

金属磨损与断裂



蔡泽高 刘以宽 王承忠 郑文龙 编著
上海交通大学出版社

金属磨损与断裂

蔡泽高 刘以宽 编著
王承忠 郑文龙



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书共分十三章，主要包括金属的磨损；断裂韧性基础知识；延性与脆性断裂；疲劳断裂；应力腐蚀与氢损伤；高温蠕变断裂等。比较系统地介绍了磨损与断裂的物理概念和基本规律。同时还注意理论联系实际，既侧重基本原理的阐述，又强调工程应用。因此，本书可作为高等院校本科生、研究生以及系统讲座的教材之用，也可以作为材料及冶金工作者的参考书籍。

1964/17

金属磨损与断裂

蔡泽高 刘以宽 编著
王承忠 郑文龙

*

上海交通大学出版社
淮海中路 1984 弄 19 号
新华书店上海发行所发行
常熟文化印刷厂 排版
印装

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：26.25 字数：652000
1985 年 6 月第一版 1985 年 7 月第一次印刷
印数：1—9,000

统一书号：13324·13 科技新书目：98—191

定价：4.80 元

前 言

从1982至1983年,上海市金属学会曾主办了“金属磨损与断裂”学习班,作者参加了该班的讲课,本书就是当时使用的教材。现应广大读者的要求,经修改充实后正式出版。

本书由上海交通大学蔡泽高(第七、八、九、十、十三章),上海工业大学刘以宽(第一、二、三章),上海材料研究所郑文龙(第十一、十二章),上海钢铁研究所王承忠(第四、五、六章)共同编写,由蔡泽高主编并审定。

本书从工程实用出发,首先介绍摩擦的概念和金属与摩擦之间的关系,然后着重叙述金属的磨损。对磨粒磨损、粘着磨损、微动磨损、腐蚀磨损、冲蚀以及接触疲劳等这些工程上常见的磨损类型,先是阐明它们的现象,继而对它们的形成机理作了较系统的论述,以期对各类磨损在物理本质上有一定的理解。为控制磨损失效的产生,在理论上打下一定的基础,在影响磨损的因素中,侧重摩擦界面条件和材料内部组织结构的作用。对减少磨损的途径,在原则上和措施上均有所介绍。对耐磨材料的选择,以及对磨损检测方法和评定,在本书中也有一定的篇幅。

编写本书断裂部份的目的,是企图将断裂力学、断裂物理、断裂化学中与工程实际密切有关的内容,有机地组成本书的主要内容。例如,在第四、五、六章中,分别介绍线弹性和弹塑性断裂韧性的基本原理,测试技术和工程应用。对表达式一般不作推导,只阐明其物理概念,侧重如 K_{Ic} 、 G_{Ic} 、 COD 、 J_{Ic} 、 R 阻力曲线等断裂韧性参量的论述。应用各种判据对构件强度的校核和设计,只简要提及。因为这类内容可查阅断裂力学专著。第七、八两章,主要是介绍金属延性和脆性断裂的物理本质。对脆性和延性断裂裂纹的萌生与扩展则有较详细的叙述。在断裂抗力指标方面,较为系统地介绍了动态断裂断裂韧性参量如 DT 能、 NDT 、 CAT 、 FTP 、动态 R 阻力曲线,以及断裂分析图(FAD)等的物理概念,测试原理和工程应用。同时,对延性和脆性断裂断口的微观形貌和形成机理也有系统的叙述。

疲劳断裂占一般构件断裂事故的85%以上,所以,疲劳断裂一直被人们所关注。在第九、十两章中,主要介绍疲劳裂纹的萌生与扩展、疲劳断口分析、腐蚀疲劳等方面的内容;侧重介绍它们的物理概念和疲劳机理,以期对疲劳断裂的物理本身有一定程度的认识;对常规疲劳只简略提及。随机疲劳、热疲劳、声响疲劳等由于篇幅所限则不作介绍。

第十一至十三章的内容是延滞断裂。主要介绍应力腐蚀开裂、氢损伤和蠕变断裂。在应力腐蚀和氢损伤两章中,从开裂现象、开裂条件、开裂和损伤机理、影响因素、评定方法、防止措施和工程应用实例等方面作了系统地叙述。在高温蠕变断裂章中,对蠕变现象、蠕变位错理论以及蠕变断裂机理也有一定程度的阐述。

总之,编者的指导思想重在宏观与微观的结合。既注重基本原理的阐述,又注意工程的应用,使读者在金属磨损与断裂的领域中,获得一定程度的基础知识。但限于水平,缺点错误恐在所难免,敬希读者批评指正。

目 录

第一章 摩擦学的基本原理	1
第一节 摩擦学的任务	1
第二节 摩擦定律及其局限性	1
第三节 金属表面形貌、表层组织和机械性能	2
第四节 摩擦理论简述	5
第五节 摩擦界面的金属学问题	11
第六节 磨损的一般问题	15
第七节 磨损的机制	18
第八节 影响固体材料耐磨性的因素	21
第九节 磨损的分析	24
第二章 磨损的形式	28
第一节 粘着磨损	28
第二节 磨粒磨损	38
第三节 腐蚀磨损	49
第四节 微动磨损	51
第五节 冲蚀和气蚀	58
第六节 滚动接触疲劳磨损	67
第三章 减少磨损的途径	79
第一节 概述	79
第二节 表面处理工艺	80
第四章 线弹性条件下的断裂韧性	89
第一节 弹性力学的一些基本概念	90
第二节 裂纹扩展的能量理论	94
第三节 裂纹顶端的应力应变场及断裂判据	98
第四节 平面应变断裂韧性 K_{I0} 的测试	108
第五章 弹塑性状态下的断裂韧性	118
第一节 J 积分	119
第二节 裂纹顶端张开位移 (CTOD)	122
第三节 弹塑性断裂韧性的测试	129
第四节 裂纹稳定扩展的 R 阻力曲线	141
第六章 断裂韧性参数在工程中的应用	149
第一节 应用 K 判据进行断裂强度校核和设计	149
第二节 根据 COD 参数进行断裂强度的校核和设计	156
第三节 根据断裂韧性参数对材料及热处理制度进行选择	166
第四节 动态和发展	169
第七章 金属材料的脆性和延性断裂	170

第一节	金属断裂类型和脆性断裂强度	170
第二节	金属的解理断裂	172
第三节	延性断裂时的裂纹扩展	177
第四节	金属断裂的抗力指标	179
第八章	延性和脆性破坏的断口特征	205
第一节	延性破坏的断口特征	205
第二节	解理断裂的断口特征	210
第三节	准解理断裂断口的微观特征	214
第四节	沿晶断裂断口的微观特征和形成机理	214
第九章	金属的疲劳断裂	220
第一节	金属疲劳的基本知识	220
第二节	疲劳裂纹的萌生	227
第三节	疲劳裂纹的扩展	233
第四节	影响疲劳裂纹扩展的因素	238
第五节	腐蚀疲劳	266
第十章	疲劳断口及疲劳裂纹扩展机理	283
第一节	疲劳断口的宏观形貌	283
第二节	疲劳断口的微观特征	286
第三节	疲劳辉纹形态和疲劳裂纹扩展机理	291
第四节	断口参量与其他机械性能之间的关系	297
第十一章	应力腐蚀开裂	298
第一节	应力腐蚀开裂的现象	298
第二节	应力腐蚀开裂的特征	299
第三节	应力腐蚀开裂的影响因素	309
第四节	应力腐蚀开裂裂纹扩展机理	318
第五节	应力腐蚀开裂的试验方法	333
第六节	防止应力腐蚀开裂的工程措施	339
第七节	应力腐蚀开裂的工程实例	340
第十二章	金属的氢损伤	356
第一节	氢损伤现象及其在工程上的意义	356
第二节	氢腐蚀和氢脆的特征及其影响因素	357
第三节	钢中的氢	367
第四节	氢脆机理	371
第五节	评定氢脆的试验方法	375
第六节	防止氢脆的工程措施	378
第七节	工程上的氢脆开裂实例	381
第十三章	金属的蠕变断裂	386
第一节	蠕变曲线及蠕变抗力指标	386
第二节	蠕变过程中金属内部组织结构的变化	389
第三节	蠕变理论	391
第四节	蠕变断裂理论	394
附录		400

第一章 摩擦学的基本原理

第一节 摩擦学的任务

任何一个技术系统的功能以至自然界的许多过程,都取决于固体、液体和气体的运动学性质和动力学性质。所有的运动过程都有一个共同的特征,就是在运动过程的同时,出现阻碍运动的效应。物体和物体紧密接触,来回移动,即当一个物体和另一物体或上、下,或平行地紧密接触相对运动时,两个物体表面之间会产生阻碍运动的效应,这就是摩擦。同时,按物体运动时接触面的变化不同,又可分为滑动摩擦和滚动摩擦。由于出现摩擦,系统的运动学和动力学性质受到影响和干扰,使系统的一部份能量以热量形式发散和以噪音形式消失。同时,摩擦效应还往往伴随着表面材料的逐渐消失,这就是磨损。

摩擦学,就是研究上述运动现象和规律的一门新兴学科。它研究摩擦的基本原理,摩擦的物理和化学过程及其对机械系统功能和结构的影响以及减少摩擦的途径。摩擦学的主要组成部分是摩擦、磨损和润滑。现在,摩擦学涉及的问题已不再局限于机械系统,而已经深入到生物学领域,开始形成了生物摩擦学并成为生物力学的一个重要分支。研究材料的生物摩擦学功能也已经引起了重视。

磨损是摩擦效应的一种表现和结果。经济合作发展组织(OECD)科学研究委员会曾对磨损定义如下:“由于物体表面相对运动而导致其相互作用表面的物质的不断地消失”。此外,还有以下三种定义:“由于机械作用,材料从固体表面被去除”;“由于摩擦带不断地受到重复扰动使材料破坏”;“依靠机械的和化学的作用,材料从相对运动的表面被去除”。不论以上定义有什么差别,可以认为磨损和物体表面状态,材料的成分、结构和机械性能以及物体表面之间、表面和环境因素的交互作用有密切关系。

通常,磨损用单位滑动距离重量或体积的损失来表示。磨损重量或磨损体积大,零件的耐磨性差,反之,耐磨性好。习惯上,耐磨性和磨损体积成反比: $\text{耐磨性} = \frac{1}{\text{磨损体积}}$ 。但是,耐磨性并不是材料的固有性能指标,它不是一个定量的而仅仅是一种具有比较意义的术语。所以,上述关系式也仅仅适用于稳态条件下的磨损,就是说在磨损的过程中,磨损的机制没有变化的条件下才适用。

第二节 摩擦定律及其局限性

人类很早就生产和生活的实践中对摩擦产生了兴趣,并根据对摩擦的认识,解决当时所面临的生产和生活中的问题。但是,对摩擦现象进行科学研究,却是近几百年的事。在15世纪中叶,Vinci试验发现摩擦阻力和运动物体重量成正比,并认为摩擦力是物体重量或负载的 $1/4$,而且对于所有的材料都是一样,即摩擦系数 $\mu = 0.25$ 。Amontons也发现这些摩擦现象,于1699年完整地发表了以下摩擦定律:滑动摩擦阻力的大小与接触面间的法向负载成正比;滑动摩擦阻力的大小与名义接触面积无关。1785年,Coulomb在他试验时也得到相同的结

果。同时又提出了一个摩擦定律,即两个相对运动物体表面的界面滑动摩擦阻力与滑动速度无关。以上就是我们沿用的三个摩擦定律。这些摩擦定律在当时的历史条件下,从物理的观点回答了机械系统中的一些基本问题。在今天,对解决一般机械工程中的实际问题,大体上也是正确的。

随着科学技术的发展和人类对世界认识的深入,发现有些摩擦现象继续用摩擦定律来解释就不能满足要求了。如,摩擦定律是建立在刚体力学基础上的,摩擦过程仅仅是一个表面滑过另一个表面,摩擦面上显微凸起接触部分,呈刚性相对滑动,因而无法解释摩擦过程能量的消耗。又如,在机械系统中,系统的摩擦行为,常常是根据摩擦系数作为常数来分析和处理的,认为摩擦系数是固体材料的固有性能。这显然是有问题的。这不仅是因为机械系统中一对摩擦副在运行过程中,其摩擦系数是变化的,而且摩擦系数的大小,还随着摩擦副本身材料及材料配对的变化而变化。同时,摩擦系数还受到环境因素的重要影响。此外,虽然至今对动摩擦系数的认识尚不充分,而试验表明,如果相对摩擦速度很高,摩擦系数会下降。有许多金属仅在有限的各不相同的速度范围内,服从界面滑动摩擦阻力与滑动速度无关这一定律。

摩擦定律的局限性,在于在当时的历史条件下,没有也不可能回答和解决摩擦的起因这个基本问题,而只能是一些经验规则,因而其有效性是有限度的。但是由于这些经验规则是建立在力学发展的初期阶段,所以这些规则仍被称为摩擦定律。

第三节 金属表面形貌、表层组织和机械性能

一、金属的表面形貌

金属的普通表面的几何形貌,是由加工工艺过程的特性所决定的。加工后的表面,从宏观上看存在着表面波度,表面波度的程度叫宏观粗糙度;从显微上看,即使采用最精密的加工方法加工表面,经检验表明,这些表面呈显微凹凸形貌,显微凹凸的程度叫显微粗糙度。所以表面的几何形貌由宏观粗糙度和显微粗糙度的合成来表征。图 1-1 为表面几何形貌的组成。

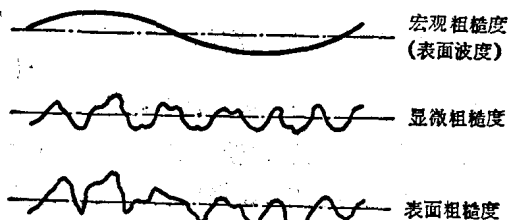


图 1-1 表面几何形貌的组成

当采用车、铣、刨加工方法时,得到的表面显微凹凸分布是定向的,当采用研磨和电解抛光时,则显微凹凸可能呈各向均匀分布。为了对表面形貌作出精确的评定,可采用光学显微镜、电子显微镜、干涉显微镜和反射显微镜等,也可采用斜切截面法和轮廓检测仪。Jones 于 1970 年提出了在负载下接触区的分布图。他将

一块金属的表面压在表面覆盖银的平板上,这两个表面的许多接触点,用 normaski 相衬照明器可以观察到,见图 1-2(a)。采用触针和扫描技术也可以获得经加工表面的轮廓图,见图 1-2(b)。

对显微粗糙度检测,可用广泛采用的轮廓检测仪所测得的以下两个带有统计性质的表面参数来表征:

$$\text{中心线平均值 (C.L.A)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i|$$

它的定义,是表面轮廓离中线的纵向偏差的算术平均值。式中 n , 是在中线上测定轮廓纵

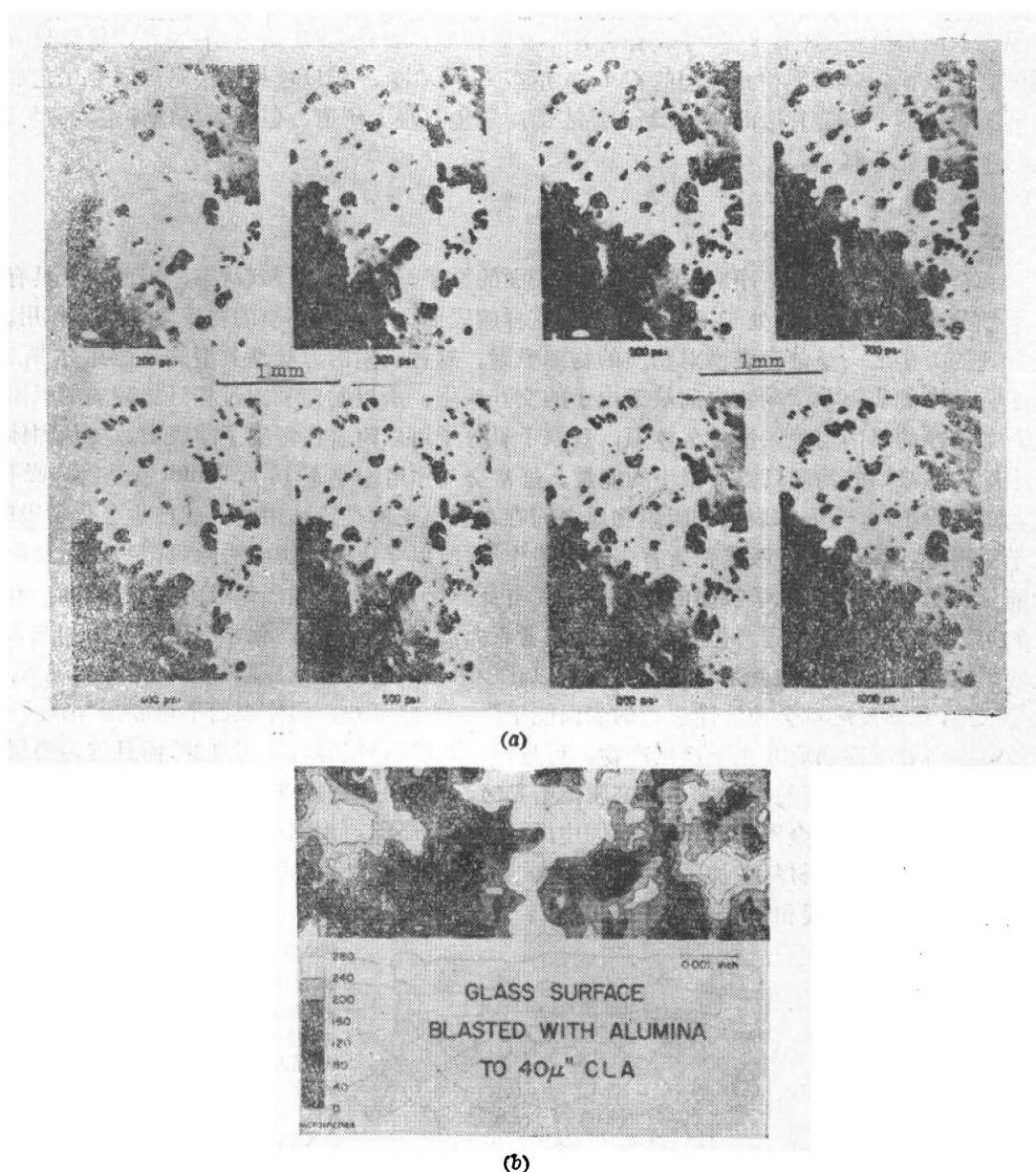


图 1-2 (a) 在负载下接触区的分布; (b) 采用触针和扫描技术得到的经加工的表面轮廓图

向偏差 Z_i 值的点的数目。中线是分隔轮廓的一段线段,取的时候,要使其所分的上下封闭的各个面积之和相等。

$$\text{均方根值}(R.M.S) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

它的定义,是纵向偏差平方的算术平均数的平方根值。

表面显微粗糙度的大小,用 $C.L.A$ 或 $R.M.S$ 值来表示。 $C.L.A$ 或 $R.M.S$ 值愈小,表面愈光滑, $C.L.A$ 或 $R.M.S$ 值愈大则愈粗糙。有关光洁度和 $C.L.A$ 以及 $R.M.S$ 值的相对应的范围,可见机械工程手册。

从以上数学式可知,这两个表面参数主要和纵向轮廓相对偏差有关。它不能提供有关表

面显微凹凸部分坡度、形状、尺寸或有关其表象的频率、均匀度的任何信息,因此,轮廓显著不同的各个表面,却可能得到相同的 *C.L.A* 值或 *R.M.S* 值。所以这种方法对以同一工艺加工的同类表面的分级是有用的,对控制产品表面质量也有很大价值,但若须精确评定表面轮廓,这两个参数就不够了。

二、金属的表层组织

当金属的表面处于洁净时,接近表面和表面的原子,处于“不饱和”状态,表面原子具有高的活性和能量,因而表面处于不稳定状态。这样的表面会和来自环境的物质发生交互作用。其最普遍的类型之一是洁净表面对物质的物理吸附。这种吸附的力就是典型的范德瓦尔斯力。由于在洁净的表面和吸附物之间缺乏电子的交互作用,所以物理吸附过程是比较弱的吸附过程。如洁净的表面可吸附惰性气体氩;双原子氧分子可以附着在污染了的表面。要从固体表面去除物理吸附的物质只需要很小的能量。通常交互作用能小于 10 kcal/mol 就是物理吸附。和物理吸附不同,当固体表面和吸附物质之间存在着电子的交换作用时,就产生了化学吸附。化学吸附时,固体表面对吸附物质有强的吸附作用,所以要从固体表面去除吸附物质需要很大的能量。化学吸附时,化学吸附的物质保留其自身的个性。如氧强烈地吸附在铁和钛的表面,人们可以用俄歇仪检测到。但是当氧浓度或者表面温度足够高时,化学吸附的氧便和铁表面反应形成铁的氧化物,这就是化学反应。所以化学吸附和化学反应应当加以区别。物理吸附,化学吸附,化学反应都会使洁净表面的表面能下降。由此可知,固体表面不可能是“洁净”的,而总是存在着吸附物质或化学反应产物。可见,固体表面是很容易被污染的,而且这污染层很稳定,要消除也不大容易。所以在研究摩擦磨损时,表面的这个特点是不能忽视的。图 1-3 为具有表面薄膜的退火金属的表层组织,图中的尺寸是粗略的。由图可看到,在吸附层和反应层(即氧化物层)下面是材料在加工过程中形成的具有不同物理冶金特点的表层,即由低位错密度层,严重加工硬化次表层和金属基体所组成。

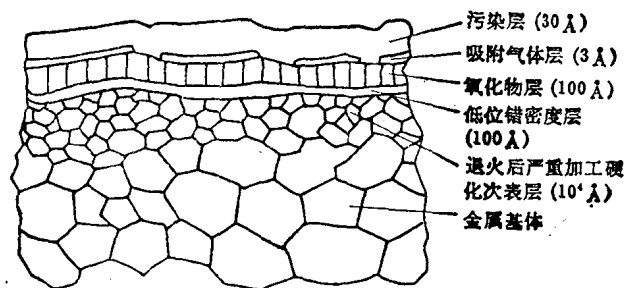


图 1-3 具有表面薄膜的退火金属的表层组织。

三、近表面金属的机械性能

根据位错和无应力表面之间的交互作用可知,非常接近并和表面平行的螺位错,由于非常贴近表面(设和表面的距离为 d) 而受到无应力表面的作用。这个作用,相当于一个距表面内实际螺位错为 $2d$, 而且在无应力表面以外的符号相反的想像螺位错的作用。实际螺位错和想像螺位错之间的作用力叫想像力(image force)。当表面没有连续粘附的氧化层时,这个想像力图把位错吸引到表面。如果想像力大于位错摩擦阻力,位错就被吸引到表面而消失。所以,在表面和近表面倾向于形成低位错密度的表层。当表面变形时,所产生的位错有些就位于这

低位错密度区的下面, 所以其位错累积和应变硬化能力比表面要强些。这也说明非常接近表面的一层金属比次表层金属能产生较大的塑性变形。

低位错密度区域的厚度取决于金属的表面能和作用在位错上的摩擦阻力的大小。因为当位错在表面露头时, 总的表面积发生变化, 所以表面能对低位错密度区域的厚度有影响。影响位错摩擦阻力的因素很多, 在常用金属中, 面心立方点阵金属中的位错摩擦阻力比体心立方点阵金属的要小。

在弹性模量不同的材料之间, 其界面附近的位错, 也受到想像力的作用。位错受到界面的吸引或者排斥, 取决于弹性模量的比值。当坚硬的连续的氧化物层粘附在金属表面时, 该氧化物和金属的界面的边界状况, 使金属中的位错承受一个力, 这个力使位错离开界面。如果一个硬的滑块, 在软金属表面滑过也会产生同样的情形。此外, 已经证明接近表面的金属, 仅仅接受内部的单向位错流, 而金属内部则接受来自两个方面的位错流。所以, 在金属内部比在金属表面, 更可能产生引起应变强化的位错交互作用。

第四节 摩擦理论简述

一、摩擦的分子理论

摩擦的分子理论认为, 当摩擦副接触面上, 原子之间的吸引力和排斥力大小相等方向相反时, 处于平衡状态。如果摩擦副的表面在负载作用下靠得很紧密, 那么原子之间的排斥力就会促使摩擦副结合面分离。该摩擦系统在外力作用下发生相对滑动时, 原子就进入排斥力场范围内, 并企图恢复到原来的平衡位置。原子的排斥力和恢复到平衡位置的内聚力, 就构成了和外力作用相反的摩擦阻力, 所以摩擦力的大小与原子的排斥力和内聚力有关。经推导, 摩擦系数 $\mu = \partial \frac{Ec}{\rho} \frac{l}{d}$, 式中 ∂ 是系数, ρ 是平均排斥力, Ec 是一对原子间的内聚力, l 是原子恢复到平衡位置的移动距离, d 是原子平衡时的中心距。摩擦的分子理论所考虑的, 是一对原子而不是一组原子之间的关系, 而且所设想的模型也过于简单。虽然这个理论指出摩擦系数和作用的法向负载无关, 但是摩擦副界面的接触, 是根据原子间排斥力提出的, 这样, 摩擦接触是弹性的, 但是经对摩擦面的检查发现, 由于摩擦, 摩擦面会出现各种形式的变化, 这些用分子理论是不能解释的。尽管如此, 分子理论仍然打开了通向现代流行理论的大门。

二、粘着摩擦理论

粘着摩擦理论认为, 摩擦界面是塑性的。这个理论的核心部分是摩擦面的粘着和犁沟。当一对摩擦副承受负载时, 两个表面仅在显微凸起端部发生接触。由于实际接触面积很小, 所以接触端部的压强很大, 并且足以使端部发生塑性变形, 进而接触面积不断增加, 直到实际接触面积足以承载为止, 如图 1-4 所示。在这种情况下, 对弹——塑性材料可得: $A \cdot \sigma = W$, 式中 A 为实际接触面积, σ 是材料承受的压缩应力, W 是法向负载。在金属和金属紧密接触的区域, 如果是“洁净”的金属接触, 就可能发生接触区(点)的粘着或“冷焊”。要使粘着区(点)被剪断, 就需要 $F = A \cdot \tau$ 这么大的剪力, τ 是材料的剪切强度, 它是引起材料塑性流变以致最后剪断所需的剪切应力。这里讲的剪切力就是摩擦力。这里有一个问题需要回答, 就是摩擦面上粘着区(点)或“冷焊”区(点)的强度应如何决定。一般认为摩擦副中材料较软的产生屈服并被

剪断,由于剪断不发生在界面上,所以较软的材料附着在材料较硬的摩擦面上。这样,摩擦界面上粘着区(点)或“冷焊”区(点)的强度,可由较软的材料强度来决定。此外,如果一对摩擦

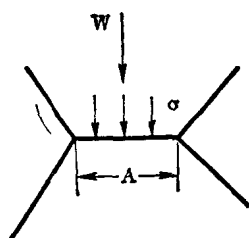


图 1-4 单个显微凸起端部接触产生塑性变形简图

副中硬的摩擦面对软的摩擦面作相对滑动,还会出现一种“犁沟”作用。摩擦时“犁沟”所需的力设为 P , 于是 $F = A \cdot \tau + P$ 。很可能 $A \cdot \tau$ 和 P 之间还存在着相互作用,影响剪力的因素也影响“犁沟”力。在摩擦力 $F = A \cdot \tau + P$ 中,虽然列出了这两种力,但要正确加以区分是困难的。一般认为未经润滑的金属,在大多数情况下 P 可以忽略不计,即 $F = A \cdot \tau$ 。

根据定义, $\mu = F/W$, 已知 $F = A \cdot \tau$, $W = A \cdot \sigma$, 因此,

$$\mu = \frac{A \cdot \tau}{A \cdot \sigma} = \frac{\tau}{\sigma}。$$

这表明摩擦系数和作用的法向负载无关。对于界面上材料剪切强度,可以认为是一个无法估计的量,但是为了简化,可以假设 $\tau = \tau_0$, τ_0 为材料屈服的临界剪切应力,于是 $\mu = \frac{\tau_0}{\sigma}$ 。由于接触面上的应力状态是十分复杂的,在作了简化后可以认为界面上总的压缩应力的 $2/3$ 以液体静压形式存在,对相应金属的屈服并没有影响;应力的其余部分 $\frac{1}{3} \sigma$ 用于金属塑性流变,所以 $\sigma_y = \frac{1}{3} \sigma$, σ_y 为金属材料的屈服极限。根据塑性理论, $\tau_0 = \frac{\sigma_y}{2}$, 于是 $\mu = \frac{\sigma_y}{2 \cdot 3 \sigma_y}$, 即 $\mu \cong 0.17$ 。对大多数金属摩擦副,在通常气氛和干滑动条件下,摩擦系数值是相近的。此外,从 $\mu = \frac{\tau_0}{\sigma}$ 可看出,为什么大多数金属的机械性能(如硬度)相差很大,但是其摩擦系数变化却很小。如果在硬的金属基体上镀上或浇注上一薄层软金属,这时承载能力主要由基体硬金属而定,而剪切则在软金属层内发生。于是可写出公式: $\mu = \frac{\tau_0 \text{ (软金属临界剪切应力)}}{\sigma \text{ (硬金属承载能力)}}$ 。这样,就可以得到低的摩擦系数。

必须指出,上述的前提是摩擦接触界面是完全塑性的,而且由于压缩应力才导致接触界面出现塑性屈服。在摩擦副接触区,真实的接触面积为 A , $A \cdot \sigma = W$, 前面已指出, $\sigma = 3\sigma_y$, 所以 $A = \frac{W}{3\sigma_y}$ 。因为材料的硬度和屈服强度存在着以下近似关系: $H \cong 3\sigma_y$, 所以 $A = \frac{W}{H}$, 于是

$$\mu = \frac{\tau_0}{3\sigma_y} \text{ 或者 } \mu = \frac{\tau_0}{H}。$$

在摩擦过程中,可以认为因塑性变形而使粘着区域的 τ_0 值有所增加。但是材料的屈服强度和硬度也同时增加,所以 $\frac{\tau_0}{H}$ 的值基本保持相对不变。如果一个较硬的半球块压在—块较软的平板上,平板的次表面发生加工硬化,由于平板较软,所以存在着侧向移动的可能性,引起沿界面 AOB 的剪切现象。剪切界面的强度要比加工硬化次表面的强度低些。这样,很可能在负载下滑动,在摩擦副界面上形成块状磨屑。如果软的平板不发生加工硬化,那么,摩擦面之间显微凸起端部在发生粘着后,被磨去的材料将粘附在较硬的半球表面,这就是金属的迁移。见图 1-5。

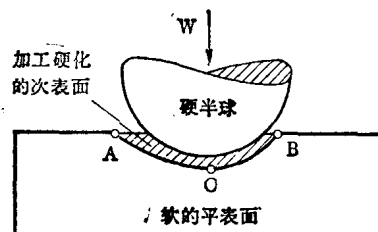


图 1-5 在正压力作用下次表层发生加工硬化

三、修正的粘着摩擦理论

上面讨论的是一种简单的摩擦接触,其结果对于静态接触是近似正确的,但是当接触区(点)还作用有剪切力时,那么接触区金属材料就受到正应力 σ 和剪应力 τ 的复合作用。试验表明,在这样的条件下,接触区(点)面积将沿运动方向增加。在开始阶段,接触区(点)只出现显微位移而没有形成宏观滑动。这种显微位移可借助于多光束干涉仪观察到。当切向剪力逐步增加时,接触面面积也不断增加,即显微位移量在不断增加。如果接触是粘着,那么瞬时摩擦系数 μ_i 也在不断增加。当开始宏观滑动时,接触面(粘着面)面积就达到最大稳定值,此时, $\mu_i \rightarrow \mu$ 。本来,接触区或粘着区的增大是三维问题,为了便于论证,可以假设是一个二维问题,于是接触区或粘着区的长大屈服判据是 $\sigma^2 + \alpha\tau^2 = \sigma_Y^2$,式中 σ 是作用的正应力, τ 是作用剪切应力, α 是常数, σ_Y 是材料发生粘着时的屈服极限。当摩擦刚开始时,即 $\tau = 0$,则不能用这个屈服判据。当由于 σ 的作用,摩擦面上显微凸起端部出现并形成许多粘着区(点),而且在剪应力 τ 作用下,这些粘着区(点)不断增加时,根据以上判据, σ 要减少,而 τ 在增加,一直到 τ 大到能克服静摩擦,并开始大范围滑动时为止。这样,可以认为,在静摩擦时,随着接触面积或粘着面积的增加,瞬时摩擦阻力 F_i 也不断增加, $F_i = \tau_i \cdot A_i$,式中 A_i 为瞬时接触或粘着面积, τ_i 为粘着区材料的临界剪应力。由于以前的计算没有考虑到 A 在不断地增加, σ 在减少和 τ 在增加,所以,现在得到的 μ 值应当大于0.17。因为 $\sigma_Y = \phi(\tau_i)$,以上屈服判据可写成

$$\sigma_i^2 + \alpha_0 \tau_i^2 = \alpha_0 \tau_i^2$$

式中 $\alpha_0 \approx 9$, τ_i 是瞬时作用剪应力,随时间的推延在 $0 \rightarrow \tau_i$ 之间增加,当在宏观范围内出现滑动时 $\sigma \rightarrow 0$, $\tau \rightarrow \tau_i$ 。

四、弹性回复

两个金属物体相互接触时,弹性回复是一个很重要的现象。可以认为相互接触和贯穿的显微凸起端部的接触面积很小,其中一些凸起端部产生了塑性流变。也可以说,在负载作用下的粘着区弥散分布在弹性基体上。由于塑性屈服而粘着的面积,随着负载的增加而增加。即使在很低的负载下,在弹性基体上仍然分布着少量因塑性屈服而产生的粘着点。当外加负载去除后,弹性接触区将恢复到原来的形状,但是在回复过程中却破坏了粘着结合点。那么,具有高弹性的摩擦副,由于弹性回复就可能破坏或削弱粘着结合点,而主要表现为弹性的交互作用。如果材料硬度高,那么因塑性流变而粘着的面积就小,这样就可以得到低的摩擦系数。从这个简单的道理,也可以看出为什么有些硬度非常高的材料具有很好的耐磨性。

五、表面覆盖有污染膜的粘着摩擦理论

已经证实,由于物理吸附、化学吸附和化学反应,金属表面有氧化物层,吸附气体层和其他污染层。虽然摩擦表面显微凸起端部在负载下会互相接触,但是金属和金属之间的接触不会出现或者不会完全出现,金属和金属之间的交互作用会被阻止或部分阻止。所以可以预计在这种情况下,摩擦系数和方程式 $\mu = \frac{\tau_0}{H}$ 所表述的有所不同。在以上分析基础上,经推导得到以下关系:

$$\mu = \alpha [\alpha_0 (1 - \alpha^2)]^{-\frac{1}{2}}$$

式中 $\alpha = \frac{\tau_f}{\tau_i} < 1$, τ_f 为覆盖层临界剪应力, $\alpha_0 = 9$

所以可得：
$$\mu = \frac{\alpha}{3(1-\alpha^2)^{\frac{1}{2}}}$$

当表面没有任何保护性覆盖物时， $\alpha=1$ ， μ 为无限大； $\alpha=0$ 时表明覆盖物完全有效，也就是说不发生金属对金属的接触， $\mu=0$ 。实际情况往往是 α 介于 0~1 之间。图 1-6 为 α 从零到 1， μ 和 α 的关系曲线。

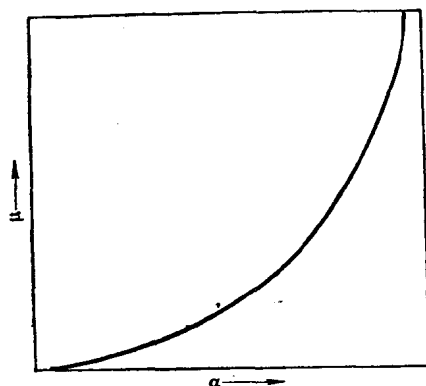


图 1-6 α 和 μ 的变化曲线

六、粘附和滑移

摩擦引起的变形反映在发生交互作用的摩擦表层上，而且很快传入摩擦副表层内部而形成摩擦特征区。这个特征区在摩擦和磨损过程中起着重要的作用。但是对这方面我们还缺乏足够的认识。为了研究摩擦现象，大多数是测定摩擦阻力和时间的关系。当滑动连续进行时，随着时间的增加，摩擦阻力的大小成波动形式变化。理想的变化曲线像一锯齿形。图 1-7 为

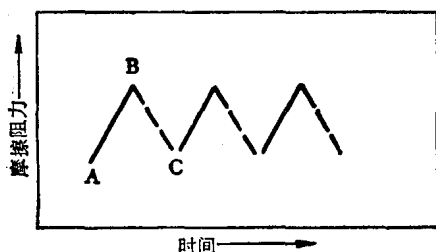


图 1-7 摩擦阻力随时间变化的曲线

摩擦阻力随时间变化的曲线。半球形滑块和平板构成一对摩擦副，试验进行时，平板开始运动，半球形滑块也随着运动，摩擦阻力由 A 上升到 B，在 A 和 B 之间平板和滑块粘在一起，到 B 点，摩擦阻力达最大值。接着因为两接触面分离，也就是在界面出现滑移，摩擦系数下降，一直到 C 点。界面的粘附和分离的反复过程就是摩擦过程。可以认为 C 点为动摩擦阻力。试验表明 A 值等于 C 值。用电阻测量表明从 A→B，接触面粘附点增加，从 B→C 则表明出现界面的滑移和粘附的交替进行。所谓滑移指的是粘附点的相对滑动。滑移量的大小是静摩擦系数 μ 和动摩擦系数 μ_k 的函数，因为 $\mu > \mu_k$ ，所以滑移量

$$\Delta s = \phi(\mu - \mu_k)。$$

如果试验机速度加快，AB 间隔就缩小，当速度很快时， $\mu \rightarrow \mu_k$ ， $\Delta s \rightarrow 0$ 。这时要区分粘附和滑移就很困难，而且试验机运行平稳。但是要注意，在任何速度和任何一对金属摩擦副的条件下， μ 都不等于 μ_k 。但是在某些条件下，过高的速度又可能在 μ 和 μ_k 之间出现明显的差值，试验机以颠簸或爬行方式运行。从以上讨论可以提出 μ 随时间变化的示意图，见图 1-8。在机器启动前， $\mu = \mu_s$ （静摩擦系数），机器启动后， μ_s 上升达到静摩擦系数的最大值 μ_s ，当界面粘附区（点）以特有的稳定的速度滑移时，动摩擦系数 μ_k 可能低于 μ_s ，而且将持续下去。如果机器停止运行后重新启动并运行，那么将重复上述过程。机器速度愈高， μ_k 值愈低。火车车轮

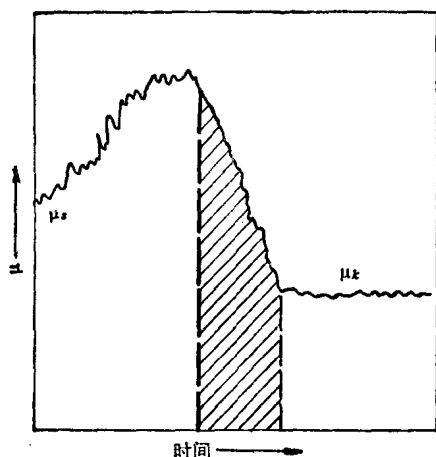


图 1-8 摩擦系数随时间变化的曲线图

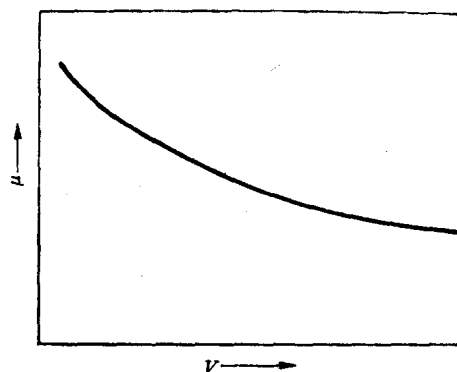


图 1-9 随着表面滑动速度的上升摩擦系数 μ 下降的示意图

采用铸铁制动块时,就出现滑动速度增加,摩擦系数下降的典型特征。当速度很高时,曲线斜率等于零,以致开始刹车时因为 $\mu \rightarrow \mu_k$, Δs 小,所以制动块和轮子界面的运动是平稳的。可是当停车时,摩擦系数急剧上升,因为 $\mu \neq \mu_k$, 所以 Δs 是相当可观的。于是在界面上会产生颤动和噪音。这就是为什么制动块要选用能产生较平稳的摩擦系数——速度曲线的材料,而不采用铸铁的原因。

七、动摩擦

很明显,一对摩擦副的接触界面上,显微凹凸部分的交互作用,在有限范围内会引起振动。产生振动的前提是接触界面上的显微凸起端部粘附在一起并保持一个瞬间,然后以很快的速度滑移。也可能接触的显微凸起端部不出现粘附而是弹性互锁,然后出现滑动。这是动摩擦的主要特点之一。

假如摩擦面上的显微凸起端部和一平坦平面接触,在法向负载下,当接触面积增加时,静摩擦系数单调增加。随着时间的延长,接触面积以蠕变方式增加。当低速滑动时,接触区(点)将呈径向或切向增大。但是在高速滑动条件下,大多数金属的 μ — V 特征曲线显示出随速度 V 增加, μ 下降的趋势。这是由于摩擦的另一个效应,即摩擦表面温度上升而引起的。当粘附点增加和滑动时,界面温度上升,当粘附点不增加,滑移发生以后,温度下降。粘附和滑移的行为以及温度的上升和下降,在整个摩擦滑动期都在连续不断地进行。界面温度上升对摩擦反过来有两种影响,一是接触的凸起端部屈服应力下降,以致该端部很容易粘附。另一种影响是在通常大气条件下,高温易使表面形成氧化膜,它又阻止金属表面的粘附。显然这两种影响是相互矛盾的。不过,高速滑动时,由于摩擦面温度上升,虽然接触面积增加,但粘着区(点)剪断所需的剪切力变小了,再加上摩擦面因温度上升而导致表面氧化,形成氧化膜,所以,从总体看来还是降低了摩擦系数。

关于接触区长大到一定尺寸所需的时间,已经有一些可利用的资料。在负载下静态接触时,只要几秒钟实际接触面积可达到最大值。在高的切向力作用下,显微凹凸部分在几毫秒时间内就出现交互作用。所以接触粘着区尺寸大小,主要决定于材料硬度和承受的法向载荷,而蠕变和切向力的作用都是很小的。所有这些都证实以下所观察到的事实,在特定情况下,动摩

擦总是低于静摩擦;对大多数金属,随着表面滑动速度的增加, μ_k 下降并趋于一渐近极限值。

八、摩擦的能量理论

粘着摩擦理论可以解释一些观察到的摩擦现象,但是有些摩擦行为又无法解释,而且也不能较精确地估算摩擦系数。如实际所测定的非常洁净的摩擦副表面的摩擦系数比用粘着摩擦理论所估算的值要高得多;又如,粘着摩擦理论没有考虑近表面在摩擦时出现的流变应力梯度。可以推测,当摩擦副中有一个表面为软表面时,摩擦系数会因为出现“犁沟”作用而大大提高。为了得到更加满意的摩擦理论, Rabinowicz 提出了摩擦的能量理论。这个理论的出发点是认为表面能对摩擦面实际接触区大小有影响。设有两个表面 a 和 b , 当表面粘着时,粘着表面能为 E_{ab} , 由于粘着,总的表面能发生了变化,并可用下式表示:

$$E_{ab} = G_a + G_b - G_{ab}$$

式中 G_a 为表面 a 的表面能, G_b 为表面 b 的表面能, G_{ab} 为 a 和 b 接触的界面能。显然,由于粘着,总的能量是减少了。现在把材料 b 摩擦面凸起端部理想化为锥形压头,压入材料 a 的平板如图 1-10 所示。法向负载 W 使压头压入 dx 所做的功等于使材料塑性变形所做的功和表面能变化之差,即:

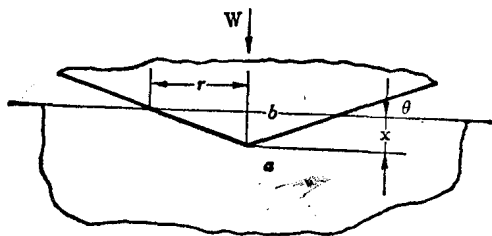


图 1-10 锥形压头压入平板表面

$$W dx = \pi r^2 H dx - (2\pi r) \frac{dx}{\sin \theta} E_{ab}$$

式中 H 为硬度。这个方程可改写为:

$$\pi r^2 = \frac{W}{H} + \frac{2\pi r}{\sin \theta} \frac{E_{ab}}{H}$$

这就说明当考虑到界面能发生变化时,接触区投影面积 πr^2 比 $\frac{W}{H}$ (粘着摩擦理论的实际接触面积)

要大 $\frac{2\pi r}{\sin \theta} \frac{E_{ab}}{H}$ 。把上式代入求摩擦系数的公式便得到:

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{\pi r^2 \cdot \tau_0}{W} = \frac{\tau_0}{H} \left(\frac{1}{1 - \frac{2}{r \sin \theta} \cdot \frac{E_{ab}}{H}} \right)$$

这方程表明,粘着表面能和硬度之比大,以及表面粗糙度 θ 小时,则摩擦系数较高。还发现在相似金属之间产生滑动时,摩擦系数和 $\frac{E_{ab}}{H}$ 呈线性关系。

除了表面能对摩擦系数的影响以外,硬的摩擦表面或粗糙表面对软金属表面的犁沟作用对摩擦系数的大小也有影响。

九、摩擦时能量的损耗

当两个摩擦面在法向负载下相对滑动时,表面材料会发生变形。如果表面出现粘着,在剪切力作用下粘着点会被剪断而产生磨粒。如果是硬的半球面和软的平面之间发生摩擦,可能出现软材料向硬材料表面迁移。如果表面显微凸起端部互锁,在发生相对滑动时,也会发生显微凸起端部的弹性变形,塑性变形以致断裂。大多数金属表面的接触点都要经过 1000 次以上的接触才会形成一个磨粒。所有这些都说明,在摩擦时材料表面显微凸起端部以至次表面都会出现弹性变形和塑性变形,表面显微凸起端部还会断裂。这样必然要引起能量消耗,其中塑

性变形能量消耗最大。能量的消耗除了引起磨损以外,还会使接触部位发热和产生噪音。

第五节 摩擦界面的金属学问题

一、接触面之间的力

不同晶面上不同的原子堆集方式导致固体表面电子密度或分布的差异。固体表面电子的这种性质,对固体表面之间的结合,对固体表面和其它物质以及润滑剂的吸附作出了贡献。当两个在原子尺度范围内洁净的金属表面相互接近但实际上并未接触时,这两个非常接近的表面受范德瓦尔斯力的作用。但范德瓦尔斯力的结合比较弱,比较容易受到破坏。当这两个非常接近的表面接触时,两个表面之间的吸引力构成强的键结合。Ferrante 和 Smith 在 1976 年研究了由产生范德瓦尔斯力到形成键结合的临界点,并且指出临界点在两个表面距离为 $1/5 \times 10^{-9} \text{mm}$ 处。

因为金属表面显微凹凸的高度以及磨粒的大小和两个金属表面之间产生有效力的间距相比要大得多,再加上其他种种因素,所以要直接测定金属表面之间的吸引力大小是很不容易的。金属表面之间的这种吸引力也叫粘着力。粘着就是这种力作用的结果。

当两个洁净的表面接触时,所有实际的接触区(点)便发生粘着。如果金属表面覆盖着一层薄膜时,不论这层薄膜是简单的污染膜还是润滑介质,实际接触的粘着量,取决于表面薄膜防止表面显微凹凸穿过薄膜相互接触的能力和有效性。一般说来,实际接触是名义接触的一部分。在轻载条件下,可能不存在显微凹凸的接触,当然也就不存在金属和金属的接触。但在重载条件下,则可能发生显微凹凸穿过薄膜相互接触而导致金属之间的粘着。

二、不同性质的金属和铁的粘着

已经对若干种金属对铁表面的粘着力进行了测定,测定结果见表 1-1。由表可知铁和铁的粘着力超过 400 dynes,而铁和其他金属的粘着力为 50~250 dynes。其他金属在铁中的溶解度对该金属和铁的粘着行为影响很小。如铅不溶解在铁中,但在铁中具有很少溶解度的金、银相比和铁却具有比较强的粘着力。此外,铂和铝在铁中具有相近的溶解度,但对铁的粘着力却相差 150 dyn。可见不同金属在铁中的溶解度对该金属和铁接触时的粘着行为没有明

表 1-1 不同金属对铁的粘着力

金 属	内 聚 能 (Kcal/g-atom)	原子大小 $\text{\AA}$ (10^{-10}m)	价 态	在铁中的溶解度 (at%)	对铁的粘着力 (dyn)
铁	99.4	2.86	2, 3		>400
钴	101.7	2.50	2, 3	35	120
镍	102.3	2.49	2, 3	9.5	160
铜	80.8	2.551	1, 2	<.25	130
银	68.3	2.883	1	.13	60
金	87.6	2.877	1	<1.5	50
铂	134.8	2.769	2, 4	20	100
铝	76.9	2.80	3	22	250
铅	47.0	3.494	2, 4	不溶	140
钽	186.7	2.94	5	20	230

注: 负载 20 dyn, 温度 20℃, 周围压力 10^{-10}torr , 用氩离子轰击清洗干净表面,