

# 微振磨蚀故障

文/ Thomas Dopke



虽然针对振动和其他脱缝机理业界进行了许多详细地研究，但还是有一个影响因素极少有人问津，甚至没有为大家正确认识，那就是磨蚀。磨蚀是微振磨损作用的结果，随着铝制品的广泛应用，磨蚀也渐渐成为人们常见的故障。微振磨损为一种损伤形式，是两个表面相互接触但在彼此相对静止的情况下发生轻微周期性相对位移而引起。两表面因轻微位移形成的摩擦会产生金属碎片，造成磨损率上升、其他化学问题、碎片散落到相邻的元件上、影响元件的功能或者造成损伤。在大多数情况下，这类位移、滑移都是非常轻微且不易察觉。据了解，在一些故障中发现每年产生的相对位移仅有150毫米。磨损生成物基本上又会变成磨蚀剂，致使接触面之间产生更多磨损，导致元件损伤。承载夹持载荷的表面出现减薄情况后，会降低张力并导致疲劳失效；这类情况常被误认为是很多微振磨损故障的主因。

表面在夹紧状态下接触且承受变化应力或者振动时，有可能出现轻微的相对位移和微振磨损。根据接合情况可分为两大类：一类为根据设计元件之间不会发生相对位移，包括冷缩配合、铆接、螺栓接合与键接等；另一类是根据设计元件之间有时可能发生相对位移，包括轴承、耦合、钢丝绳、凸轮等。以下本文的重点将锁定在扣紧接合。

微振磨损通常发生在接合较紧的接头中，也就是说，在铆接和销接（孔眼已完全填充）中不可能出现相对位移，但在螺栓接合中则有可能发生相对位移的情形。因为接触面几乎不会脱离接触，所以磨损生成物无法从元件上排出，出现排出物质即可充分说明造成微振磨损的原因。铁质材料之间发生微振磨损后，碎屑通常呈现微红色，一般称为「锈尘」；铝质材料表面发生微振磨损后，排出物一般为黑色，而在

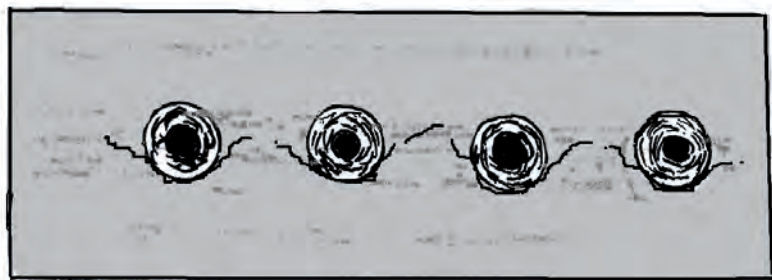
正常情况下铝的腐蚀产物为白色。如果微振磨损已经发生，那麽接下来将会出现疲劳裂纹。

由微振磨损所引起的疲劳断裂有其特有的形状和位置，**透过检查会发现裂缝往往不是从孔眼开始，而是从磨耗痕迹的边缘开始**（见以下图解）。

损失将造成部件发生更大程度的位移，进而导致更严重的后果，加速故障产生。

**表面糙度对微振磨损的过程具有重大影响，表面相对粗糙，则可产生更多形变适应运转条件，同时也提供更多的凹陷容纳灰尘，因此可阻碍和迟缓微振**

粗糙表面 vs 光滑表面



在正常情况下，疲劳裂纹会形成正弦波样图纹，根据一铆接部件显示，疲劳裂纹从一个磨耗痕迹圆周开始，呈曲线状逐渐向下发展，然后改变轨迹向上发展至另一个磨耗痕迹，呈现出上文提到的正弦波图纹。夹持载荷的

**磨损的出现**。表面糙度可以减少碎屑的磨损作用，而碎屑多为磨掉的金属，成分多半为金属氧化物。这些碎屑颗粒就像砂纸一样不断摩擦部件表面，产生的灰尘一方面增加传送摩擦阻力，另一方面又如同磨蚀剂加剧两接触面



粗糙表面：  
凹陷处可以容纳碎屑，  
防止其产生研作用。



光滑表面：  
磨屑产生砂纸的研磨  
作用，磨损表面。

粗糙表面 vs 光滑表面

间的摩擦与磨损，而光滑的表面会致使金属碎屑颗粒停留在表层并不断地摩擦两接触面。

### 微振磨损的影响

那该如何界定磨损属于微振磨损还是正常损耗呢？首先，微振磨损在极低速度的状态下发生，一般来说，速度低至150mm/年的情况下，会出现微振磨损。其次，微振磨损发生在两表面持续互相接触的条件下，使得磨蚀剂残渣从两表面间脱离后停留在边缘位置。

微振磨损的影响不尽相同，小至造成困扰，严重时却可致命。例如，钢丝绳发生微振磨损后会产生氧化物，氧化物的体积往往超过母材本身，产生的力可使该氧化物与钢丝绳发生分离，甚至进一步造成氧化和磨损，让吊桥塌落或者起重吊车故障；外科植入物（接骨夹板）亦有实证，植入物中的固定螺钉因微振磨损而出现腐蚀情况，而金属具有部分可溶性，伴随局部金属离子的出现，无论其惰性强多弱都有可能损害人体组织或延迟复原。

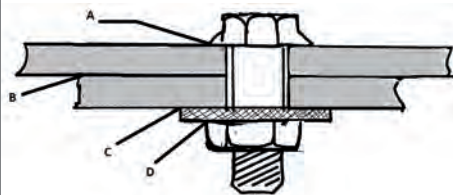
另磨粒可能落入相邻的元件，造成装置（尤其是通过少量电流发挥功能的装置）出现短路和电气故障。以现代电气装置为例，随著手机、iPod、电脑等小型化趋势，线路间几乎没有预留空间容纳上述磨粒，因此操作机构中滞留的碎屑颗粒将导致运动部件的滞塞和干扰，如果部件是安全阀或者螺线管则可能造成严重后果。

根据故障铆钉孔图解显示，铆接的接头接合比较紧，对微振磨损非常敏感。反向弯曲动量或振动即使没有超过夹持载荷，也会形成微振磨损作用。基体金属接头的铆钉头、固定在一起的两个片材之间、锚柄和孔壁之间均有可能产生微振磨损。

如果是螺栓接合，锚柄和孔壁间存在空隙时，则与接合元件表面相接触的上轴承表面和螺母的另一面均会出现微振磨损，通常会称为「夹持载荷」（预载）可以维持接头的紧密接合状态并阻止位移的发生，但这不能说明接头可承受超过设计参数的载荷。位移持续的时间仅仅是几微秒，也非定期的周期性动作。典型事例就是车胎撞击路边的情况，发动马达甚至猛关车门

都会产生冲击载荷，此外，热胀冷缩也会引起各种物品的位移，如电脑、电灯泡等。

微振磨损可透过多种方法预防，最有效的方法是润滑。对于铝制品的微振磨损，在两接触部件之间添加润滑脂或润滑油可降低摩擦系数，减少侵蚀作用。如需进一步加工，则该办法效果不佳，许多企业利用齿条把零件分离，也有采用在金属片之间放置纸片的方式以减少微振磨损。



螺栓接合出现微振磨损的部份  
A-螺栓正下方与表面接触部位  
B-两板间的接触面  
C-垫圈表面与表面的接触部位  
D-螺母表面与垫圈的接触部位  
注：螺栓轴与螺栓孔壁之间不存在微振磨损。

关于微振磨损的性质和形成虽然有一些理论著作，但是这些文章参考价值并不大。自然科学和材料科学专家，对微振磨损的数学解析能让大家了解微振磨损的产生原理，但大多数读者更希望了解在出现故障时需做哪些检查。

是微振磨损还是正常老化？除出现碎屑外，微振磨损的另一个重要特征是表面的凹陷，一般



钢丝绳的润滑防止微振磨损和氧化物膨胀腐蚀

分为盘状浅坑和深坑，且通常伴有凸缘的两种类型。浅坑是在碎屑可以脱离形成区域并开始产生砂纸作用的情况下形成；深坑则是在磨掉的物质被滞留的情况下发生。因该物质体积大于坑的面积，所以在压力之下引起金属周围的变形，在凹陷位置周围形成凸缘。

**腐蚀疲劳裂纹一般出现在与微振磨损方向成直角处，即位移的方向（交变应力的方向）。**裂缝从磨蚀点处开始呈斜角发展，在裂纹范围超出微振磨损的作用范围后，开始与微振磨损方向成直角位移。典型磨蚀疲劳破断裂纹面会显示出一个裂纹面材料的舌片和另一个裂纹面上出现的相应碎片。这一点就足以说明故障是因微振磨损而起的最佳证明。

## 如何预防微振磨损

人们常常会问在微振磨损开始的一刻究竟发生了什么事？假设相互接触的粗糙面承受较大的压力（夹持载荷集中在接触点位置，且有可能超过了材料的抗张强度），相对位移就侵蚀了正在形成的保护膜（通常是氧化物）。这种压力把两个表面「焊接」在一起，当有充分的时间发生位移时，如果该「焊接」力

低于两个滑移面的弹性效应且焊接表面已因形成的氧化层弱化的情况下，焊缝就很容易分离。位移的频率较大时，氧化膜没有完全形成，就出现了金属间的粘合，后来的位移打破了这种接合，产生磨损表面，磨损表面又粘合到下一个接触面上。快速回圈状态下磨损表面增长较快，零星位移时增长较慢，直至形成碎屑，碎屑又产生摩擦剂的作用，进一步磨蚀表面。

要预防微振磨损应首先从设计出发。把表面接合后产生更高的正常压力以阻止任何振荡运动作为设计的目标。但是，因大多数接头都会出现一些位移，微振磨损还是有可能出现。设计应该力求把受力大的部位设定在不会出现微振磨损的部位，但具体实践起来可能比较困难，因为两者往往是紧密相连的。以下列举针对标准接头的一些常用处理办法：

压合（轴承内的毂、轴、电机轴等）可透过降低轴径的减少高应力区域（通常在安装孔的轴上），而在该区域构造凹槽也是一个解决办法。此外，表面抛光、调整硬度、振动频率等都有一定效果。

**销接精密配合接头发生微振磨损的概率最低，阻碍增加微振磨损也随之增加。**

铆接和螺栓接头，如果重复松紧操作或者处于变化张力作用下，则孔眼区域会出现微振磨损。最佳的设计原则是尽可能使用最多数量的最大直径的同厚度紧固件。但鉴于现今减少金属重量和零件尺寸的需求，这一点很难达成。

润滑已在前文中简要提到，润滑剂能把摩擦系数降至最低，虽无法阻止相对位移的发生，可以降低接触区域的磨蚀作用。

金属涂层已经被用作金属表面之间的减摩剂。镉因其不会硬化零件且不会产生金属间化合焊接，曾被公认为理想的耐摩涂层，但目前已被大多数国家禁用。

采用更高疲劳强度的材料不一定可以解决微振磨损问题。试验结果也证实了该结论，虽然铸造材料的疲劳强度比较低，但是铸件表面的磨蚀疲劳强度比锻造表面的磨蚀疲劳强度高。 □

