

第二次全国摩擦磨损润滑 学术会议论文集

中国机械工程学会摩擦学学会编审委员会论文编辑组编

机械工业出版社

第二次全国摩擦磨损润滑 学术会议论文集

中国机械工程学会摩擦学学会编审委员会论文编辑组编



机械工业出版社

第二次全国摩擦磨损润滑学术会议
论文集
中国机械工程学会摩擦学学会编审委员会
论文编辑组编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 16 · 字数 388 千字

1982 年 5 月北京第一版·1982 年 5 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,700 · 定价 2.00 元

*

统一书号: 15033 · 5237

前 言

摩擦磨损润滑学是研究作相对运动的相互作用表面及与之有关的实践的科学技术。它密切关联着人们的生活和生产活动，对提高机械产品效能，延长产品寿命，减少能量损耗，节约原材料，充分发挥生产能力等方面，有着十分重要的作用。它对国民经济的重大影响，自六十年代中期以来受到各国的广泛重视，并取其名为摩擦学 (Tribology)。

中国机械工程学会于一九七九年三月，在广州市召开了第二次全国摩擦磨损润滑学术讨论会。会议收到的论文和专题报告有169篇，不少论文具有一定水平，反映了我国摩擦磨损润滑学科发展的情况。会议评选出部分优秀论文，而且本着百花齐放百家争鸣的方针，为促进科技工作者进一步开展研究，也选出某些有不同学术观点的论文，共27篇，每篇都请专家多人审阅，并先后两次召开编审委员会会议审查、定稿，最后由论文编辑组委托广州机床研究所编辑成册。

论文集包括三部分内容，即：流体润滑和摩擦状态转化过程；磨损机理和耐磨、减摩、摩阻材料；润滑技术和润滑材料。虽然我国摩擦学的研究工作还处在初始阶段，但从这些论文中已可以看出研究工作对选择摩擦偶件；研究新材料、新工艺的积极指导作用。

我们希望本论文集的出版将促进这门新兴学科在我国的发展，从而提高我国机械工业产品的性能与质量作出积极的贡献。在此特对参与论文审阅和编辑的同志致以深切的谢意。

中国机械工程学会摩擦学学会
编审委员会论文编辑组
一九八〇年八月

目 录

前言

聚四氟乙烯的结晶结构及其抗摩性的研究·····	1
四球试验与齿轮试验的关系·····	8
含难熔金属的自润滑复合材料·····	15
含二硒化铌金属基自润滑电触点材料的应用研究·✓·····	23
水轮机水泵快速破坏原因的研究	
含砂水中汽蚀和磨损的规律·····	29
几种固体润滑材料在真空中的摩擦磨损及防冷焊的研究·····	39
紊流工况下椭圆轴承性能的研究·····	46
极压添加剂复合效应的研究·····	59
聚四氟乙烯织物复合材料的研究·····	68
合成摩擦材料的弹性模量对车轮热裂影响的研究·····	75
动静压轴承的分析与设计·····	83
腔内孔式回油液体静压轴承回转性能(动压效应)的研究·····	93
可倾瓦径向滑动轴承性能分析·····	104
可倾瓦块滑动轴承动力特性系数的计算及分析·····	116
铁素体球墨铸铁齿轮抗点蚀能力的研究·····	129
感应电涡流原理及调频线路在非接触位移测量中的应用·····	137
弹性流体动力润滑理论有限元解·····	144
内燃机滑动轴承轴心轨迹的理论计算与试验研究·····	151
不稳定负荷轴心轨迹的计算·····	162
关于可倾瓦径向滑动轴承油膜动力特性的讨论·····	168
可倾瓦径向轴承的特性及参数分析(一)·····	177
径向动压轴承静态及动态特性的计算及其通用程序·····	190
大型推力轴承的实测及其瓦变形的分析和计算·····	200
重载制动摩擦材料在MM—1000型试验机上的模拟试验·····	211
湿磨蚀试验方法及机理·····	218
导轨油防爬性能的研究·····	227
液体静压轴承的动态特性分析·····	236

聚四氟乙烯的结晶结构及其抗摩性的研究

中国科学院兰州化学物理研究所二室 胡廷永 齐尚奎 赵家政[⊙]
马 励 孙守镁 党鸿辛

摘要 本文根据电镜考察结晶形态的结果,讨论了聚四氟乙烯的结晶结构模型,然后对经过不同冷却速率和由不同品种树脂制成的样品用电镜考察结晶尺寸,用x-射线衍射法、红外吸收光谱法、熔融热与梯度-密度法等测定结晶度,并评价它们的抗摩性。

聚四氟乙烯是由结晶薄片与无序非晶区相间的带状结晶构成的聚集体,同种树脂的样品随冷却速率减慢,其带晶增宽、结晶度增大、磨损增大。当采用同样的冷却速率时,不同种树脂的样品的磨损与结晶结构之间,不存在上述关系。

聚四氟乙烯优异的低摩擦特性、突出的化学稳定性、良好的耐高温和耐低温性,使它被广泛地用作各种自润滑部件。在工农业生产、国防建设与尖端技术等方面,尤其在高真空、超低温、强腐蚀等条件下,日益显示了它的生命力。但是,聚四氟乙烯的耐磨性较差,而耐磨能力是决定部件使用寿命的一个重要因素,所以本文着重探讨降低磨损率这一关键问题。

据报导,聚四氟乙烯的耐磨性与它的结晶度及结晶尺寸有关,而制品的这些结晶情况主要取决于加工过程的冷却速率,但是,对这三者之间的关系迄今尚有不同的看法^[1~5]。

我们在研制聚四氟乙烯自润滑材料的过程中,应用过多种聚四氟乙烯树脂,发现在同样冷却速率下,不同种树脂制品的抗摩性也不同。国外有人研究过树脂分子量与制品结晶度、结晶尺寸的关系^[6~8],但没有进一步研究它们与抗摩性的关系。

本文对这两组关系初步考察的结果进行了讨论。

结果与讨论

1. 聚四氟乙烯的结晶结构

由于高分子结构的复杂性及其长链的几何不对称、长短不一致、柔软易缠曲等因素,使它难以象低分子一样排列成一个很规整的三维有序的晶体。但是在局部区域,由高分子链集结而成的链束可以有规则地折迭,构成具有三维远程有序点阵结构的晶片。多层晶片通常盘砌成球状,构成球晶;有时并列成带状,构成带晶。所以一般聚合物在通常情况下结晶时,都是生成被许多无序非晶区穿插的多晶聚集体。

聚四氟乙烯是一种带状多晶聚集体,我们在电镜下看到了它的明显的带状结晶及带上并列着的与带长相垂直的条纹,如图1所示。图中条纹间距为 $0.02 \sim 0.05 \mu$,条宽 $0.2 \sim 1.2 \mu$,带晶长度 $15 \sim 25 \mu$ 。我们的考察结果与C. W. Bunn等人^[14]的报导(图2)非常相似,

[⊙] 在本课题研究工作中曾得到孙明栋、薛舜卿、高承勋等同志的协助。

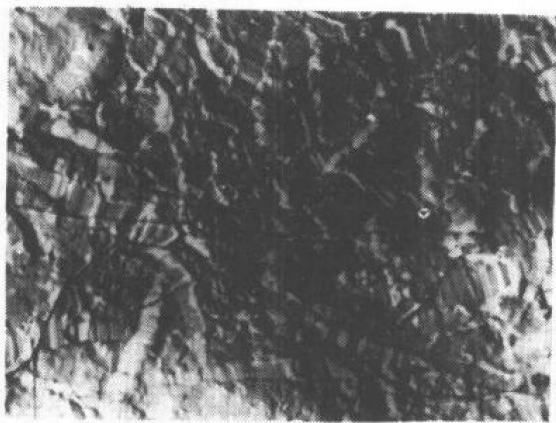


图1 聚四氟乙烯的电镜照片 8000 ×

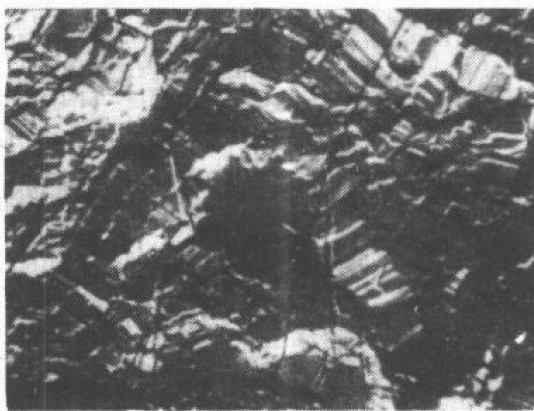


图2 聚四氟乙烯的电镜照片 6000 ×

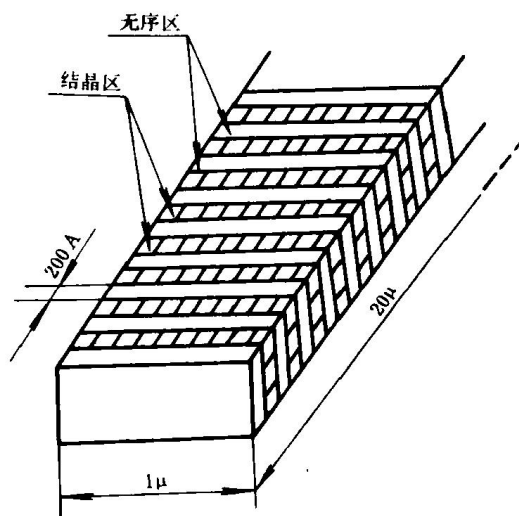


图3 聚四氟乙烯的带晶结构模型

所以接受了他们所提出的聚四氟乙烯结晶结构模型：由结晶薄片与无序非晶区相间组成的带状结晶（图3）。

2. 冷却速率与结晶情况及抗摩性的关系

关于冷却速率对聚四氟乙烯的结晶尺寸与结晶度的影响，前人已作过很多工作。对冷却速率减慢后带晶宽度增大的看法是一致的^[3~5]，而对结晶度的影响的认识却不相同：Lontz等人^[1,2,4]用密度法、红外吸收光谱法、x-射线衍射法等所测出的结晶度是增大的；Speerschneider报导在电镜下看到的结晶度是大致相同的^[3]。

我们用同种聚四氟乙烯树脂制成一批样坯，烧结后经四种速率冷却得到四组样品，用电镜考察冷却速率对样品结晶尺寸的影响，得到的电子显微照片如图4所示。由图4可以看到带晶宽度随冷却速率减慢而增大（详见表1），这与前人的考察结果一致。

我们在电镜中还看到随着冷却速率减慢，样品中无序结构逐渐减少和带晶结构逐渐明显的趋势：冷却速率为36℃/分时，明显的带晶结晶很少；冷却速率为1~2℃/分时，有的电镜视场呈现了很多明显的带晶（图4 a、4 d），有的视场则还不多（图4 e、4 f）；当冷却速率为0.3℃/分时，各个电镜视场都密布了明显的带晶。由于电镜视场很小，故欲全面考察样

品必须广选视场。Speerschneider 在电镜下看到不同冷却速率下样品的结晶度大致相同，他分析其原因是样品的某些位于电镜没有看到的区域，从我们的上述电子显微照片来看，他这个推测是正确的。我们用 x-射线衍射法、红外吸收光谱法、梯度-密度法等测得的结晶度与电镜考察的结果是一致的，见表1所示。

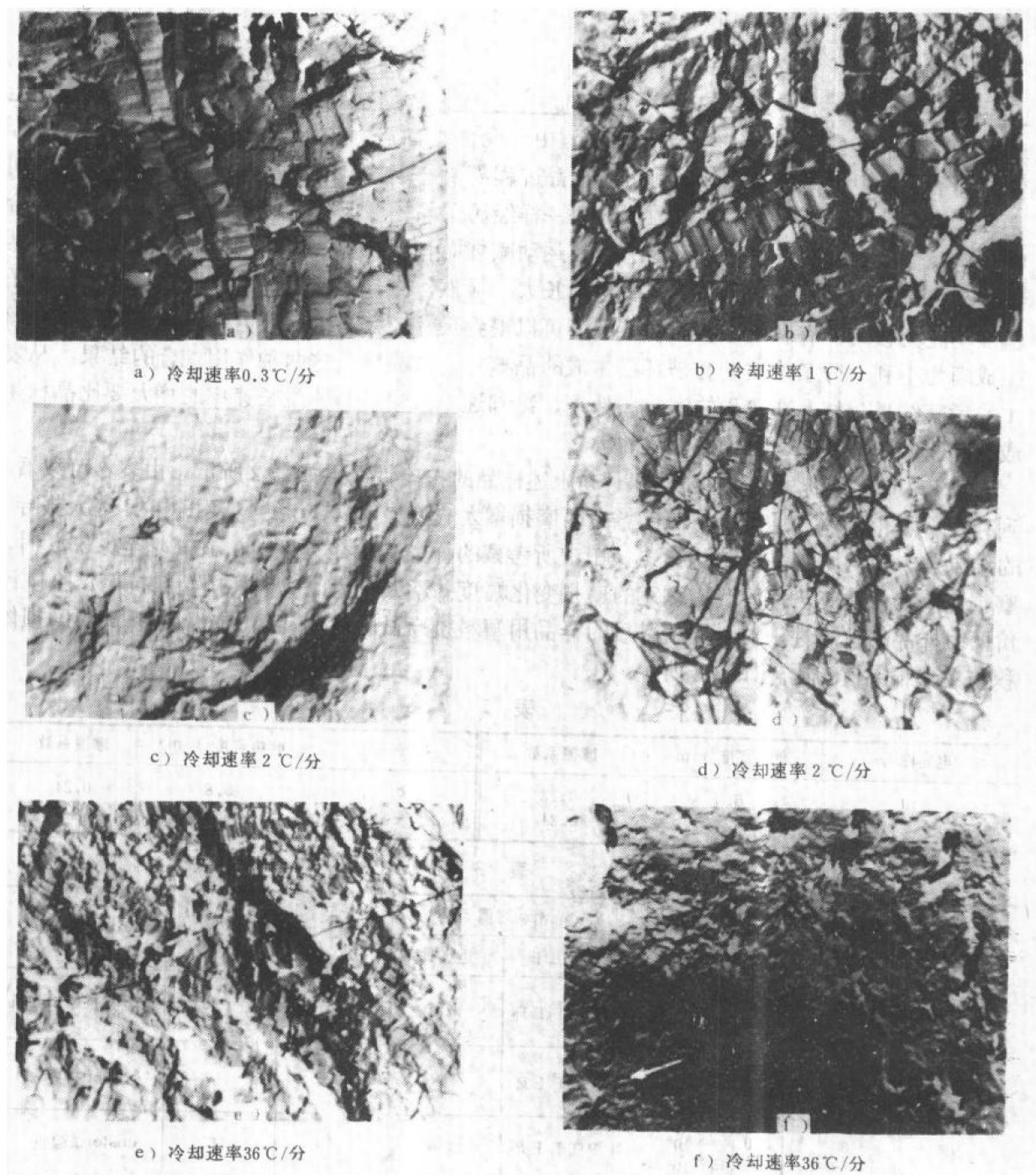


图4 聚四氟乙烯（2号）的电子显微镜相片（8000×）

表 1

电显图号	冷却速率 (°C/分)	带晶宽度 (μ)	带晶含量 (电镜法)	结晶度 %		
				x-射线法	红外法	密度法
4 a、b	0.3	0.5 ~ 1.2	多	—	—	—
4 c、d	1	0.5	中	69.3	69.4	56.6
4 e、f	2	0.5	中	66.0	69.1	58.6
4 g、h	36	0.3	少	62.5	63.9	50.2

上述结果可试用高分子结晶理论解释。由于聚合物的分子链很长以及运动单元的多重性，使高分子从无规则排列到有规则排列的结晶过程需要一定的时间，不象低分子那样可在瞬间完成。但是高分子的结晶过程也象低分子一样经历了晶核生成与晶核生长两个阶段，当聚合物从熔融体冷却到熔点以下时，高分子热运动减弱而有规则排列起来生成晶核，以晶核为基础，高分子进一步有规则排列使晶核逐渐长大。显然，冷却速率较慢、温度较高时，高分子链活动能力较大，有利于晶核生长，因而可以得到尺寸较大的结晶；但是，这种条件对晶核生成颇为不利（分子热运动会破坏已生成的晶核），结晶度是这两种作用综合的结果。从表 1 的考察结果分析，在我们的实验条件下，冷却速率减慢时晶体生长速率的增大要比晶核生成速率的减小显著些，因而结晶度增大。

用Timken磨损与润滑剂试验机评价上述样品的抗摩性结果如表 2 所示，由表 2 可以看到存在着随带晶宽度增大、结晶度增大而磨损增大的趋势，这与 Jost〔4〕及田中〔5〕等人报导的结果是一致的。但是，应该指出，田中所考察的样品的带晶宽度从 0.15μ 增至 0.25μ 时，磨损速率变化达三倍，而我们测定的磨损变化幅度并不大。为此我们又用塑料抗摩试验机评价两组样品的抗摩性，对不同结晶度的样品用塑料抗摩试验机测定单位滑动距离的磨损体积与文献报导值的比较如表 3 所示。

表 2

电显图号	磨痕宽度(mm)	摩擦系数	电显图号	磨痕宽度(mm)	摩擦系数
4 a	6.3	0.23	4 c、d	5.8	0.24
4 b	6.1	0.24	4 e、f	5.4	0.25

表 3

序号	结晶度 (%)	体积磨损/距离 (cm^3/cm)	滑动对偶		载荷 (kgf)	速度 (cm/sec)	试验机名称
			静止件	运动件			
1	71 80	6.59×10^{-7} 8.85×10^{-7}	PTFE 环	钢球	10	96	塑料抗摩试验机
2〔4〕	60 75	2.0×10^{-7} 2.5×10^{-7}	PTFE 环	钢环	5	40	Amsler试验机
3〔4〕	60 75	0.4×10^{-8} 0.45×10^{-8}	PTFE 环	钢环	110	252	Amsler试验机
4〔1〕	54 64 82	0.38×10^{-9} 0.75×10^{-9} 0.79×10^{-9}	PTFE 环	钢环	100	190	

Makinson和Tabor^[15]曾检测出聚四氟乙烯摩擦表面上的转移薄膜为厚度100至400 Å的定向结晶物质；田中^[5、16]也曾检测出摩擦面上的薄膜厚度为300 Å，并算出聚四氟乙烯晶片间滑移的活化能只有7千卡/克分子，从而提出下述磨损机理，即：在磨损过程中，自相邻带晶滑移出来的晶片连续连成纤维和相邻纤维侧向相联而生成薄膜。用这个机理似乎可解释磨损随带晶宽度与结晶度增大而增大的现象。后来他们又检测了厚度仅50 Å的薄膜^[17、18]，这个事实启示我们还需要深入进行摩擦与转移的研究。

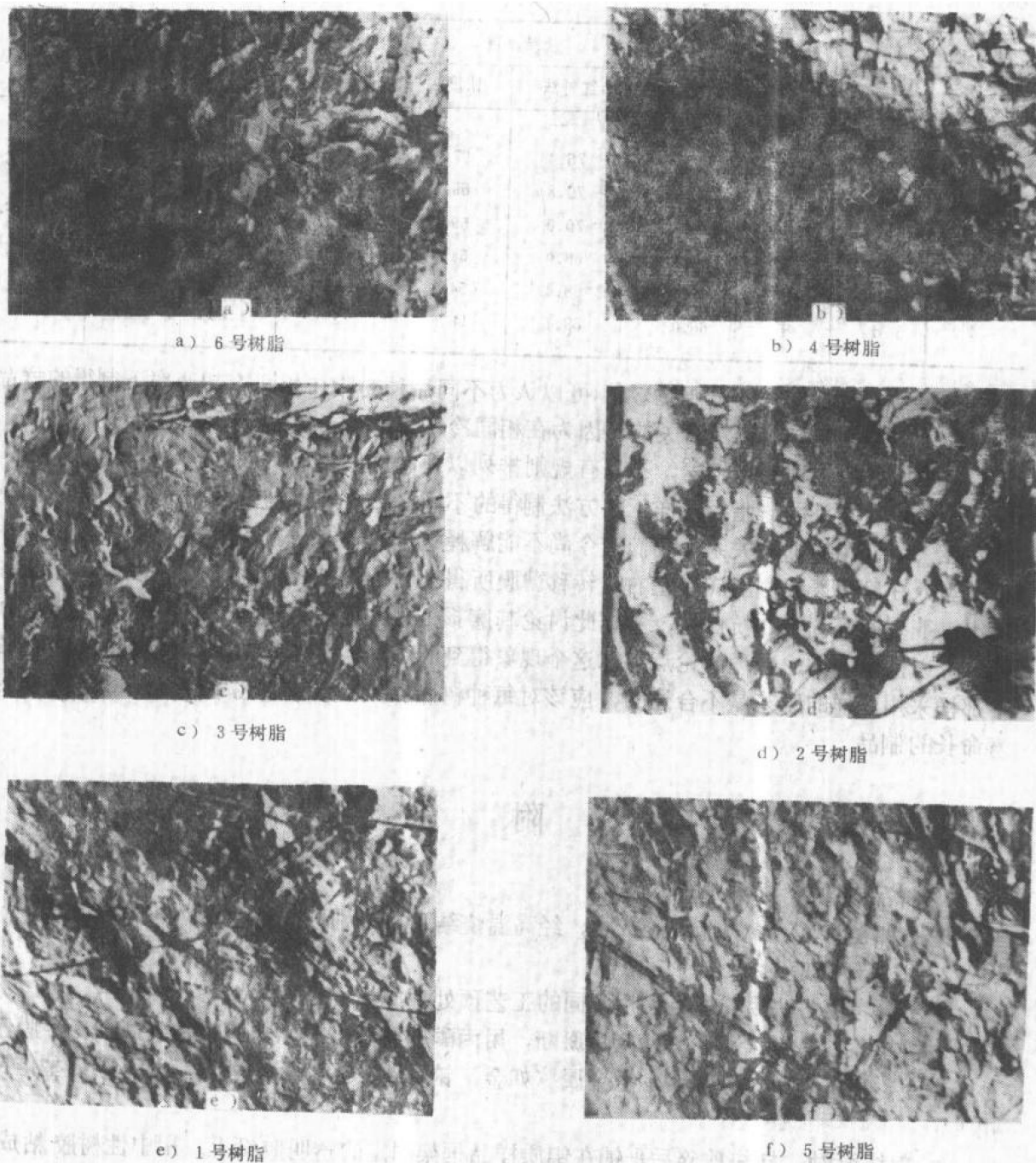


图5 不同种树脂品种的聚四氟乙烯样品的电子显微镜照片 8000×

3. 树脂品种与结晶情况及抗摩性的关系

我们用六种聚四氟乙烯树脂制成样坯, 烧结后以 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 速率冷却得到六组样品。先用电镜考察冷却速率对结晶尺寸与结晶度的影响, 电子显微图片如图 5 所示, 从这些图片看不出带晶宽度的明显差异, 仅见 6 号、4 号树脂的带晶结构较为密集一些; 又用 x-射线衍射法、红外吸收光谱法、熔融热法和梯度-密度法等测定结晶度, 发现经历相同冷却速率的、不同种树脂的、样品的结晶度不同, 将它们用塑料抗摩试验机评价的磨损结果也不同, 见表 4 所示:

表 4

树脂 编 号	电显 图号	带晶含量 (电镜法)	结晶度				磨损 (mm)	摩擦 系数	$\overline{M}_n$ ($\times 10^6$)
			x-射线法	红外法	密度法	熔融热法			
7	—	—	77.0	—	—	—	1.40	0.19	—
4	5 b	多	73.8	76.4	67.8	48	1.50	0.25	1.45
6	5 a	多	74.8	79.8	69.3	52	1.59	0.26	1.24
3	5 c	中	71.5	70.0	59.2	32	1.59	0.27	5.78
5	5 f	中	68.3	68.0	54.8	23	1.68	0.26	18.7
1	5 e	中	66.6	68.4	54.3	25	1.71	0.30	18.7
2	5 d	中	66.0	69.1	58.6	25	1.80	0.30	16.3

参照表 4 所列的数均分子量数值, 可以认为不同品种树脂在相同冷却速率下制得的样品, 其结晶度的差异是与分子量有关的。因为在相同冷却速率下, 样品分子量高者分子链较长, 相互作用较大而活动能力较差, 不易有规则排列以使晶体生长, 所以结晶度较低。从表 4 与图 5 还可以看到不同树脂经同样工艺方法制得的不同样品的磨损与带晶宽度、结晶度之间并不存在上节介绍的那种关系。我们迄今尚不能解释这个有趣的现象, 但这个现象与 Tabor、田中等人在摩擦表面测出 50Å 左右的转移薄膜所得到的启示是相似的: 用结晶度或者结晶宽度来表征聚四氟乙烯的抗摩性, 并据此讨论其磨损机理可能是不适当的, 应进一步进行有关的研究以提出新的、合理的论点。从这个现象得到的另一启示是, 对不同种树脂象目前生产中那样采用同样的工艺是不合适的, 应该对每种树脂探索其最佳工艺条件以获得磨损率小、寿命长的制品。

附 录

1. 样品制备

把七种聚四氟乙烯树脂模压成型, 经高温烧结后, 分别以四种速率冷却制得样品。

2. 样品预处理

供不同考察方法用的样品需用不同的工艺预处理:

电镜考察: 样块经液氮深冷后掰断, 用丙酮把醋酸纤维素薄膜粘覆到断面上, 膜干后小心揭下, 在真空中喷碳并喷少量金属(如金、铂)铸影, 然后溶去薄膜留下碳复型作镜检用^[9];

x-射线衍射: 样块剪碎后平铺在铝质样品框架固定的透明胶纸上, 用中性树胶粘成一

个均匀平面:

红外测定: 用刨床自样块上刨下厚约0.05毫米、面积 14×20 毫米²的薄膜, 用硬纸框架绷平固定:

熔融热与分子量测定: 没有特殊要求, 以洁净细碎为佳:

梯度-密度测定: 1毫米³左右的小块, 为便于在梯度管中辨认, 各组样块可裁成不同的形状, 样块边缘忌有毛边。测定前用溶剂洗净, 用滤纸吸干:

耐磨测定: 用砂纸打磨平整, 用溶剂擦净表面。

3. 分子量、结晶尺寸、结晶度与抗摩性的测定

分子量的测定: 用CDR-1型差动热分析仪测定聚四氟乙烯样品的结晶热。先以5~10℃/分速率把样品加热到熔融温度, 恒温10分钟, 然后以5℃/分速率降温并扫出结晶峰, 用机械求积仪求得峰面积并计算结晶热, 用讷访武的关系式计算数均分子量: $\overline{M}_n = 2.1 \times 10^{10} \Delta H_c - 5.16 [10]$ 。

结晶尺寸与结晶度的测定: 用Zeiss D₂型透射电子显微镜, 在8000倍下考察结晶尺寸与结晶度。用D9c型x光机测得10~20°范围的x-射线衍射图谱, 由此计算结晶度; 用Perkin-Elmer-325型红外光栅分光光度计测得3000厘米⁻¹至300厘米⁻¹范围的红外吸收光谱, 由此计算结晶度; 用CDR-1型差动热分析仪测定熔融热, 由此计算结晶度; 用三溴甲烷-四氯化碳混合液配置的梯度-密度管测定密度并计算结晶度[11]。

抗摩性的测定: 用Timken磨损与润滑剂试验机评价抗摩性时, 采用8.3磅力载荷, 200转/分转速[12]; 用塑料抗摩试验机评价抗摩性时, 采用10公斤力载荷, 1450转/分转速[13]; 两者都在室温下干摩擦。

参 考 资 料

- [1] L. F. Lontz, 《ASLE Trans.》, 6, 276-285 (1963)。
- [2] J. T. Orourke, Proc. of First, Secend and Third Fluorocarbon Design Conf., 15-25 (1966)。
- [3] C. J. Speersneider and C. H. Li, 《J. of Appl. phys.》, 33, 1871-1875 (1962)。
- [4] H. Jost, Plaste u Kautschuk, 18, 436-443, 512-517 (1971)。
- [5] Tanaka, K., etc, Wear, 23, 153-172 (1972)。
- [6] 里川孝臣, ふっ素树脂, 1969。
- [7] D. C. Bassett, Polymer, 15, 721-728 (1974)。
- [8] Suwa, T. (讷访武), J. Polymer Sci. Polymer Phys., 13, 2183-2194 (1975)。
- [9] 齐尚奎、赵家政、胡廷永、孙守镁, 聚四氟乙烯结晶形态的电子显微镜研究(内部资料), 1977。
- [10] Suwa, T., etc., J. Appl. Polymer Sci., 17, 3253-3257 (1973)。
- [11] 胡廷永、孙守镁、李陇旭, 测定聚四氟乙烯结晶度的研究(内部资料), 1978。
- [12] 兰州化物所, 固体抗摩材料, 科学出版社, 1973。
- [13] 兰州化物所, 用吉山四球机改装的塑料抗摩试验机及氟塑料抗摩性的测定(内部资料), 1978。
- [14] C. W. Bunn, J. Polymer Sci., 28, 365-376 (1958)。
- [15] K. R. Makinson, D. Tabor, Proc. Roy. Soc., A281, 49-61 (1964)。
- [16] K. Tanaka, (田中久一郎), Wear, 39, 323-333 (1976)。
- [17] C. M. Pooloyana, D. Tabor, Proc. Roy. Soc. of London, A. 329, 251- (1972)。
- [18] T. Tanaka, (田中久一郎), 《Wear》, 41, 383-398 (1977)。

四球试验与齿轮试验的关系

一坪化工厂

摘要 测定润滑油承载能力的模拟试验方法有多种,最常用的有齿轮试验和四球试验。在合成航空润滑油规格中,英美都规定齿轮承载能力测试项目,而苏联则规定四球试验的测试项目。

从摩擦形式来看:四球机是点接触的纯滑动摩擦,齿轮试验机是线接触的滚动和滑动混合摩擦。后者被认为更接近实际使用情况。究竟这两种试验方法之间是否有一致性?有些人作过研究,所得结论并不一致。为了探讨这个问题,我们采用国产CH-1齿轮试验机和国产MQ-12型四球试验机,对九种航空润滑油进行对比试验,将所得结果进行综合整理,从中寻找四球试验与齿轮试验之间的关系,以加深对这两种试验机的认识。

一、试验设备和方法

1. CH-1 齿轮试验机

CH-1 齿轮试验机是一种封闭力流型的齿轮试验装置。试验齿轮的主要参数如下:

齿数	大齿轮	16	压力角	20°
	小齿轮	40	中心距(毫米)	70
齿形	渐开线直齿		表面硬度(HRC)	58~60
齿宽(毫米)		10	材料	12Cr2Ni4A
模数		2.5	精度	七级

齿轮试验条件:

转速	10,000转/分	运转期间	5分
试油量	2公斤	试油流量	300毫升/分
负荷级别	3公斤力·米	试验温度(°C)	根据油样选定

齿轮试验方法^①是:在规定的试验条件下运转5分钟,停车,观测并记录每个齿轮的磨损擦伤面积,然后增加一级负荷,再运转5分钟,再停车观测记录,如此循环下去,直至齿面破坏达60%以上为止,然后在座标纸上标绘负荷—磨损擦伤面积曲线,采取规定的齿面破坏面积下所对应的负荷值作为所试润滑油的承载能力。各种齿轮试验方法所规定的齿面破坏面积不同,Ryder齿轮试验方法规定为22.5%,而IAE和CH-1齿轮试验方法均规定为60%。在本研究中同时对这两种破坏面积下的“承载能力”指标与四球试验的三种指标进行了对比。

2. MQ-12型四球试验机

该型试验机由济南材料试验机厂生产。试验钢球为虹山机械厂生产的直径为12.7毫米的

Ⅱ级滚铬15轴承钢球。试验方法与SY 2665试验方法^[2]相同。评定指标有临界负荷 (P_K)，烧结负荷 (P_D) 和负荷磨损指数 (ZMZ) 等三种。

二、试验油样

试验中采用了9种涡轮喷气发动机润滑油,其中包括两种Ⅰ型和一种Ⅱ型低粘度($\nu_{100}=3$ 厘沲)合成润滑油,三种Ⅱ型中粘度($\nu_{100}=5\sim 5.5$ 厘沲)合成润滑油,两种Ⅰ型高粘度($\nu_{100}>7.5$ 厘沲)合成润滑油和一种矿物润滑油(8号油),其主要理化指标见表1。

表1 试验油样的主要理化指标及组成

试油类型	试油名称	粘 度 (厘沲)		酸 值 (毫克KOH/克)	主 要 组 成
		100℃	50℃		
Ⅰ型低 粘度油	4109	3.74	11.22	0.04	双酯加新戊基多元醇酯及抗磨、抗氧、抗腐蚀添加剂等
	325	3.61	10.22	0.08	癸二酸双酯加五氯联苯等添加剂
Ⅱ型低 粘度油	4103	4.12	13.47	0.04	新戊基多元醇酯加抗磨、抗氧、抗腐蚀等添加剂
Ⅱ 型 中 粘 度 油	4106	5.05	17.42	0.06	新戊基多元醇酯加抗磨、抗氧、抗腐蚀等添加剂
	4050	5.15	17.68	0.03	新戊基多元醇酯加复酯和抗磨、抗氧、抗腐蚀等添加剂
	2380	4.95	17.00	0.18	三羟甲基丙烷酯加三甲酚磷酸酯等添加剂
Ⅰ型高 粘度油	4104	7.46	24.13	0.04	双酯加复酯加抗磨、抗氧、抗腐蚀等添加剂
	98	7.49	23.79		双酯加聚醇醚酯及五氯联苯等添加剂
矿物油	8号	2.79	8.81	0.04	矿物油

三、试验结果和结论

1. 试验结果

在各种相同温度下(室温、140℃、175℃、200℃),分别对各种试验油样同时进行齿轮试验和四球试验,所得结果见表2和图1、2。表2中 $L_{60\%}$ 和 $L_{22.5\%}$ 分别表示齿面破坏60%和22.5%时所对应的负荷。

从表2看出,当试验温度升高时,齿轮承载能力和四球试验的三个指标均相应降低,无论是Ⅰ型油(4109油)、Ⅱ型油(2380油),还是矿物油,均不例外。

从图1和图2可以看出,齿轮承载能力($L_{60\%}$ 和 $L_{22.5\%}$)与 P_K 及 P_D 的相关性较好,与 ZMZ 的次之。

为了检验齿轮试验结果与四球试验结果之间的相关性,按回归分析方法^[3]进行了计算,计算步骤见附录,计算结果见表3。

从表3可以看出,无论是 $L_{60\%}$ 或 $L_{22.5\%}$ 与 P_K 、 P_D 和 ZMZ 的相关系数均大于显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,相关系数达到显著的最小值 $r_{0.05}=0.553$,表明CH-1齿轮试验结果

($L_{60\%}$ 、 $L_{22.5\%}$)与四球试验结果 (P_K 、 P_D 、 ZMZ) 之间有显著的一致性。

表2 齿轮试验和四球试验结果

序号	油样名称	试验温度 ($^{\circ}\text{C}$)	齿轮承载能力 (公斤力/厘米 2)		P_K (公斤力)	P_D (公斤力)	负荷磨损指数 ZMZ (公斤力)
			$L_{60\%}$	$L_{22.5\%}$			
1	4109	200	240	167	37	100	15.9
2	4109	175	275	143	40	115	15.4
3	4109	常温	640	279	62	141	26.2
4	325	200	237	171	40	100	17.7
5	4103	200	360	200	34	126	13.5
6	4106	200	446	226	41	115	16.3
7	4050	200	478	242	32	126	13.2
8	2380	200	354	202	38	115	14.3
9	2380	175	374	210	42	126	14.8
10	4104	140	528	260	50	141	22.3
11	98	140	532	275	50	148	26.5
12	8号油	140	139	92	30	100	12.0
13	8号油	常温	185	117	40	126	17.0

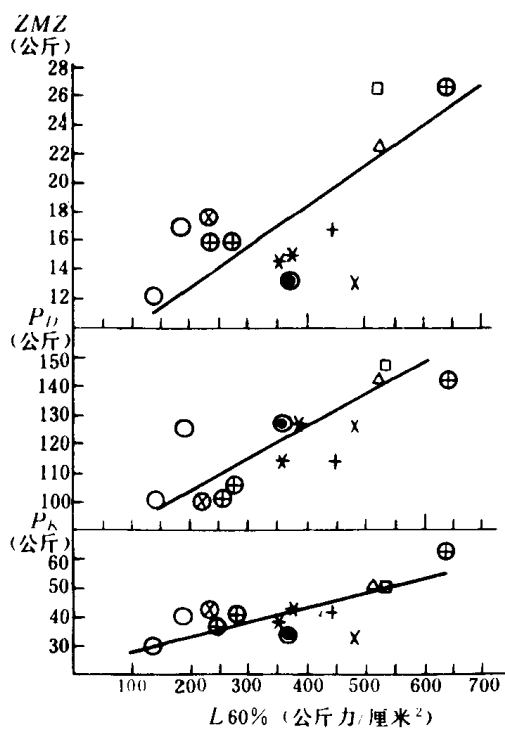


图1 $L_{60\%}$ 与 P_K 、 P_D 、 ZMZ 的散点图

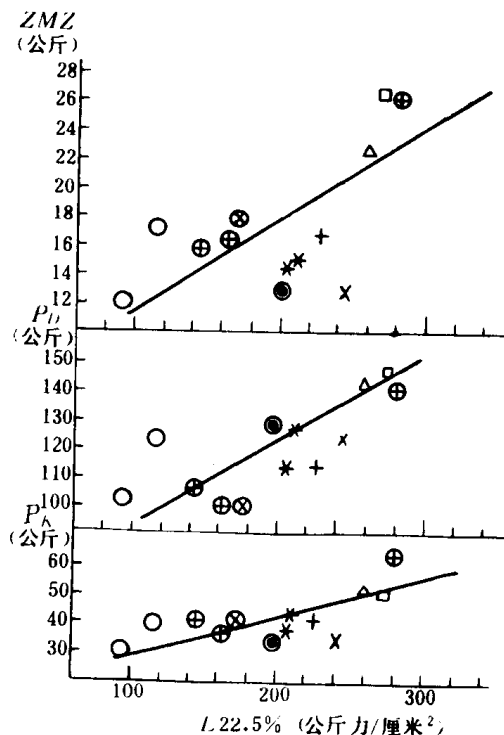


图2 $L_{22.5\%}$ 与 P_K 、 P_D 、 ZMZ 的散点图

表3 齿轮试验与四球试验结果的相关系数

相关系数序号	回 归 变 量	相关系数值
r_1	$L_{60\%}-P_K$	0.707
r_2	$L_{60\%}-P_D$	0.786
r_3	$L_{60\%}-ZMZ$	0.667
r_4	$L_{22.5\%}-P_K$	0.659
r_5	$L_{22.5\%}-P_D$	0.747
r_6	$L_{22.5\%}-ZMZ$	0.659
$r_{0.05}$	显著水平最小值	0.553

2. 结论

在CH-1齿轮试验机
和MQ-12四球试验机上对
五个不同类型的九种航空润
滑油进行了对比试验, 所得
结果表明, 所试润滑油的齿
轮承载能力与四球试验结果
(P_K 、 P_D 及 ZMZ)之间有
显著的一致性。

附录 相关系数计算

(1) $L_{60\%}$ 与 P_K 的关系 设 $X = \frac{L_{60\%}}{100}$, $Y = P_K - 40$

序号	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	2.40	-3	5.76	9	-7.20
2	2.75	0	7.56	0	0
3	6.40	22	40.96	484	140.80
4	2.37	0	5.62	0	0
5	3.60	-6	12.96	36	-21.60
6	4.46	1	19.89	1	4.46
7	4.78	-8	22.85	64	-38.24
8	3.54	-2	13.53	4	-7.08
9	3.74	2	13.99	4	7.48
10	5.28	10	27.88	100	52.8
11	5.32	10	28.30	100	53.2
12	1.39	-10	1.93	100	-13.9
13	1.85	0	3.42	0	0
Σ	47.88	16	204.65	902	170.72

$$L_{xx} = \Sigma X^2 - \frac{1}{N} (\Sigma X)^2 = 204.65 - 176.38 = 28.27$$

$$L_{yy} = \Sigma Y^2 - \frac{1}{N} (\Sigma Y)^2 = 902 - 19.69 = 882.31$$

$$L_{xy} = \Sigma XY - \frac{1}{N} (\Sigma X)(\Sigma Y) = 170.72 - 58.93 = 111.79$$

$$r_1 = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx} \cdot L_{yy}}} = \frac{111.79}{157.97} = 0.707$$

(2) $L_{60\%}$ 与 P_D 的关系 设 $X = \frac{L_{60\%}}{100}$, $Y = \frac{P_D - 100}{10}$

序号	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	2.40	0	5.76	0	0
2	2.75	1.5	7.56	2.25	4.13
3	6.40	4.1	40.96	16.81	26.24
4	2.37	0	5.62	0	0
5	3.60	2.6	12.96	6.76	9.36
6	4.46	1.5	19.89	2.25	6.69
7	4.78	2.6	22.85	6.76	12.43
8	3.54	1.5	13.53	2.25	5.31
9	3.74	2.6	13.99	6.76	9.72
10	5.28	4.1	27.88	16.81	21.65
11	5.32	4.8	28.30	23.04	25.54
12	1.39	0	1.93	0	0
13	1.85	2.6	3.42	6.76	4.81
Σ	47.88	27.90	204.03	90.45	125.88

$$L_{xx} = \Sigma X^2 - \frac{1}{N} (\Sigma X)^2 = 204.65 - 176.35 = 28.30$$

$$L_{yy} = \Sigma Y^2 - \frac{1}{N} (\Sigma Y)^2 = 90.43 - 59.88 = 30.55$$

$$L_{xy} = \Sigma XY - \frac{1}{N} (\Sigma X)(\Sigma Y) = 125.88 - 102.76 = 23.12$$

$$r_2 = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx} \cdot L_{yy}}} = \frac{23.12}{29.40} = 0.786$$

(3) $L_{60\%}$ 与 Z_{MZ} 的关系 设 $X = \frac{L_{60\%}}{100}$, $Y = \frac{Z_{MZ} - 14}{2}$

序 号	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	2.40	0.96	5.76	0.92	2.30
2	2.75	0.71	7.56	0.50	1.95
3	6.40	6.08	40.96	36.97	38.91
4	2.37	1.86	5.62	3.46	4.41
5	3.60	-0.24	12.96	0.06	-0.86
6	4.46	1.14	19.89	1.30	5.08
7	4.78	-0.41	22.85	0.17	-1.96
8	3.54	0.13	13.53	0.02	0.46
9	3.74	0.40	13.99	0.16	1.50
10	5.28	4.13	27.88	17.06	21.81
11	5.32	6.25	28.30	39.06	33.25
12	1.39	-1.03	1.93	1.06	-1.43
13	1.85	1.48	3.42	2.19	2.74
Σ	47.88	21.46	204.65	102.93	108.16

$$L_{xx} = \Sigma X^2 - \frac{1}{N} (\Sigma X)^2 = 204.65 - 176.38 = 28.27$$

$$L_{yy} = \Sigma Y^2 - \frac{1}{N} (\Sigma Y)^2 = 102.93 - 35.43 = 67.50$$

$$L_{xy} = \Sigma XY - \frac{1}{N} (\Sigma X)(\Sigma Y) = 108.16 - 79.04 = 29.12$$

$$r_{3'} = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx} \cdot L_{yy}}} = \frac{29.12}{43.66} = 0.667$$

(4) $L_{22.5\%}$ 与 P_K 的关系 设 $X = \frac{L_{22.5\%}}{100}$, $Y = P_K - 40$

序 号	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	1.67	-3	2.79	9	-5.01
2	1.43	0	2.05	0	0
3	2.79	22	7.78	484	61.38
4	1.71	0	2.92	0	0
5	2.00	-6	4.00	36	-12.00
6	2.26	1	5.11	1	2.26
7	2.42	-8	5.86	64	-19.36
8	2.02	-2	4.04	4	-4.04
9	2.10	2	4.41	4	4.10
10	2.60	10	6.76	100	26.00
11	2.75	10	7.56	100	27.50
12	0.92	-10	0.85	100	-9.20
13	1.17	0	1.37	0	0
Σ	25.84	16	55.50	902	71.63