

离合器片模型试验新方法

冯士成
(河北机电学院)

白元章 王铁山
(吉林工业大学)

摘 要

作者在综述了离合器片模型试验现行的试验机和试验方法基础上,应用相似理论,确定模拟准则,提出了离合器片模型试验新方法。通过在MM-1000试验机上的模拟试验及PC-1500计算机数据处理,并与离合器片零件试验结果对比,证明该新方法方便实用。

一、前 言

摩擦离合器是汽车、拖拉机传动系统的重要组成部分。离合器的性能虽然依其结构和对偶材料的不同而发生变化,但作为离合器的关键零件——离合器摩擦片(以下简称离合器片)的摩擦特性对它的影响最大^[1]。为了在实验室条件下,能够迅速而准确地对离合器片材料的摩擦特性进行评价,各国都十分注重试验机和试验方法的研究^[2~8]。但在国际上,目前还没有制定出一个模型试验的统一方法。现有用来探讨离合器片模型试验的试验机和试验方法,还不能充分反映离合器片的实际摩擦特性,所得试验结果缺乏对比性研究和理论分析;离合器片模型试验、总成台架试验、实际使用试验间的相互关系,仍是个悬而未决的问题。因而迫切希望确定更好的试验机和试验方法,对离合器片摩擦特性进行更深入的研究。

二、现有模型试验方法、试验机的分析

目前世界上比较有名的摩阻材料试验方法有日本的JISD4311、美国的SAEJ661a和福特公司的FAST方法^[8]。按绦部久文的分类,这三种方法均属于定速摩擦型式。

在我国离合器片的模型试验普遍采用定速试验。试验机包括MD-240定速摩擦试验机和圆盘试验机(以下二者统称定速机),并制定了石棉摩阻材料产品质量和出厂检验标准JC129-66^[6],使用的设备是圆盘试验机。该标准自颁布以来,对我国石棉摩阻材料的生产和使用起了重要作用。但是,随着科学技术的发展,以及随着运输机械和其它机械日益向高速、重载方向发展,对石棉摩阻材料的研究和质量检验的要求日益提高。实践表明,圆盘试验机和JC129-66标准都不适应石棉摩阻材料研究的发展和质量检验的要求,其原因如下:

1. 对偶材料

定速机的对偶为一固定的圆盘，不能根据实际要求选择对偶件材料和尺寸，各种试验均在同一圆盘（HT20-40）上进行。圆盘长期使用以后，其表面粗糙度和材料金相组织将发生很大变化。根据S.K.Rhee的研究报告，石棉摩擦材料的磨损与对偶表面粗糙度成抛物线性增加^[10]，可推知这必将对试验结果产生影响。

2. 摩擦方式

定速机在试验过程中是不停地连续摩擦，载荷平稳地加在作用面上，基本上是恒压、恒温、恒速。而实际使用的离合器片是在变压、变温、变速条件下工作（见图1），常产生急剧的冲击和明显的振动等。定速、定压、定温的试验方法，只模拟了离合器片实际工作中某一点处的工况，因而既不能全面反映材料的特性，又不能为设计与生产提供可靠的数据。

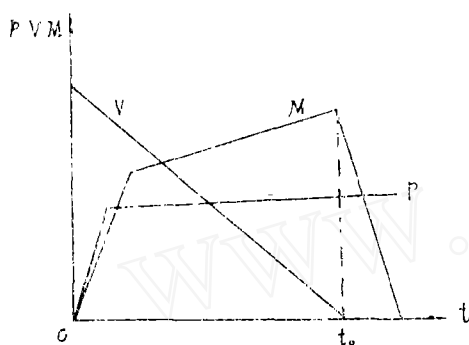


图1 离合器片试验记录曲线

P—压力；V—速度；M—摩擦力矩； t_0 —接合时间

3. 输入恒定

定速机在试验时采用恒定输入的方式，即摩擦时的压力、速度和时间是恒定的，则摩擦功

$$W = f p v t \quad (1)$$

式中：f—摩擦系数；

t—接合时间；

v—速度；

p—压力

由于P、v、t、均为定值，则摩擦系数低的材料或热衰退严重的材料，在试验中由于做功少，因而磨损可能较少。而在实际使用中，摩擦功是恒定的，摩擦系数低，则滑摩时间必须加长，必然导致磨损加大。所以只有采用恒定滑摩功（即恒定输出）的方式来评价耐磨性，才能得出符合实际的结果。

4. 温度分布

定速机的重叠系数，（试样总面积/摩擦盘面积）远远小于离合器的重叠系数，摩擦盘厚度也与离合器不符。此外，在实际使用中两摩擦偶件的温升是靠摩擦热来获得的，而定速机试验时常伴以人工加温的方式达到测试温度，因而将影响摩擦副的热过程和温度分布，引起摩擦特性发生变化。

5. 几何形状

定速机的试样是20毫米×30毫米× δ （ δ 为试样厚度）的长方块，而实际的离合器片是圆环形的，从相似理论^[11]可知，若模型与原型几何形状不同，即所谓畸变，必然带来误差。

6. 受力关系

定速机试样是装在试件槽中的，试件的受力关系见图2（a），试样沿相对运动方向的压应力分布见图2（b），可见试样受力不均，靠近DC端压力最小，靠近AB端压力最大，即等于试样摩擦面上所有摩擦力之和。加之对偶金属某点在试样表面DC线上开始接触，在AB线上脱开，这样从DC线到AB线，由于温度逐渐升高，必然导致试样磨损沿DA方向或CB方向增加，造成不均匀磨损。从理论上讲，圆环型试样沿相对运动方向向摩擦面的压力是均匀的，因而摩擦温度也是一致的（见图3），其磨损也是均匀的。

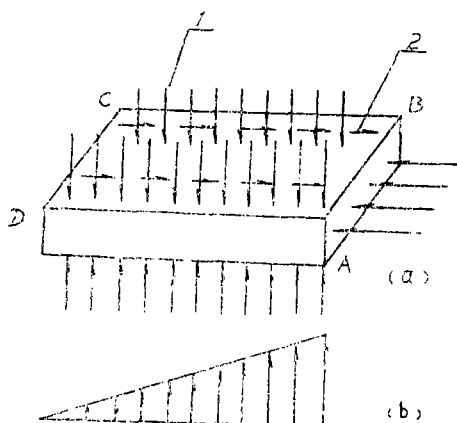


图2 长方块试样受力关系

1—载荷；2—摩擦力

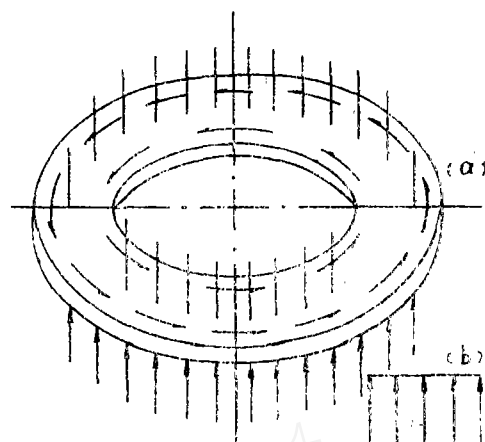


图3 圆环形试样受力关系

总之，现行的试验机和试验标准与离合器的实际工况条件不符，故有必要找一种与实际工况相接近的试验机和试验标准

三、离合与制动工况的关系

惯性制动法本来是模拟制动器的工况产生的，它能否用于离合器片的试验研究？已有人从速度、压力、能量三方面探讨了离合与制动工况的关系，指出惯性制动试验机的试验结果能反映离合器在一般工况下摩擦材料性能的变化规律。

惯性制动法现已用来进行粉末冶金离合器片的质量检查并已形成标准^[12]，但该标准从压力、速度、能量等方面均不适于石棉离合器片的试验研究和质量检验，故我们以MM-1000为试验机，采用下述试样惯性制动试验方法，即离合器片模型试验新方法。

四、试样惯性制动试验方法

(一) 模拟准则的确定

1. 国外有关模拟准则的论述

摩擦特性同一般的机械性能不同，影响因素比较多，因此必须根据影响离合器片摩擦特性的主要因素和实际工作条件来确定合理的模拟准则。关于影响摩擦材料摩擦特性的主要因素及其模拟准则，国外已进行了许多研究。

苏联的И.В.克拉盖尔斯基对实验室模拟摩擦试验提出的模拟准则^[9]是：在摩擦副的滑动速度、压力、接触面积与总摩擦面积之比、表面层的温度梯度及周围的介质或环境等方面模拟实际工况条件。

美国的A.J. Wilson等提出实物与试样的模拟准则为^[7]：

- (1) 衬垫单位面积上的压力相同；
- (2) 在平均半径上的线速度相同；

- (3) 刹停时间相同;
- (4) 单位面积上的能量相同;
- (5) 在衬垫和盘中, 垂直于工作面的热传导路径相同。

上述都说明速度、压力、温度和能量是影响摩阻材料摩擦特性的主要因素, 因而一直被作为摩擦特性试验的模拟准则。但对于汽车、拖拉机等离合器片试样试验, 要使模型 (即小试样) 与原型之间, 既保持能量相同, 又保持压力、速度相同在MM-1000上是难于实现的。

2. 模拟准则的理论推导

(1) 确定影响参量

影响离合器片摩擦特性的参量可归结如下:

①表征离合器片参量	符号	量纲
机械强度 (硬度、冲击强度……)	S	FL^{-2}
热物理参数 (导热系数、比热……)	H	
表面状态参数	F	
外径	D_2	L
内径	D_1	L
厚度	h_0	L
②表征对偶 (压盘) 参量		
机械强度 (硬度) ……)	S_o	FL^{-2}
热物理参数 (导热系数、比热……)	H_o	
表面状态参数	F_o	
外径	D_2	L
内径	D_1	L
厚度	h_0	L
③表征工况参量		
接合压力	P	FL^{-2}
滑摩速度	V	LT^{-1}
表面温度	T	C
滑摩功 (单位面积上的)	E	FL^{-1}
滑摩时间	t	T
环境温度	T_o	C
环境介质	β	
④因变量		
摩擦系数	f	O
磨损率	W	L

(2) 确定模拟准则

①保持试样材料、对偶材料与原型相同, 因而把离合器片及对偶的机械强度S、 S_o , 热物理参数H、 H_o , 表面状态参数F、 F_o 定为材料模拟准则, 取环境介质也与原型一致。

②确定其余参量的模拟准则, 其步骤如下:

首先写出有关影响离合器片参量的一般数学表达式:

$$\varphi = \varphi(D_1, D_2, h, h_0, P, V, T, E, t, T_0, W, f) \quad (2)$$

然后将(2)式写成Ⅱ项的指数式:

$$\Pi = D_1^{a_1} D_2^{a_2} h^{a_3} h_0^{a_4} P^{a_5} V^{a_6} T^{a_7} E^{a_8} t^{a_9} T_0^{a_{10}} W^{a_{11}} f^{a_{12}} \quad (3)$$

再把各参量的量纲代入(3)式,列出量纲等价式:

$$\Pi = L^{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - 2a_5 + a_6 - a_8 + a_{11}} \cdot F^{a_5 + a_6} \cdot T^{(-a_6 + a_9)} \cdot C^{(a_7 + a_{10})} \quad (4)$$

由于式(2)中含 $n=12$ 个物理量,基本量纲数 $m=4$,独立Ⅱ项数为 $n-m=12-4=8$ 。又由于 f 为无量纲量,正符合相似理论中相似准则的主要属性,故 $\Pi_1=f$ 为相似准则。

根据量纲齐次原则,得如下模拟准则:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= D_1/D_2; \quad \Pi_2 = h/h_0; \quad \Pi_3 = D_2/h; \\ \Pi_4 &= T/T_0; \quad \Pi_5 = fPVt/E; \quad \Pi_6 = PD_2/E; \\ \Pi_7 &= f; \quad \Pi_8 = W/D_2. \end{aligned}$$

其中: Π_1, Π_2, Π_3 为几何模拟准则; Π_4 为温度模拟准则; Π_5 为能量模拟准则; Π_6 为几何与工况关系模拟准则; Π_7, Π_8 为原型与模型试验结果间的转换关系式。

(二) 试验参数的确定

石棉离合器片试样试验参数,主要是根据该离合器片的实际使用工况和上述模拟准则来确定。下面就以铁牛-55型拖拉机离合器片摩擦特性试验为例,确定其试验参数如下:

1. 取试样材料、对偶材料、环境介质与原型相同,因而满足材料模拟准则。试样材料取杭州制动材料厂产石棉离合器片(规格 $336 \times 216 \times 4$),对偶为灰铸铁HT20-40,表面光洁度 $\Delta 7$ 。

2. 几何尺寸确定(符号右上角加一撇为试样参数,不加一撇为原型参数)。

因为: $D_2=336$ 毫米, $D_1=216$ 毫米, $h_0=30$ 毫米, $h=4$ 毫米, $D'_2=75$ 毫米,根据相似原则可以求得: $D'_1=48.2$ 毫米, $h'_0=6.7$ 毫米, $h=0.9$ 毫米。

由于试样制作粘结工艺限制,取 $h'=h=4$ 毫米,则试样与对偶的几何尺寸见图4。

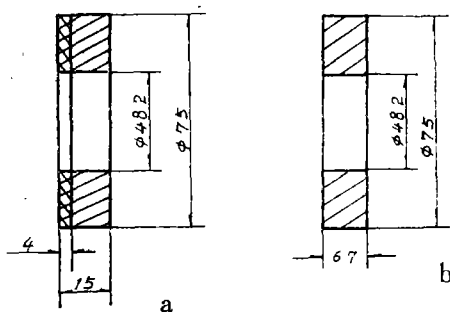


图4 (a)一试样; (b)一对偶

3. 温度的确定

取试样表面温度与原型表面温度相同。

4. 滑摩功和压力的确定

取试样与原型单次制动单位面积滑摩功相等。即 $E'=E$;

$$\text{由 } \Pi_6 = \frac{PD_2}{E} = \frac{P'D'_2}{E'} \text{ 得:}$$

$$\begin{aligned} P' &= \frac{PD_2}{D'_2} = \frac{2 \times 336}{75} \\ &= 8.96 \times 9.8 \times 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

注:铁牛-55拖拉机离合器实测接合最大压力 $P=2 \times 9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$

5. 滑摩速度和制动时间的确定

由相似理论知: $\Pi_5 = fPvt/E$,可转变成 $\Pi_5 = pvt/E$ (因 f 为无量纲量)。

取 $t'=t_0$ 且 $E'=E$ 得:

$$PVt/E = P'V't'/E'$$

$$PV = P'V'$$

$$V' = \frac{PV}{P'} = \frac{2 \times 14.4}{8.90} = 3.2 \text{ 米/秒}$$

($V = 14.4$ 米/秒为离合器最大滑摩速度)

注意：已往试验都是 $P = P'$, $V = V'$ 。但是对于 MM-1000 试验机，当 $V' = V = 14.4$ 米/秒时，即使取最小惯量——轴系惯量 $J = 0.36 \times 9.8 \text{ 牛} \cdot \text{厘米/秒}^2$ 。其单次制动单位面积的滑摩功(近似取转动动能)也为 $15.19 \times 9.8 \text{ 牛} \cdot \text{米/厘米}^2$ 。是实际离合器片滑摩功最大允许值 ($3 \times 9.8 \text{ 牛} \cdot \text{米/厘米}^2$) 的 5.06 倍。因而以往的模拟准则 [7]、[9] 对 MM-1000 试验机离合器片试样试验是不适合的。对此本文以模型 $P'V'$ 乘积等于原型 PV 乘积为模拟准则，就可以使单次制动单位面积滑摩功，从 $0.80 \times 9.8 \text{ 牛} \cdot \text{米/厘米}^2$ 至 $33.15 \times 9.8 \text{ 牛} \cdot \text{米/厘米}^2$ 。从而使离合器片试样试验在 MM-1000 试验机上成为可能。

总之本文所采用的模拟准则是：

- ①材料模拟准则：保持模型与原型材料相同。环境也相同。
- ②几何模拟准则：保持模型与原型几何相似。
- ③温度模拟准则：保持模型与原型的环境温度、试样表面温度分别相同。
- ④能量模拟准则：保持模型与原型的能量相同。
- ⑤时间模拟准则：保持模型与原型的滑摩时间相同。因为能量相同，时间相同，实际上这意味着模型与原型的滑摩功率相同。
- ⑥PV模拟准则：保持模型与原型PV之积相同。

6. 具体试验项目

对于实际使用中的离合器，无论是汽车上，还是拖拉机上，它的接合初速度（即最大滑摩速度）取决于发动机的额定转速，最大接合压力取决于弹簧。对于一定车型它们都是一定的。而离合器片的表面温度、滑摩功都是个变化很大的量。它们随具体工况而改变，如运输时坡路、挂拖车与否；田间作业时的地块大小、土壤行驶阻力等，都影响（接合频率）表面温度和滑摩功。因而在满足等式 $PV = P'V'$ 。即 $P' = 8.96 \times 9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ ， $V' = 3.2$ 米/秒条件下，只模拟实际离合器片滑摩功及表面温度，即进行能量试验和温度试验，来考察离合器片试样磨损量 w' 、摩擦系数 f' 与能量的关系式 $w'(E)$ 、 $f'(E)$ 及热衰退性能（即摩擦系数与温度的关系式） $f'(T)$ 。其具体试验条件及程序见表 1。

表 1 试验条件及程序表*

顺序	试验项目	最大接合压力 $\times 9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$	接合初速度 (米/秒)	表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)	滑摩功(能量) ($\times 9.8 \text{ 牛米/厘米}^2$)	相当惯量($\times 9.8$ 牛·厘米/秒 2)	接合次数	记录
1	磨 合	4	3	< 60	3	3.01	接触面积达 100%	温度 T'
2	能量试验	8.96	3.2 相当 $n = 984$ 转/分	60 ± 10	1.46, 3.01 4.99, 8.97 10.96	0.66, 1.36 2.26, 3.16 4.06, 4.60	每级50次拆下 测磨损	温度 T' 力矩 M' 压力 P'
3	磨 合	同顺序 1 (换新片)						
4	温度试验	8.96	3.2	60, 100 150, 200 250, 300	3	3.01	重复制动使温 度从 50°C 升至 300°C	温度 T' 力矩 M' 压力 P'

*磨损测量采用千分尺测厚法，能量近似按动能计算： $E' = 1/2 J' w'^2 / A'$ 式中 J' 为包括轴系在内的总惯量， w' 为接合初速度， A' 为试样面积。

(三) 试样试验与零件试验的对比

表 2 试 验 结 果

试 样 试 验						零 件 试 验					
能 量 试 验				温 度 试 验		能 量 试 验				温 度 试 验	
惯量 J'	能 量 E'	磨损 10^{-3} 微米/次 W'	摩擦系数 f'	表面温度 T'	摩擦系数 f'	惯量 J	能 量 E	磨损 10^{-3} 微米/次 W	摩擦系数 f	表面温度 T	摩擦系数 f
0.66	1.46	31	0.31	60	0.30	26.0	2.73	11.5	0.403	60	0.441
1.36	3.01	66	0.28	100	0.29	45.2	4.76	10.2	0.370	100	0.386
2.26	4.99	80	0.26	150	0.25	54.9	5.76	21.4	0.369		
3.16	7.00	100	0.22	200	0.26	64.5	6.77	41.0	0.365	150	0.356
4.06	8.97	126	0.24	250	0.23	74.3	7.80		0.362	200	0.283
4.06	10.97	266	0.19	300	0.21	84.1	8.82	81.1	0.350	250	0.295

注：惯量单位 $9.8\text{牛}\cdot\text{厘米}/\text{秒}^2$ ；能量单位 $9.8\text{牛}\cdot\text{米}/\text{厘米}^2$ ；温度单位 $^{\circ}\text{C}$

表 2 列出试样试验与零件试验的结果,可见不能精确满足转换式: $f = f'$ 和 $\frac{W}{D_2} = \frac{W'}{D'_2}$ 。

但摩擦系数和磨损率随能量及温度的变化趋势是一致的,反映出二者的摩擦磨损机理是一致的,因而它们二者之间具有相关性,存在着折算关系。为建立二者之间的折算关系,首先编制BASIC回归计算程序,应用PC-1500计算机,分别求出各自的回归方程如下:

$$W(E) = E \times P(0.358E + 1.126) \quad (5)$$

$$f(E) = 0.416 - 0.008E \quad (6)$$

$$W'(E) = \text{EXP}(0.190E + 3.351) \quad (7)$$

$$f'(E) = 0.318 - 1.12 \times 10^{-2}E \quad (8)$$

$$f(T) = 0.476 - 8.17 \times 10^{-4}T \quad (9)$$

$$f'(T) = 0.321 - 3.65 \times 10^{-4}T \quad (10)$$

然后(5)式与(7)式,(6)式与(8)式,分别联立消去E,(9)式与(10)式联立消去T,即得试样试验与零件试验之间的折算关系式(11)、(12)、(13)。

$$W(E) = 5.583 \times 10^{-3} W' [f'(E)]^{1.884} \quad (11)$$

$$f(E) = 0.189 + 0.714 f'(E) \quad (12)$$

$$f(T) = -0.243 + 2.238 f'(T) \quad (13)$$

这样,只要我们知道试样试验结果,根据(11)、(12)、(13)三式,就可推算出在相同条件下零件试验的结果,使试样试验代替零件试验成为可能。同时还可根据(5)~(10)式来估计任意温度或能量下的摩擦系数或磨损率。例如,试样能量 $E' = 6.1 \times 9.8\text{牛米}/\text{厘米}^2$ 时,采用(7)式估计此时的磨损率为: $W'(6.1) = 90.92 (\times 10^{-3}\text{微米}/\text{次})$ 。如果要知道零件能量 $E = E' = 6.1 \times 9.8\text{牛米}/\text{厘米}^2$ 时的磨损率,将 $W'(6.1)$ 值代入(11)式就可求得:

$$\begin{aligned} W(6.1) &= 5.583 \times 10^{-3} [W'(6.1)]^{1.884} \\ &= 5.583 \times 10^{-3} (90.92)^{1.884} \\ &= 27.35 (\times 10^{-3}\text{微米}/\text{次}) \end{aligned}$$

五、结 论

1. 本文指出了定速试验机及定速试验方法存在的缺陷。
2. 从离合器片实际工况出发, 应用相似理论建立了新的模拟准则, 来指导离合器片模型试验。
3. 本文应用PC-1500计算机计算回归方程, 建立试样试验与零件试验之间的折算关系, 从而使试样试验代替零件试验成为可能, 为建立试样→零件→总成试验之间的折算关系创造了条件。
4. 通过试验初步证明本方法是当前评价和筛选离合器片的一种新的实用的方法。

致 谢

在本文的试验过程中, 曾得到长春摩擦材料厂郭成志、邱华两同志的大力协助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 〔1〕吉林工业大学汽车教研室编, 汽车设计, 机械工业出版社, 1981年7月。
- 〔2〕福岗圭三郎, 自动车技术, **30**(1976), 11.
- 〔3〕绫部久文, 小池力, 自动车技术, **28**(1974), 3: 207.
- 〔4〕周顺隆等, 摩擦磨损, 1980, 1: 25.
- 〔5〕神崎福, 润滑, **26**(1981), 5: 359.
- 〔6〕JC129-66, 石棉摩擦制品检验方法, 1966年, 第129号。
- 〔7〕Wilson, A.J., SAE paper, 710249.
- 〔8〕王铁山等, 吉林工业大学学报, 1982, 3: 69.
- 〔9〕Крагельский, И. В., Коэффициенты Трения, МАШГИЗ, М., 1962, 220С.
- 〔10〕S.K.Rhee, Wear, **16**(1970) 431~445.
- 〔11〕陈秉聪, 拖拉机, 1979年第2、3、6期; 1980年第1~4期。
- 〔12〕一机部通用部件总局, 粉末冶金摩擦材料制器质量检验标准, 1982年。

A New Method for Clutch Lining Model Test

Feng Shicheng

(Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology)

Bai Yuanzhang

Wang Tieshan

(Jilin University of Technology)

Abstract

Based on the review of model machines and test methods, applying the principle of similitude, the establishment of the analogue criterion. A new method for clutch lining model test is proposed. The results from analogue test on the MM-1000 test machine and data processing with PC-1500 computer were compared with results of clutch lining component tests. The new method is considered convenient and practical.

会 议 消 息

全国摩擦学工业应用技术交流会于1985年十一月六日至十一日在厦门召开。这次会议是建国以来摩擦学界规模最大的一次工业应用技术交流活动，展示了我国摩擦学工业应用取得了很大的发展。

这次会议是中国机械工程学会摩擦学学会委托上海交大和福建省机械工程学会主持召开的。大会收到全国各地工矿企业、大专院校、科研单位的论文、报告共300余篇，其中140余篇在大会或分组会上作了宣读，110余篇作为会议交流论文。到会代表有430余人。会上还举办了摩擦学研究成果和应用效益展览会，开展了咨询服务活动。

论文涉及的内容非常广泛。有摩擦学工业应用调查报告；有新材料、新产品、新技术的开发和应用；有摩擦学试验设备、测试技术和测试仪器的开发和应用；有直接为工业应用服务的理论与试验研究成果；有摩擦学在一些新工业领域和新学科方面的应用。会议论文表明摩擦、磨损与润滑的研究已引起了广泛的重视，研究工作开展活跃，建立了许多新的研究方法，引进了新的分析、测试、评价设备，研究手段更趋现代化了。论文和报告也表明摩擦、磨损与润滑的研究已经取得了可喜的成果，三百多篇征文中来自工矿企业的占半数以上就充分说明以这一点，真是形势大好。润滑材料、润滑管理以及润滑理论的应用等方面的论文，报告表明，发展新的润滑料料，采用新的润滑方式、建立健全润滑管理制度的研究有了新的发展，它在工业开发和应用中收到了“一本万利”的经济效益。

这次会议是一次检阅、交流和推广我国在开发与应用摩擦学技术的成果，尽快把科技成果转化为生产力，推动和促进科学技术面向社会、面向四化建设的有益活动。可以预期摩擦学技术必将在加强能源、交通延输、材料这些薄弱环节，提高机械产品质量和可靠性诸方面发挥巨大的威力。

朱伟成