微动疲劳损伤失效分析

Failure Analysis of the Fretting Fatigue Damage

中国民航适航中心失效分析室　曹大树　吴培远

Cao Dashu　Wu Peiyuan（Failure Analysis Dvision of CAAC-AAC）

［**摘要**］　介绍了微动疲劳损伤失效的现象，影响因素，鉴别特征，并举例说明。

关键词：微动疲劳损伤　失效分析

［**Abstract**］　This article describes the phenomenon, effect factors and distinguishable characteristics of fretting fatigue damage failure by real case.

Keywords：fretting fatigue damage　failure analysis

1　微动疲劳损伤失效的现象

微动疲劳损伤即微振疲劳损伤（Fretting fatigue damage），它是指名义上并不存在或产生相对运动的两个零件，由于在局部相互接触的两个表面区域，在一定的法向载荷作用下，出现微幅的相对振动运动。由于这种微幅的振动，将导致接触部位表面发生磨损、粘着和腐蚀效应，而且，随着循环周次的增加，在微动磨损区，或微动磨损区与非磨损区的界面间产生向里和向外发展的微裂纹，向里发展的微裂纹往往有可能发展成为疲劳裂纹源。

产生微动损伤效应的微动振幅，最小为 $2\sim75\times10^3\mu m$，但一般多在 $300\mu m$ 以下范围发生。因接触面积小，正压力很大，而且相对滑动幅也很小，所以微动磨损产生的氧化磨削大部分滞留在原处，如微动疲劳损伤断裂的源区，初始扩展区，以及源区毗邻的外侧表面。

微动损伤大幅度降低材料疲劳强度的原因归因于表面完整性和氧化防护膜遭到在重复性的破坏得不到修复，大大缩短了疲劳裂纹的形核周期。

2　影响微动疲劳损伤的一些主要因素

2．1　相对滑动幅

相对滑动幅指两个零件发生微动时，局部接触表面之间的切向位移幅。对铝合金的研究结果表明，当相对滑动幅小于 $7.5\mu m$ 时，微动疲劳强度随滑动幅的增大而下降，而当相对滑动幅超过 $7.5\mu m$ 之后，两者无关。对碳钢而言，相对滑动幅小于 $20\mu m$ 时，微动疲劳强度随相对滑动幅的增大而迅速下降，但当相对滑动幅大于 $20\mu m$ 时，随相对滑动幅的增大而有所增加。有鉴于此，认为材料的微动疲劳强度存在一个临界滑动幅。当相对滑动幅小于其临界滑动幅时，材料的微动疲劳强度随相对滑动幅的增大而下降，而当相对滑动幅小于其临界滑动幅时，其微动疲劳强度基本保持不变，甚至有所提高。当相对滑动幅等于临界滑动幅时，微动疲劳强度最低。公认的临界滑动幅，一般在 $8\sim20\mu m$ 范围。

2．2　接触压力

接触压力增大，接触部位表层在发生微动时的应力集中程度随之提高，可加速疲劳微裂纹的形成。在接触压力足够大时，形成微裂纹所必须的循环应力已很低，一旦裂纹尺寸超出接触压力和表面摩擦力的影响范围，裂纹尖的应力强度因子 $\triangle K$ 降至材料的疲劳裂纹扩展门槛值 $\triangle K_{th}$ 以下时，裂纹停止扩展，此时材料的疲劳强度将不再随接触压力的增加而下降。此外，接触压力的变化会改变界面摩擦力的大小，由此影响表面损伤程度，导致应力集中大小的不同，从而影响微动疲劳强度的不同。

2．3　受力状态

在微动疲劳条件下，作用在接触部位的有两个表面应力：一个是垂直于接触表面的接触压力，一般看作静应力，其作用如前述；另一个是表面摩擦力（切向力），它与循环应力同步变化，因此它是一种表面的交变切应力，对疲劳裂纹的形核和 I 阶段扩展起着重要作用。

此外，当工件在工作中承受拉应力作用时，表层的塑性流变得以松弛，尤其是当外加拉应力卸除之后，表层出现残余压应力，可抑制疲劳裂纹的萌生和扩展。反之，原先在压应力作用下进行的微动磨损过程将留下残余拉应力，可加速微裂纹的形核与扩展。

2．4　材料的影响

材料对微动疲劳损伤的影响，主要有以下几点：

（1）表面未经强化处理的材料

材料的常规疲劳强度 σ_{nf} 与拉伸强度 σ_b 在硬度 HV 之间一般存在以下近似关系：

$$\sigma_{nf} \approx \frac{\sigma_b}{2} \approx \frac{HV}{6}$$

当出现微动磨损效应时，材料的微动疲劳强度仅为常规疲劳强度的一半，即

$$\sigma_{ff} \approx \frac{1}{2}\sigma_{nf}$$

应当指出的是，上述经验关系式在一般情况下适用。但若材料表面未经处理，则材料表面的粗糙度，表面应力、以及表层材料的性质、表面摩擦系数等，对微动疲劳强度都有影响。如表面十分粗糙，对常规机械疲劳而言是不好的，疲劳强度必然降低，但对微动疲劳损伤而言，反而可提高其疲劳抗力，究其原因是，当粗糙表面相互接触时，只有微凸体承受微动效应，必须在经过若干周次的微动之后，微动损伤才触及基体材料，自然推迟了微动疲劳裂纹的形核与扩展。

（2）表面经过强化处理的材料

当材料表面经过渗碳、氧化、淬火或喷丸、滚压等强化处理之后，由于提高了材料表面的硬度和耐磨性能，在相对滑动幅较小时，因磨损量小、磨痕浅，造成的应力集中小，材料的疲劳强度下降很小。但当相对滑动幅较大、磨损量增大、磨痕加深时，应力集中加剧，微动损伤的作用与尖缺口相似，疲劳强度将大幅度下降。

（3）显微组织

对同种材料而言，强化处理状态，如冷作硬化、淬火后低温回火，则比软处理状态，如退火或高温回火状态，具有更大的微动损伤效应，因而疲劳抗力低。其原因可能与缺口敏感效应和材料的脆性倾向有关；单相组织与多相组织相比，单相组织抗微动损伤疲劳的能力要低，原因是多相组织对裂纹扩展比单相组织有更大的阻力作用。

2.5 环境介质

一些金属材料，如铝合金、钛合金、奥氏体或马氏体不锈钢等，在大气中表面会形成具有防护功能的氧化膜。由于微动损伤效应，表层氧化膜不断受到破坏，环境介质不断渗入与新鲜基体金属不断发生腐蚀反应，此过程反复循环进行的结果，大大加速了材料损伤失效的进程。

3 微动疲劳损伤裂纹的萌生与扩展

在发生微动疲劳损伤失效过程中，首先是在微动损伤部位由于材料或零件的表面完整性，因局部永不脱离地相互接触，而且相对运动速度也很小，从而造成了缺口，微动腐蚀产物也无法排除，这样使处于正常工作中的零件出现下面的一些情况：

（a）在缺口部位产生高的局部应力，即导至局部的高度应力集中；

（b）由于缺口效应，引入了三向拉伸应力状态，其弹性应力集中系数 K_t 可趋近于 10，材料容易发生脆性破坏；

（c）产生高的局部应变硬化与开裂；

（d）应变速率局部增大；

（e）微动腐蚀产物犹如“楔子”一般，促进裂纹扩展。

对于已形成微动损伤斑的构件而言，该损伤斑亦犹如其它材质、工艺、腐蚀损伤缺陷一样，是天然的疲劳源，疲劳裂纹从该损伤部位直接扩展。

在微动疲劳裂纹形核后，其扩展过程可分为两个阶段：

Ⅰ阶段主要是交变切应力起作用，裂纹沿着与接触表面大体成 45° 角的方位扩展，断面的主要特征是交滑移小面；

Ⅱ阶段裂纹则沿着垂直于交变拉伸应力的平面，即垂直于交变应力轴的方向扩展，断面的主要特征是条带花样。

应当强调的是，在微动疲劳损伤中，由于微动效应，微动磨粒楔入裂纹尖，极大地加速了裂纹的扩展速率，尽管零件在工作中常常是承力很小，甚至于是不怎么承力的一类零件。

4 微动疲劳损伤失效的鉴别特征

（1）构件连接形式

出现这类损伤失效的构件，在工作时名义上并不存在或发生相对运动，设计结构上相互都不接触，因此，宏观上看来相互处于静止状态，然而，在实际工作中却有局部的接触，而且是永不脱离的，在接触表面之间存在着小于 300μm 的微幅相对滑动。

（2）构件破坏或断裂起源部位毗邻的外表面有微动斑标记；微动斑的底部是微动磨损坑，坑内常存有磨削产物，钢的磨削产物多呈粒状或片状，系红棕色的氧化物，铝合金、镁合金、钛合金的磨削产物系黑色粉末。

（3）在微动磨损坑粘结斑之间，或在微动磨损坑与未被磨损的基体金属的交界部位，常可观察到一些微裂纹，它们中有的向基体内部延伸扩展，形成疲劳裂纹

的顶面和侧面最清晰，颜色稍暗。侧面呈橙黄色，侧面上有明显的层纹。横断面呈椭圆形，直径大部分在3cm以内，横断面积不超过3cm²，部分超3mm