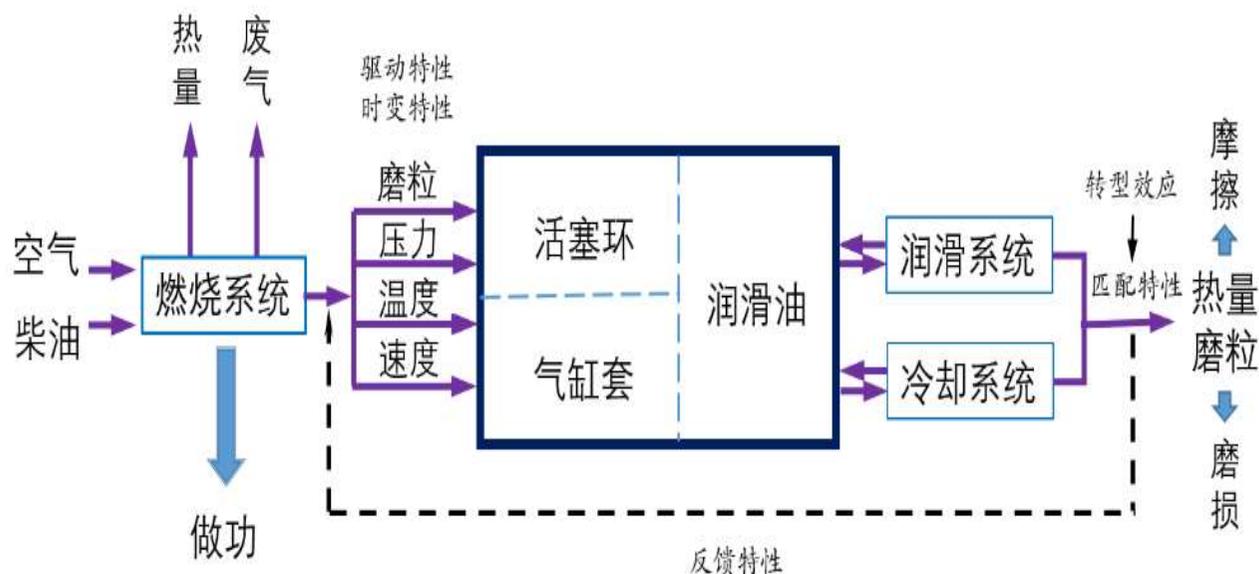


活塞环-气缸套摩擦磨损试验的相似性

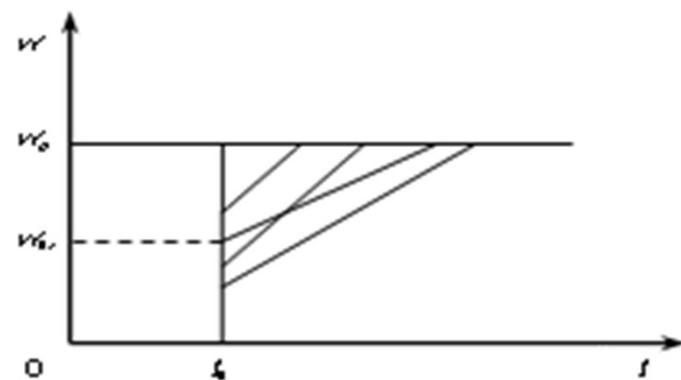
(2) 摩擦磨损问题的复杂性

- 磨损过程是一个**随机过程**

磨损受到**许多因素**的影响，这些因素不仅**同时**起作用，而且**彼此之间互相影响**，这些因素**多半是随机的**。



Wear random process



Discrete cases of stable wear

(3) 活塞环-气缸套：磨损问题复杂性的原因？

(1) 匹配特性

磨损特性不仅仅是缸套或活塞环材料本身的特性，三元素的匹配。

(2) 驱动特性

工况条件参数组合对缸套活塞环的磨损会有不同的影响。

(3) 反馈特性

磨损产物、磨损后表面状态、摩擦热等因素的变化反馈到缸套和活塞环的磨损状态，从而改变磨损原来的磨损规律。

(4) 时变特性

摩擦过程系统结构元素性能在不断改变，导致结构元素相互作用特性不断变化，继而导致系统输出量不断变化，反馈至工况条件的参数，随之变化

(5) 转型特性

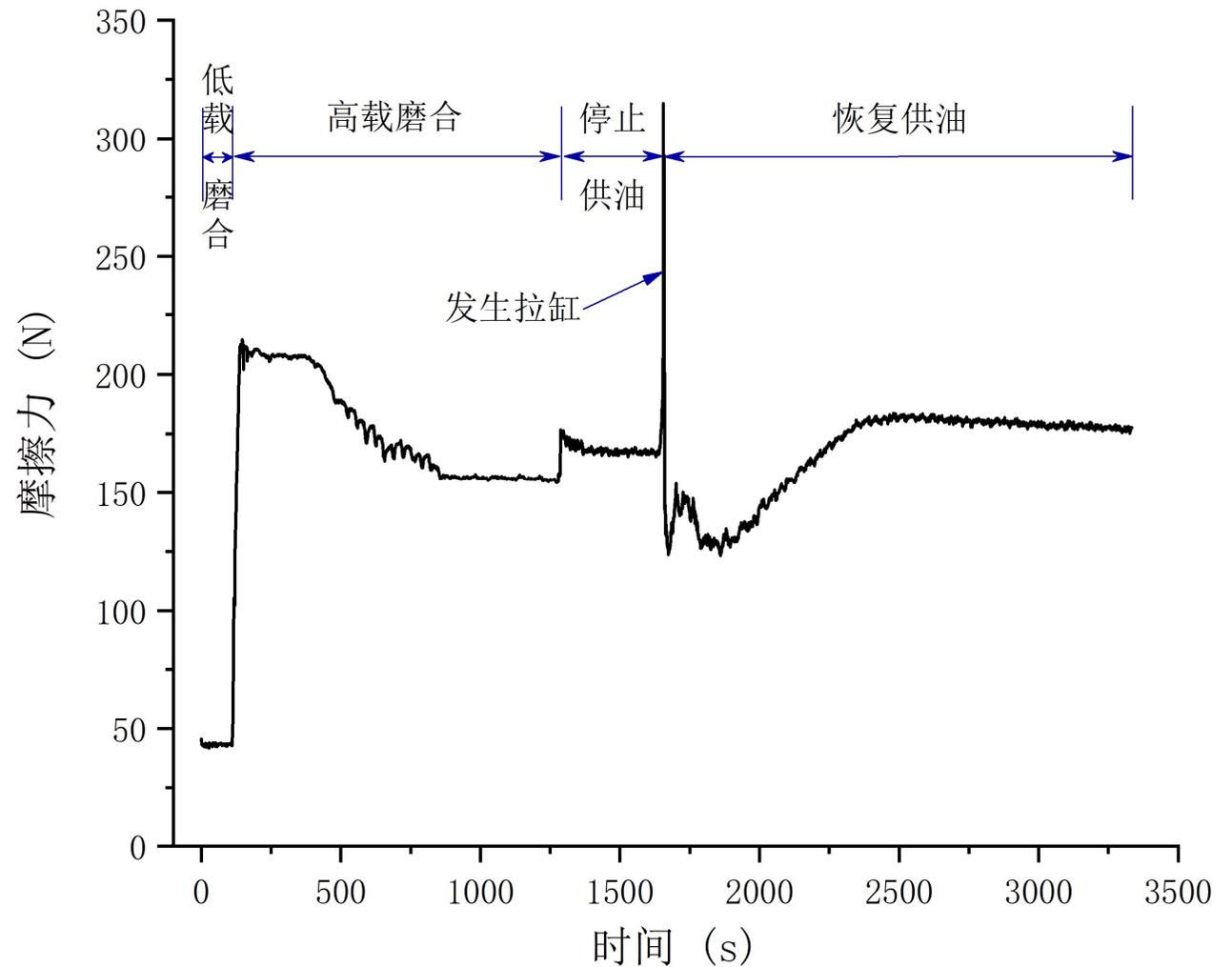
主导磨损形式，即从一种转变为另一种，产生磨损转型效应。

转型：载荷、速度、结构元素变化（润滑、磨粒的加入等）引起。

拉缸是一种典型的磨损转型效应。

当停止供油，残余油膜消耗到一定程度，摩擦力急剧升高，此时摩擦副局部发生黏着，并且黏着区域快速扩大。

恢复供油后，摩擦副表面可重新建立新的平衡状态，从黏着磨损转型到疲劳磨损。



磨损转型效应

(4) 摩擦磨损试验
——应模拟那些参数？

3类

11个

摩擦系统的参数		
系统结构	试验件的材料性质	
	试验件的表面状态	
	接触状态	
	润滑油性质	
运动形式	往复滑动	
工况条件	载荷	
	速度	线速度
		频率
	表面温度	
	润滑状态	
	环境介质	
	试验时间	

(5) 摩擦磨损试验——参数应如何模拟？——模拟准则

第一条：系统关联准则

模拟系统应当在**运动形式、系统结构和工况条件等**方面与实际系统相互关联。

摩擦系统的参数		模拟系统的参数必须与实际系统相同	模拟系统的参数可与实际系统相似	备注	
系统结构	试验件的材料性质	✓			
	试验件的表面状态	✓			
	接触状态	✓			
	润滑油性质	✓		视为一个元素	
运动形式	往复滑动	✓			
工况条件	载荷			✓	可在磨损机理相同的极限载荷范围内强化
	速度	线速度	✓		应在磨损机理相同的速度范围内相近
		频率		✓	应在磨损机理相同的速度范围内加快
	表面温度		✓		
	润滑状态		✓		与磨损机理相关
	环境介质		✓		实验室可忽略
	试验时间			✓	在磨损量可准确测量的前提下应缩短

第二条：极限强化准则

强化活塞环与气缸套之间的磨损行为，可以充分反映摩擦磨损特性，但强化条件需要控制一定限度，防止因磨损机理转型。这样最大限度强化磨损条件缩短试验时间。

第三条：机理相同准则

应选择适当的磨损试验条件，使某一种磨损机理起支配性作用，并且要与实际零件的磨损机理应是相同的，保证试验结果有效性。

4. 摩擦磨损试验方法

如何使用三条件模拟准则？

试样模拟性试验装置+模拟准则



对置往复摩擦磨损试验机



- 1) 系统结构关联
- 2) 运动形式关联
- 3) 工况条件关联+极限强化+机理相同
- 4) 磨损机理转型效应的利用

(1)系统结构关联

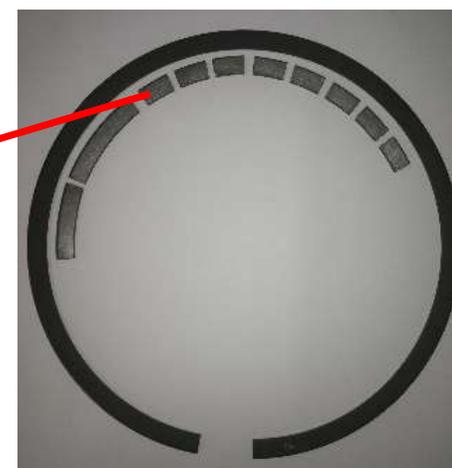
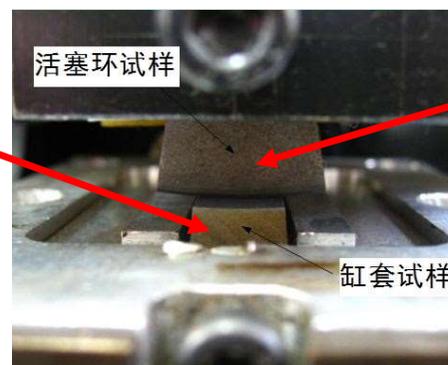
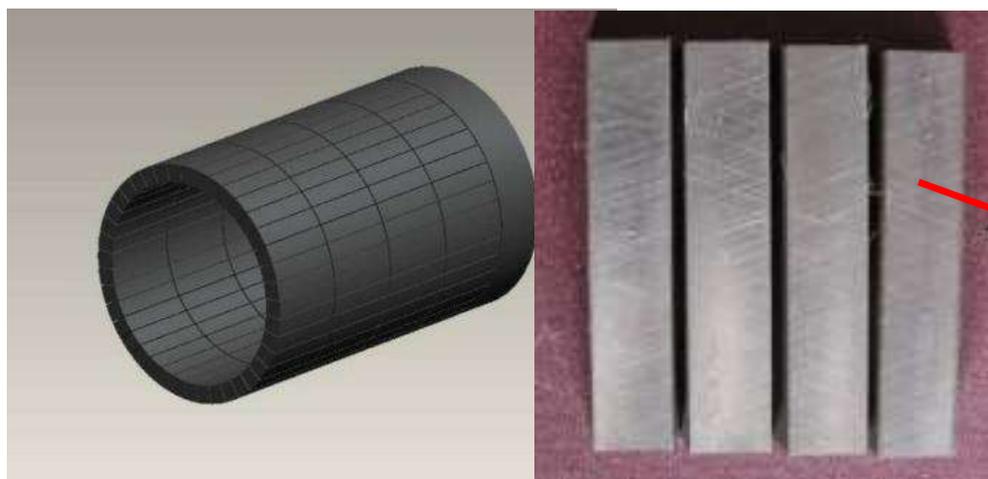
活塞环和气缸套零件的典型部位取样：材料、表面状态、接触状态、润滑油相同

气缸套取样方式

试样宽度一般为活塞环高度的**3倍以内**，大缸径活塞环可减小到**1倍**，对应气缸套的圆周方向。
最小**试样长度**应满足往复行程为**活塞环高度的3倍**，一般应为**5倍左右**，对应气缸套的轴向。

活塞环取样方式

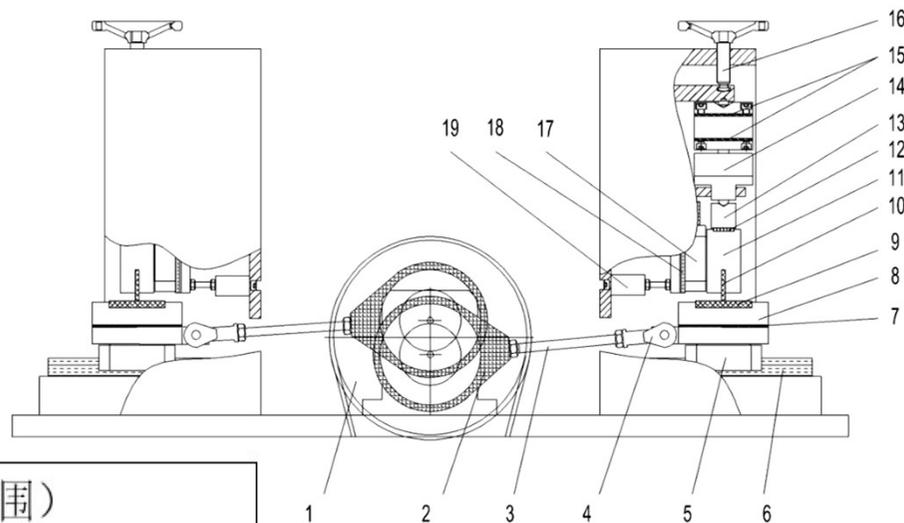
试样**圆周方向**的长度应不低于缸套**试样宽度的2倍**，以便于调整试样
试样的**接触长度较小**，活塞环不同位置的**曲率半径差异可以忽略**。



(2)运动形式关联

往复运动

对置往复摩擦磨损试验机



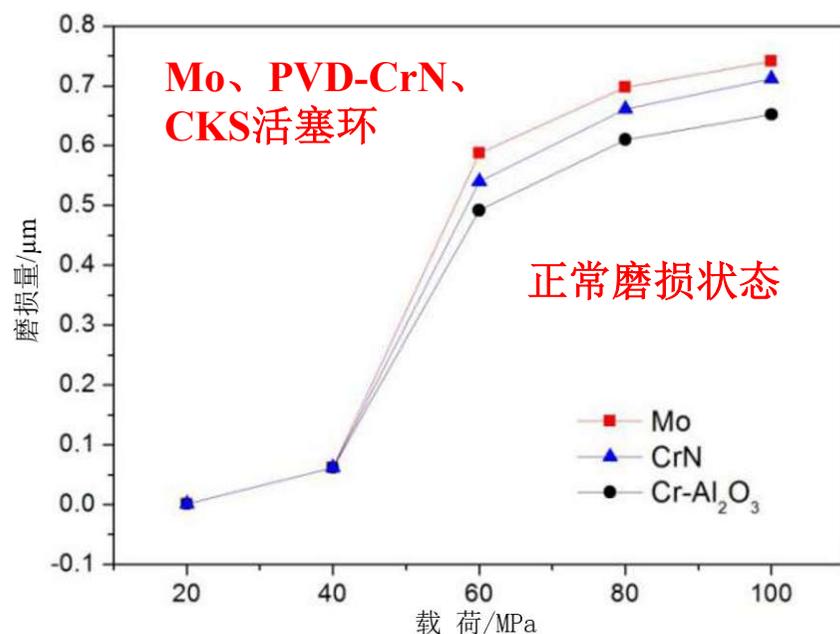
性能参数	单位	典型值（范围）
往复行程	mm	30
转速	r/min	10~3000
线速度	m/s	4.72（典型行程，max）
温度	°C	室温~250
润滑油供给速率	滴/min（32滴≈1 mL）	0.5~100
法向压力	N	2000
摩擦力	N	500
摩擦力测量精度	—	<1%FS

(3)工况条件关联+极限强化+机理相同

载荷

一般指最大燃烧压力，为节省时间和成本，需要加速磨损试验。

强化载荷，是加速磨损的主要手段，载荷过小不利于加速磨损，载荷过大可能改变磨损机制。

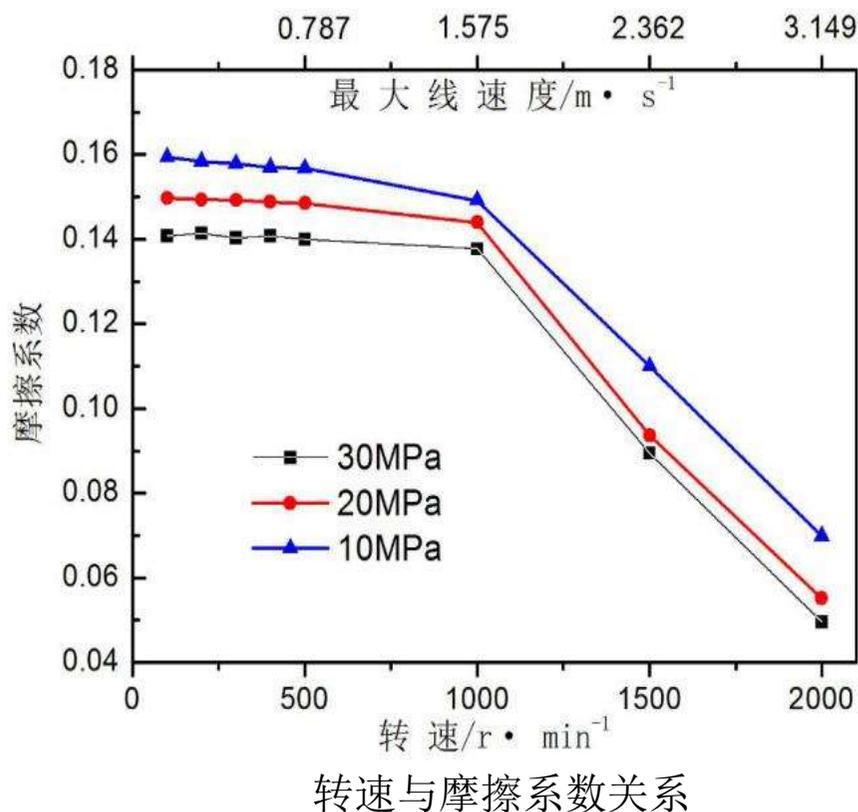


低载荷时气缸套磨损量很小，难以区分耐磨性差异。载荷超过40 MPa时，三种活塞环配对气缸套磨损量均迅速增大，且磨损量差别开始显现。载荷超过60 MPa时，磨损量增幅放缓。

加速磨损试验载荷可取60~100 MPa

速度

速度与行程和往复频率（转速）相关，最终影响线速度，线速度影响润滑状态。

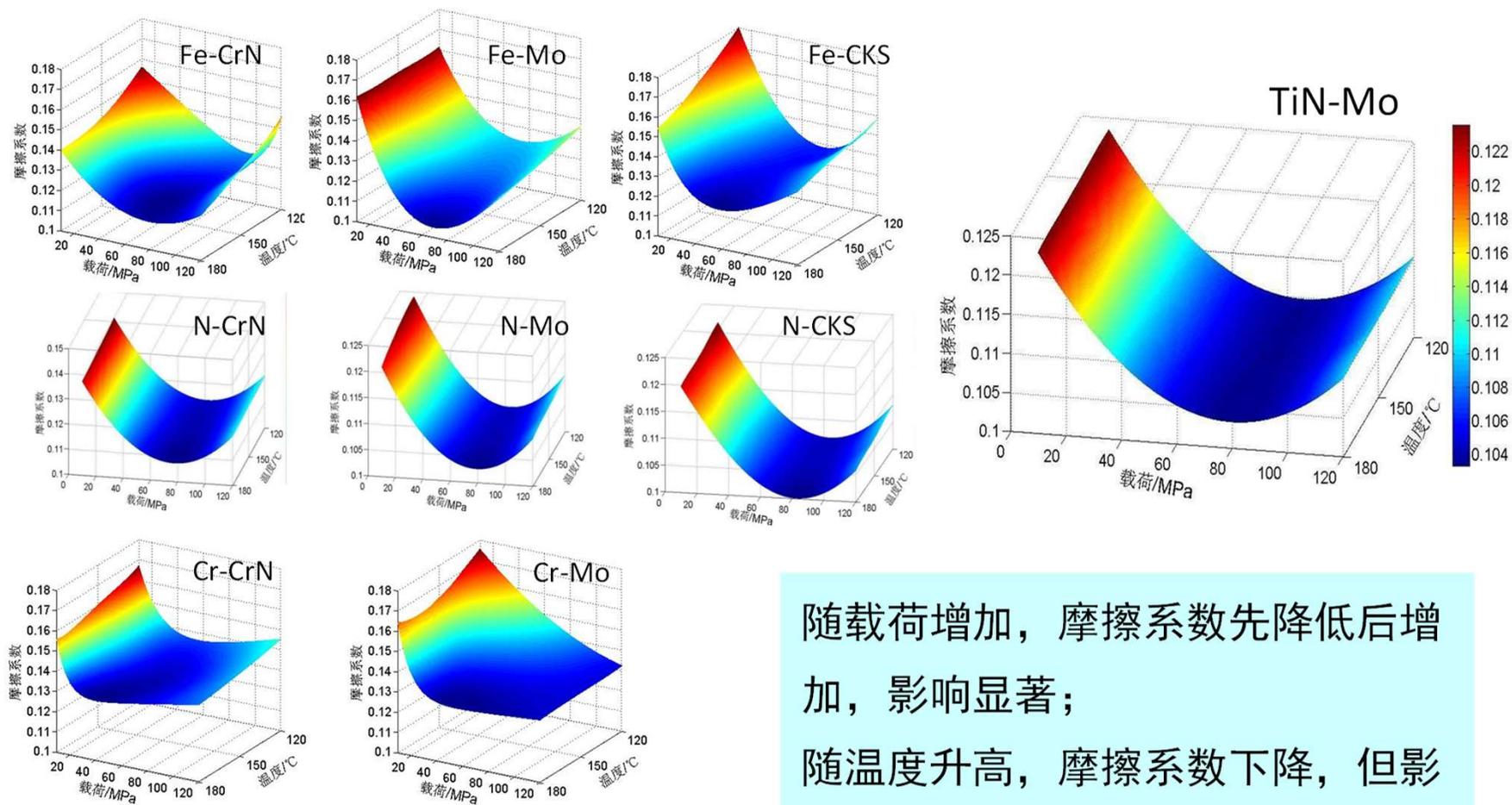


当转速在**100~1000 r/min**，摩擦系数随转速变化不大，总体处于**0.14~0.16**之间，一般认为处于**边界润滑状态**；

当转速超过**1000 r/min**（最大线速度1.575 m/s）时，摩擦系数随转速的升高迅速下降，润滑状态逐渐向**流体动压润滑**转化。

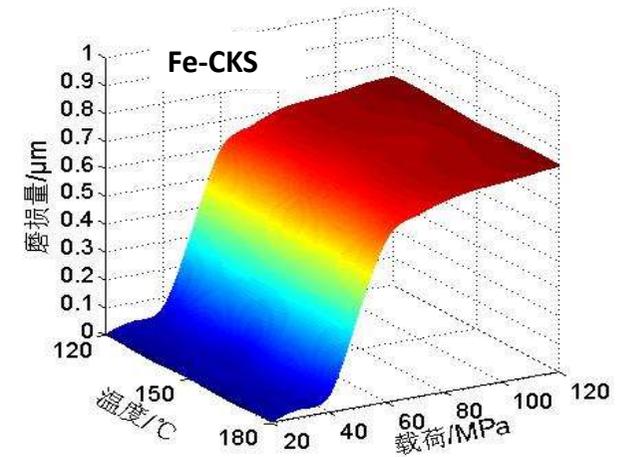
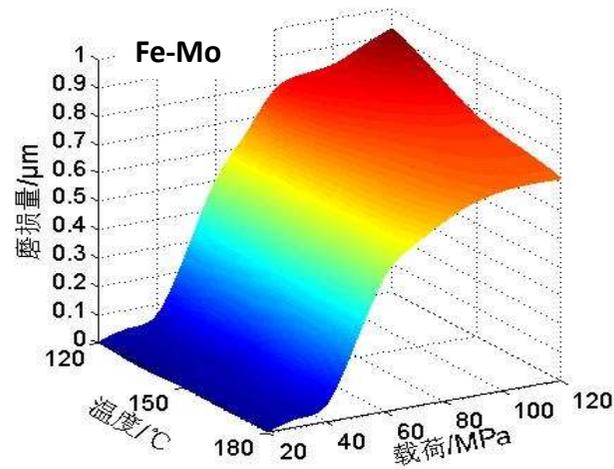
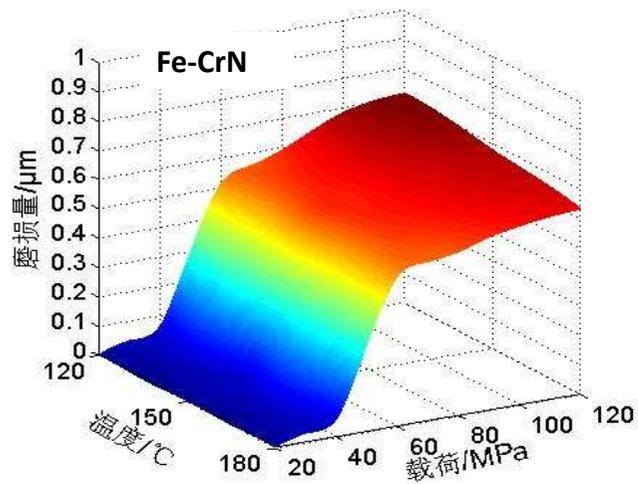
转速范围选择**100~500 r/min**，可模拟活塞环与气缸套边界摩擦状态，且实现快速磨损。

温度、载荷对摩擦系数的影响



随载荷增加，摩擦系数先降低后增加，影响显著；
随温度升高，摩擦系数下降，但影响较小。

温度、载荷对磨损量的影响



铸铁缸套在40MPa后磨损率增加，80MPa后趋于稳定。
温度升高，磨损量略有下降。

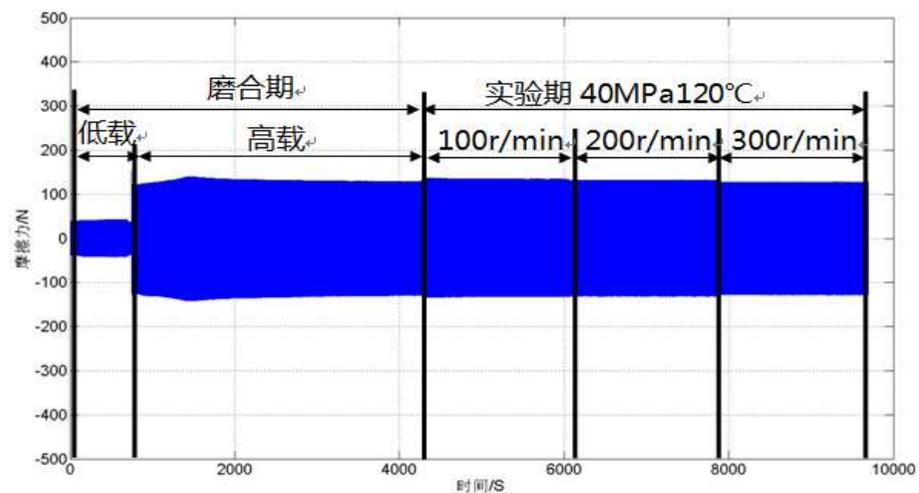
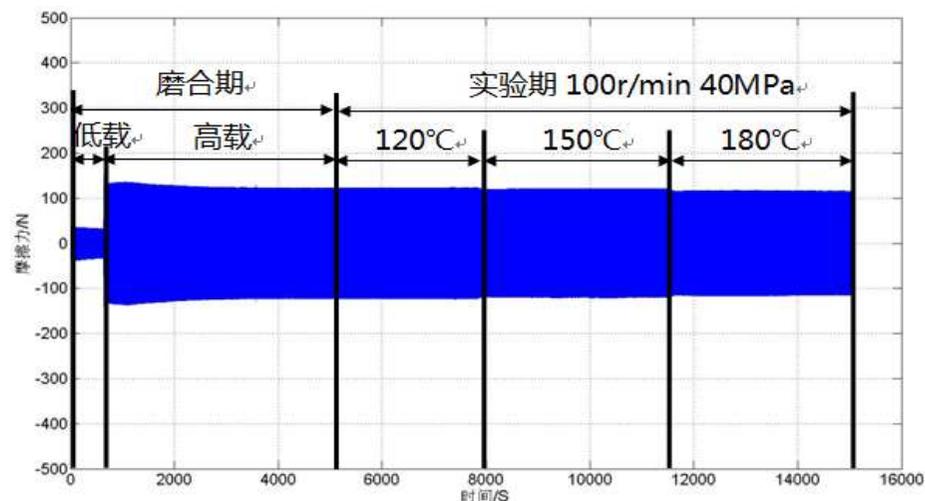
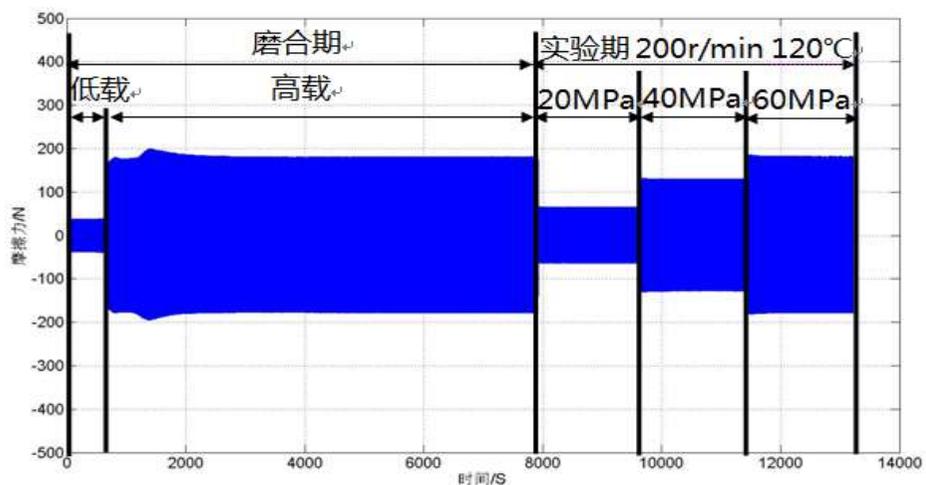
4) 磨损机理转型效应的利用——拉缸现象模拟

拉缸是活塞环与气缸套之间的一种严重磨损形式，一般以黏着磨损机制为主，一旦发生，摩擦副快速失效，影响整机可靠性。

在正常润滑条件下，拉缸一般不会发生，只有在供油不足，或者温度、载荷等工况条件组合破坏了润滑油膜，使上止点附近的润滑状态由混合润滑向边界润滑、干摩擦转化，导致摩擦副之间的局部黏着，进一步演化为拉缸。

拉缸性能试验是一种极端条件下的磨损模拟试验，其试验方法的关键在于如何通过控制润滑状态的转化，来模拟磨损机理的转型效应。

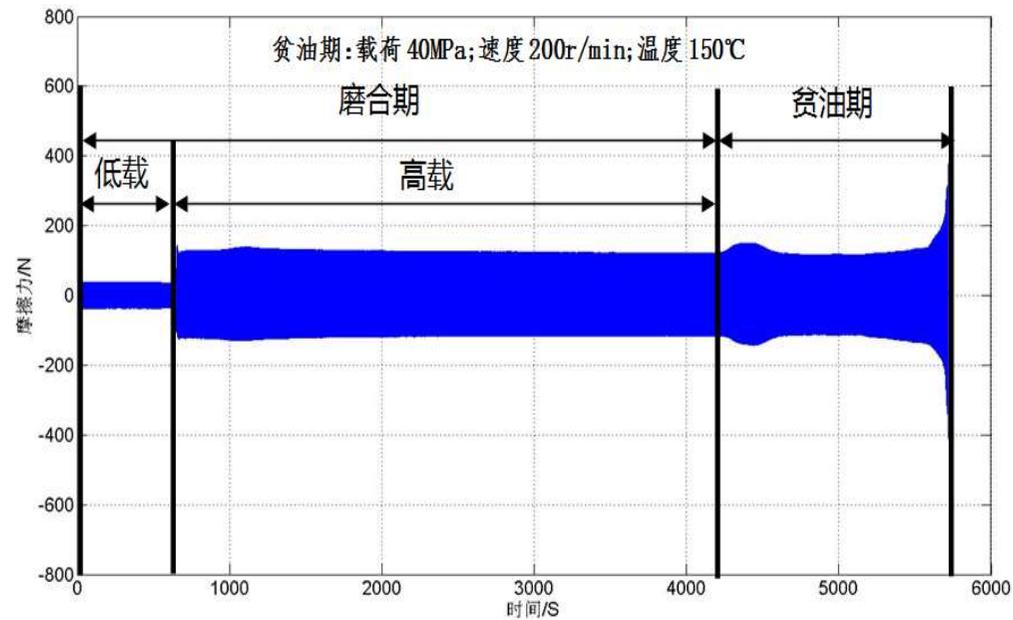
控制润滑状态的阶梯工况法



在润滑油连续供给条件下，温度、载荷、速度参数在相当宽的范围内阶梯变化，很难使活塞环-气缸套摩擦表面转化到干摩擦状态，难以实现拉缸过程的模拟。

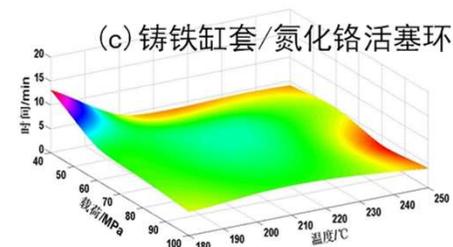
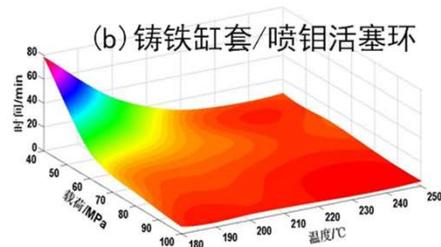
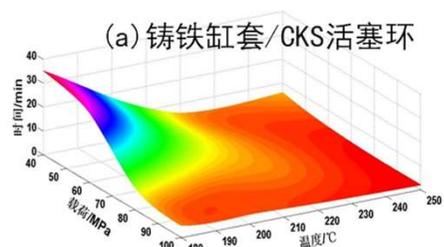
控制润滑状态的油膜耗散法

采用与摩擦磨损试验相同的工艺进行磨合；记录从断油，到发生粘着磨损的时间。

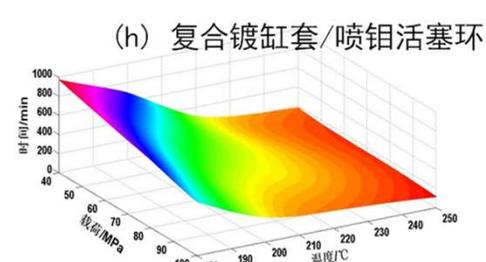
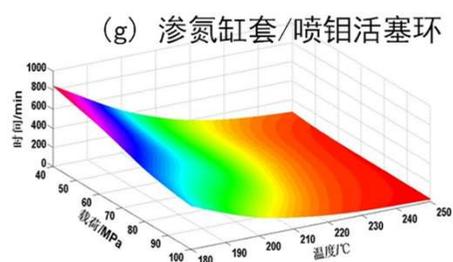
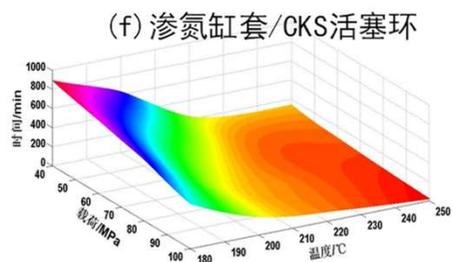
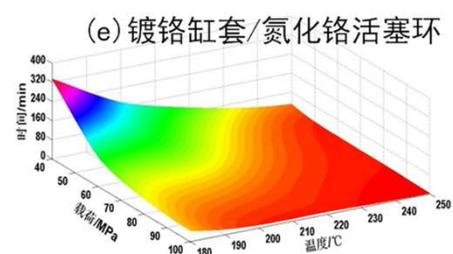
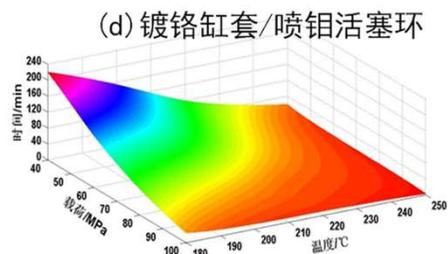


大量试验表明，这种方法，试验过程可控，结果重复性好。

敏感：载荷、温度



共性规律：温度升高，载荷增大，拉缸时间缩短



铸铁在60分钟内，镀铬在400分钟内，渗氮在千分钟。
复合镀-喷钼 > 渗氮-CKS > 渗氮-喷钼 > 镀铬-PVD ~ 镀铬-喷钼 > 铸铁-喷钼 > 铸铁-CKS > 铸铁-PVD

5. 试验方法的单缸机台架验证

□ 三种CKS（铬基 Al_2O_3 陶瓷复合镀）活塞环

- A环为通过了单缸柴油机台架耐久性和可靠性考核的参比活塞环
- B环和C环为新开发活塞环，性能未知。

(1) 试样模拟性试验

抗拉缸性能试验参数

试验程序	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	载荷/MPa	时间/min
低载磨合	200	120	10	10
高载磨合	200	180	40	150
停油磨损	转速、温度、载荷保持不变，停止供油磨至拉缸			

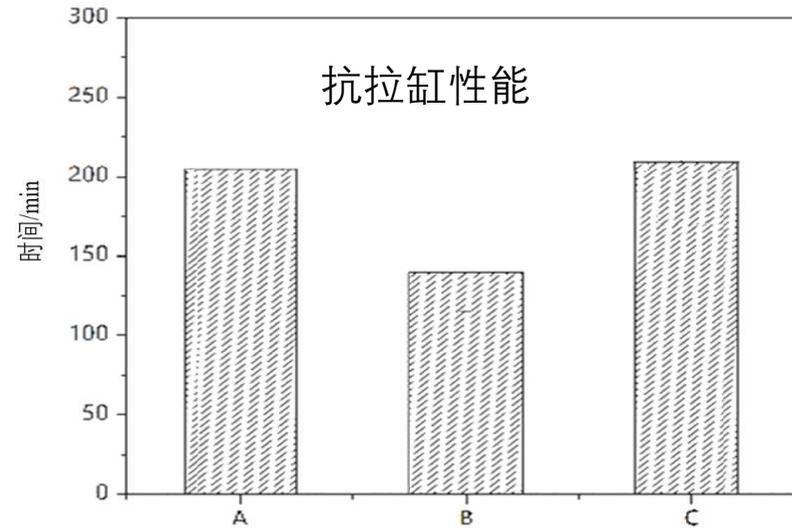
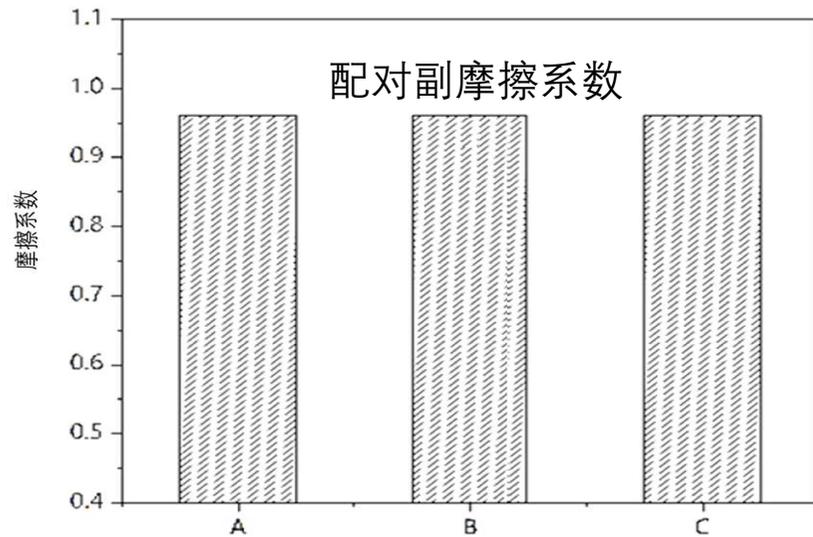
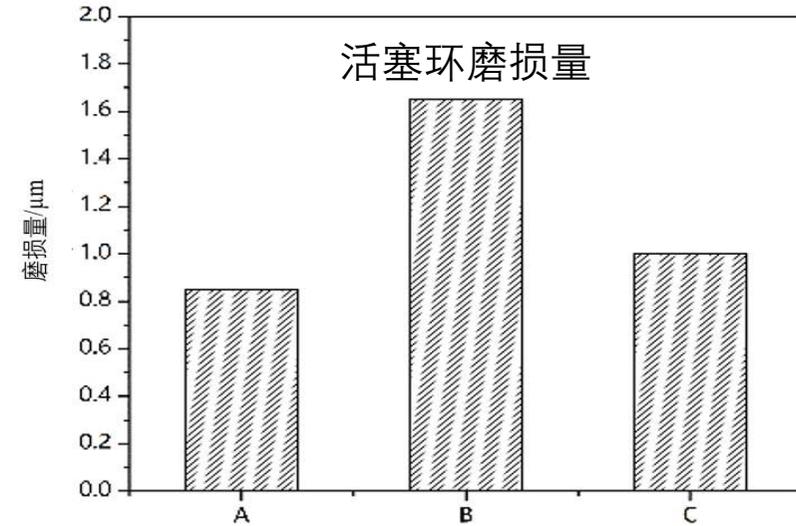
摩擦磨损试验参数

试验程序	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	载荷/MPa	时间/h
磨合	200	180	10	3
磨损	200	180	80	21



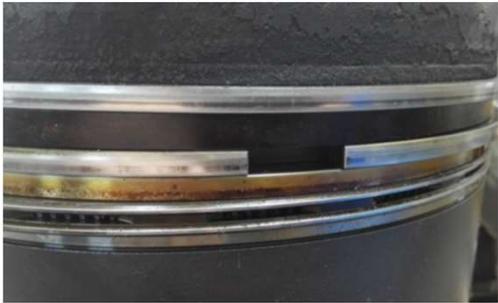
(2) 试样模拟性试验结果

- 活塞环A的磨损量最小，活塞环C的磨损量比A环的磨损量稍大，而活塞环B的磨损量最大，可达A环的2倍。
- C环的抗拉缸性能比A环略有提高，B活塞环的抗拉缸性能最差，仅为A环性能的四分之三。
- 三种活塞环的摩擦系数非常接近。



(3) 单缸机台架考核结果

- C活塞环在考核过程中，**未发生拉缸**
- 活塞环表面**光亮均匀**，无可见擦伤
- 气缸套内表面**珩磨网纹清晰完整**。



C活塞环表面形貌



与C活塞环配对气缸套表面形貌

- B活塞环在**磨合期发生拉缸**
- 气环表面有严重的拉伤且已变黑
- 气缸套全周面均有明显的纵向擦伤痕迹，珩磨纹消失。



B活塞环拉缸后的表面形貌



与B活塞环配对气缸套在拉缸后表面形貌

6. 结论

- 活塞环或者气缸套的新产品开发，应具备从**试样试验到使用试验**的完整“**试验链**”，对**各阶段产品的充分评价**，可加速产品开发进程，提高可靠性，有重要意义。
- 经采用单缸机试验台架验证，上述**模拟性试验方法**的结果，与单缸柴油机具有**良好的模拟性**。
- 建立的**摩擦磨损试验方法**，可用于评价活塞环、气缸套**本体材料及其表面改形、改性技术**的评价，也可用于**润滑油及抗磨添加剂**的摩擦磨损性能评价。

后记1:

建立的摩擦磨损和抗拉缸试验方法已经用于部分常见的活塞环和气缸套产品开发过程的评价。

气缸套材料与摩擦磨损:

- 4.1 一种合金铸铁气缸套的摩擦磨损
- 4.2 合金成分及组织对铸铁气缸套摩擦磨损的影响
- 4.3 铌铸铁及硼铌铸铁气缸套的磨损
- 4.4 含Cu合金铸铁气缸套的摩擦磨损
- 4.5 球墨铸铁气缸套的摩擦磨损

匹配的活塞环：喷钼、PVD-CrN、CKS/GDC

气缸套**表面处理**与摩擦磨损:

5.1 **镀铬**气缸套的摩擦磨损

5.2 FeNi**合金镀铁**气缸套的摩擦磨损

5.3 **氮化**气缸套的摩擦磨损

5.4 **复合镀**气缸套的摩擦磨损及控制方法

5.5 **激光淬火**铸铁气缸套的磨损

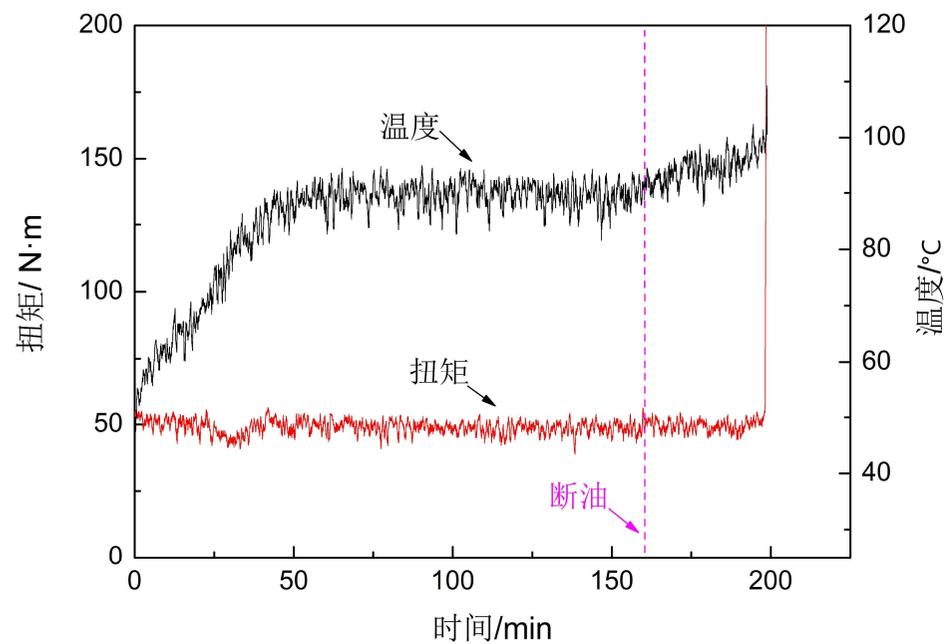
5.6 **珩研**合金铸铁气缸套的摩擦磨损

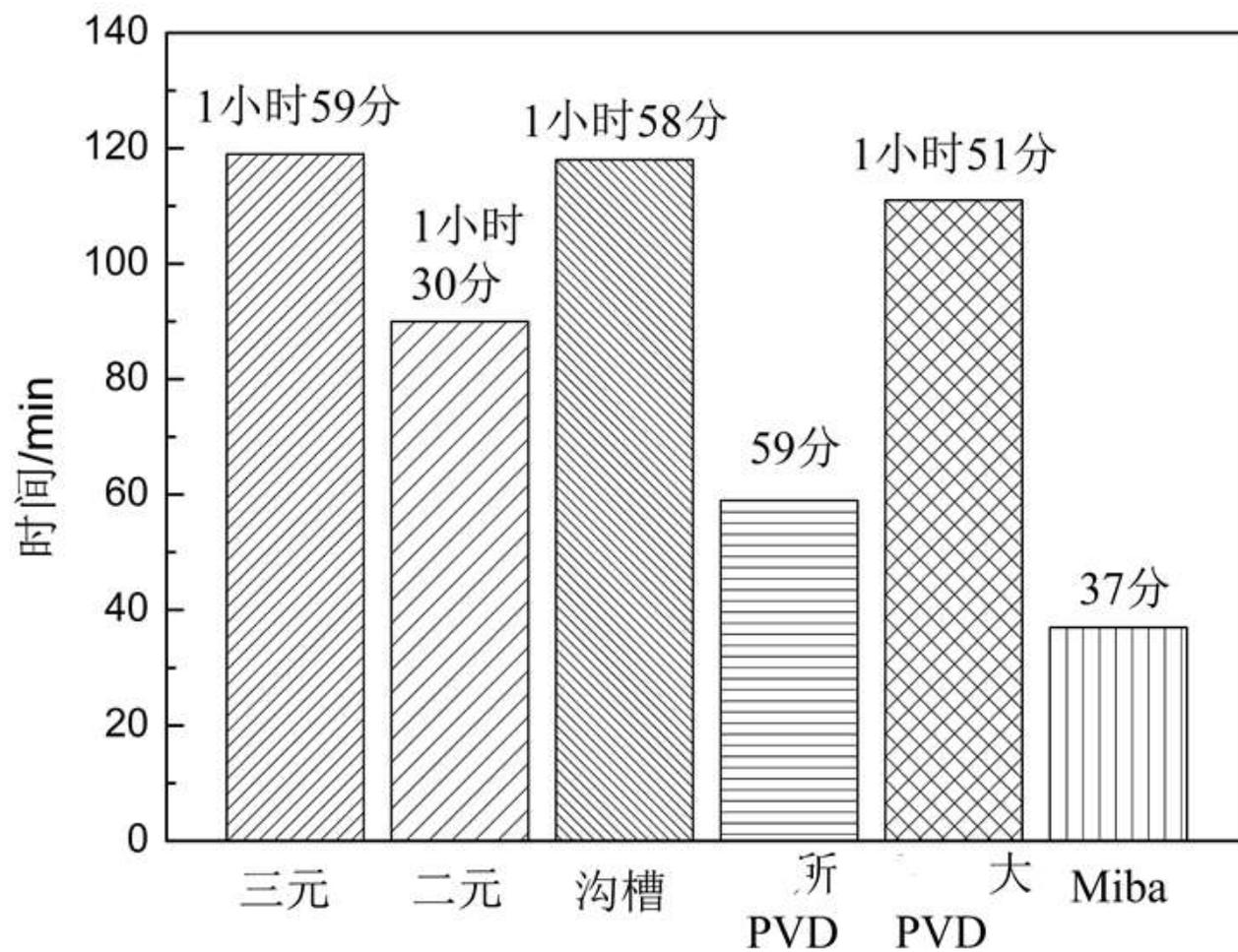
5.7 **圆形微织构**铸铁气缸套的抗拉缸性能

5.8 **摩擦缓释固体润滑剂**对气缸套摩擦磨损的影响

后记2:

方法还可应用于轴瓦抗烧瓦性能评价





抗咬合时间对比



大连海事大学
DALIAN MARITIME UNIVERSITY

学汇百川 德济四海

谢 谢

