

第一届金属耐磨材料学术 会议论文选集

(电力机械专集)

中国金属学会金属耐磨材料学组
《电力机械》编辑部 编

21584/30

中国金属学会金属耐磨材料学组征文通知

中国金属学会特殊钢学委会金属耐磨材料学组82年10月工作会议决定83年10月在山东烟台地区召开第二届金属耐磨材料学术报告会，现将征文范围和注意事项通知如下：

一、征文范围

- 1、耐磨铸铁和合金铸铁方面研究论文或报告
- 2、奥氏体高锰钢方面研究论文或报告
- 3、合金钢磨料磨损研究论文或报告
- 4、合金钢粘附磨损金属摩擦副干磨损，如切削刀具、冷热成型模具、缸套、销套、齿轮、阀门等用钢或合金的磨损研究论文或报告
- 5、表面金属耐磨材料（如复合层、镀层、焊层、渗层）研究论文或报告
- 6、机械设备金属工件磨损及磨损机理研究论文
- 7、磨损测试设备、测试方法研究报告
- 8、特约专题学术报告（另行约请）

二、注意事项

- 1、请在83年5月底前将论文题目和摘要（500字左右）用挂号信寄到“北京西外钢铁研究总院六室转金属耐磨材料学组”。
- 2、请在83年8月底前将论文复制150份挂号寄会议秘书组（具体地点另行通知）
- 3、第二届金属耐磨材料学术会议具体报到地点和日期另行通知

中国金属学会特钢学委会

一九八二年十月二十五日

前言

摩擦学是六十年代发展起来的一门技术科学。金属耐磨材料和金属磨损是摩擦学的一个重要研究内容。

金属磨损与金属腐蚀、金属疲劳相比，虽很少引起灾难性危害，但磨损造成的经济损失却是相当惊人的。例如，由于磨损引起机械设备运转效率降低、工件更新或维修频繁，能源消耗增加，等等。据美国材料政策委员会 1977 年测算，磨损造成的国民经济损失约 150 亿美元/年。西德技术科学部估测磨损造成的损失达 100 亿马克/年。

我国工业生产中磨损造成的经济损失也是相当大的。仅据 70 年代一机部所属汽车、拖拉机和内燃机三个行业的调查，以及近年冶金矿山、建材、电力、煤炭和农机不完整的统计，由于工件的磨料磨损年消耗钢达 150 万吨。如果再考虑机械设备的其他类型磨损造成的经济损失，那末，金属材料的消耗就更为惊人。由此可见，积极开展金属耐磨材料和磨损的研究对国民经济的发展是有重要意义的。

近年来，国内对金属耐磨材料和磨损进行了不少研究工作，取得一定成绩。为开展这方面的经验交流和学术活动，在中国金属学会的领导下金属耐磨材料学组于 1981 年 12 月召开了金属耐磨材料第一届学术会议。会上宣读和交流论文 80 多篇。在论文作者和作者所在单位的支持下，我们汇编了这本《金属耐磨材料第一届学术会议论文集》。

本论文集内容包括：国内外金属耐磨材料和磨损机理研究综述，以及国内耐磨合金钢、耐磨合金铸铁、表面硬化处理、磨损测试、磨损机理等方面的研究新成果。

由于编者水平有限，文集中可能有缺点错误，恳请读者指正。

编者

一九八二年七月

2k554/30

目 录

前 言

材料磨损研究的某些动向.....	陈南平等 (1)
关于磨料磨损研究中的几个基本问题.....	邵荷生 (19)
影响金属粘着磨损的若干因素.....	张 清 (30)
稀土元素在高锰钢中应用的研究.....	山东省冶金研究所 山东冶金机械厂 (38)
奥氏体锰钢在非强烈冲击下使用寿命提高的研究	吉林工业大学铸造教研室 长春发电设备修造厂 (46)
高碳高锰钢弥散硬化处理的研究.....	杨安石等 (55)
钒和钛在高锰钢中的存在形式及分布.....	刘 森 (60)
ZG31Mn2Si 履带板的研究	陈守煦等 (64)
30MnSiTi 耐磨铸钢的研究	杨瑞林等 (70)
合金铸钢耐磨性的研究.....	全建民等 (77)
ZG42CrMn2SiMo 耐磨钢的研究.....	景焕然等 (82)
ZG75Cr2MnNiMo 耐磨钢空心球的研制及其使用效果.....	王金新等 (87)
Cr5 Cu钢的由来及其发展.....	上海材料研究所 (94)
30Cr—Mn—Si—Mo—Ti 耐磨钢研究.....	沈阳铸造研究所耐磨钢组 (100)
在松散磨料条件下钛含量对钢耐磨性的影响.....	毛志远等 (103)
磨料磨损的摩擦力和能量消耗率初步探讨.....	张 清等 (111)
渗碳渗硫化学热处理与磨损行为的研究.....	高彩桥等 (119)
离子氮化层组织与磨料磨损的研究.....	王振焕等 (127)
几种合金钢的干磨损.....	冶金部钢铁研究总院 (133)
磨损产物的 SEM 研究	高彩桥等 (137)
ZG2Mn10Ti 组织结构的分析与研究	安志义等 (141)
ZG70Mn2MoRe 低合金耐磨钢的热处理.....	汤尧坤 (147)
风扇磨煤机 ZG50Mn2 冲击板磨损分析	周长荣等 (152)
钢轨的磨损、波浪磨损和剥离.....	李家驹等 (159)
风扇式磨煤机冲击板复合铸造的研制	上海电力修造总厂 上海后方 325 电厂 上海电力专科学校 (164)
高铬白口铁的研制与应用.....	西安交通大学铸造教研室 西安电力机械厂耐磨研究所 建材部建材研究院水泥研究所 (171)
高铬白口铁的结晶冷却速度对其抗磨性的影响.....	杨为慈 (176)
高铬铸铁高炉钟斗.....	陈振民 (185)
硼对白口铸铁的硬度、韧性及抗磨性的影响.....	陈 明等 (191)
中锰白口铸铁的合金化及稀土变质处理.....	北京钢铁学院白口铸铁科研小组 (198)
钒白口铸铁强韧化的研究.....	姜振雄等 (204)
硼系合金白口耐磨铸铁的研究	吉林工业大学耐磨铸铁课题组 长春发电设备修造厂科研设计科 (212)
锻造强韧性白口铸铁的研究.....	姜振雄等 (221)

高温气体软氮化对灰铸铁耐磨性的影响.....	孙一唐等 (230)
钨对钨系白口铸铁碳化物的影响.....	朴东学 (236)
白口铸铁磨料磨损的磨屑形成过程的探索.....	姜振雄等 (242)
卧式销一环摩擦磨损试验机.....	高彩桥等 (249)

《论文摘要》目录

高锰钢沉淀强化处理工艺的研究.....	北京钢铁学院 首钢机械厂 (29)
高锰钢的再合金化.....	刘 森 (54)
含 V、Ti、Mo 的 ZGMn13 钢冲击板.....	张敬澈 (59)
稀土、硼对高锰钢组织和性能的影响.....	赵勇等 (140)
ZGMn13Cr2 钢耐磨件的研究.....	景焕然等 (126)
碱性工频炉熔炼高锰钢.....	吕尚谋 (76)
ZG70Mn2MoRe 低合金耐磨钢的研究.....	臧怀德等 (158)
球磨机衬板新材质——低合金耐磨铸钢试验研究.....	郭宝璠 (163)
推土机刀片用钢的研究.....	胡增文 (211)
含 Cu、Ti、V 的 Cr15—Mo3 白口铸铁在杂质泵上的应用	一机部沈阳铸造研究所 石家庄水泵厂 (184)
提高履带板使用寿命的措施.....	成书茂等 (261)
中锰稀土镁球墨铸铁球试用研究.....	江西省电力修造厂 (254)
窑后高压喂料泵泵壳另件新材质试验.....	山东铝厂机械厂 (255)
铬钼铜马氏体白口铸铁的试验研究	西安电力机械厂耐磨件试制组 西安交大耐磨课题组 (260)
硼耐磨铸铁生产灰渣泵和钢管轧辊	长春发电设备修造厂 吉林工业大学铸造教研室 (63)
提高大负荷抛丸机叶片使用寿命的研究.....	张珉等 (256)
高钨白口铸铁铲片试验.....	朴东学 (257)
Cr—Mo 合金白口铸铁磨环的研制.....	杜建华等 (259)
稀土镁中锰铁球生产与应用.....	辽宁桓仁铜锌矿机修厂 (256)
耐磨白口铸铁磨球的研制.....	浙江大学 浙江电力修造厂 (258)
关于 E 型磨碾磨部件用材的探讨.....	胡永康 (18)
风扇磨冲击板磨损分析.....	余林森 (255)
铜基湿式 7924—401 粉末合金耐磨材料的研制.....	常朝宣 (257)
湿磨料磨蚀试验方法及其机理探讨.....	王琼礼等 (258)
国内外抗磨钢铁材料的应用和研究.....	王兆昌 (259)
磨损失效分析.....	王琼礼 (260)
磨料磨损理论现状.....	洛阳矿山机械研究所 (261)
磨料磨损.....	刘凤恩等 (262)
影响低合金耐磨钢的冶金因素.....	汤尧坤 (262)

材料磨损研究的某些动向

陈南平 白新桂

(清华大学)

自从 1966 年 Jost 报告^[1]发表,把摩擦、润滑和磨损这几个互相关连的领域综合成一门学科,定名为“摩擦学”(Tribology)以来,这个与人类生活和生产活动有密切关系的问题受到了人们空前的重视。Jost 认为英国如能广泛应用当时的摩擦学知识,那另件更换和避免故障损失等费用每年可节约 5 亿英镑以上(约为当时英国国民生产总值的 1%)。后来美国、苏联、西德、日本相继发表的类似数据表明都有涉及每年成百亿美元以上的损失问题。据统计,在各类磨损造成的经济损失中,磨料磨损占 50%,粘着磨损占 15%,其它如冲刷磨损、微动磨损、腐蚀磨损等各不足 10%。我国的初步统计,在建材、冶金矿山、农机、煤炭、电力上述五个部门,每年因磨料磨损消耗的备件用钢就超过百万吨。目前,我国这方面的损失可能会远远超过英国当时国民生产总值 1% 的水平,这不能不吸引人们的注意力。Rigney^[2]最近谈到:“大家公认腐蚀是一个大问题,涉及面宽,经济上损失惊人。然而,实际上摩擦学所涉及的面可能更宽而损失要比腐蚀约大五倍以上,但是目前人们对摩擦学的了解比起腐蚀来说要少得多”。这也就是近十年来,国际上摩擦学研究得到大力发展的根本原因,特别在能源危机问题提出后,这个问题就更加受到人们的重视。

应该说摩擦学是一门综合性学科,它涉及化学、物理、材料科学、流体和固体力学等许多学科领域。同时,要研究的还是一个系统的动态过程。因此,它是一个很复杂的问题。这也就是为什么史前时期,人类就知道摩擦现象及其应用,直到本世纪 60 年代中期才提出这门学科的原因。

磨损是摩擦学形成中进展较晚的一个领域。第一届专门的材料磨损国际会议是 1977 年召开的,现每二年召开一次。^[3]有人认为在摩擦学这个领域中的研究工作,今后应把重点转移到研究材料的磨损问题上来,而且磨损很可能从摩擦学中分离出来,成为新的分支学科^[4]。现就近年来磨损研究中某些动向作一简要介绍。

一、磨损试验设备和方法

1-1 磨损试验设备

磨损要研究的内容是二个相对运动物体工作面间变动情况(二体磨损),工作面间有时还有其它物体(可以是外加的,也可以是发生物理或化学变化的磨损产物,这就变成多体磨损),也可因有不同的工作条件,如载荷状态与大小,滚动或滑动的相对速率,环境温度与介质,工作面的表面状态等等而对工作面间的变动发生影响。因此,材

料的磨损率($\dot{w}$) (单位行程距离或时间的重量或体积损失)是反映了某个磨损系统的特性,在该系统中,一个因素的变动都可以导致材料磨损率的变化。所以材料的磨损率不是材料固有的特性。真实反映材料磨损率的应是现场试验的统计数据。但是,人们希望能在有控制的条件下,去研究该系统中某个主要因素的影响,则可进行实物模拟试验,这有二种情况:一种就是用实际机械或其模拟装置控制运行,这可大大避免了现场试验中许多不可控因素的影响,试验重现性好,而且缩小了现场试验结果的分散性。另一种是把磨损条件抽象成几种简单形式,例如常用的销—盘、柱—柱、块—环及胶轮磨损试验机等,这是在一定程度上模拟了几种实物磨损情况,实验结果有可能反映现场磨损情况,但也有可能相差很大。这种试验机的好处是易于控制运行,易取得对比性数据,便于机理性研究。

1—2 磨损研究方法

标志磨损的特征参量为磨损率 $\dot{W}$ (或其倒数为耐磨性 $\dot{W}^{-1}$),通常以工件或试样的单位行程失重或体积的变化来表示。实际工件也可以用工作寿命(小时或吨位工作量)来表示。要对磨损过程中的磨损量进行连续性测量还有困难,有人在销盘试验中,在销的轴向加位移传感器,说可以在磨料磨损试验中销位置不断下降去反映磨损量。但在粘着磨损试验中销位置则是周期性上下升降的^[5]。有人在有流动润滑油情况下,曾利用同位素进行连续测量。近年来已使用铁谱仪(Ferrography),对黑色金属,可以把磨屑粒子按尺寸、形状及磁性分类,也可用以进行连续监测^[2]。这些测试方法可以敏感发觉磨损机制的变化,但都无法反映摩擦副配对材料间的相互转移(粘附)。

近年来普遍认为,作为完整的磨损试验去弄清磨损原因,首先,应注意观察与检验样品的表面、表层及磨屑。即用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜来观察样品的原始表面情况和表层的组织状态(剖面)以及磨损后的表面和表层的变化(还应注意把跑合态与稳态的情况区分开考虑,跑合时是过渡态,稳态才说明正常的磨损情况。)磨损后的表面可观察到表面划伤、点蚀、犁沟、韧性撕裂、氧化色和氧化物,粘附的配对材料等等。表层的观察可提供变形层深度、组织结构的变化,是否有相变,判断形变的程度、回复和再结晶现象等。还可通过测定显微硬度的变化去说明形变、相变的程度。通过微区分析研究成分变化以及磨屑形成前期的特征,如位错组态、微孔、微裂纹等。对磨屑的观察除形状、尺寸、颜色外,也应观察内部组织结构上的变化,藉以综合判断磨屑的形成过程。总之,材料科学研究方法中的组织结构观察,微区成分确定、表面极薄层的成分分析,微区性能测定等手段,即金相(光学显微镜和电镜),x射线衍射(电子衍射),探针、俄歇谱仪、PSEE(光激外逸电子技术)、显微硬度计、磁性测定仪等,都是非常有用的工具^[5]。从耐磨材料的选择到改善材料的耐磨性,最核心的问题就是要分清在该磨损系统条件下,造成磨损的主要机制是什么,例如是切削还是疲劳?是粘着磨损还是氧化腐蚀等等,搞清了主要症结所在,才能提出针对性的措施,有效地去解决问题。

在磨损研究中,如表面温度的量测,由于接触面的微凸体及其变形部分的微区都在表层,直接量测不好解决。有人用离表面一定距离埋热电偶去测,然后再根据热传导去

估算〔7〕。或利用透明材料用红外线法测量〔8〕。这些都有一定的局限性。但是，对表层和磨屑的组织结构分析和表面氧化色的观察，可能倒还真实反映了过程中所经历的最高温度。当然，目前要精确定量的测定还是困难的，用光敏涂料测温可能是有效的方法。要想阐明组织结构或材料其它性能与耐磨性的相关关系时，离开了工作温度去讨论（现在通常如此），终究是个大问题。再从磨损过程的实质看，涉及的是具有微凸体的材料表层微区的变形、断裂（应该还有物质迁移）的问题，由于材料中每颗晶粒的各向异性（变形层也会出现织构），一般工程材料又都是复相组织。因此，如何处理微区的应力分布，导致的形变和开裂也是一个困难的课题。这些可能都是深入研究过程中有待解决的关键技术。

二、滑动条件下的摩擦和磨损

2-1 摩擦〔9,10,2〕

相互接触的物体双方，如发生相对运动便会有摩擦现象。Bowden 和 Tabor 提出，在滑动摩擦情况下，决定摩擦系数 μ 有三个因素：表面光洁度，犁沟和粘着效应。由表面光洁度考虑，则摩擦力就是要克服双方接触表面微凸体间的互锁作用，也就是说在刚性情况下摩擦力系指能把一个表面的微凸体抬到超过另一表面的微凸体的力。如果锥形微凸体的平均斜率是 θ ，

则：

$$\mu_r = \tan \theta$$

由犁沟效应看，是一方硬而尖的微凸体压入软的对方表层，在滑动时把对方软金属推挤到二侧形成犁沟（也可以有切削），这样可以设想摩擦力就是软金属压入硬度和犁沟截面积的乘积，由此可以得到下式：

$$\mu_p = \frac{\tan \theta}{\pi}$$

对粘着效应来说，摩擦力就是要能剪切开由于微凸体间相互接触而形成的粘结状态。在极端情况下：

$$\mu_a = \frac{S}{P}$$

S 代表粘结部位的平均剪切应力，材料愈软，S 值愈低。P 代表对软材料的压入硬度。

如上所述，若把在滑动摩擦系统中这三种可能性都考虑在一起，分别用 f_r ， f_p ，和 f_a 代表光洁度、犁沟及粘着三种模式所占的百分数，则该系统的摩擦系数应为：

$$\mu = \mu_r \cdot f_r + \mu_p \cdot f_p + \mu_a \cdot f_a \quad (1)$$

同时

$$f_r + f_p + f_a = 1 \quad (2)$$

f_e 表示接触面上弹性变形部分所占百分数。

但是由 (1) 计算的 μ 值约为 0.2, 实测值通常为 0.3~1.2 其差别太大, 后来把粘着部分的效应, 用滑移线场理论对此处的塑性变形进一步做了分析, 得到

$$\mu_a = \frac{1}{(1 + \frac{\pi}{2} - 2\theta)}$$

其中 θ 是微凸体最大倾角。这样 μ_a 值可为 0.4~1.0, 与实测值接近。Rabinowicz 曾建议考虑用粘着能量去修正 μ_a , 在体心立方和面心立方的纯金属中, 用他的修正值计算的 μ_a 与实测值相近。

Suh 等⁽¹¹⁾ 利用锥体单磨粒进行磨损试验测得的 μ 值比 $\tan\theta/\pi$ 要大 (此值应只包括 μ_a 与 μ_p 二项), 其实测值与 Goddard—Wilmana 的计算值符合得较好, 该式是:

$$\mu = \frac{2}{\pi} (\tan\theta + \frac{S}{P} \sec\theta) \quad (3)$$

由此去推论, μ_p 值应比 $\tan\theta/\pi$ 大, 可能是 $\frac{2 \tan\theta}{\pi}$ 。

由上述讨论可看到, 摩擦系数终究主要只是与变形有关的问题。还应该注意的是摩擦系数还可能受以下几种情况的影响。例如, 在跑合阶段, 单行程与重复行程时测的数据不一样。因之提供的数据应是稳态时的情况。环境介质也有影响, 例如都是在硬钢的摩擦副中, 在大气介质中典型的 μ 值约为 0.6, 而在真空中 μ 值要高得多。石墨和石墨的配对件在大气中 μ 值约为 0.1, 而在很干燥的大气中可高达 0.5 以上。这肯定是摩擦表面由于介质条件有了变化的缘故。就象都是硬钢摩擦副, 在大气介质中 μ 值比真空中要低得多, 可能就是与表面有氧化物层有关系, 这样就降低了粘着效应。但另一种情况, 正如很多试验所证明, 在硬材料与软材料配对的摩擦副中, 如把硬材料换成另外任一种硬材料时, 尽管它们之间的键合情况有了变化, 但 μ 值的变化总是很小的⁽²⁾。这就是说粘着力与键合情况无关。为什么是这样, 目前尚不清楚。

2-2 磨损^(8,2)

磨损形式一般可分成五类, 即磨料磨损、粘附磨损、腐蚀磨损、表面疲劳及冲击现象 (包括固体和液体的冲蚀) 导致的磨损⁽²⁾。磨损现象主要是出现磨屑 (在粘附磨损中还有物质迁移粘附现象)。磨屑的形成, 就是部分材料从母体上剥落或断裂, 断裂方式可以是被切割、反复应变或循环应力导致的疲劳 (即包括低周疲劳和高周疲劳), 韧性撕裂和脆断, 腐蚀产物的剥落、局部熔化等。

对磨损率, Archard 根据微凸体的粘附磨损的简化模型⁽¹⁾, 提出:

$$\dot{\omega} = k' \frac{L}{3 P_0}$$

$\dot{\omega}$ 为单位行程体积磨损量 $\left(\frac{dv}{dl}\right)$, 即磨损率;

L 为接触面上的外加载荷;

k' 为比例常数;

p₀ 为材料的屈服压力。对金属材料 p₀ 与压痕硬度 (H) 成正比。即 $H \approx 3p_0$ 。这样, 上式可写成:

$$\dot{\omega} = k \frac{L}{H} \quad (4)$$

其中, k 为磨损系数。

对磨料磨损, 由硬的微凸锥体 (假定就是磨粒硬粒子), 压入硬度为 H 的较软表面, 滑动时切出一道沟痕的模型出发, 也可以导出与 (4) 式一样的简化公式。

在金属滑动磨损实验测定中可看到, 在轻微磨损的情况, 即接触面上氧化层不被破坏时, $k = 10^{-7} \sim 10^{-8}$; 在严重磨损的情况下, 即发生粘结、犁沟, 切削时, k 值可增大到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。所以, 磨损系数 k 是与磨屑形成机理有关的参量。在实践中也发现, 在金属—金属相对滑动时, 系统中其它参量固定, 外载 L 在一段范围内, 即 $L \leq H/3$ 时, k 是常数。但是, 当 L 超过 H/3 后, k 值迅速增大⁽¹⁰⁾。而在磨料磨损情况下, 则 L 在一定范围内 k 是常数, L 增大后, k 值有降低的趋向⁽¹¹⁾。这些只能从磨损条件的变化 (如磨粒破碎等) 或几种磨损机制综合作用时, 彼此所起作用的大小发生了变化诸方面去研究它。

Saka⁽⁹⁾ 提出在 (4) 式中, 当固定 L 观察材料组织结构变化对 $\dot{\omega}$ 的影响时, 硬度 H 是一个与组织结构有关的参量。对纯金属, $\dot{\omega} \propto H^{-1}$ 的关系基本成立 (也有人主张不用原始硬度, 而用磨损后的表面硬度), 说明 k 是常数。但是, 对固溶体就有偏离。对时效硬化型合金, 硬度变化时几乎看不到 $\dot{\omega}$ 的变化。因之, 如认为 $\dot{\omega}$ 是与组织结构有关的参量, 但 H 变化时, $\dot{\omega}$ 又几乎没有变化, 那就只能认为磨损系数 k 不是一个常数, 而是与组织结构等有关的参量。如果, 把磨屑形成看成是一个微区的断裂过程, 即通过表层变形、裂纹形核及裂纹扩展, 这三个阶段形成磨屑, 并把 k 值看成是材料的组织 (S) 和工作温度 (T) 的函数。即:

$$k(S, T) = k \left[\dot{\varepsilon}(S, T); \dot{\varphi}(S, T); \frac{da}{dn}(S, T) \right] \quad (5)$$

那么, 如 k 值受表层变形控制时, 则:

$$k = k_1 [\dot{\varepsilon}(S, T)] \quad (6)$$

如 k 值受裂纹形核控制时, 则

$$k = k_2 [\dot{\varphi}(S, T)] \quad (7)$$

如 k 值受裂纹扩展控制时, 则

$$k = k_3 \left[\frac{da}{dn}(S, T) \right] \quad (8)$$

对 k_1 , 则可以同宏观力学试验中的变形机制分析图连系起来考虑。

对 k_2 , 则可以同反映断口模式的断裂机制分析图连系起来考虑。

对 k_3 , 则可以同疲劳裂纹的亚临界扩展联系起来考虑。(从此推论, 在介质条件下, 也可以与应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt 相联系)。由类似的观点出发, Argon⁽¹²⁾, Ritchie⁽¹³⁾都进一步进行了分析。后者的工作把耐磨性 $\dot{w}^{-1}$ 与疲劳特性 δ_{-1} 和 Δk_{th} 作了对比, 发现 $\dot{w}^{-1}$ 与 δ_{-1} 是同步的, 与 Δk_{th} 无关。说明磨损是由疲劳裂纹形核控制的。

Hornbogen⁽¹⁴⁾也持类似观点, 认为 k 不是常数。它由微凸体变形导致断裂出发。同断裂韧性联系起来进行了讨论, 他认为磨损系数 k 是与微凸体变形程度有关的函数。即:

$$k = k_0 \frac{\epsilon_d}{\epsilon_c} \quad (9)$$

其中, ϵ_d 代表微凸体峰的应变变量。

ϵ_c 代表导致材料断裂的临界应变变量。

如 $\epsilon_d \leq \epsilon_c$ 即表示有足够的塑性, 由于微凸体的接触面积 $\pi a^2 \alpha \frac{L}{H}$, $\epsilon_d \propto a$

故

$$\epsilon_d = \alpha \left(\frac{L}{H} \right)^{1/2}$$

而

$$\epsilon_c = \delta_c / L$$

其中

$$\delta_c = \frac{K_{Ic}^2}{2 E \cdot \sigma_y} \quad \text{有效标距长度 } L = \frac{1}{2} \beta n^2$$

(δ_c 为 COD)

n 为硬化指数

所以

$$k = k_0 \frac{\epsilon_d}{\epsilon_c} = k_0 \left[\frac{\alpha \cdot \left(\frac{L}{H} \right)^{1/2}}{\left(\frac{K_{Ic}^2}{E \cdot \sigma_y} \right)} \cdot \beta n^2 \right] \quad (10)$$

式中 α , β 是比例常数。(10)式把磨损系数 k 值同 H 、 σ_y 、 E 、 n 、 K_{Ic} , 这些反映材料性能的参量联系在一起, 从而当成在一定条件下与材料组织结构相关的参量。

在对经典的 Archard 公式修正的基础上, 许多学者也想把形成某种磨损现象的主要机制进行分析研究, 以走出一条新的路子。

例如磨擦副中材料的相互迁移的机制问题。Rigney^[15]谈到, 他在铁-铜摩擦副中曾观察到各自表面都有配对材料的迁移, 都是尺寸只有几十个埃($\text{\AA}$)的孤立小斑点, 其原因尚不清楚, 而这显然难以用 Archard 公式去分析。再如 Suh 的变形层理论及由此出发提出的关于磨屑形成的机制^[16, 17, 18]; Quinn 对轻微滑动磨损中的一些氧化层厚

度形成及其成为磨屑的分析^[2]；Edwards 等在实验测定铝合金中氧化层厚度 20~30 μm 后，在无润滑情况下摩擦系数可以得到稳定的低值的讨论^[19]；Rabinowicz 则从材料强度波动对粘着磨损过程中磨屑的形成，从能量观点出发的讨论^[20]；在滚动轴承寿命设计中 Palmgreen 考虑接触疲劳决定了轴承寿命，IBM 由此提及‘零磨损’设计方法^[1,2]，许多人的工作证明在滑动磨损情况下，疲劳也是磨损形成的主要原因（只要有周期性的应力波动或应变周期，便会有疲劳）。并认为磨损系数 kαN（应力或应变次数）^[2]。这应该对粘附或犁沟二种磨损现象都是适用的。对磨粒切削形成的磨屑来说，许多人用单磨粒进行摩擦磨损的定量分析^[21,22]。Zum-Gahr 认为磨损系数 k 决定于切屑消耗功与摩擦功的比值^[22]。即

$$k = \frac{V \cdot u}{F \cdot S}$$

其中

V 为切屑体积

u 为形成单位体积磨屑所消耗的能量，

F 为摩擦力

S 为行程。

这些动向是很值得注意的。Finkin 曾对八种磨损理论进行了评述^[23]，观点值得参考。

磨损与摩擦一样，有多种机制复合在一起发生影响。但是，在一定条件下，总有一种（或二种）是主要的，因之孤立出某种机制来研究磨损中材料损失过程。由此，提出抗磨措施，是解决问题的重要方法与途径。

2-3 摩擦与磨损的关系

摩擦与磨损是同时发生的，从二者的形成过程来说也是有联系的。但二者也有区别：摩擦主要只涉及到材料的变形，而磨损则涉及断裂（或转移、熔化），表 1^[9]列出了各类钢形成摩擦副后在相同条件下的摩擦系数与磨损系数的实测值。在这些摩擦副中反映的二者关系在半对数坐标上近似线性。μ 增加，lgk 也增加。但 μ 变化小，而 k 变化大。通常也是，在一个系统中如摩擦力有变化，就说明马上要发生恶性的磨损现象。因之摩擦力的变化，就是要发生恶性磨损的早期警告讯号^[2]。

但是，另一方面也只有摩擦而几乎没有磨损的情况。例如轴承等的设计准则便是由此出发的。由表 2 的数据也就可以看出摩擦与磨损的关系不是一个简单的问题，由这些数据中看不出二者有什么关联。μ 只是在很小范围变化，但 k 值可差几个数量级。这说明要由摩擦去判断磨损是不妥当的。在磨料磨损的情况下，Suh^[21]等认为，摩擦主要是由于变形，要消耗能量，这部分能量占的比例很大。而磨损，至少对形成磨屑来说，还应附加一个断裂功，但它同变形功相比要小得多。Suh 等在讨论磨粒尺寸对表层变形、犁沟和切削功所需能量的比例时，指出表层变形所占的能量消耗的比例是很大

表 1

钢的摩擦与磨损系数^[9]

		样 品				
		工 业 纯 铁	20 钢	45 钢	T 10	G Cr 15
滑 块	工 业 纯 铁	μ_1	0.82 ± 0.04			
		μ_s	0.71 ± 0.13			
		k_a	$(4.60 \pm 3.72) \times 10^{-3}$			
		k_b	$(2.51 \pm 1.75) \times 10^{-3}$			
	20 钢	μ_1	0.56 ± 0.04	0.75 ± 0.03		
		μ_s	0.55 ± 0.04	0.68 ± 0.06		
		k_a	$(6.10 \pm 2.75) \times 10^{-4}$	$(1.43 \pm 0.88) \times 10^{-3}$		
		k_b	$(5.23 \pm 2.60) \times 10^{-4}$	$(8.54 \pm 4.84) \times 10^{-3}$		
	45 钢	μ_1	0.54 ± 0.01	0.62 ± 0.09	0.73 ± 0.01	
		μ_s	0.52 ± 0.02	0.53 ± 0.03	0.71 ± 0.03	
		k_a	$(3.59 \pm 1.69) \times 10^{-4}$	$(1.56 \pm 0.59) \times 10^{-3}$	$(9.42 \pm 1.78) \times 10^{-3}$	
		k_b	$(2.89 \pm 2.37) \times 10^{-4}$	$(1.39 \pm 0.72) \times 10^{-3}$	$(4.94 \pm 0.75) \times 10^{-3}$	
	T 10	μ_1	0.47 ± 0.04	0.65 ± 0.03	0.68 ± 0.04	0.73 ± 0.08
		μ_s	0.47 ± 0.04	0.54 ± 0.02	0.58 ± 0.03	0.67 ± 0.05
		k_a	$(2.11 \pm 0.89) \times 10^{-4}$	$(8.83 \pm 4.04) \times 10^{-4}$	$(7.32 \pm 5.10) \times 10^{-4}$	$(1.51 \pm 0.76) \times 10^{-3}$
		k_b	$(2.35 \pm 0.95) \times 10^{-4}$	$(4.97 \pm 2.72) \times 10^{-4}$	$(5.24 \pm 3.78) \times 10^{-4}$	$(1.47 \pm 0.03) \times 10^{-3}$
	GCr 15	μ_1	0.54 ± 0.04	0.62 ± 0.05	0.68 ± 0.03	0.71 ± 0.03
		μ_s	0.54 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.66 ± 0.01	0.70 ± 0.02
		k_a	$(3.41 \pm 0.87) \times 10^{-4}$	$(9.43 \pm 3.46) \times 10^{-4}$	$(1.97 \pm 1.11) \times 10^{-3}$	$(1.05 \pm 0.69) \times 10^{-3}$
		k_b	—	—	—	$(4.78 \pm 2.05) \times 10^{-4}$ $(6.99 \pm 3.65) \times 10^{-4}$

 μ_1 : 初始阶段的摩擦系数 μ_s : 滑程 36 米的摩擦系数 k_a : 试样的磨损系数 k_b : 滑块的磨损系数

的(图1)。由图2,图3,可看到磨粒粒度对 μ 的影响很小,但对 k 的影响却很大。特别是磨粒尺寸小于 $100\mu\text{m}$ 时, k 值就急剧下降。(磨粒粒度小于 $1\mu\text{m}$,就可以认为没有磨损。)

表 2^[2] 几种摩擦副的摩擦系数
 μ 与 磨损系数 k

摩擦副 (在空气中)	摩擦系数 μ	磨损系数 k
金 对 金	2.5	10^{-1}
黄 铜 对 硬 钢	0.3	10^{-3}
聚四氟乙稀对硬钢	0.15	2×10^{-5}
聚 乙 稀 对 硬 钢	0.6	10^{-7}

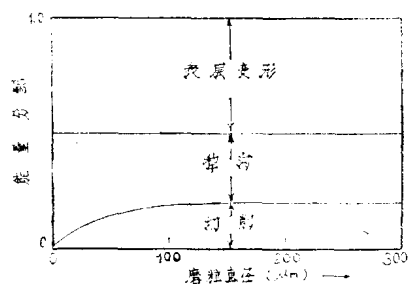


图 1 磨料磨损中各部分消耗的能量^[21]

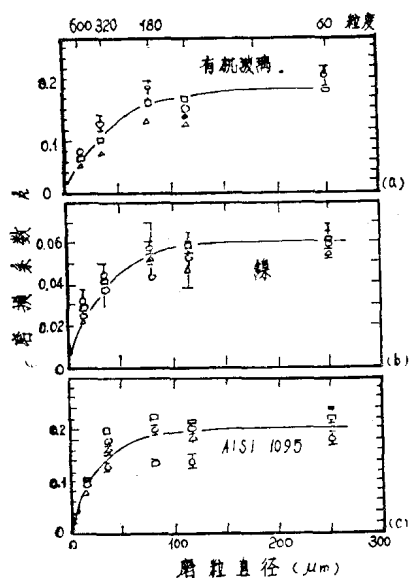


图 2 μ 与磨粒大小的关系^[21]

a: 有机玻璃 b: 纯 Ni c: 1095 钢(相当 T10 钢)

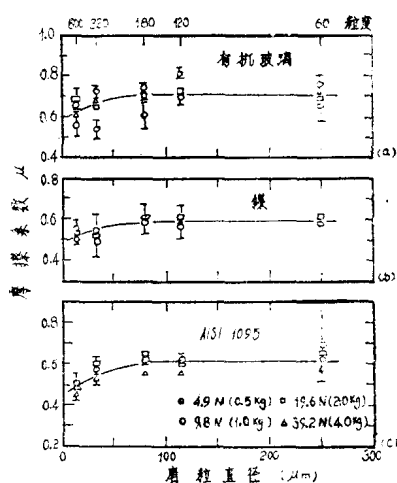


图 3 磨损系数 k 与磨粒大小的关系^[21]

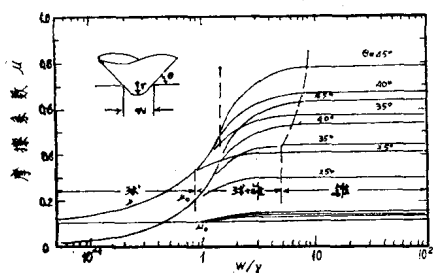


图 4 摩擦系数 μ 与 W/r 的关系^[21]

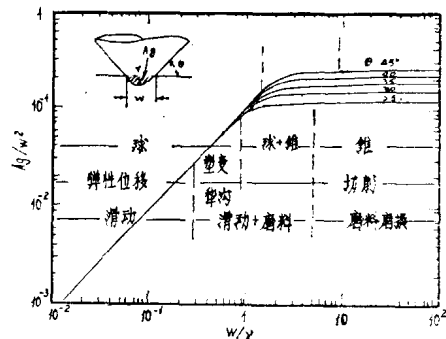


图 5 Ag/W^2 与 $\frac{W}{r}$ 的关系^[21]

由图4, 图5可以看到磨粒尖端锐利程度 (W/r , W 表示磨沟宽度, r 表示锥形磨粒半球形尖端半径) 对 μ 与 A_g/W^2 (A_g 表示磨沟截面积, W 为磨沟宽度, A_g/W^2 反映的是与磨损系数相当的参量) 与 W/r 的关系。可以看出, 随磨粒形状尖锐程度增加, 总的摩擦系数 μ 与 A_g/W^2 的增加几乎是同步的。

进一步弄清摩擦系数与磨损系数的关系, 从另一角度看也是必要的, 例如制动摩擦片, 希望 μ 大, 尽快制动, 同时, 希望磨损率低, 使用寿命高。

三、影响材料磨损率的因素。

影响因素包括有外部因素与内部因素。

3-1 外部因素

外部因素指该系统的工作条件, 包括载荷、相对运动速度、持续时间、润滑条件及介质情况等。如果是磨料磨损, 则还涉及磨粒硬度、几何形状及切入角 (仰角) 等。对载荷 W 、速度 V 、温度 T 及持续时间 t 来说, 影响各种磨屑形成机制的磨损率 $\dot{\omega}$ 的示意图见图6^[24]。

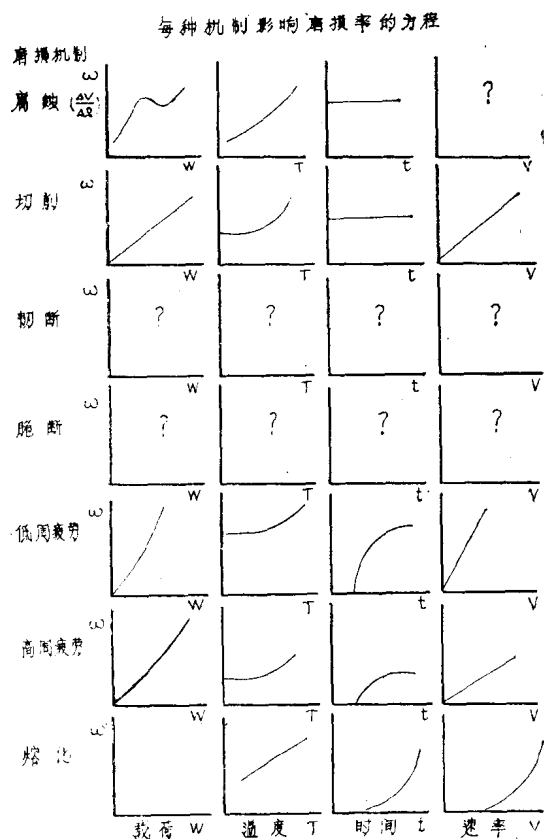


图6 载荷 W 、工作温度 T 、持久时间 t 、相对速度 V 对各种磨损机制下磨损率 $\dot{\omega}$ ($\Delta V/\Delta t$) 的影响

图见6^[24]。

载荷与速度是轴承设计中工作极限的标志^[1]如PV值就确定了磨损极限。润滑涉及油膜建立条件、润滑剂性质等^[1]。介质环境主要涉及表面膜形成情况及腐蚀速度。在轻载荷条件下氧化膜有个临界厚度方能起保护作用。油膜不能把两表面完全隔开的边界润滑问题, 也是目前研究的重要课题。当然, 氧化膜本身的组成——成分、致密程度、与基体金属的结合强度, 都决定了氧化膜在磨损过程中的作用。破碎的氧化膜不但会起磨料作用, 并会引起金属与金属接触, 从而加剧磨损。工作温度既对氧化膜的形成有密切关系, 还会使材料表层的组织结构发生变化, 以及改变润滑油的物理特性甚至化学组成。

在磨料磨损情况下, 材料与磨料的硬度比 H_m/H_a 决定了耐磨性。Richardson^[25]认为, $H_m/H_a > 0.8$, 耐磨性 $\dot{\omega}^{-1}$ 才能迅速提高。但要使磨料磨损忽略不计, 应使 H_m/H_a

≥ 2.5 。Moore^[26]认为 $H_a/H_m \geq 1.3 \sim 1.7$ ，磨损率很高，而且几乎与磨料硬度 H_a 无关。 $H_a/H_m \leq 0.7 \sim 1.1$ ，则磨料磨损量很小。Larsen-Basse⁽²⁷⁾认为 $H_a/H_m > 1.2$ ，随比值增加，磨损率随之线性增加。

从磨粒的几何形状与尺寸来说，除尺寸与磨粒尖端锐利程度的影响外，还有磨粒进入被磨材料的切入角 α （仰角，即刀具中前角 $+\frac{\pi}{2}$ ）的影响，如图 7^[21]所示。出现犁沟并有切屑形成的条件是 α 应大于临界值 α_c ，并认为在 $\alpha > \alpha_c$ 的情况下，切屑的体积也只占犁沟体积的 10—40%。 α_c 值与摩擦系数有关，Zum-Gahr⁽²²⁾认为 $\alpha_c \geq 45^\circ + \rho$ ，（ ρ 为磨粒仰角面与变形金属接触面间的摩擦角）。

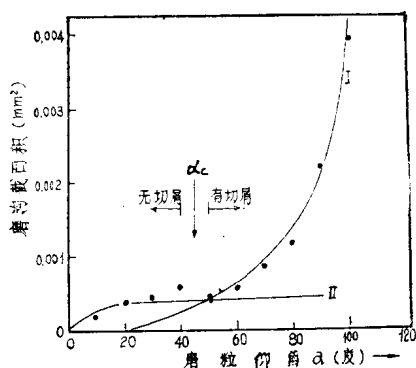


图 7 磨粒仰角变化导致由擦伤过渡到切削、曲线 I 及 II 分别代表擦伤或切削时磨沟截面积与仰角的关系。图上黑点表示在铜上的实测值

3—2 内部因素

内部因素是指材料组织结构与性能对磨损率的影响。

在滑动磨损情况下，粘附磨损为主时，内部因素应考虑配对材料双方的情况。在干摩擦情况下，由表 1 与表 2 可看到，配对材料是相同的材料，则 $\dot{\omega}$ 都较大。硬度差别大的材料配对时，相对来说 $\dot{\omega}$ 可以降低。聚合物与硬钢配对时，则 $\dot{\omega}$ 更低。（即使有的 μ 也不低）。Briscoe⁽²⁸⁾曾从分子链与表层变化进行讨论，磨损严重的总是很软的配对材料。

Saka⁽⁹⁾曾讨论了从纯金属到多相合金在滑动摩擦情况下，组织结构对磨损率的影响。认为磨损率 $\dot{\omega}$ 与外载 W 关系基本符合 Archard 公式，但 $\dot{\omega}$ 与材料硬度 H 的反比关系是成问题的。对纯金属还勉强认可（图 8），对固溶体则看不到硬度与耐磨性有什么相关关系。

图 8 中只是 Co 与 Re 的 $\dot{\omega}$ 偏低很多。从晶型看，体心立方的一般都比面心立方和六角型的要硬些，故相对而言 $\dot{\omega}$ 要低些。六角晶型的金属，其 μ 值通常很小，故 $\dot{\omega}$ 也较低。在纯金属中晶粒尺寸及形状对 μ 没有影响。但体心立方金属的表层如出现织构，而且介理面在有利于裂纹扩展的方向上，即（100）平行表面，则对 $\dot{\omega}$ 有一些不利的影响。总之，对纯金属的 $\dot{\omega}$ ，硬度是决定性的。对固溶体来说，不论是间隙还是置换式固溶体，固溶组元增加总是使硬度增加的，而并不会使裂纹形核的倾向增加，因此，磨损率会有所降低。关于固溶体有

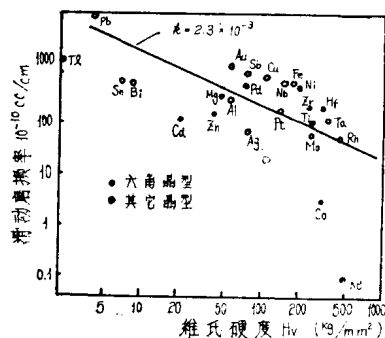


图 8 纯金属磨损率($\dot{\omega}$)与硬度的关系（销-盘试验，载荷 200 克，未润滑）

序化影响的问题，目前尚不清楚。已肯定短程有序对磨损率是没有影响的。但堆垛层错能 (SFE) 对 $\dot{\omega}$ 是有影响的^(20,30)。SFE 值高，形变时易发生交滑移，这样晶界更易强化，易导致裂纹形核，进而导致 $\dot{\omega}$ 增加。所以形成固溶体时，如固溶组元加入能使纯金属的 SFE 值下降，如 S_n , Z_n 加入铜中就是一例，则 $\dot{\omega}$ 的降低，不但是因硬度的增加，而且还有 SFE 降低的效应。如合金中有杂质组元在晶界或位错壁富集，引起脆化，则 $\dot{\omega}$ 增加。此时，对 Archard 公式的理解，便要把 K 当成受组织结构影响的变量去处理。对双相合金，图 9 是 C_u-C_r 合金的时效硬化曲线，图 10 是不同时效态时的磨损率。由图可以看出 $\dot{\omega}$ 与 k 值的凹谷不在硬度峰值处。前面已提过时效合金的 μ 值与时效状态无关，Saka⁽⁶⁾ 认为在时效初期，析出相与母相共格 ($<100\text{\AA}$ 的粒子易保持共格)，粒子小不会促进裂纹形核倾向，故耐磨性提高。而在时效一定时间后，由于共格破坏，粒子长大，数量增多，虽然硬度提高，但

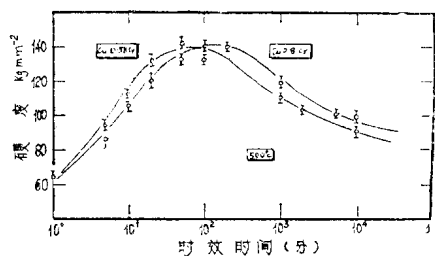


图 9 二种 $Cu-Cr$ 时效硬化合金的时效硬化曲线

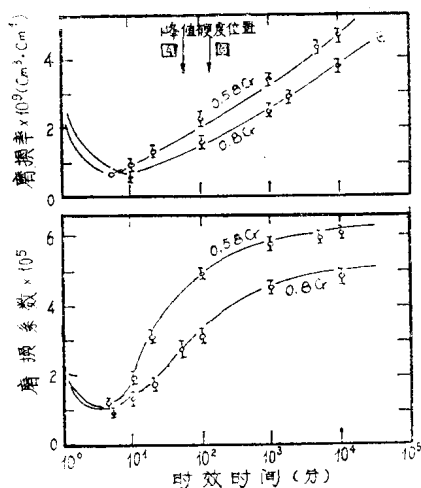


图 10 上述合金在不同时效态的磨损率和磨损系数

裂纹形核机率增加，因之，耐磨性下降，出现图10的曲线。这种说法有个根本的问题是没有考虑磨损过程发生时，塑变和温升，这会大大促进时效过程的进展。

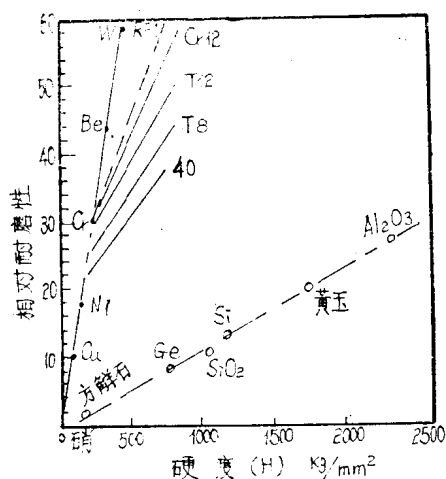


图 11 磨料磨损试验中材料硬度与耐磨性关系

对磨料磨损过程，耐磨性与材料硬度的关系，根据 Khrushov 等的工作得图 11⁽¹⁴⁾，表明耐磨性与硬度关系，退火纯金属符合线性关系。而多相合金是斜率有变化的另一直线。对时效硬化型合金或经加工硬化的合金，虽然硬度有提高，但对耐磨性几乎没有好处^(2,27)。还可看到，硬度相同时，碳量高的钢中碳化物所占的体积百分比 f_v 高，则耐磨性好。用硬度都是 $R_c 62-64$ 的碳钢与合金钢去比，则由于碳钢的回火稳定性差，其耐磨性不如合金钢好。同样是合金钢，在相近的硬度条件下，基体组织是下贝氏体，板条马氏体的耐磨性最好^(31,32,33)。具有二次硬化特性的基体钢是刚过峰值硬度