

学术讨论

材质不均匀性引起的突进型裂纹 亚临界扩展问题的探讨

西南交通大学 孙训方

一、前言 近二十多年来,国内外断裂力学方法基本上都按照均质材料来建立脆断判据及对脆断安全的判据。例如线弹性断裂力学中 I 型问题的脆断判据及对脆断安全的判据分别为

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

$$K_I \leq [K_I] \equiv K_{Ic}/n_k \quad (2)$$

式中 K_I 为 I 型应力强度因子, K_{Ic} 为 I 型平面应变断裂韧度, n_k 为对于脆断的安全系数, $[K_I]$ 为允许的应力强度因子。 K_I 的表达式可写作如下的普遍形式:

$$K_I \equiv \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

式中 α 为反映结构及裂纹几何特征的无量纲参数, σ 为无裂纹结构在裂纹所在位置处的当地应力, a 为裂纹的特征尺寸。

对于复合型断裂问题,其脆断安全的判据为

$$K_I^* \leq [K_I] \equiv K_{Ic}/n_k \quad (4)$$

式中 K_I^* 为与 I 型应力强度因子等效的复合型应力强度因子,其普遍形式为

$$K_I^* \equiv F \sigma^* \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

F 为反映结构及裂纹几何特征以及复合型断裂判据的无量纲参数, σ^* 为当地等效应力。

以上都把研究对象当作均质材料来处理。材质的不均匀性只是通过对于脆性断裂的安全系数 n_k 来考虑。这种作法对于实际情况过于简单化,没有考虑到材质不均匀性引起的复杂问题,因而是偏于不安全的。本文从实验观察到的现象出发,说明材质的不均匀性所引起的突进型裂纹亚临界扩展。过去对裂纹的亚临界扩展也是按均质材料的假设来研究的,对突进型亚临界扩展未予重视,迄今还缺乏对这类裂纹扩展量的定量计算方法。

二、裂纹突进型亚临界扩展的现象 近年来在用小试样测定 J_{Ic} 的实验中确定启裂点的方法是多种多样的。我们用声发射法来抓小试样的启裂点,并以 J 积分的启裂临界值作为材料的 J_{Ic} 。在实验中有时发现,同一组小试样中有的试样的声发射讯号出现得特别早。为了检验这时是否确实发生了启裂,对每个试样在出现声发射讯号时立即卸载,随后进行热染色(在 300℃ 温度下保持 3 小时),再将试样弯断。这样就可以清楚看到卸载前是否确实发生了启裂。从有些声发射讯号出现得特别早的试样断口上,我们观察到予制疲劳裂纹的前缘处出现了一些裂纹局部突进现象(图 1)。这些局部突进往往并不出现

在受平面应变约束程度最强的中心部位,而是在靠近自由表面的两侧部位,有时只有一个

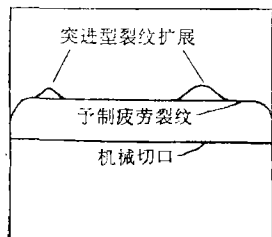


图 1

局部突进,有时则可能同时看到两个甚至两个以上的局部突进,这些突进型亚临界扩展说明材料的抗脆断性能很不均匀,在发生局部突进处材料的断裂韧性很低,因而,即使在比较接近于平面应力态的自由表面附近(该处的平面应变约束程度低,按道理其抗脆断的阻力应高些),在较低的 K_{Ic} 值下,这些局部的材料也会发生裂纹的临界扩展,但随后受到附近具有较高止裂断裂韧性 K_{Ic} 值的材料遏制,阻止了这局部薄弱环节处材料的临界扩展,使得整个试样不至于脆断。这种局部的裂纹临界扩展而整体的亚临界扩展在非均质材料中是一种比较严重的突进型裂纹亚临界扩展。过去由于没能在试样启裂时及时卸载并作热染色处理,所以难以发现这种现象。

当材质不均匀时,在同一组小试样中还会发生 $P-\Delta$ 曲线显著不同的现象(图2)。有些试样在启裂前 $P-\Delta$ 曲线的塑性变形量很大(图2(a));另一些试样其启裂点与断裂点

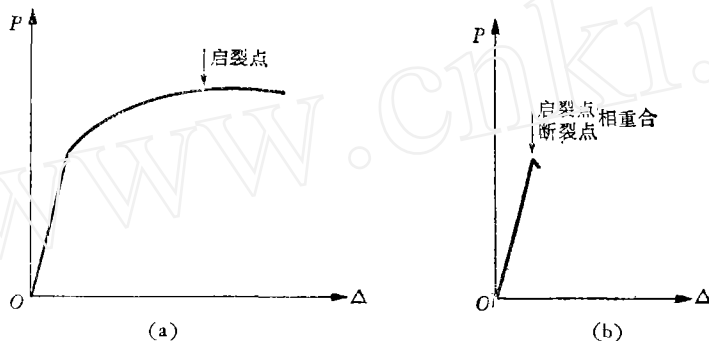


图 2

基本上重合(图2(b))。显然前者的启裂点 J_{Ic} 值要比后者的大得多。发生图2(b)所示情况可能是整个试样的材质很差;或试样韧带部分材质很差;或韧带部分有较大一部分材质很差,这部分材料发生临界扩展后剩下的材料已不足以止裂;也可能是韧带部分材料的止裂断裂韧性较低,裂纹前缘局部薄弱环节发生临界扩展时剩余材料不能阻止裂纹扩展。

应该指出,用大试样做 K_{Ic} 试验有时发生爆裂现象。过去的解释是试样在裂纹前缘中央部位受平面应变约束最强,这部分可能先发生临界扩展,但很快被周围基本上接近于平面应力状态其断裂韧性较高的材料止裂,但并没有确切了解发生这种爆裂的物理实质。从前述小试样的实验结果看,用大试样做 K_{Ic} 试验时发生的爆裂现象也可能是材质不均匀所引起的突进型亚临界扩展。今后,除了对大试样做 K_{Ic} 试验时需对发生爆裂现象的试样采用及时卸载,热染色,然后使试样断裂以观察其断口情况的方法外,还需用小试样做系统的大量实验来探讨材质不均匀引起裂纹局部突进的规律,建立定量计算这类突进型裂纹亚临界扩展量的方法。

三、初始缺陷因突进型裂纹亚临界扩展所引起的后果 零件或结构中的初始缺陷,因材质不均匀而引起突进型裂纹亚临界扩展,其后果是很严重的。现取深埋缺陷为例来讨论。

1. 密集伤区中缺陷的扩展 在密集伤区中存在着数量较多而特征尺寸较小的缺

陷. 当载荷加大到一定程度时, 就整体而言虽远未达到脆断的条件 [公式 (1)], 但其中的某一个缺陷却因其周边处材料的断裂韧度甚低而发生突进型亚临界扩展 (图 3 缺陷①). 载荷继续增大, 另一个缺陷又发生突进型亚临界扩展 (图 3 缺陷②). 载荷的不断增大将使其余缺陷相继发生突进型亚临界扩展, 终于联体而形成较大的片状裂纹. 随后在又一次超载下, 再次突进而扩展成图 3 所示的一个大片状裂纹.

上述联体现象可以在一次超载中发生, 也可以在多次超载中先后出现. 图 3 的每个初始缺陷都可以是一次超载后某几个初始缺陷联体而形成的, 经过若干次超载后它们就进一步联体而形成更大的片状裂纹, 而在达到了临界尺寸时就引起脆断. 50 年代美国匹茨堡电站发生过一起汽轮发电机转子脆断事故, 事后在碎片中找到了可能的启裂源, 它是在靠近转子中心处某一径截面上的一簇非金属夹杂物, 其外形是一个约 $50 \times 125\text{mm}$ 的椭圆盘形片状裂纹. 这根转子是在运行两年后第 11 次停机再启动的超速试验时断裂的. 由于转子安全地经历了过去的 10 次停机再启动及其中的超速运行, 所以, 可以设想这一簇非金属夹杂物在开始时只是一些十分密集的小缺陷 (夹渣), 经过 10 次超速运行后逐渐联体而形成了上述椭圆盘形片状裂纹, 达到了该转子超速运转时在此部位的临界尺寸, 因而在第 11 次超速试验中发生脆断. 当然, 这种设想是否真正符合实际, 还有待理论上的分析并通过实验加以检验.

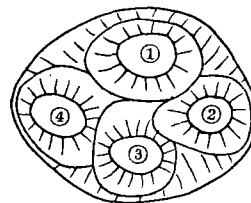


图 3

2. 单个缺陷因氢脆而引起的突进型亚临界扩展 单个缺陷长期在高应力条件下 (例如发电机转子在正常运行时因离心力引起的径截面上的高应力), 若材料中含有较多的游离氢, 则将会造成氢原子向裂纹前缘高应力区聚集, 使这一部位的材料发生氢脆, 降低其抗裂纹扩展的阻力. 这也相当于材质的不均匀 (即沿裂纹前缘有一个低韧性区). 当材料因氢脆而造成的断裂韧度降低并不过分严重时, 在正常运行条件下裂纹并不扩展, 但当

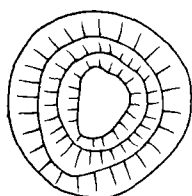


图 4

载荷突然增大时, 裂纹前缘的 K_{Ic} 超过经氢脆后降低了的材料 K_{Ic} 值, 就会在裂纹前缘的氢脆区内发生突进型亚临界扩展 (图 4). 多次反复的这种亚临界扩展和氢聚集的过程, 将导致初始缺陷因突进型亚临界扩展而不断扩大 (图 4), 最终可能导致整个结构脆

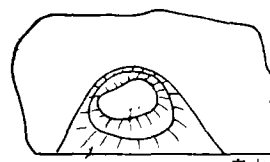


图 5

断. 材质不均匀及材料内部含氢量高的情况可能同时存在, 这时两类突进型亚临界扩展将交替出现, 其后果当然更为严重. 这在大锻件或大铸件中又往往容易出现, 应给予重视.

当缺陷位于浅表部位时, 上述两种突进型亚临界扩展将导致裂纹向自由表面扩展而形成一表面裂纹 (图 5). 目前有些计算中似已考虑到这一因素, 将离开自由表面不太远处的深埋裂纹按扩大后形成一表面裂纹的情况来加以计算.

四、讨论 1. 为了防止因突进型裂纹亚临界扩展的积累导致最后的整体脆断, 首先, 应该掌握材料的止裂性能. 止裂断裂韧度 K_{Ic} 高的材料能减小突进型亚临界扩展发生的几率. 所以必须进行测定材料的 K_{Ic} 的实验. 目前多以动态的断裂韧度 K_{Ic} 作为 K_{Ic} 的近

似值,这可作为工程上的近似,但物理概念上是不够确切的。有人用两种材料的组合型双悬臂试样来测定材料的 K_{Ia} 随裂纹传播速度而变化的规律,找到 K_{Ia} 的最低值 $K_{Ia \min}$ 并试图以它作为 K_{Ia} 。这比用 K_{Ia} 作为 K_{Ia} 合理些,但方法较复杂,且有不少量测技术上的困难。所以还应努力寻找一种较简便可靠的试验方法来测定材料的 K_{Ia} 或其下限值。

2. 材质不均匀引起的突进型亚临界扩展也与材料的最低 K_{Ic} 值有关,因为这只有当缺陷(裂纹)前缘处的 K_I 超过了材料的最低 K_{Ic} 值时才有可能发生。如何测定材料的最低 K_{Ic} 值也是重要的课题。看来宜于采用小试样测 J_{Ic} 的方法。当然,在选择试样的取样部位与取向以及对试验结果的处理方法等方面都还有待研究。此外,对突进型亚临界扩展区应通过扫描电镜来观察断口特征,这对于分析突进型亚临界扩展的物理本质有很重要的意义。

3. 氢原子向裂纹前缘聚集而引起裂纹前缘区内材料的 K_{Ic} 降低(局部氢脆),以及由此而引起的突进型亚临界扩展也是重要的课题。应模拟这种物理条件,创造维持高应力以造成氢原子向高应力区聚集的试验条件,观察随后在超载条件下裂纹的突进型亚临界扩展的数量。这类试验数据将是很分散的,如何处理也有待探讨。

4. 在高温长期加载条件下经过一定时间后,再在常温条件下测 K_{Ic} ,可发现 K_{Ic} 值有所降低。这是由于某些杂质在高温下将析出并附集于晶界上,从而降低了材料抗脆断的阻力。这种脆化显然也带有很强的局部性,也会造成材料的不均匀性而引起突进型亚临界扩展,应通过系统的实验研究来探索其规律。

5. 低应力高周次疲劳裂纹的亚临界扩展,过去也一直按均质材料的扩展规律如

$$da/dN = C(\Delta K_I)^n \quad (6)$$

所示的指数规律来处理。事实上,在实际材料中,这种裂纹的亚临界扩展也不是均匀的。实验中经常可以看到疲劳裂纹的扩展是跳跃式的,在若干次应力循环中都没有观察到裂纹的扩展,但随后却看到裂纹的一次突然扩展。由于没能及时进行热染色,所以,也无法判定疲劳裂纹的这种突进型亚临界扩展在断口上是什么情况,当然也就无法了解其物理本质。材质实际上的不均匀性在这种低应力高周次的疲劳过程中,同样也会引起突进型亚临界扩展,而其扩展量往往要比按式(6)算出的大几个量级。这类疲劳裂纹的突进型扩展在实际结构或零件中危害性很大,必须进行理论和实验研究。

6. 在腐蚀介质中高应力条件下,材质不均匀引起的突进型亚临界扩展将因应力腐蚀作用而更加严重。对这一因素的考虑看来十分必要,因为它所造成的后果是相当严重地偏于不安全一面的。

7. 在高温条件下缺陷因蠕变而引起的亚临界扩展,受到材质不均匀的影响,同样会形成突进型亚临界扩展。在低温条件下,材料的抗脆断阻力显然会降低,这时材质不均匀所引起的突进型亚临界扩展量将更大。因而还应当考虑到温度的影响。

总之,要系统地研究材质不均匀所引起的裂纹亚临界扩展问题,应加强断口的电镜分析;运用数理统计和弹塑性断裂力学的方法;开展系统的试验工作即从小试样到大试样的试验,从启裂的 K_{Ic} 值到止裂的 K_{Ia} 值的测定,从常温到低温、高温,从恒定静载到交变载荷,从低含氢量到富含氢量,从无腐蚀介质到有腐蚀介质等等条件下来测定有关的参数。显然这是极复杂、艰巨且工作量十分巨大的研究工作,但对断裂力学的发展将会带来重大的突破,其意义是很大的。