

## 金属断口分析：揭开金属失效的秘密

引言：金属断口分析是一门研究金属材料在受力后如何断裂的学科，它可以揭示金属材料的性能、结构、缺陷和失效机理，为材料设计、加工、使用和改进提供重要的依据。本文将介绍金属断口的分类，通过对这些形貌特征的识别，判断金属材料的断裂类型和原因，从而找出金属失效的秘密。

根据金属材料在断裂前是否有明显的宏观塑性变形，可以将金属断口分为韧性（延性）断口和脆性（解理）断口两个大类，其他也根据实际断口分为准解离断裂、疲劳断裂。

**韧性（延性）断口：**材料在断裂前及过程中产生明显的宏观塑性变形的断裂现象。这类断口在扫描电子显微镜下，可以明显看到韧窝（微坑），韧窝周围的白色脊线称为撕裂棱。韧窝的形成包含了微孔形成、长大和连结等过程。在每一个韧窝内都含有一个第二相质点或者折断的夹杂物或者夹杂物颗粒，它们是微孔形成的核心。在加载力的作用下，初始裂纹沿拉伸方向延长，形成空洞（裂纹扩展阶段），空洞连接最终金属断裂。

韧性断口的宏观特征一般分为杯锥状、凿峰状、纯剪切断口等，断口通常分为三个区域：纤维区、放射区和剪切唇区。纤维区位于断口的中央，是材料处于平面应变状态下发生的正断裂，呈粗糙的纤维状；放射区紧接着纤维区，是裂纹由缓慢扩展向快速不稳定扩展转化的区域，呈放射状花样；剪切唇区最后断裂，是平面应力状态下发生的切断型断裂，呈光滑的剪切面，与拉伸应力呈  $45^\circ$  角。



图 1：拉伸韧性断裂

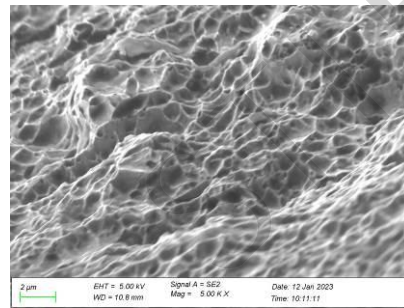


图 2：韧窝

**脆性（解理）断口：**材料在断裂前基本上不产生明显的宏观塑性变形（伸长和缩颈）的断裂现象。试样脆性断裂后，在宏观上看，断口较为平齐，光亮。此类断口的特征有三：解理台阶、河流状花样和舌状花样。

解理台阶是脆性断口最明显的特征，是由于裂纹沿着一定的晶面或者滑移面、孪晶面扩展而使材料断开而形成的一簇相互平行的、位于不同高度的晶面。河流状花样是由于裂纹沿着不同方向的晶面扩展而形成的一种曲折变化的花样。舌状花样是由于裂纹在某一方向上遇到阻碍而改变方向而形成的一种舌状突出或凹陷。

根据脆性断裂时裂纹扩展途径，可以将脆性断口分为穿晶断裂和沿晶(晶界)断裂两种。

穿晶断裂是指裂纹穿越晶粒内部扩展而造成的断裂；沿晶(晶界)断裂是指裂纹沿着晶界扩展而造成的断裂。一般情况下，晶界的结合力高于晶界内的结合力，晶界是强化因素。但如果热处理不当或环境、应力状态等因素使晶界被弱化成裂纹扩展的优先通道，材料就会发生沿晶断裂。产生沿晶断裂一般有以下几种原因：

1. 晶界上有脆性沉淀相。例如，奥氏体不锈钢在 475°C 左右的温度下长期保温，会在晶界上析出连续的碳化物网状相，导致晶界脆性增加，从而发生沿晶断裂。
2. 晶界有使其弱化的夹杂物。例如，钢中含有 P、S、As、Sb、Sn 等元素，它们会在晶界上形成低熔点的偏析相或夹杂物，降低晶界的结合力和塑性。
3. 环境因素与晶界相互作用造成的晶界弱化或脆化。例如，高温蠕变条件下的晶界弱化，应力腐蚀条件下晶界易于优先腐蚀，氢脆条件下氢原子聚集在晶界上等，均促使沿晶断裂产生。
4. 沿晶断口的形貌取决于材料本身晶粒的形状。一般来说，沿晶断口呈现不同程度的晶粒多面体外形的岩石状花样或粒状花样，晶粒明显，且立体感强，断口颜色较深。在扫描电子显微镜下，可以看到沿着晶界扩展的裂纹和微孔聚合型或脆性薄层分裂型的断裂特征。

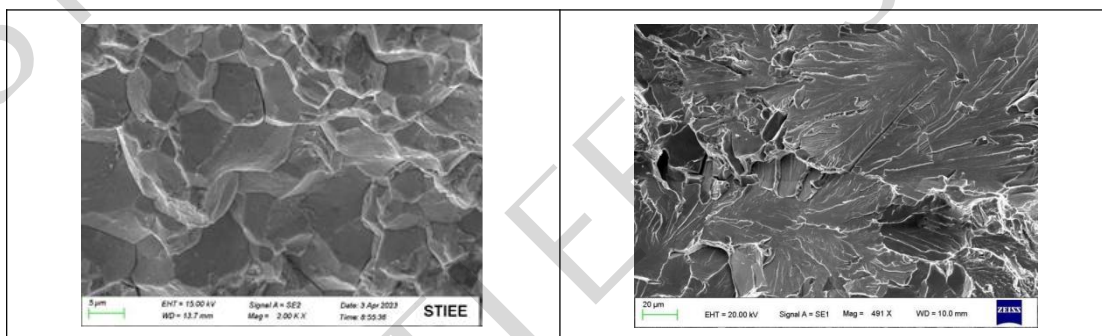


图 3: 沿晶断裂

图 4: 穿晶解理

**疲劳断裂:**是由于材料在反复的应力作用下发生的断裂,通常表现为穿晶断裂,断口上有疲劳辉纹、海滩花样和棘轮花样等特征。通过观察断口的形貌,可以分析裂纹的扩展方向、起源位置、载荷情况等。

**准解理断裂**是一种介于解理断裂和韧窝断裂之间的断裂方式,它在不同部位产生解理裂纹核,扩展成解理刻面,最后以塑性方式撕裂。准解理断裂的断口形貌比较平整,但微观形貌有河流花样,舌状花样及韧窝与撕裂棱等。准解理断裂的特征与材料的结构、组织和应力状态有关,一般发生在体心立方和密排六方结构的金属中。

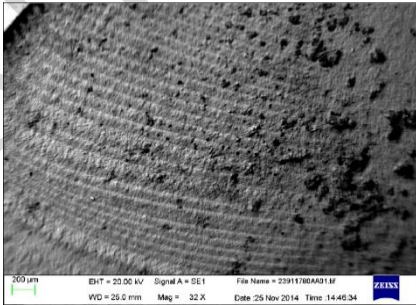


图 5 疲劳辉纹

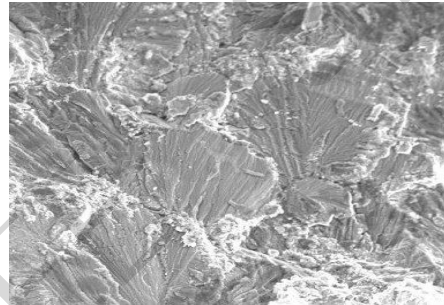


图 6 准解理断面