



连接器接触界面

- 触点物理学(contact physics)/电接触理论(electrical contact)
- 接触界面的构造
- 接触界面的电气特征
- 接触界面的机械特征

案例, 数据, 图片, 图示培训时提供!



触点物理学/电接触理论

- 电接触含义：指导体接触过渡区产生的各种机械现象，电现象，热现象和化学现象. 在工程实际应用中，“电接触”常指的是接触导体的具体结构或接触导体本身，称为“电触头”，简称触头或触点.
- 电接触分类
- 研究对象/内容：接触界面(的基础知识)
 - 接触界面的结构及其如何影响接触的性能
 - 接触界面的电气特性和机械特征：摩擦和磨损
- 意义：理解连接器设计要求和性能特点的基础
- 连接电阻（研究对象/内容之一）
- 重要性
 - 只有理解触点物理学（如接触电阻的本质）才能理解接触电阻潜在的失效机理
 - 掌握接触电阻失效机理才能在连接器设计中减少它对产品性能的影响.



电接触分类

工程应用中的电接触,从工作原理分三类:

固定接触:

- 强电中有母线的连接或铆接,输电线连接器,电缆头等;
- 在弱电中有电子设备和仪器中的插接件,连接器,塞子和插头;
- 工作中出现的主要现象和问题是; 接触电阻、接触温升和接触熔焊;

滑动接触:

开关的滑动触头、变阻器的滑动头、电机的电刷与滑环、电车的馈电弓与馈电线等,除上述问题外,还有接触元件之间的摩擦、润滑和磨损。

可分合的接触:

各种开关电器和继电器的触头在工作期间常出现电弧。



连接电阻 (1)





连接电阻（2）

■体电阻

- 典型值，几~十毫欧
- 决定于材料电阻率，几何形状；受影响于信号或电流类型
- 内在稳定性连接电阻的主要组分（好的连接器设计）

■永久连接电阻

- 典型值，0.0几~0.1毫欧
- Crimp, press fit, soldering, IDC...
- 具内在稳定性，（好的连接器设计和应用）

■接触电阻

- 典型值，几毫欧内，连接电阻的小部分
- 界面退化时将增大，电阻失效的主要源头
- 连接器设计的主要对象，性能重要指标。



接触界面的构造

- 触点物理学在连接器领域的应用
- 界面结构决定界面性能（接触电阻，摩擦，磨损）
- 界面的管控：黄铜vs铍铜，润滑vs不润滑，硬金vs软金，贵金属镀层vs非贵金属镀层，镍底vs不含镍底...
- 各种应用环境和应用要求有不同的失效机理及不同的对策
- 金属表面形态
 - 金属及其表面 薄膜和污染物的影响 表面粗糙度
 - 接触面几何形状（球面Vs平面Vs剪切面）
 - 赫兹应力（综合正向力，几何形状，材质）

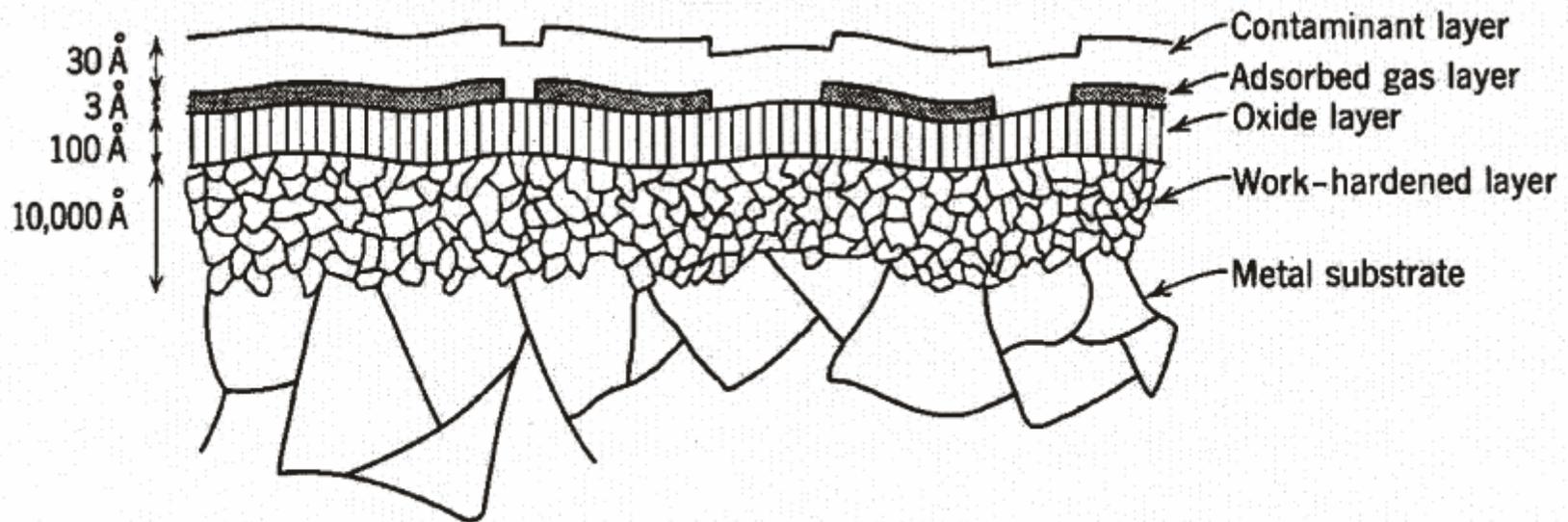
界面形态

- 触点微观分析
- 硬度与触点物理学的关系：硬度反映材料内在的本质，要求测试对象有相当厚度，触点物理学侧重于材料表面特征（局部变形，膜，镀层...）
- 触点接触类型.



金属及其表面

- 金属材料不可避免存在各种缺陷：位错，置换，夹杂物，孔隙，裂纹，划痕，缩孔，缩松，分层...
- 金属材料表面受各种污染，吸收各种灰尘，小颗粒，气体，薄膜（有外来的，有与金属表面反应生成的：氧化物，硫化物，氯化物，氮化物...）
- 表面污染物（特别是反应生成膜）影响，甚至决定金属表面性质
- 金属表面示意图。



Schematic Illustrating the Subsurface Cross-sectional Surface/subsurface Structure of a Typical Film Covered Surface. (Rabinowicz Fig 4.6 p 57)



薄膜及其影响

- 表面膜的影响: 接触膜的存在往往妨碍导电, 甚至使工作完全失效. 但在开关触头和滑动接触中, 能减小冷焊和摩擦. 因此, 在不妨碍触头导电性的前提下应该允许膜存在。
- 表层金属决定是否反应生成膜及其性质
- 表面污染膜决定表面性质 (锡生成膜Vs金外来膜)
- 膜的成分, 特征和性质的环境依赖性 (不稳定性)。



膜及氧化膜

膜在金属表面的普遍存在

在实际中，即使最清洁的金属表面（如金）也堆积着一个或两个包围着的气体的原子层。一般情况，化合物是处于稳定状态，纯金属是处于最不稳定状态。金属的氧化物或硫化物之类的化合物存在于天然的矿石中，处于稳定状态，通过冶炼、精制获得的纯金属。然而这种纯金属是很不稳定的，往往受空气中的氧或硫化氢之类的气体腐蚀形成稳定的化合物。所以，制造连接器的金属不可避免的受O₂和H₂S的作用形成膜层。影响膜层的生长因素有：温度、金属种类、环境中锈蚀媒介及扩散率。所以膜层生成厚度就不能用一个完整通用的公式来表示。一般来说，在相同时间内，潮湿状态下，膜层生长得快，膜层较软和，连接器接触界面处由于局部发热有助于膜层生长。

氧化膜：金属与氧的反应生成氧化膜，可分为以下几种情况：

- 1) 在金属与氧化物接触的界面处进行反应。
- 2) 氧化物中的离子和电子向金属扩散反应。
- 3) 在氧化物与大气接触的界面处进行反应。

金属铜生成氧化膜的厚度随时间增加而加厚，一般有指数律和对数律以及线性关系。刚清洗的金属暴露在正常大气条件和使用温度中，经过零点几秒就生成一层或两层氧化物，随着时间增加，膜层厚度逐渐达到饱和。

黄金是生成氧化膜最少的一类金属。通常是在金的表面吸附一层氧，而第二层的氧化物也可能发生，但常常很弱，在轻微的接触力作用下就能去掉这一层。

污染气体与金属的反应原理类似于氧与金属的反应原理，即金属原子通过氧化层向外扩散与大气中氧结合。同时，氧或硫等杂质向金属内扩散。



膜的分类

膜的性质分类:

- 前锈膜: 它在基体金属上产生, 能发展成锈膜, 故有前锈膜之称。如化学吸附的单层氧化膜
- 锈膜 它由阵点金属原子组成。例如氧化物就是一种常见的锈膜。贵金属在大气中不易氧化, 但可能与某种气体作用生成化合物
- 外膜: 在金属表面附的一层其他物质。例如润滑膜、水膜。水膜或液体润滑剂本身(不考虑它们引起的电化或化学效应)对接触电阻的影响是很小的, 因为当触头闭合时它们便从接触斑点处挤走, 留下的单层膜能隧道导电。水膜的存在使触头表面产生局部电池效应。即使触头是一种材料, 也不能避免, 例如Fe。它的纯金属斑点作为局部电池的阳极, 它的杂质, 覆盖氧化物或沾污(如炭)的斑点作为阴极, 这就在不同的斑点之间形成电流而产生局部电池效应。会生成一种海绵状的氢氧化物—俗称铁锈沉淀下来, 铁锈的生成过程常比氧化膜生长快得多, 因此对接触有很大危害

根据膜的厚度分:

- 吸附膜: 它只有一个到几个原子厚。最典型的是单层膜。吸附膜可分成物理吸附和化学吸附。
- 保护膜: 这种膜在很薄时, 停止生长, 它能阻止化学侵蚀。某些金属表面, 当膜生长到 $1\sim 10\text{nm}$ 的数量级时停止生长, 这种膜能有效地保护金属表面避免氧或其它化学的侵蚀, 这种膜称为“保护膜”
- 暗膜: 这种膜能连续生长、加厚, 颜色灰暗, 故有暗膜之称。在许多普通金属表面上, 例如钢, 常生成这种暗膜。普通的贱金属材料在大气中大都生成暗膜

其他分类:

1) 无机膜层 2) 有机膜层 3) 薄膜——由散发的烟雾和润滑油的沉积物、微粒和纤维、或者在制造时潜入的油和工具磨损掉的物质之类的污染物等组成。

无机膜层和有机膜层主要是由物理和化学的键合产生的。第三类膜层中还是有机膜为主。

事实上, 所有这些膜是共存的。一些膜层(特别是硫化银)是一种松软结构, 就容易保存落入的杂质。对于半贵金属(指银以及银与金、铂或钯之类的贵金属的合金), 可以产生十分严重的硫化物。在铜、镍、钨或含有锌或铬之类金属的合金的接触件基体金属上, 膜层可能是不同金属的氧化物或硫化物的混合物。



摩擦聚合物/friction polymer

接触表面的固体沉积物即使沉积的厚度不大比如说1nm，也会使接触电阻增大，甚至导致接触失效。

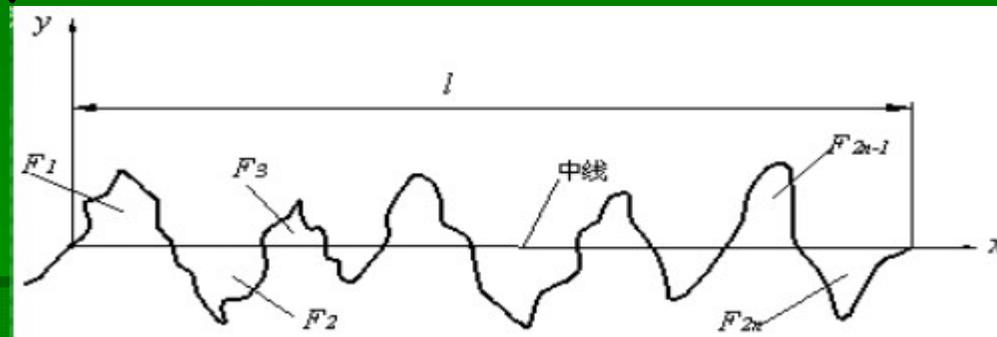
工业大气中的有机蒸气在触头的摩擦作用下会形成高分子量的无定形固体颗粒，它在接触面上堆积起来将触头绝缘。例如Pd触头，在闭合撞击和摩擦作用下(不论有无电流)，在触头表面形成褐色的绝缘粉末，这些粉末是一种异量的有机物，它与原始蒸气的成分相同，分子量不同，称为“摩擦异量”。实验研究得出，不仅是Pd，还有Pt、Ru、Mo、Ta和Cr都是形成褐色沉积物的触媒剂。Au形成这种固体沉积物的效应很小，Ag、Ni、Cu、Fe、W完全没有。上述的异量化效应在碳氢化合物中普遍存在，其中乙炔和芳香族效应最明显，只有甲烷不存在异量化。如果触头产生电弧，电弧将部分沉积物烧掉变成炭，这些炭化物能帮助触头在闭合过程中引燃电弧。进一步研究得出，“摩擦异量”的形成不一定需要摩擦，只是形成得很慢而已。在工程应用中，为了避免大气中有机蒸气和其它有害气体对触头的侵害，一些电器的触头采用了密封式的结构，例如舌簧继电器的触头就密封在玻璃泡内。



表面粗糙度

铜/合金的板材的典型表面粗糙度， $R_a=0.2\sim 1$

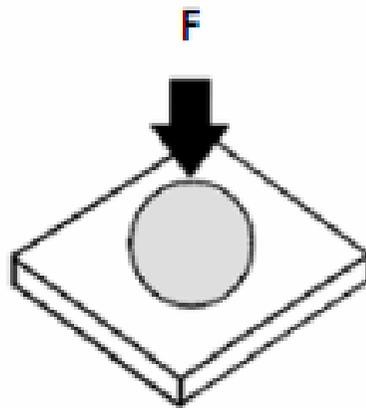
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$



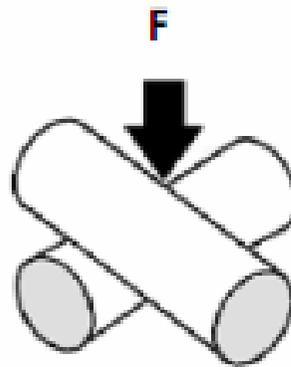


接触面几何形状

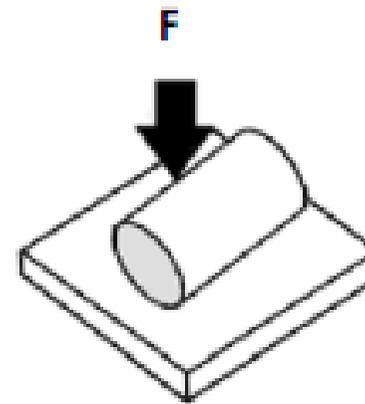
接触面的几何形状决定接触面积(表象),触点分布于接触面积内,接触面积决定触点的分布特点,对受限电阻产生影响.在相同条件下如下接触面的几何形状形成的接触面积按递增排列(从左到右)



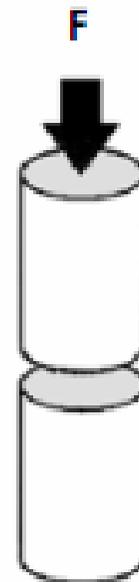
Sphere on flat



Crossed cylinders



Cylinder on flat



Flat on flat



触点微观分析 (1)

任何经过精细加工的名义平面,实际上都是粗糙不平.当接触时,即使外加很大的接触力在接触表面也只有少数的点(小面)实际发生真正的接触,这些实际接触的小面承受全部的外加接触力.由于金属表面一般都覆盖着不导电的氧化膜或其它种类的膜,因而在实际接触小面内,只有少部分膜被压破的地方才能形成金属与金属的直接接触,电流实际上只从这些更小的金属接触点通过.

机械接触斑点:

实际发生机械接触的小面简称“接触斑点”

导电斑点/a asperity:

形成金属接触或准金属接触的更小的面(实际传导电流的面)或称为a斑点.



触点微观分析 (2)

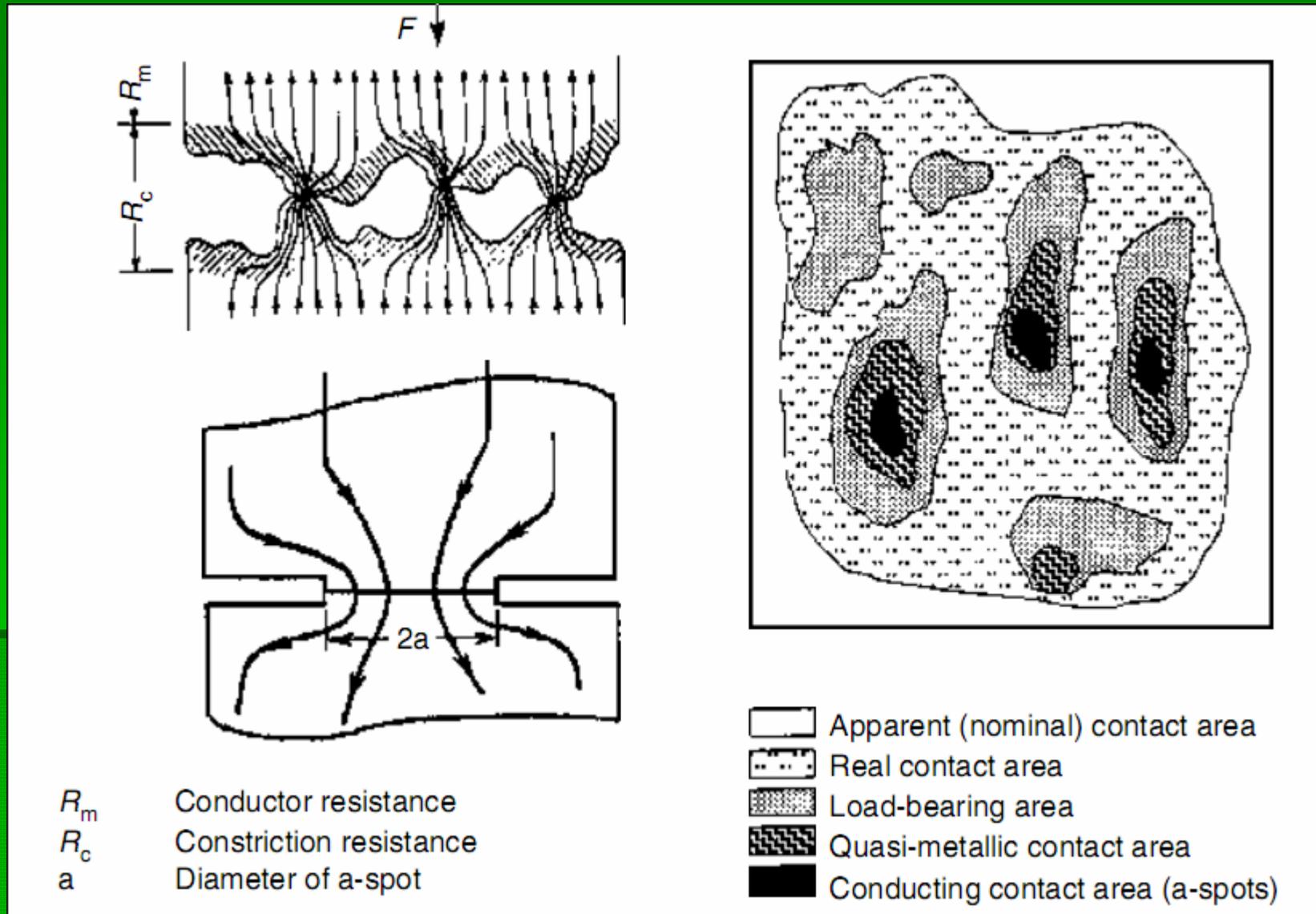


触点的分布,数量及触点区域的变形程度受影响于两表面的粗糙度,表面几何形状以及正向力.





触点微观分析 (3)



Encnn enables connection!

www.encnn.com



触点微观分析（4）



即使表面产生严重变形峰谷特点不会消失

- 实际接触面积只取决于正向力。
- 硬度数值便是例证（如100gf/平方毫米，100gf产生1平方毫米变形）。



触点的接触类型

- 金属/金属
- 金属/金属+膜/膜
- 膜/膜.



接触界面的电气特征

- 接触电阻的组成: 收缩电阻 (稳定) + 膜电阻 (不稳定)
- 接触电阻的计算和分析
- 金属膜的机械破坏
- 连接器镀层对正向力的要求
- 接触压降/斑点超温/软化温度和熔化温度
- 镀层对接触电阻的影响
- 膜电阻



接触电阻

收缩电阻/restriction resistance

当电流通过接触元件的接触内表面时，电流将集中流过那些极小的导电斑点，因而在导电斑点附近，电流必然发生收缩，由于电流线在导电斑点附近发生收缩，使电流流过的路径增长，有效导电面积减小，因而出现的附加电阻，称为“收缩电阻”。

膜电阻/film resistance

如果电流通过导电斑点不是纯金属接触，而是准金属接触，则电子因通过极薄的膜还会遇到另一附加电阻，称为“膜电阻”。

接触电阻/contact resistance

这两部分附加电阻在电路上是串联相加的，这个附加的总电阻称接触电阻。



接触电阻的形成

设两实际的粗糙金属表面，在真空中经清洁处理，去掉了表面膜。当此两金属面接触时，如果材料的硬度为无限大(为理想刚体)，则不论外加的接触力有多大材料都不会产生任何变形。在此条件下，对于两平面接触，实际的接触点最多只有三个。对于两圆柱面轴间平行接触，实际接触点最多是两个。而对于两圆球面交叉接触，实际接触点就只有一个。

材料的实际硬度都不是无限大，在外力作用下，材料都会产生变形。当外加接触力较小时，材料产生弹性变形，如果接触力超过一定限度，材料将产生塑性变形。因此，在外加接触力作用下，两实际金属面的接触过程如下：两表面开始接触时只有很少的实际接触点，由于此时实际接触面积非常小，单位实际接触面积受到的力非常大，起始接触点首先产生弹性变形，然后向塑性变形过渡。由于起始接触点变形，实际接触面积扩大，同时两金属表面的空隙部分相互靠近，继续产生新的实际接触点。最后，当总的实际接触面积扩大到支持力与外力相平衡时，接触过程结束。



接触电阻的计算

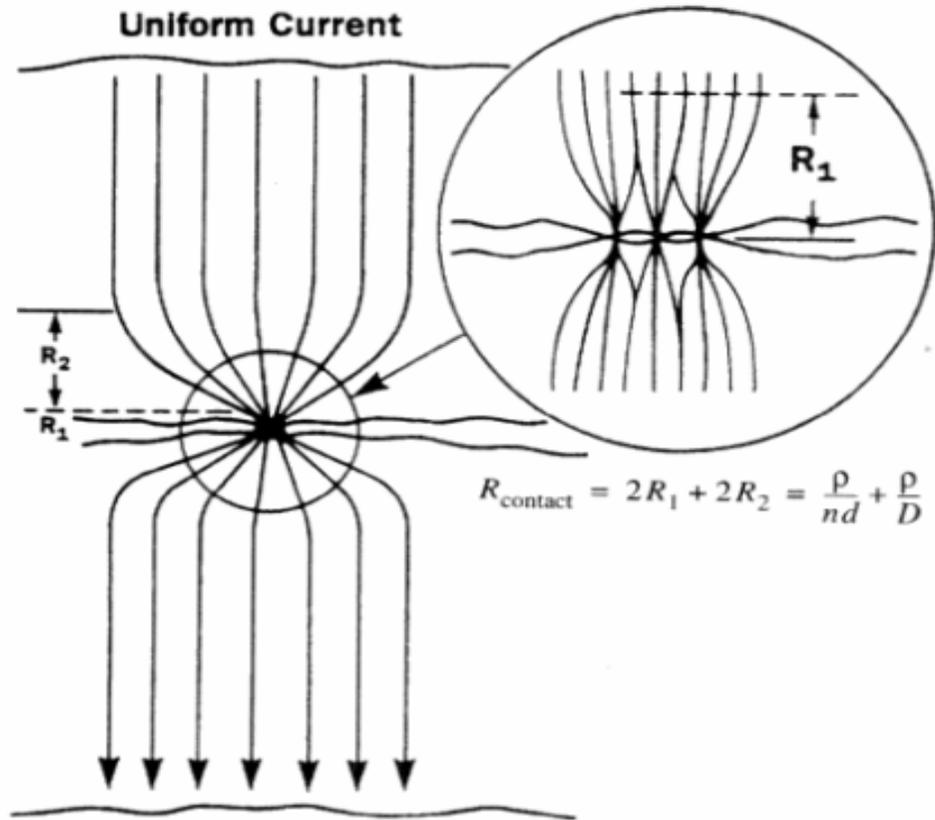
$$R = \rho L / A$$

根据电流收缩区电位为椭球场的假定，可以证明收缩电阻与导电斑点尺寸之间有下列的简单关系：

$$R_{constriction} = \rho / d$$



接触电阻的计算



长收缩: 导电斑点为圆形, 它的尺寸比视在接触面积小得多, 收缩区范围比导电斑点尺寸大很多, 在作理论分析时, 可令收缩区延伸到无限远.
短收缩: 导电斑点尺寸与收缩区范围比较相差不大.

Encnn enables connection!

www.encnn.com



接触电阻的计算

正向力增大, 导电斑点的导电模式由长收缩逐步转为短收缩: 正向力很小时, 接触电阻下降的很快; 正向力逐步增大, 接触电阻下降的没有之前明显, 且越发减慢; 接触电阻趋于与正向力平方根成正比.



金属表面膜的机械破坏

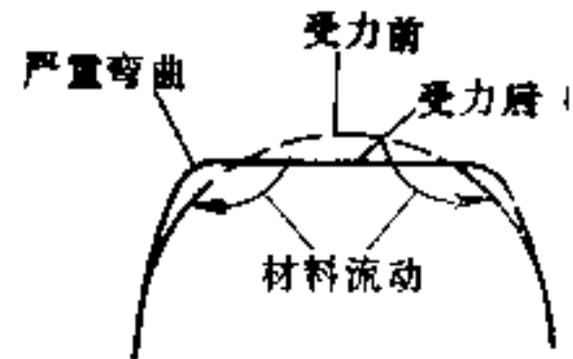
具有绝缘膜的两金属表面接触时，有两种方法可能使膜破坏；

- 一种是机械的方法: 机械的方法是在接触元件上施加一定的接触力，使实际接触面上获得极高的应力，当表面凸丘受力变形时，膜亦随之破裂。或者，在两金属表面接触受力的同时，使两表面作相对滑动，将膜磨碎并剥离。
- 另一种是电的方法: 电的方法是在接触元件两端施加一定的电压。当膜内的电场达到很高的数值时，膜便被“击穿”而破坏。

表面膜在凸丘变形时易于破裂基本条件：

- 第一: 凸丘受压变形处膜应受极高的机械应力，
- 第二: 膜的硬度和韧性与基底金属相比应有很大的差别。

在电接触中，凸丘初始接触变形，虽然膜已发生破裂，但不形成基底金属直接接触。当丘顶进一步受力变形时，顶端接触部分的表面积在变形前后有很大变化。凸丘顶部由弧线变成直线，长度缩短，膜下层的基底金属大量流动，使膜碎裂。凸丘受力变形的后阶段，膜的破裂部位发生在实际接触面内包括初始阶段一部分圆周方向和径向的破裂。这一现象表明，电接触只是在微观凸丘受力产生严重变形，才能出现金属的直接接触。



凸丘受力
变形过程的示意图



金属表面膜的机械破坏

在不同的接触方式,膜的破裂情况是极不相同的。

对于两金属表面无相对滑动的接触,实际接触面内膜的破裂呈不规则的网状分布,膜破裂成一块块小矩形碎片,在碎片与碎片之间,基底金属被挤压填满这些缝隙。

对于两金属表面有相对活动的接触,当接触斑点上的膜被压碎后,膜碎片在切线力的作用下,产生大块剥离,在接触斑点中形成大面积金属接触。

因此有相对滑动和无相对滑动的两类接触中,接触斑点内膜的破裂情况和形成金属接触的详细结构是不同的,在考虑收缩电阻和有关特性时应该区别对待。

连接器镀层膜:

鉴于不同的金属形成各种不同的膜,不同的接触方式,膜的破裂情况是不相同的.连接器要实现稳定的接触电阻,需保证金属界面通过机械方式渗透金属膜从而达到金属间的接触。

故要实现界面间良好的导电性,连接器各镀层对正向力的要求是不一样的.而且连接器各镀层对正向力的要求也受别的因素影响。



连接器各镀层对正向力的要求



The normal force required is dependent on the plating material. This dependence arises from the different surface chemistries and reactivities of the materials. The plating materials are generally divided into two classes. These classes are noble metal platings such as gold and palladium, and non noble platings such as tin.

Normal force, and the frictional force associated with normal force, contributes to the mechanical integrity of the contact interface by reducing the interfaces susceptibility to vibration and mechanical disturbances

金的正向力要求

Gold
Under
the low
An ex
is of t
suffic
Mech
conta
conta
Minim
consi
mech
oppos



连接器各镀层对正向力的要求



锡和锡合金的正向力要求

Tin is a non-noble metal which always has a tin oxide surface film. This tendency of tin to form surface oxides has many significant effects on the performance of tin as a contact plating. With respect to establishing a contact interface, the presence of the oxide means that the normal force applied must be sufficient to penetrate the oxide and establish metallic contact areas. In addition to normal force, wiping action is necessary to ensure adequate displacement of the surface oxides. The formation of tin oxides also plays an important role in the requirements for maintaining the contact interface. If the contact interface moves, the original contact interface will re-oxidize. If such oxidation occurs, the contact interface will be contaminated by debris and oxidation products, which will lead to contact degradation and fretting corrosion. Therefore, the normal force and wiping action are important performance factors for tin plating.

When the contact interface moves, the original contact interface will re-oxidize. If such oxidation occurs, the contact interface will be contaminated by debris and oxidation products, which will lead to contact degradation and fretting corrosion. Therefore, the normal force and wiping action are important performance factors for tin plating.

When the contact interface moves, the original contact interface will re-oxidize. If such oxidation occurs, the contact interface will be contaminated by debris and oxidation products, which will lead to contact degradation and fretting corrosion. Therefore, the normal force and wiping action are important performance factors for tin plating.

When the contact interface moves, the original contact interface will re-oxidize. If such oxidation occurs, the contact interface will be contaminated by debris and oxidation products, which will lead to contact degradation and fretting corrosion. Therefore, the normal force and wiping action are important performance factors for tin plating.



连接器各镀层对正向力的要求



钯和钯合金的正向力要求

some surface films, particularly in humid (relative humidity greater than 50%) environments. Palladium also shows catalytic behavior, which may result in the formation of organic films on palladium surfaces. These two characteristics result in a requirement for higher normal forces at the contact interface. The recommended minimum normal force for palladium is 50 grams. The same comments with respect to mechanical stability and contaminants as discussed for gold, apply to palladium contacts.

镍的正向力要求

The primary concern with nickel is the formation of a surface oxide film. This oxide film is a barrier to electrical contact. It is primarily a problem in humid environments. Oxide films are generally removed by cleaning with a mild detergent solution. However, if the cleaning process is not thorough, the oxide film will remain and cause contact resistance. In addition, nickel is susceptible to fretting corrosion. Fretting corrosion is a localized form of corrosion that occurs at the interface of two surfaces in contact and subjected to relative motion. This motion is usually small amplitude, high frequency oscillation. Fretting corrosion is a typical problem in electrical contacts, but a



接触压降/斑点超温/软化/熔化电压

- 接触压降:

当电流通过导体与导体的接触处时，由于接触电阻的存在，在电流收缩区两端必然会出现一定的电压降，这个电压降称之为“接触压降”。

- 斑点的“超温”

接触电阻产生焦耳热，使收缩区的温度升高，常超过收缩区外导体的温度。导电斑点上的温度超过收缩区外导体的温度的数值称之为斑点的“超温”

- 软化电压和熔化电压

如果通过导体接触处的电流增大，或者接触电阻增高，则接触压降必然相应增大，导电斑点和收缩区内的温度亦必然相应增大，当温度达到接触导体材料的软化点和熔化点时，导电斑点及其附近的金属就会发生软化和熔化。一定的导体材料，一定的软化和熔化温度，对应的接触压降称为材料的“软化电压”和“熔化电压”。



接触压降/斑点超温/软化/熔化电压

- 导体与导体接触处由于有接触电阻的存在，当电流通过它时必然产生焦耳热。使接触点局部区域温度升高。温度升高会促进表面膜的生长，使接触电阻增大，产生更多的热量。界面的温升影响界面的接触电阻（电阻随温度增大而增大），机械性能（摩擦和磨损，蠕变，应力释放）及其他因素（如微动腐蚀）。严重时接触点的温度可达接触元件材料的软化点、熔点，甚至沸腾点，最后使两接触面产生金属的焊接
- 在机械加工工业中，电接触的热效应被广泛应用于金属薄板的焊接即所谓的接触焊。
- 开关电器，当开关发生金属性的熔焊，触头不能被开关的分闸力断开，开关便失去它的工作职能。连接器的可分离界面若被熔焊也就丧失了连接器的功能。
- 研究电接触热效应的根本目的就是要找出导电斑点及其附近的温度大小和分布。找出难于测量的导电斑点温度与易于测量的接触电压（或通过的电流）之间的关系，找出接触电压（或电流），则导电斑点的温度间接可知



斑点超温的相关计算及其应用

用上述公式可以通过接触压降计算出斑点的局部高温，也就是说接触压降决定了界面局部高温的情况，在设计连接器界面时为了避免界面局部温度过高，我们需控制接触压降（不至于过大）。每种金属（镀层）能承受的接触压降取决于该金属的软化电压/熔化电压，而接触压降的大小由界面电流和接触电阻所决定。



斑点超温的相关计算及其应用

Material	Density (g/cm ³)	ρ (10 ⁻⁸ Ωm)	λ (W/(m°C))	H_B	α (°C ⁻¹)	E (10 ⁵ MPa)	Temperature (°C)		Voltage (V)	
							Softening	Melting	Softening	Melting
Platinum	21.4	11.7	70	40	0.0038	1.54	540	1,773	0.25	0.65
Gold	19.3	2.3	310	20	0.004	0.84	100	1,063	0.08	0.43
Iridium	22.4	5.5	60	170	0.0039	5.3	—	2,450	—	—
Palladium	12.0	10.8	70	32	0.0033	1.2	—	1,554	—	0.57
Silver	10.5	1.65	418	25	0.004	0.75	180	960	0.09	0.37
Tungsten	19.3	5.5	190	350	0.005	3.5	1000	3,390	0.4	1.1
Copper	8.9	1.75	380	35	0.004	1.2	190	1,083	0.12	0.43
Graphite	1.8	700	160	35	0.0013	0.03	—	3,650	2	5
Aluminum	2.7	2.9	210	27	0.004	0.72	150	657	0.1	0.3
Gallium	5.9	53.4	33	—	0.00396	—	—	29.75	—	—
Cadmium	8.6	7.5	90	16	0.004	0.6	—	321	—	0.15
Cobalt	7.87	9.7	69	125	0.0066	2.1	—	1,495	—	—
Molybdenum	10.0	5.8	140	250	0.0045	3.5	900	2,620	0.25	0.75
Nickel	8.8	8	70	70	0.005	2.1	520	1,452	0.22	0.65
Tin	7.3	12	64	4	0.0045	0.4	100	232	—	—
Lead	11.3	21	35	4	0.004	0.16	200	327	0.12	0.19
Zinc	7.1	6.1	110	33	0.0037	0.84	170	419	0.1	0.17
Rhodium	12.4	4.5	88	55	0.0043	3.0	1,966	1,966	—	—
Rhenium	21.0	9.71	75	250	0.007	4.7	1,400	3,170	—	—
Iron	7.8	10	60	67	0.0065	2.0	500	1,540	0.21	0.6
Manganese	7.46	164	—	—	—	—	—	1,245	—	—
Chrome	7.0	20	67	90	0.002	9.0	—	1,615	—	—
Mercury	13.55	94	9	—	0.0092	—	—	-38.7	—	—
Tantalum	16.6	14	545	40	0.003	1.9	800	2,996	0.3	1.0
Ruthenium	11.56	7.16	—	193	0.0046	4.2	—	2,500	—	—
Osmium	22.5	9.66	—	—	0.0042	5.6	—	2,700	—	—
Indium	7.3	8.2	24	1	0.0049	—	—	156	—	—
Hafnium	1.3	44	—	—	—	—	—	2,222	—	—
Cadmium oxide	0.69	600	—	—	—	—	—	—	—	—



接触电阻与正向力

ENCNN



镀层对接触电阻的影响

- 电镀层的硬度（相对于基材）影响如公式



- 电镀层较厚时，电阻率（相对于基材）影响如公式，较薄时，可忽略不计



- 镀层对接触电阻最主要的影响在于它对膜及污染物的管理，往往是决定性的。



膜的导电方式

膜层电传导的主要机理包括三种,即量子论的隧道传导;某些膜层中存在的电解传导;膜层击穿特性.

1) 隧道传导/隧道效应: 由量子力学理论可知, 根据德布罗意波的性质, 电子能够穿过膜而导电, 电子具有穿透位垒而导电的现象称为隧道效应。

三种型式的隧道效应

第1种型式, 隧道效应型式, 其特点是两元件之间的电压很小, 如说电压趋于零此时效应是欧姆型的. 即电流密度正比于电压.

第2种型式的特点是电压很高, 为“场发射”型, 其电流密度主要决定于电场.

第3种型式介于1和2之间. 即电压为中等大小. 电流密度比电压上升更快. 当电压很高时, 便趋近于场发射膜层单位面积的电阻称为隧道电阻率, 随着膜层厚度的增加迅速大.

2) 电解传导: 有离子存在的膜层中, 在加上电场时, 这些离子能迁移, 形成电解作用的离子传导为主, 当电极是不同材料时, 由于隧道作用, 电极之间金属桥的生长以及极化作用, 产生固态电解



膜的导电方式

3) **膜层击穿**: 在膜层厚度增加时, 电阻迅速增加, 随之使膜层成为不良导体. 但是膜层可以发生机械击穿或电击穿. 膜层的击穿是接触特性非线性和不稳定的主要原因.

机械击穿: 接触件的膜层被接触压力弄破或撞向一边, 在膜层裂缝或破裂处使清洁金属之间接触, 发生压缩机理传导作用. 例如, 铜接触件清洁处理后, 在空气中放置几天后, 其电阻值虽然近似于收缩电阻的5倍, 但仍然远远低于隧道电阻即膜层电阻值.

电击穿: 许多膜层, 加上的接触电压须升高到足够高以后才发生电传导作用, 这是由于电击穿的原因所致. 在产生电击穿时, 由于静电吸引或其它过程吸引, 使接触件金属穿过通道形成电流. 膜层电击穿的一般作用过程是: 电流穿透膜层, 金属须延伸或向形成路径的各区域扩大, 在电流增加时它就增大, 并使局部膜层减少, 这种过程就称为熔接作用. 膜层耐受的电场强度约为 10^9 次方 $V/m=1V/nanometer$, 高于此值后, 膜层会被击穿.

一对触头接触, 夹有高电阻率的暗膜. 膜厚几十nm. 在触头的两端加上一电压, 电压由低升高. 开始电压很低时, 暗膜的电阻率很大, 通过触头的电流极其微弱. 当电压升高到几伏(加5v, 此电压称为膜的熔解电压), 触头间相应的电压梯度达到 $10^8 v/m$ 的数量级时, 电流突然增大, 接触电压立即下降, 这说明暗膜已被击穿(熔解), 并形成导电通道. 形成了一个导电斑点. 这个斑点能够在接触电压低于触头材料的熔化电压, 但高于软化电压的情况下传导电流.

绝缘暗膜的击穿通常假定开始于场发射或齐纳效应, 由于强电场作用使边界位垒斜度增大并且变薄, 以致电子能隧道通过位垒. 暗膜的厚度不十分均匀. 电子自动选最容易穿透的一个窄的通道通过. 通道内膜被电流急剧加热, 造成膜在此处熔解. 最后, 熔化的金属吸入通道形成金属桥接.

膜熔现象有两类熔解, 解电压在几伏的数量级, 称为A类熔解; 熔解电压只有几十毫伏, 称为B类熔解.



膜影响电镀层材料的选择，正向力的要求，配合滑动距离

- 膜的不稳定性：成分的环境依赖性--电阻率；厚度；接触面积。
- 电场对膜的击穿现象；击穿的不可预估性。



接触界面的机械特征

- 摩擦与磨损对连接器的影响：插拔力，界面稳定性，插拔寿命
- 摩擦与磨损的本质
- 连接器领域中的摩擦特点及规律
- 磨损的概念
- 连接器常见磨损类型
- 正向力对磨损的影响
- 硬度和润滑对磨损的影响
- 硬底层软表层（e.g. 镍底+薄金表层）
改善磨损性能-“砧板效应”。



摩擦的概念



当两表面相接触时，在载荷作用下，某些接触点的单位压力很大，发生塑性变形，这些点将牢固的粘着，使两表面形成一体，称为粘着或冷焊。当一表面相对另一表面滑动时，粘着点则被剪断，而剪断这些连接的力就是摩擦力。此外，如果一表面比另一表面硬一些，则硬表面的粗糙微凸体顶端将会在较软表面上产生犁沟，这种犁沟的阻力也是摩擦力，即摩擦力由粘着阻力和犁沟阻力两部分组成

摩擦副的相互作用

(1) 静止时表面粘着作用---在洁净金属表面，即微凸体顶端相接触的界面上不存在表面膜的情况下，金属与金属在高压下直接发生接触，发生塑性变形，这些点将牢固的粘着，使两表面形成一体(粘着或冷焊)。如图中的C, D点。

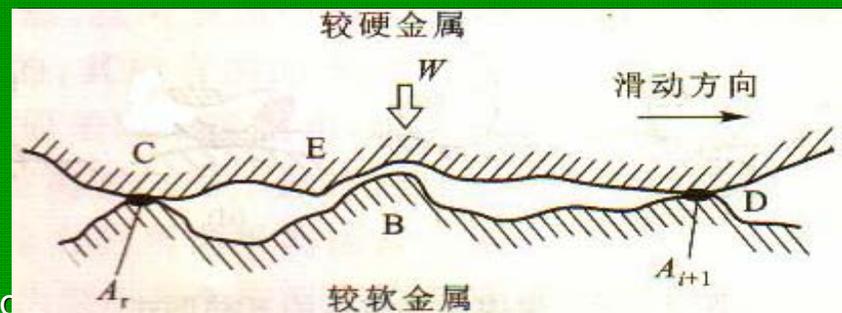
(2) 运动时表面材料的迁移---在上图中B点处虽没有粘着作用，但是当表面发生相对运动时，B点处阻碍运动的那部分表面材料可能发生如下情况才能继续作相对滑动。

a) 微凸体E(或C)通过B时，微凸体B发生比较严重的塑性变形而粘着。若其粘着点粘着强度比软金属大，则滑动剪断发生在软金属层内，从而造成金属从下表面转移到上表面。

b) 微凸体B虽然发生塑性变形，但不严重，因而粘着并不牢固。微凸体E(或C)沿B“犁削”而过，即沿两物体的界面剪断，这时下表面微凸体B发生材料迁移变形(犁沟)，但不发生上述金属转移情况。

3) 运动时表面材料的滑动---微凸体B只发生弹性变形，微凸体E(或C)比较容易地滑过B。

对金属间的摩擦而言，主要是粘着作用，其次是“犁沟”(变形)作用。而材料的弹性变形引起的能量消耗很小，因而对总摩擦阻力的影响很小，故可忽略不计



两表面摩擦示意图



连接器中的摩擦特点及规律

- 摩擦的复杂性：大量的材料参数，表面形状参数，环境参数的相互影响
- 连接器领域中摩擦的简化特点：
 - 除极端情况下（极大极小），摩擦性能与速度和表面粗糙度无关
 - 摩擦热忽略不计
 - 表面几何形状决定摩擦性能（犁沟，磨损痕迹形式...）
 - 界面的表面形貌（膜，镀层/涂层，基材...）决定摩擦性能
 - 摩擦的复杂性及应用状况的复杂性无法量化摩擦的性能。
- 摩擦的经典定律
- 极端情况外， $F_{\text{friction}} = \mu \times F_N$
- 摩擦系数与名义接触面积无关（表面粗糙度和正向力极端情况外），与真实接触面积有关，摩擦力是粘着效应与犁沟效应产生阻力的总和。
- 材料决定摩擦系数
- 表面粗糙度对摩擦系数的影响
- 正向力对摩擦系数的影响
- 静态摩擦系数往往大于动态摩擦系数（静态有较大的真实接触面积—1，较长的界面接触时间，2，弹性能转为塑性能/蠕变可能性更高）
- 润滑对摩擦系数的影响
- 应用环境/工作环境/生产环境是天然的润滑剂施敷者，效果取决于环境本身。



表面粗糙度对摩擦系数的影响

- 规律见附图
- 在相同的真实接触面积，大的触点相对小的触点需更大的剪切应力来分离界面故有较大的摩擦系数
- 较高的粗糙度产生较大的摩擦系数是机械互锁所致.



正向力对摩擦系数的影响



- 规律见附图
- 正向力很小时 ($<1gf$), 膜/膜界面
- 正向力变大时 ($1gf < F < 10$), 膜/膜+金属/金属界面
- 正向力较大时 ($10gf < F$), 金属/金属界面



润滑剂对摩擦系数的影响



- 润滑剂降低摩擦系数，但对静态和动态摩擦系数影响不一样
- 对于动态，润滑剂提供剪切强度较小的界面
- 润滑剂有一定的厚度要求---润滑层不至于太薄
- 润滑剂有一定的正向力应用范围---润滑层不至于太薄
- 润滑剂有一定的温度应用范围---润滑层不至于太薄
- 静态润滑本质上更接近无润滑状况---润滑层被挤出触点区域，但可根据应用要求调整润滑剂性能



磨损的概念

相互接触的物体在相对运动中，表层材料不断损失、转移或产生残余变形的现象称为磨损，它是伴随着摩擦而产生的必然结果。

磨损的影响因素，包括摩擦副材料、表面形态、润滑状况、环境条件，以及滑动速度，载荷，工作温度等工况参数。

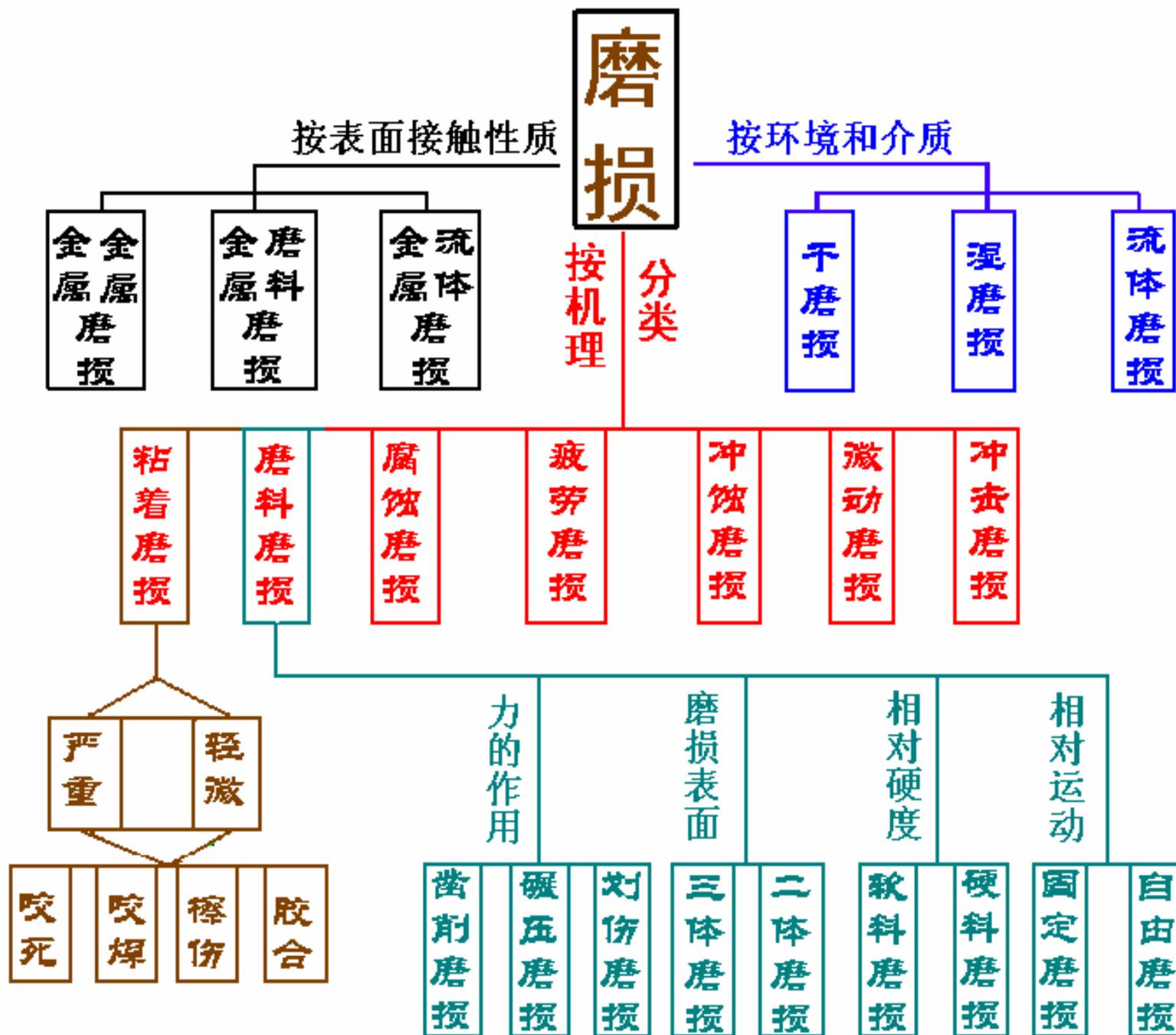
零件的正常磨损过程大致可分为三个阶段：

I：跑合阶段； II：稳定磨损阶段； III：剧烈磨损阶段





磨损的分类





连接器常见磨损类型

- 轻微磨损: 粘着强度比摩擦副的两金属基体强度低时, 剪切发生在粘着结合面上, 表面转移的材料较轻微
- 粘着磨损: 当摩擦副相对滑动时, 由于粘着效应所形成的结合点发生剪切断裂, 接触表面的材料从一个表面转移到另一个表面的现象称为粘着磨损。磨损的程度/快慢取决于剪切断裂处离结合原点的距离, 而这个距离又决定于粘着结合点相对于两表面基材的强度, 正向力以及界面的几何形状
- 磨粒磨损: 外界硬颗粒或者对磨表面上的硬突起物或粗糙峰在摩擦过程中引起表面材料脱落的现象.
- 微动磨损/微动腐蚀: 另一章的内容.



正向力对磨损的影响

- 正向力增大，磨损的速度增加，但它们并不是线性关系，正向力是决定磨损方式的主要因素，当正向力在一定范围内，磨损方式发生改变（如从轻微磨损转为粘着磨损，甚至磨粒磨损），磨损速度剧增或剧减。
- 当正向力较大时，结合点由于加工硬化的缘故致使剪切强度高于基材本身而产生粘着磨损，磨损加剧。



硬度和润滑对磨损的影响

- 硬度越高，在别的相同的条件下，结合点变形面积/接触面积越小，磨损越小。硬度也是决定磨损方式的主要因素。
- 润滑也是决定磨损方式的主要因素，对磨损寿命的影响巨大。



砧板效应的镀层

ENCHN

SUCOPRO - THE GOLD PLATING FOR THE FUTURE

SUCOPRO is a thin gold plating with a nickel-phosphorus alloy (13 % phosphorus) underlayer. The gold layer - which is not subject to oxidation itself - protects the nickel-phosphorus underlayer against oxidation and thus allows for good wetting while soldering. It provides stable, low contact resistance and improved protection against oxidation and corrosion. Because it only contains a thin layer of gold, the solder joints will not become brittle.

The nickel-phosphorus layer provides very good corrosion resistance, high wear resistance and hardness, and a diffusion barrier against gold, copper, tin and zinc. Below 300°C the NiP is amorphous and non-magnetic. Between 300 and 500°C it changes its structure to microcrystalline and its hardness increases but no brittleness or weak adhesion occurs.

At low temperatures (-20°C) no changes of the soldering properties were detected.

The main advantages of SUCOPRO are:

- Excellent wear resistance
- Non-magnetic
- Excellent corrosion resistance
- Excellent wettability / solderability
- Very high strength of soldered joints without embrittlement
- Low contact resistance

STRUCTURE OF THE SUCOPRO PLATING

Top Layer:	Gold 99.7%	min. 0.1 µm
Underlayer:	Nickel Phosphorus Alloy (P13%)	min. 2.0 µm
Underlayer:	Copper	min. 0.5 µm
Base Material:	Brass or other Materials	