

# CM-I 型多功能擦膜摩擦试验机的研制(II) ——试验与结果分析\*

王黎钦 齐毓霖 朱宝库

(哈尔滨工业大学机电工程系 哈尔滨 150001)

**摘要** 在CM-I型多功能擦膜摩擦试验机上,分别对TiN/52100钢球-TiN/W9Cr4V2Mo钢板和TiC/W9Cr4V2Mo钢球-TiN/W9Cr4V2Mo钢板等摩擦副在不同条件下作了擦膜摩擦试验.结果表明,利用CM-I型试验机能够较好地测试出在法向力和摩擦力同时作用下膜-基体系的失效临界载荷,而且测试数据的重复性较好,随着摩擦系数的增大,其失效形式是由底材首先屈服,进而发生镀层被压碎并逐渐转化为完全剥离,临界载荷也随之减小.

**关键词** 镀层,膜-基体系,失效临界载荷,擦膜试验,试验机,失效分析

## 1 前言

评价膜-基体系的重要指标之一就是失效临界载荷 $L_c$ .研究表明,摩擦系数、镀层厚度、镀层和底材的材料特性,以及镀层的沉积方法等,都对膜-基体系的失效形式和失效临界载荷的影响很大<sup>[1]</sup>.

作者在自行设计制造的CM-I型多功能擦膜摩擦试验机<sup>[2]</sup>上,对几种膜-基体系在不同摩擦条件下的失效临界载荷进行了测试,并就其失效过程作了分析与讨论.本文报道有关的试验研究和分析测试结果.

## 2 试验部分

### 2.1 试样

试样a: PVD TiN/52100钢球, TiN镀层的厚度为4—5 $\mu\text{m}$ ,球半径为9 915.5 $\mu\text{m}$ ,表面显微硬度为1 700 HV.

试样b: CVD TiC/W9Cr4V2Mo钢球, TiC镀层的厚度为7—8 $\mu\text{m}$ ,经1 210 $^{\circ}\text{C}$ 下真空淬火,540 $^{\circ}\text{C}$ 下3次真空回火,球半径为8 731.4 $\mu\text{m}$ ,表面显微硬度为2 800 HV.

### 2.2 偶件

偶件a: PVD TiN/W9Cr4V2Mo钢板.

偶件b: W9Cr4V2Mo钢板.

### 2.3 试验方法

将上述试样与偶件相互配对组成摩擦副,在CM-I型多功能擦膜摩擦试验机上进行不

\* 1993—1994年度航天基金资助项目

1995-02-18收到初稿,1995-08-19收到修改稿

本文通讯联系人王黎钦

同摩擦状态下的擦膜试验,所用试验方法详见文献[2].

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 润滑状态下的摩擦系数

将试验样 a 与偶件 b 配对组成摩擦副,并且在两者的接触面之间加注 HL-30 齿轮润滑油,测试速度  $V = 0.575 \text{ m/s}$ ,初始最大 Hertz 压力约为  $1.7 \text{ GPa}$ ,摩擦副在测试过程中处于部分膜润滑状态.图1(a)和(b)所示分别为该摩擦副的  $P$ - $Q$  测点分布图和摩擦系数  $\mu$  随着

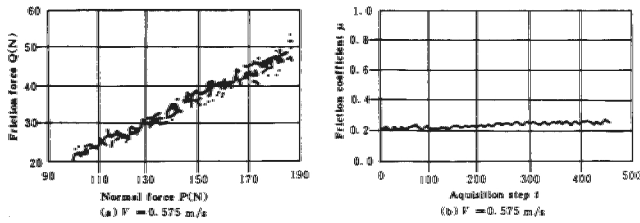


Fig. 1 Testing results of TiN/52100 steel ball-W9Cr4V2Mo steel plate friction pair under HL-30 gear oil lubrication condition

图1 在 HL-30 齿轮油润滑条件下 TiN/52100 钢球-W9Cr4V2Mo 钢板摩擦副的测试结果

采样步  $t$  变化的测试结果示意图,测试后接触区的扫描电子显微镜 (SEM) 照片如图2所示.

由图1示出的测试结果可以看出,测试过程中摩擦力  $Q$  对法向力  $P$  的测点分布一直比较集中,摩擦系数的初始值约为 0.2. 这个值明显偏高,且其随后还呈现出缓慢上升的趋势. 对图2所示表面形貌照片分析认为,这是在给定的试验条件下,接触界面还没有形成全膜润滑的结果,随着法向力的增大,对零件之间发生直接接触的面积有所增大,因而摩擦系数呈现出缓慢上升的变化趋势,此时接触区的表面不仅出现了抛光痕迹,而且还发生了非常轻微的磨损. 这些测试结果充分说明,CM-1 型多功能擦膜摩擦试验机适用于测试摩擦副的摩擦学特性.

#### 3.2 膜-基体系失效临界载荷的测试结果<sup>[3]</sup>

膜-基体系的失效临界载荷  $L_c$  在干摩擦条件下测试,由 CM-1 型多功能擦膜摩擦试验机自动均匀递增加载直到膜-基体系失效. 观察发现,摩擦力  $Q$  的突然变小或发生急剧波动,都是膜-基体系失效的主要特征. 这种情况下,不仅产生了  $P$ - $Q$  测点分布图上测点的急剧发散,而且有时还会伴随发生法向力  $P$  的变化. 图3和图4所示分别为试样 a 与偶件 a

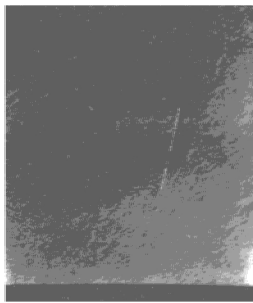


Fig. 2 SEM photograph of TiN/52100 steel ball after test

图2 测试后 TiN/52100 钢球表面形貌的扫描电子显微镜照片

的急剧发散,而且有时还会伴随发生法向力  $P$  的变化. 图3和图4所示分别为试样 a 与偶件 a

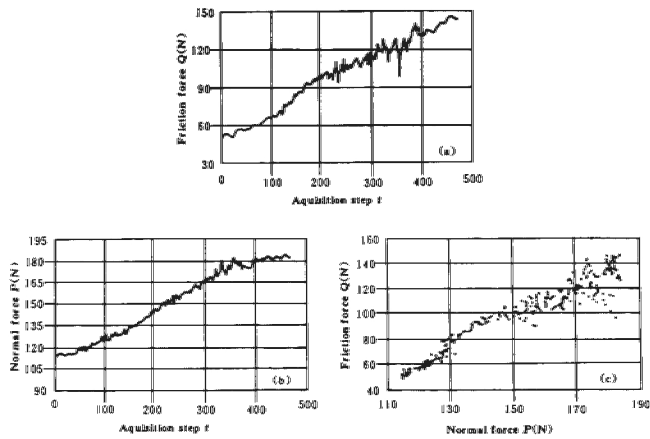


Fig.3 Testing results of TiN/52100 steel ball-TiN/W9Cr4V2Mo steel plate friction pair under dry friction condition

图3 在干摩擦条件下 TiN/52100 钢球-TiN/W9Cr4V2Mo 钢板摩擦副的测试结果示意图

配对组成的摩擦副在干摩擦条件下的测试结果和失效后钢球表面形貌的扫描电子显微镜照片。由图可以看出,当采样步  $t > 220$  以后,摩擦力  $Q$  的发散程度明显增大[见图3(a)所示],而且法向力  $P$  在采样步  $t > 300$  以后的波动加剧[见图3(b)所示],同时  $P$ - $Q$  测点也开始急剧发散。

根据以上所述可以判断,  $t = 220$  所对应的法向力就是干摩擦条件下所测膜-基体系的失效临界载荷  $L_c$  值。由图3(b)所示可以看出,  $L_c = 150$  N,而且测试结果表明,此时的摩擦系数  $\mu = 0.7$ 。图4所示表面形貌照片说明,膜-基体系发生的是混合失效,包括镀层压碎、剪断、片状剥落和沿界面剥离。

图5和图6所示分别是由试样 a 与偶件 b 配对组成的摩擦副在干摩擦条件下的测试结果和失效之后的 TiN/52100 钢球表面形貌的 SEM 照片。可以看出,图5(a)中摩擦力  $Q$  在  $t$  处于 50—150 之间时有一个比较大的跌幅,  $t = 50$  所对应的法向力  $P = 200$  N。在  $P$ - $Q$  测点分布图上,这个  $P$  值附近的摩擦力  $Q$  变化非常大,表明  $t = 50$  为膜-基体系失效的开始



Fig.4 SEM photogram of TiN/52100 steel ball surface after failure

图4 失效后 TiN/52100 钢球表面形貌的扫描电子显微镜照片

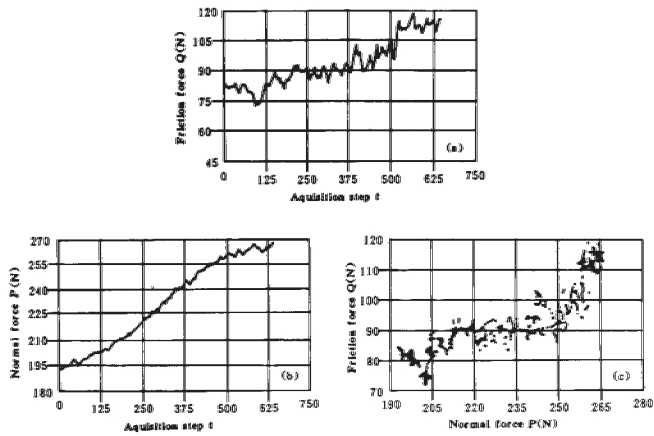


Fig. 5 Testing results of TiN/52100 steel ball-W9Cr4V2Mo steel plate friction pair under dry friction condition

图5 在干摩擦条件下 TiN/52100 钢球-W9Cr4V2Mo 钢板摩擦副的测试结果示意图

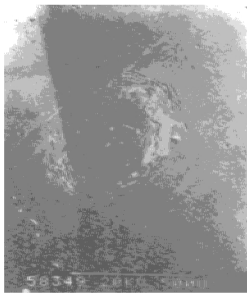


Fig. 6 SEM photogram of TiN/52100 steel ball surface after failure

图6 失效后 TiN/52100 钢球表面形貌的扫描电子显微镜照片

点,对应于该点的摩擦系数测定值为0.4。此后,摩擦力的波动一直比较大。由图6所示钢球表面形貌的扫描电子显微镜照片可以看出,失效区为椭圆状,而且失效明显集中在椭圆长轴的两端。椭圆长轴对应的是摩擦膜方向,即摩擦力方向,这种失效分布与文献[1]报道的研究结果完全吻合。分析认为,失效起始于底材的屈服,进而导致膜层被压碎,由于没有发生材料转移,法向力  $P$  随着采样步  $t$  的增加基本是呈线性增大;摩擦力  $Q$  的波动幅度或  $P$ - $Q$  测点的发散程度与弧形裂纹的形成速度有关。

试样 b 与偶件 a 配对组成的摩擦副在干摩擦条件下的测试结果和 TiC/W9Cr4V2Mo 钢球失效表面形貌的 SEM 照片分别如图7和图8所示。

由图7可以看出,在  $t = 60$  附近,摩擦力  $Q$  开始发生比较明显的波动并且有所减小,对应于该点的法向力  $P$  为190 N,而且  $P$  值也开始发生小幅度的下降,表明发生了少量的材料转移,  $P$ - $Q$  测点的发散程度明显

增大,此时的摩擦系数为0.58。分析认为,这是偶件a表面TiN镀层失效的结果。由图8所

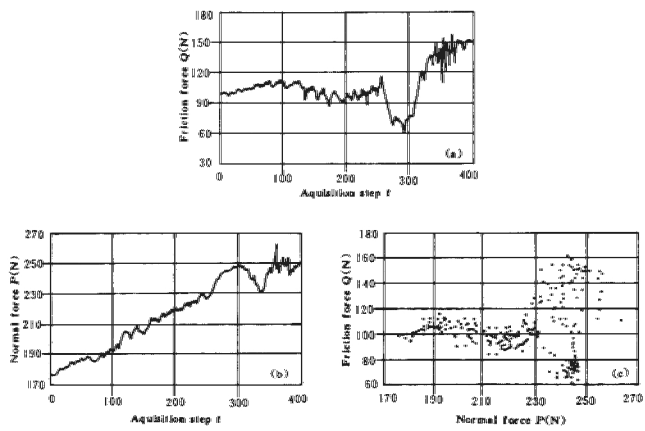


Fig. 7 Testing results of TiC/W9Cr4V2Mo steel ball-TiN/W9Cr4V2Mo steel plate friction pair under dry friction condition

图7 在干摩擦条件下 TiC/W9Cr4V2Mo 钢球-TiN/W9Cr4V2Mo 钢板摩擦副的测试结果示意图

示明显可见, 试样b发生的是马蹄形的大块剥落, 在失效瞬间会导致摩擦力Q的大幅度减



Fig. 8 SEM photograph of specimen b surface after failure  
图8 失效后试样 b 表面形貌的扫描电子显微镜照片

小, 同时法向力  $P$  也会随着材料的转移而出现较大幅度的下降,  $P$ - $Q$  测点急剧发散, 所对应的  $t = 240$ , 此时的失效临界载荷  $L_c = 230$  N, 摩擦系数为 0.5.

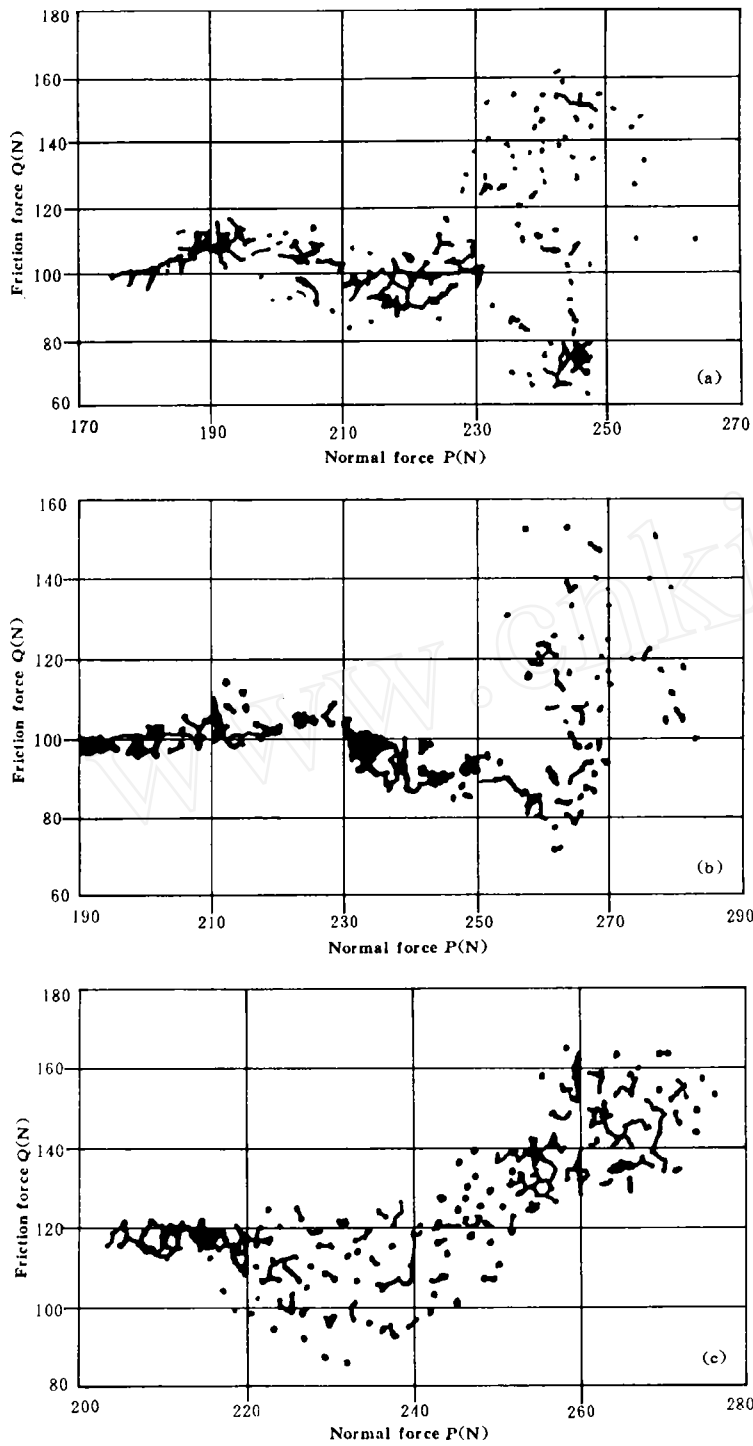


Fig. 9 Three diagram of friction force  $Q$  vs normal force  $P$  of TiC/W9Cr4V2Mo steel ball under dry friction condition

图9 在干摩擦条件下 TiC/W9Cr4V2Mo 钢球试样3次擦膜测试的  $P$ - $Q$  测点分布示意图

### 3.3 擦膜试验的可靠性分析

图9给出的是试样b与偶件a配对组成的摩擦副在3次擦膜测试过程中的P-Q测点分布图。观察发现,此时失效表面的SEM照片与图8示出的很相似。参照对图7和图8所作的分析,图9(a)、(b)和(c)对应的TiC镀层的失效临界载荷 $L_c$ 分别为230 N, 230 N和220 N,失效时对应的摩擦系数 $\mu$ 分别为0.5、0.5和0.54。由此可见,CM-I型多功能擦膜摩擦试验机测量膜-基体系的失效临界载荷具有较好的重复性。

## 4 结论

- 自制的CM-I型多功能擦膜摩擦试验机适用于测试摩擦副的摩擦学性能。
- 利用CM-I型多功能擦膜摩擦试验机,可以较好地测试膜-基体系的失效临界载荷,而且具有较好的重复精度。
- 摩擦系数不仅影响膜-基体系的失效临界载荷,而且还影响它的失效形式,摩擦系数越大,临界载荷越小,膜-基体系的承载能力越低。

### 参 考 文 献

- [1] 王黎钦. 气相沉积薄膜-基体系承载能力的研究:[学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程系,1994.
- [2] 王黎钦, 齐毓霖, 朱宝库. CM-I型多功能擦膜摩擦试验机的研制(Ⅰ)——原理与构成. 摩擦学学报,1994,14(4):345-351.
- [3] 胡世炎主编. 机械失效分析手册. 成都:四川科学技术出版社,1989. 191-195;551-563.

## Developing of Model CM- I Multifunctional Tester for Coating Adhesion or Friction Measurement (Ⅱ) —— Test and Analysis of Its Results

Wang Liqin Qi Yulin Zhu Baoku

(Department of Mechanical and

Electronic Engineering Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China)

**Abstract** The rubbing and tribological test of pairs of TiN/52100 steel ball to TiN/W9Cr4V2Mo steel plate, TiC/W9Cr4V2Mo to TiN/W9Cr4V2Mo steel plate *etc* under different circumstance are completed on model CM- I multifunctional tester for coating adhesion or friction measurement. The results show that the critical loads of failure of coating-substrate systems under both normal and friction forces can be well tested on this tester and the repetition accuracy of data is fairly good. With increase of friction coefficient  $\mu$ , the critical load decreases, the failure type of coating-substrate system changes from substrate's yielding which then causes the coating to be idented to pieces to the complete coating spalling.

**Key words** coating, coating-substrate system, failure critical load, rubbing test, tester, failure analysis