

金属材料应力腐蚀开裂测试 方法及其数据汇编



北京航空材料研究所

1984年

内 容 简 介

本书共分四章，根据现代国内外结构材料构件在环境介质中使用产生应力腐蚀断裂的情况，针对我国航空工业和一般机械工业发展的需要介绍了几种应用线弹性断裂力学方法测定材料应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 的方法。汇集了几种高强度材料的应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 数据和裂纹扩展速率数据，包括大量的数据、曲线并附带部份材料的S.C.C断口图片。本书还选编了部分有关测试技术的研究报告及 K_{ISCC} 值的数据处理。

本书供从事应力腐蚀破裂研究的科技人员以及从事新材料研制、新机设计、地面维护修理的工程技术人员使用。还可作为高等院校金属材料专业、金属腐蚀专业的教学参考书。

前 言

近代科学技术水平不断发展,对结构材料性能的要求越来越高,宇航工程对于结构材料性能的要求尤为苛刻。然而人们知道提高材料的强度将会降低材料本身的断裂韧性和抗应力腐蚀开裂性能。有时材料强度越高,其 K_{ISCC} 性能降低的幅度比 K_{IC} 更大。众所周知,工程结构中高强度材料经常发生低应力脆断,尤其是结构材料在应力和环境介质的共同作用下,这种破坏应力远远低于材料本身的破坏应力 σ_b 。而且破坏前又没有征兆,往往给工程带来灾难性损害。所以无论是新机设计还是新材料的研制,以及故障分析都离不开材料在环境介质中的断裂参数。为了满足设计、研究、制造、使用等方面科技人员的要求,以及适应我国科技发展水平,编者受航空工业部委托编写了这本书。书中大部分的数据取自近年来的科研成果,同时也引用了国外的一些数据,作为借鉴。

航空工业部于1979年在武汉举行了金属材料的 K_{ISCC} 及 da/dt 的测试会议。并在会议上成立了由厂、所、院校共十一个单位组成的航空材料应力腐蚀课题组。会后课题组成员开始对航空用高强度材料的应力腐蚀开裂性能进行了大量研究。几年来测定了常用的高强度材料Lc4、30CrMnSiNi2A、Gc-4、TC-11等的应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 及裂纹扩展速率 da/dt 数据。在此基础上,经过几次修订,建立了DCB、WOL、单悬梁三个应力腐蚀试验方法草案,并于1983年12月在无锡航标审定会上通过。编者在几年来大量实践的基础上编写了《金属材料应力腐蚀开裂测试方法及其数据汇编》。

本汇编包括四方面内容:一、金属材料应力腐蚀开裂的基本概念;二、 K_{ISCC} 、 da/dt 的数据表, $\lg V-K_I$ 曲线、断口图片等;三、测定 K_{ISCC} 及 da/dt 的试验方法;四、在研究制定试验方法中提出的部分专题技术报告和 K_{ISCC} 数据统计处理。

本汇编数据主要来源于航空工业部:北京航空材料研究所、北京航空学院、红安公司、松菱机械厂、伟建机械厂、彤辉机械厂、湘江机械厂、峨嵋机械厂、130厂、602库、5703厂等单位。由北京航空材料研究所、北京航空学院、红安公司组成汇编小组负责汇编起草工作,徐福源同志任组长、陈永宜、纪树达、陈文英任组员。

本汇编在编写过程中由于缺乏经验,时间又紧迫,难免有不周之处,希望从事于这方面工作的读者提出批评指正,以便进一步充实完善。本书在编写过程中得到航空工业部科技局有力支持、得到了兄弟单位的大力帮助,在此表示感谢。本书由纪树达同志负责审定。责任编辑朱之桀。

编者 1984年9月

目 录

前 言

第一章 金属材料应力腐蚀开裂 K_{ISCC} 及 da/dt 的基本概念

第一节 应力腐蚀断裂的条件及其特征

第二节 断裂力学在应力腐蚀断裂中的应用

第三节 K_{ISCC} 、 da/dt 数据的工程意义

第二章 金属材料的 K_{ISCC} 及 da/dt 的测试方法

第一节 高强铝合金双悬臂DCB试样平面应变应力腐蚀试验方法

第二节 楔型加载的WOL预制裂纹试样 K_{ISCC} 、 da/dt 试验方法

第三节 高强度合金悬臂弯曲预裂纹试样的 K_{ISCC} 试验方法

第三章 金属材料的 K_{ISCC} 、 da/dt 数据表、曲线及图片

第一节 铝合金的 K_{ISCC} 数据表

第二节 钢的 K_{ISCC} 数据表

第三节 钛合金的 K_{ISCC} 数据表

第四节 铝合金、钢、钛合金的 $\lg(da/dt) \sim K_I$ 曲线

第五节 S.C.C断口的图片

第四章 有关专题试验技术研究报告选编及参考文献

内 容 简 介

本书共分四章, 根据现代国内外结构材料构件在环境介质中使用产生应力腐蚀断裂的情况, 针对我国航空工业和一般机械工业发展的需要介绍了几种应用线弹性断裂力学方法测定材料应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 的方法。汇集了几种高强度材料的应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 数据和裂纹扩展速率数据, 包括大量的数据、曲线并附带部份材料的S.C.C断口图片。本书还选编了部分有关测试技术的研究报告及 K_{ISCC} 值的数据处理。

本书供从事应力腐蚀破裂研究的科技人员以及从事新材料研制、新机设计、地面维护修理的工程技术人员使用。还可作为高等院校金属材料专业、金属腐蚀专业的教学参考书。

目 录

前 言

第一章 金属材料应力腐蚀开裂 K_{ISCC} 及 da/dt 的基本概念

第一节 应力腐蚀断裂的条件及其特征

第二节 断裂力学在应力腐蚀断裂中的应用

第三节 K_{ISCC} 、 da/dt 数据的工程意义

第二章 金属材料的 K_{ISCC} 及 da/dt 的测试方法

第一节 高强铝合金双悬臂DCB试样平面应变应力腐蚀试验方法

第二节 楔型加载的WOL预制裂纹试样 K_{ISCC} 、 da/dt 试验方法

第三节 高强度合金悬臂弯曲预裂纹试样的 K_{ISCC} 试验方法

第三章 金属材料的 K_{ISCC} 、 da/dt 数据表、曲线及图片

第一节 铝合金的 K_{ISCC} 数据表

第二节 钢的 K_{ISCC} 数据表

第三节 钛合金的 K_{ISCC} 数据表

第四节 铝合金、钢、钛合金的 $\lg(da/dt) \sim K_I$ 曲线

第五节 S.C.C断口的图片

第四章 有关专题试验技术研究报告选编及参考文献

前 言

近代科学技术水平不断发展,对结构材料性能的要求越来越高,宇航工程对于结构材料性能的要求尤为苛刻。然而人们知道提高材料的强度将会降低材料本身的断裂韧性和抗应力腐蚀开裂性能。有时材料强度越高,其 K_{Isc} 性能降低的幅度比 K_{Ic} 更大。众所周知,工程结构中高强度材料经常发生低应力脆断,尤其是结构材料在应力和环境介质的共同作用下,这种破坏应力远远低于材料本身的破坏应力 σ_u ,而且破坏前又没有征兆,往往给工程带来灾难性损害。所以无论是新机设计还是新材料的研制,以及故障分析都离不开材料在环境介质中的断裂参数。为了满足设计、研究、制造、使用等方面科技人员的要求,以及适应我国科技发展水平,编者受航空工业部委托编写了这本书。书中大部分的数据取自近年来的科研成果,同时也引用了国外的一些数据,作为借鉴。

航空工业部于1979年在武汉举行了金属材料的 K_{Isc} 及 da/dt 的测试会议。并在会议上成立了由厂、所、院校共十一个单位组成的航空材料应力腐蚀课题组。会后课题组成员开始对航空用高强度材料的应力腐蚀开裂性能进行了大量研究。几年来测定了常用的高强度材料Lc4、30CrMnSiNi2A、Gc-4、TC-11等的应力腐蚀开裂门槛值 K_{Isc} 及裂纹扩展速率 da/dt 数据。在此基础上,经过几次修订,建立了DCB、WOL、单悬梁三个应力腐蚀试验方法草案,并于1983年12月在无锡航标审定会上通过。编者在几年来大量实践的基础上编写了《金属材料应力腐蚀开裂测试方法及其数据汇编》。

本汇编包括四方面内容:一、金属材料应力腐蚀开裂的基本概念;二、 K_{Isc} 、 da/dt 的数据表, $\lg V-K_I$ 曲线、断口图片等;三、测定 K_{Isc} 及 da/dt 的试验方法;四、在研究制定试验方法中提出的部分专题技术报告和 K_{Isc} 数据统计处理。

本汇编数据主要来源于航空工业部:北京航空材料研究所、北京航空学院、红安公司、松陵机械厂、伟建机械厂、彤辉机械厂、湘江机械厂、峨嵋机械厂、130厂、602库、5703厂等单位。由北京航空材料研究所、北京航空学院、红安公司组成汇编小组负责汇编起草工作,徐福源同志任组长、陈永宜、纪树达、陈文英任组员。

本汇编在编写过程中由于缺乏经验,时间又紧迫,难免有不周之处,希望从事于这方面工作的读者提出批评指正,以便进一步充实完善。本书在编写过程中得到航空工业部科技局有力支持、得到了兄弟单位的大力帮助,在此表示感谢。本书由纪树达同志负责审定。责任编辑朱之桀。

编者 1984年9月

第一章 金属材料应力腐蚀开裂 K_{ISCC}

da/dt 基本概念

第一节 应力腐蚀断裂的条件及其特征

金属材料应力腐蚀断裂是金属结构件在应力和腐蚀环境同时作用下所发生的腐蚀性断裂。一般来说，金属材料在腐蚀环境中，受到外加应力后，会加速腐蚀破坏的进程。最简单的情况是这两种因素迭加作用的结果，一般它的危害性较小。我们这里所讨论的是危害性严重的应力腐蚀断裂，它是一种更为复杂的断裂化学现象：在某一特定腐蚀环境中，金属材料不受应力时，腐蚀破坏甚微，而当受到一定应力作用时，尽管所受应力有时远低于材料本身的强度极限，经历一定时间，甚至于延性很好的金属材料却发生了脆性断裂。这种破坏往往没有任何预兆，造成的破坏是十分严重的，往往是灾难性的。

应力腐蚀断裂是个实际问题，也是一个复杂的理论问题，影响因素是多方面的，它涉及到金属物理学、电化学、腐蚀学、力学等几个学科领域，属于边缘学科，这就需要几方面的科学工作者相互合作，努力探索，以求揭示金属应力腐蚀断裂的本质和内在规律。

一、应力腐蚀断裂的必备条件

产生应力腐蚀断裂的必备条件大致有三个：

1. 在使用环境中金属结构材料本身对应力腐蚀断裂是敏感的。其敏感性的大小取决于金属材料的成分和组织。在使用环境中没有敏感性的合金材料，即使受到外界拉伸应力的作用，也不会发生低应力脆断。
2. 必须受到拉伸应力的作用。凡对应力腐蚀断裂有敏感性的合金在受到拉伸应力作用下，当拉伸应力超过某限度数值时，才发生应力腐蚀断裂。当受到压缩应力作用时是不会发生应力腐蚀断裂的。
3. 所处的腐蚀环境是特定的。只有在某些合金和腐蚀环境的配合下，才会发生应力腐蚀断裂。例如：奥氏体不锈钢在含有氯离子水溶液中的“氯脆”；高强度铝合金在含有氯离子水溶液中的“氯脆”，以及它们在与汞接触时产生的“汞脆”；高强度钢的“甲烷脆”以及“氢脆”；黄铜的“氨脆”等。在特定环境中，即使在腐蚀介质浓度较低的情况下，就能使用具有S.C.C敏感性的合金在拉伸应力作用下发生应力腐蚀开裂。像Ti-6Al-4V钛合金作为火箭和导弹燃料的 N_2O_4 储箱，尽管 N_2O_4 中含有痕迹微量氧，也会使钛合金产生应力腐蚀开裂。

二、应力腐蚀断裂的特征

应力腐蚀断裂的特征大致可归纳以下几点:

1. 合金材料在没有缺陷的情况下, 应力腐蚀断裂过程可以分为三个阶段。第一个阶段是裂纹源的萌生阶段, 它是由于腐蚀介质引起坑蚀源, 从而导致应力集中的裂纹源, 这就是我们通常所说的裂纹源生核孕育期, 这个阶段约占断裂总时间的90%; 第二个阶段是裂纹扩展阶段; 第三个阶段是构件失稳的纯力学的裂纹扩展阶段, 后两者加起来约占总断裂时间的10%。

金属材料存在缺陷和裂纹的时候, 应力腐蚀断裂过程, 通常只有裂纹扩展和失稳快速瞬断两个阶段。应力腐蚀裂纹扩展速度, 比纯机械快速脆断速度慢得多, 但比点蚀等局部腐蚀速度快得多, 例如钢在海水中应力腐蚀断裂速度为点蚀速度的 10^6 倍。

2. 应力腐蚀裂纹尖端溶液性质远不同于本体溶液性质。裂纹端部由于自催化作用, 溶液呈酸性。例如Lc4高强度铝合金DCB试样放入3.5%NaCl水溶液中, 本体溶液的PH值为6~7, 而裂纹尖端PH值为2.5~3。

3. 应力腐蚀裂纹总是沿着垂直于主拉伸应力方向扩展的。

4. 应力腐蚀断裂的途径有沿晶型的、穿晶型的、或两者兼而有之的混合型的。如高强度铝合金多半是沿晶型断裂, 高强钢也是沿晶型断裂, 而奥氏体不锈钢则多半是穿晶型断裂, 钛合金对这两种断裂类型兼而有之。

5. 应力腐蚀断裂从宏观上看属于脆性断裂, 即使塑性好的材料在发生应力腐蚀断裂时, 是如此。然而从微观尺度上看, 可以观察到断裂表面有明显的塑性流为痕迹。

6. 在电子扫描电镜上观察, 可以看出应力腐蚀断裂与纯力学平面应变的脆性断裂之间有区别。应力腐蚀断裂面往往有裂纹分枝现象, 断口形态上可以看到海滩条纹、羽毛状、撕裂岭、冰糖块图象等断口形貌。

第二节断裂力学在应力腐蚀断裂中的应用

一、采用预制裂纹试样

传统应力腐蚀研究是以完整材料为出发点。所以, 它以光滑试样为试验对象, 在给定应力作用下(通常所给名义应力较大), 观察在腐蚀介质中, 断裂的延滞寿命。这种研究的价值在于可以提供合金成分, 加工及热处理状态和环境介质对材料的应力腐蚀敏感性的影响, 从而为选择在应力腐蚀条件下应用的材料提供依据。这种敏感性的测定和衡量方法, 是根据光滑试样在不同应力水平作用下, 在介质中的“滞后破坏”时间来表示材料抗断裂的性能。然而, 总的应力不是对裂纹扩展机械驱动力的准确测定值, 因为它与应力腐蚀过程中起作用的裂纹尖端无关。用光滑试样也无法准确区分裂纹的引发和扩展, 不能准确区分对每一个阶段的作用, 这种不加区别的破坏时间数据可能会造成错误的判断。

传统应力腐蚀试验方法的优点是：比较简便、经济，可以定性地获得材料的应力腐蚀敏感性。但是，传统的应力腐蚀试验研究有以下缺点：

（一）由光滑试样所得到的总寿命，显然等于裂纹源生核的寿命和裂纹源扩展直到断裂的寿命总和。但由于一般加的应力 σ 偏大，所以，裂纹源一旦生核，裂纹体实际上接近于失稳状态，加上腐蚀介质的作用，裂纹将加速扩展，因此 da/dt 很大，因而，在这种情况下，总寿命中90%将是裂纹源的生核寿命。所以，这种寿命总的说来反映材料对裂纹核萌生的敏感性，而不太反映裂纹扩展的性能。正因为这样，在材料的实际使用中，有时会发现传统应力腐蚀性能好的材料，却未必在实际使用条件下也具有好的S.C.C性能。

（二）光滑试样的应力腐蚀试验数据，通常会有较大的分散度，这对分析结果常常造成困难。

事实上，造成上述缺点的根源，在于传统应力腐蚀试验研究的出发点，把材料看成是理想完整无缺的，但实际上这种情况存在的可能性不大。因为不仅由于冶炼、冷加工、热加工不可避免地会在材料中引入裂纹源或类似裂纹的缺陷，而且构件在工作过程中，由于静载荷、疲劳载荷或腐蚀介质都可能形成新的裂纹源，所以，材料的不完整性是绝对的，而完整性是相对的。

断裂力学为存在裂纹的材料提供了实用的分析方法，在应力腐蚀断裂中采用断裂力学方法，是建立在线弹性力学的基础上的，只处理裂纹的扩展，不处理裂纹源成核过程。因此，进行预制给定宏观裂纹试样的研究，将可给出稳定的裂纹扩展性能 da/dt 数据。因此断裂力学在应力腐蚀断裂中的应用，是对传统应力腐蚀试验研究的一个重要补充和发展。采用预制裂纹试样做应力腐蚀试验，其优点如下：

（一）当实际构件存在裂纹或其它缺陷时，用预裂纹试样得到的试验结果与实际情况比较符合。

（二）传统的应力腐蚀试验只能提供材料抗应力腐蚀方面定性资料，难以为工程设计所应用，而用断裂力学方法获得的应力腐蚀临界应力强度因子 K_{ISCC} 以及裂纹在腐蚀介质中的扩展速率 da/dt 等参量，可直接应用于构件的选材和设计。

（三）光滑试样在应力腐蚀试验中，往往同时存在若干个分叉裂纹，故难以用该法研究应力腐蚀裂纹扩展动力学，而预裂纹试样在应力腐蚀试验中，只有一个裂纹扩展着，便于研究裂纹扩展动力学。

二、应力强度因子在应力腐蚀中的作用

在应力腐蚀过程中，用哪些参量来表征裂纹扩展的驱动力。现在让我们观察一个有裂纹试样的S.C.C试验的实例。

用一个中心裂纹板状试样，在裂纹中央作用一对集中张力 P ，如图1—1所示。引用断裂力学关于应力场强度因子的分析，得其裂纹尖端应力强度因子 K_I 为：

$$K_I = \frac{P}{(\pi a)^{1/2}}$$

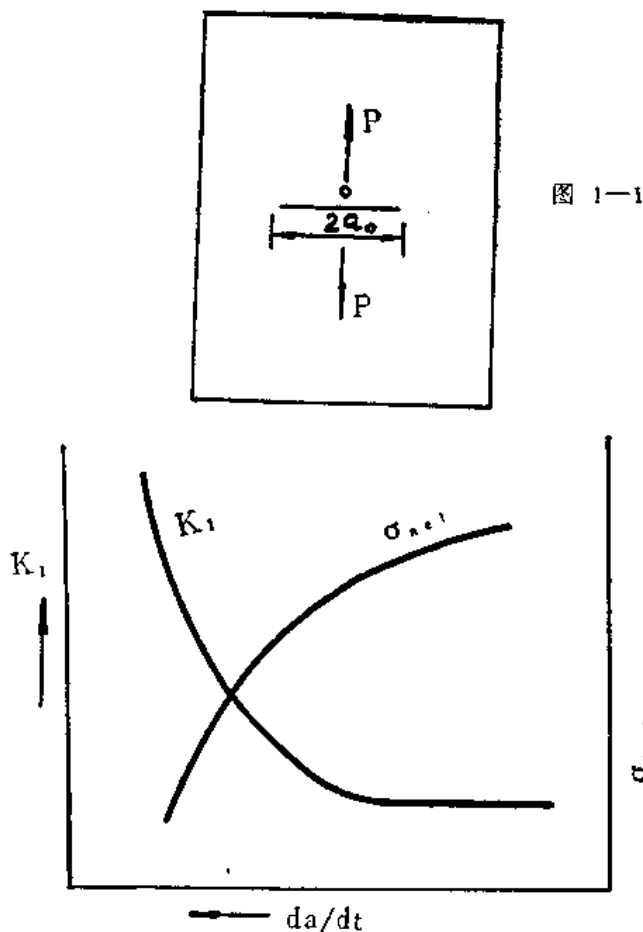


图 1-2 da/dt 与应力强度因子 K 和净截面应力 σ_{net} 的关系

式中: P 为单位厚度板上的集中作用力:

a 为中心裂纹的半长

这个公式表明, 当载荷恒定时, 裂纹一旦扩展——即 a 增长, 则 K_I 下降。

我们用这样的预裂纹试样, 在加载条件下进行 S.C.C 试验, 所得数据可用图 1-2 表示图中 σ_{net} 为净截面应力, da/dt 为裂纹扩展速率。由图可得出三个重要论断:

1. 在加载初期, K_I 最大, 相应 da/dt 也最大, σ_{net} 最小, 随着裂纹扩展, a 逐渐增长, K_I 则随之下降, 然而净断面应力 σ_{net} 随之上升, da/dt 却下降。习惯上, 似乎应有 σ_{net} 增加, 裂纹扩展速率 da/dt 也增加, 但实际上裂纹扩展速率 da/dt 随裂尖应力强度因子 K_I 的下降而下降。可见, 材料的 S.C.C 性能 (这里指 da/dt) 的控制性因素不是 σ_{net} , 而是 K_I 。

2. 由于 K_I 增加, da/dt 增加; K_I 下降 da/dt 也下降。为了进一步验证这一规律, 人们利用恒 K_I 试样 (即 a 扩展, 而 K_I 能保持恒定的试样) 进行了 S.C.C 试验, 结果发现所测得的 da/dt 也能恒定, 如图 1-3 所示。这就再次表明, K_I 确系 da/dt 的决定性因素。图中实线表示拟合直线, 虚线表示实验数据。

3. 由图 1-2 可见, 当 K_I 下降到某足够低的数值时, da/dt 也将降到足够低到可以忽略的程度, 即 a 不再增长, S.C.C 过程近于停止。所以人们对于给定材料在相应的腐蚀环境里, 似乎可找到一个临界应力强度因子 K_{ISCC} 。若 $K_I \leq K_{ISCC}$ 时, 材料在该环境中的寿命可以很大, 相应的 da/dt 可以被忽略。若 K_I 高于这个 K_{ISCC} 值时, 就会发生应力腐蚀裂纹扩展。所以人们把这个临界 K_I 值又称为应力腐蚀开裂门槛值—— K_{ISCC} 。如图 1-4 所示。

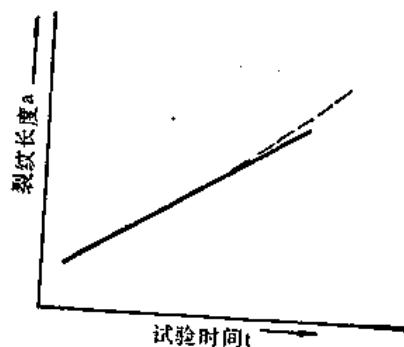


图 1-3

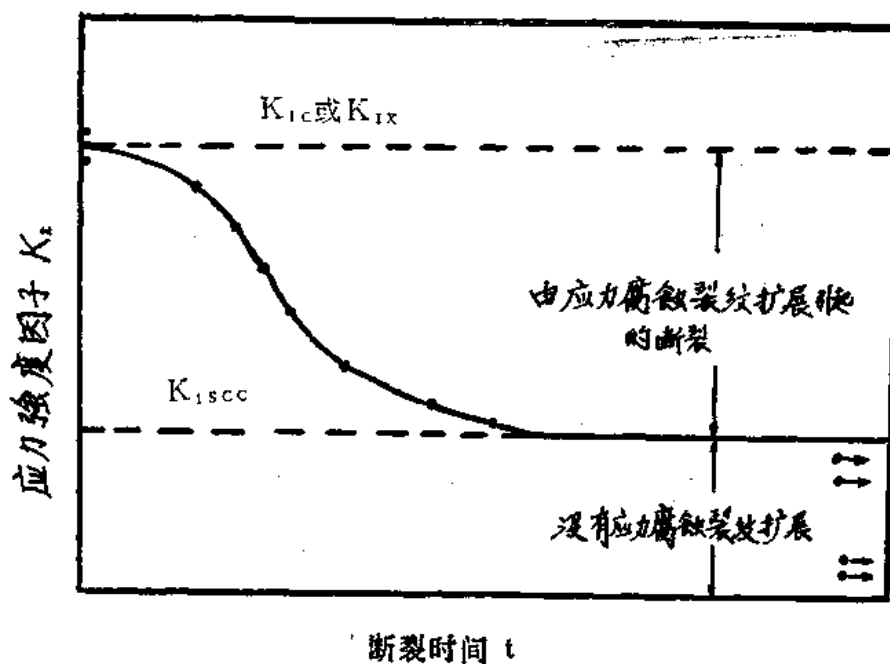


图1-4 用悬臂梁方法测定 K_{Isc} 的示意图

运用断裂力学理论,研究应力腐蚀开裂,不仅可以定量地测定材料在特定环境中的应力腐蚀开裂门槛应力强度因子 K_{Isc} ,而且能够测定材料在特定环境介质中的裂纹扩展速率

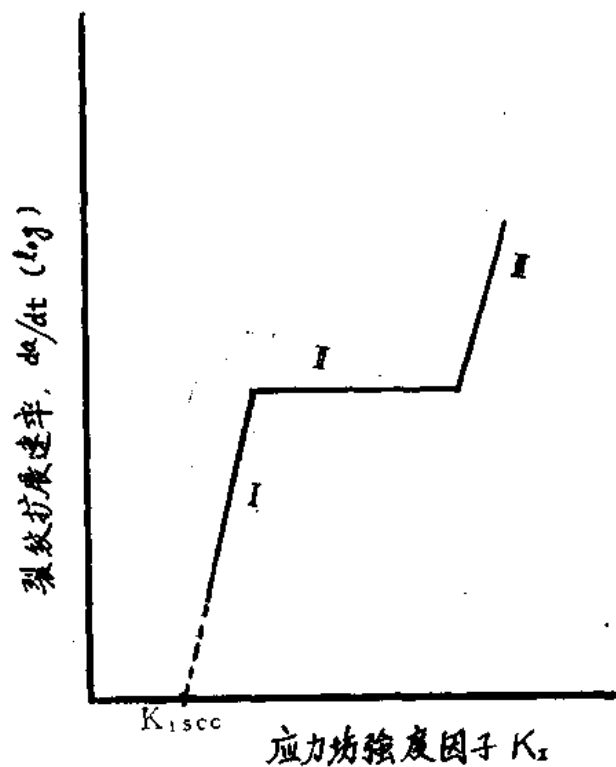


图1-5 $\lg (da/dt) - K_I$ 曲线

da/dt 。运用断裂力学理论为研究裂纹尖端应力场强度因子 K_I 对裂纹扩展动力学的影响提供了方便。图1-5为裂纹尖端应力场强度因子 K_I 与裂纹扩展速率 da/dt 的关系。

在图1-5中，Ⅰ区裂纹扩展速率与应力场强度因子 K_I 成线性关系，裂纹扩展速率强烈地取决于应力场强度因子；而Ⅱ区裂纹扩展速率与应力场强度因子无关，其速率几乎是一个恒定值，在图中呈一水平直线，所以又称为平台区；在较高的应力强度因子 K_I 水平下，裂纹扩展速率变得重新与 K_I 有关系，这个区称为Ⅲ区。在一些金属材料与环境系统中Ⅱ区或Ⅲ区都得不到，这是因为在这些系统中应力腐蚀断裂发生在一个比Ⅱ区或Ⅲ区还低的应力水平下。

第三节 K_{ISCC} 、 da/dt 数据的工程意义

由断裂力学方法测得的应力腐蚀开裂门槛应力强度因子 K_{ISCC} ，是判断材料在某种环境介质中裂纹能否扩展的准则。应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt ，反映了材料在环境介质中抗开裂的能力。这两个重要参数可直接提供工程设计和材料研究使用，具有相当大的实际意义。

一、 K_{ISCC} 在材料研究和工程设计中的意义

应力腐蚀开裂门槛应力强度因子 K_{ISCC} ，标志着结构件中可以存在而又不引起应力腐蚀裂纹扩展的最大缺陷的尺寸，也就是规定了允许的最大临界尺寸。假如构件中早就存在缺陷（裂纹）或在使用中产生了裂纹，那末我们可以根据 K_{ISCC} 水平来估算这个裂纹是否会扩展，如果裂纹扩展，那末就可以推算出构件产生断裂的临界裂纹长度。对于工程构件中通常出现的长而浅的半椭圆形表面裂纹，如图1-3所示，其应力场强度因子 K_I 表达式为：

$$K_I^2 = \frac{1.2 \pi \sigma^2 a}{\Phi^2 - 0.212 \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2} \quad (1)$$

式中：

a —裂纹深度；

σ —外加应力；

σ_s —屈服强度；

Φ —裂纹形状因子（ a/c 的椭圆积分函数）

如果裂纹长度为 $2c$ ，表面裂纹的裂纹形状因子

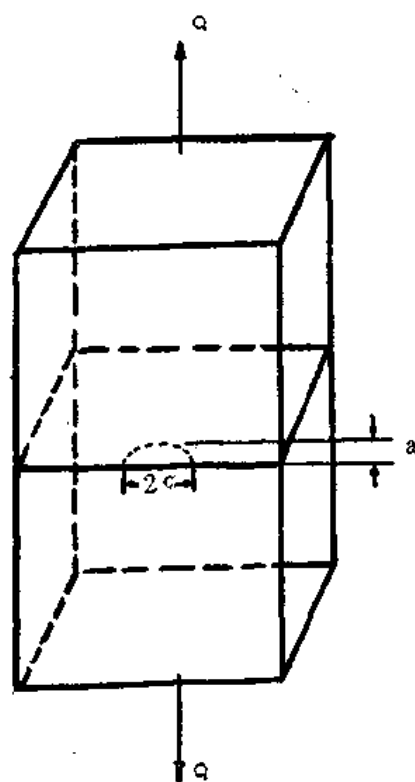


图1-6 半椭圆形表面裂纹

Φ 可由下表查得。

表面裂纹 Φ^2 计算表

a/c	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Φ^2	1.00	1.01	1.03	1.06	1.10	1.14	1.20
a/c	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
Φ^2	1.25	1.32	1.39	1.46	1.55	1.63	1.69
a/c	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
Φ^2	1.81	1.91	2.00	2.11	2.22	2.34	2.47

由方程(1)可以看到在一定的外力作用下,当缺陷深度a达到临界裂纹长度 a_{cr} 时, K_I 即达到应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} ,应力腐蚀裂纹就会发生。如果当缺陷深度a很浅时,其长度2c与深度相比可以认为是无限大,那末a/c趋近于零, $\Phi=1$,如果施加的应力等于材料的屈服强度,也就是说当 $\sigma=\sigma_s$ 时,临界裂纹深度可以由下式表示:

$$a_{cr}=0.209 (K_{ISCC}/\sigma_s)^2 \quad (2)$$

由方程(2)可知,如果材料在某种环境介质中的 K_{ISCC} 值是已知的,那末我们就可以确定材料在某种环境中所能容许的最大表面缺陷深度。临界裂纹深度 a_{cr} 可以作为材料应力腐蚀开裂抗力与屈服强度水平联合作用的一个质量因素,从而可以确定某种应力,包括使用应力或构件自身的应力(残余应力、装配应力等)所产生的应力腐蚀开裂的危险程度。随着材料屈服强度的提高,断裂韧性 K_{IC} 和应力腐蚀开裂门槛在 K_{ISCC} 降低,屈服强度愈高, K_{ISCC} 降低的幅度比 K_{IC} 更大。从这里可以说明为什么对于高强度材料在缺陷很小或难以检测的情况下,就可能发生腐蚀开裂。

二、应力腐蚀裂纹扩展速率da/dt在估算结构寿命中的作用

应力腐蚀裂纹扩展速率da/dt与 K_I 的关系,可以反映材料抗应力腐蚀裂纹扩展的能力,因而可用于定量估算构件的使用寿命和确定安全检查周期。材料在应力腐蚀破坏过程中,其破坏寿命包括裂纹扩展前的孕育期和裂纹慢扩展期两部分组成(图1-7)。如果我们已经测得了裂纹扩展速率da/dt,那末我们可以按下列方程估算构件材料的安全使用期。

$$t_r = \text{孕育期} + \int_{K_{I1}}^{K_{Ic}} \left(\frac{dk_I}{da} \cdot \frac{da}{dt} \right) \cdot dk_I \quad (3)$$

式中:

dk_I/da 由结构的几何形状、裂纹状态及受力状态确定。

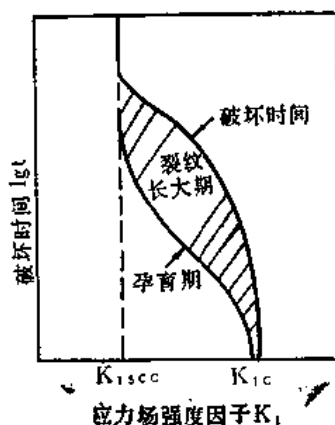


图1-7 裂纹扩展动力学与破坏时间

三、 K_{Isc} 、 da/dt 测试方法

关于测定金属材料 K_{Isc} 、 da/dt 的测试方法，收入本汇编中的有悬臂弯曲试验方法；双悬臂（DCB）试样试验方法；和楔型加载试样（WOL）试验方法。有关具体测试方法请见本书的第二章。

第二章

金属材料的 K_{ISCC} 及 da/dt 的测试方法

本章重点介绍了用线弹性断裂力学预裂纹试样方法测试金属材料的 K_{ISCC} 及 da/dt 。预裂纹试样类型很多,本章重点阐述恒位移试验中的二种:双悬臂梁(DCB)试样和楔形张开加载(WOL)试样。恒载试验中远处弯曲单悬臂梁预裂纹试样法。

第一节 高强铝合金双悬臂(DCB)试样平面应变应力腐蚀试验方法

本方法适用于高强度变形铝合金,采用 $B, a_0 \geq 2.5 (K_{IC}/\sigma_{0.2})^2$ 的双悬臂螺栓自加载预制裂纹试样。可提供材料短横向的应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 和裂纹扩展速率 da/dt 的应力腐蚀参数。

1. 原理

本方法采用恒位移的双悬臂试样,加载后位移基本保持恒定。裂纹尖端的应力场强度因子 K_I 值随着应力腐蚀裂纹的扩展而不断降低,直到裂纹扩展速率 da/dt 降到规定值时,则其对应的裂纹尖端应力场强度因子 K_I 为应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 。

由测得的 a, t 可作 $a \sim t$ 曲线,并依此求得裂纹扩展速率 da/dt 与应力场强度因子 K_I 的关系曲线,从而可求得Ⅱ区(平台区)速率 da/dt 的数值。

2. 名词、术语

- 2.1 应力场强度因子 K_I ——线弹性体中I型理想裂纹尖端应力场的强度。
- 2.2 平面应变断裂韧性 K_{IC} ——裂纹尖端平面应变状态下的裂纹扩展阻力。
- 2.3 应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} ——指在特定介质作用下,裂纹尖端平面应变状态下的裂纹扩展阻力。
- 2.4 位移 V ——加载中心线上线切割槽宽度在加载前后的差值。
- 2.5 预制裂纹 a_i ——预制裂纹又称突入裂纹,加载后使试样线切割槽顶端产生的裂纹。
- 2.6 初始裂纹长度 a_0 ——加载中心线到预制裂纹尖端之长度。
- 2.7 应力腐蚀裂纹长度 a_{sc} ——从预制裂纹尖端到应力腐蚀裂纹尖端的长度。
- 2.8 止裂时裂纹长度 a_f ——初始裂纹长度与试验终止时,应力腐蚀裂纹长度之和。
- 2.9 止裂时裂纹有效长度 a_e ——将试验后的应力腐蚀试样打开,在试样厚度的1/4、2/4和3/4处,由加载中心线到裂纹前缘的裂纹长度平均值(见附录B)。
- 2.10 裂纹扩展速率 da/dt ——应力腐蚀过程中,单位时间内裂纹扩展的量。
- 2.11 Ⅱ区(平台区)速率 $(da/dt)_Ⅱ$ ——裂纹扩展速率与应力场强度因子基本无关

的区域, 在 $\lg (da/dt) \sim K_I$ 曲线上是与横坐标 K_I 基本平行的直线部分, 在此区域裂纹扩展速率 $(da/dt)_{II}$ 为一定值, 故称 II 区裂纹扩展速率。

3. 符号及单位

- 3.1 K_I ——裂纹尖端应力场强度因子, 公斤力/毫米^{3/2}
- 3.2 K_{Ic} ——平面应变断裂韧度公斤力/毫米^{3/2}
- 3.3 K_{ISCC} ——应力腐蚀开裂门槛值, 公斤力/毫米^{3/2}
- 3.4 $\sigma_{0.2}$ ——材料的屈服强度, 公斤力/毫米²
- 3.5 σ_b ——材料的拉伸强度, 公斤力/毫米²
- 3.6 δ ——材料的延伸率, %
- 3.7 E ——材料的弹性模量, 公斤力/毫米²
- 3.8 V ——位移, 毫米
- 3.9 B ——试样厚度, 毫米
- 3.10 h ——试样的半高, 毫米
- 3.11 L ——试样的长度, 毫米
- 3.12 a_f ——试样突入裂纹长度, 毫米
- 3.13 a_0 ——加载中心线到线切割槽顶端的长度, 毫米
- 3.14 a_{sc} ——应力腐蚀裂纹扩展的长度, 毫米
- 3.15 a ——表面裂纹长度, 毫米
- 3.16 a_0 ——初始裂纹长度, 毫米
- 3.17 a_r ——止裂时裂纹长度, $a_r = a_0 + a_{sc}$, 毫米
- 3.18 a_e ——止裂时裂纹有效长度, 毫米
- 3.19 da/dt ——应力腐蚀裂纹扩展速率, 米/秒
- 3.20 $(da/dt)_{II}$ ——II 区裂纹扩展速率, 米/秒

4. 试样的制备

- 4.1 推荐标准试样尺寸及技术要求见图2-1
- 4.2 试样加工技术要求
 - 4.2.1 长度方向的四个面要求互相垂直, 允差0.1。
 - 4.2.2 加工完后立即用清洗剂洗去槽内切屑、冷却液。
 - 4.2.3 M8螺孔必须垂直于线切割面, 允差0.1。
 - 4.2.4 和M8螺孔平行的两个观察面, 从槽口的上端面各划一条尖锐刻线, 此线与加载中心线重合(见图2-1刻线位置)。
 - 4.2.5 用钼丝($\phi \leq 0.12$ 毫米)线切割槽口。
- 4.3 试样取向

一般对铝合金厚板试样的裂纹面取向是短横向即S—L。符号的第一个字母表示裂纹平面法线方向, 第二个字母表示裂纹扩展的预期方向。对锻件取高向即S—T, 见图2-2(a) (b)。

4.4 试样的打磨