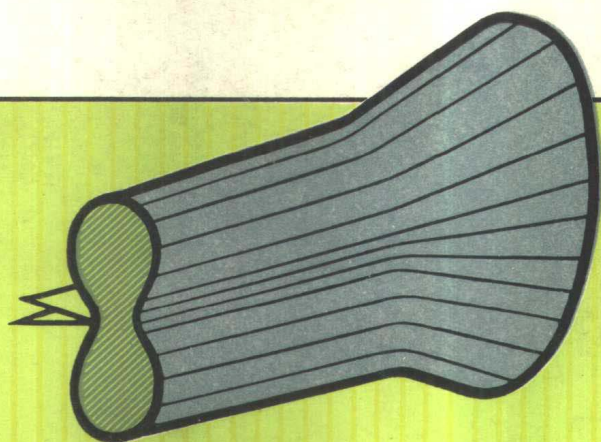


〔苏联〕 В. Г. 库德良绍夫 著
В. И. 斯莫连采夫

高 云 震 等 译



铝合金断裂韧性

冶金工业出版社

铝合金断裂韧性

〔苏联〕B.Г.库德良绍夫 著
B.И.斯莫连采夫

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书是根据苏联冶金出版社1976年版B.Г.库德良绍夫等著《ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ》一书翻译的。本书系金属材料断裂学科领域的一本专题著作,主要介绍了使用苏联仪器在一个试样上多次测定 K_{Ic} 的方法,研究材料断裂韧性的试验,并指出了该试验方法的实例。作者在论述中,列举了各种变形铝合金不同半成品在室温和低温下的断裂韧性数据,总结了合金的化学成分、组织及压力加工方法对断裂韧性影响的研究经验等。主要供从事冶金、机械制造、国防工业、航空及其它各有关工业部门的科研人员、工程技术人员参考,亦可作大专院校师生和有关专业的研究生参考书。

本书按章节顺序分别由高革、韩学忠、关学丰、韩秉诚、蒋香泉等同志译出,高云震同志审校。

铝 合 金 断 裂 韧 性

〔苏联〕 B.Г.库德良绍夫 著
B.И.斯莫连采夫

高 云 震 等 译

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张 9 1/8 字数 199 千字

1980年9月第一版 1980年9月第一次印刷

印数00,001~5,000册

统一书号: 15062·3541 定价 0.98 元

序

断裂力学(研究裂纹体在加载时的行为的科学)是强度学科中近二十年来发展起来的一门较为年轻的学科。以前认为金属不含裂纹,制品在使用过程中一出现裂纹几乎就意味着瞬间断裂。

但是,实际上多数金属构件都是在有裂纹扩展的条件下长期工作的,这种材料的断裂取决于带裂纹材料本身所能承受的载荷。所谓断裂韧性就是指材料在存在裂纹的条件下能够承受的载荷指标,它表征了裂纹扩展的阻力。知道了断裂韧性,便能够估计在加载时引起脆性断裂的临界裂纹长度,或者选取适合于有一定长度的假想裂纹的零件的工作应力。

最近几年对带裂纹材料的行为已开始了广泛的研究工作,不久前发表的一系列文献反映了这一点^①。

但是只在个别杂志的文章中发表了铝合金的断裂韧性。

到目前为止,苏联的铝合金多数还没有采用断裂力学方法加以探讨。许多从事金属和合金强度的研究人员应该注意利用断裂韧性去选择高强合金的化学成分、半成品的生产工艺及其组织、热处理强化和形变热处理强化工艺以及解决现代金属学的一些其它问题。

本书主要综合了铝合金断裂韧性的实验数据,并对提高评定断裂韧性方法的精度、裂纹扩展动力学的研究以及铝合金的断裂特点与其组织的关系给予了极大的注意。

① Черепанов Г.П. 脆性断裂力学 М., 《Наука》, 1974. 640 с. с ил; Качанов Л.М. 断裂力学原理 М., 《Наука》, 1974. 342 с. с ил; Партон. В.З., Морозов Е.М., 弹-塑性断裂力学 М., 《Наука》, 1974. 416 с. с ил; Васильченко Г.С., Кошелев П.Ф., 断裂力学在评定结构强度中的实际应用 М., 《Наука》, 1974. 148 с. с ил. 等等。

目 录

序	V
第一章 什么是断裂韧性	1
一、从能量理论观点看断裂韧性	4
二、从裂纹尖端附近的应力 状态看断裂韧性	8
第二章 断裂韧性的评定方法	14
一、实用试样的基本概念	14
二、试样尺寸	21
三、断裂韧性试样的制备	22
带中心裂纹平试样 (ЦНР) 的拉伸试验	30
双边切口平试样 (ДБНР) 的拉伸试验	32
单边切口平试样 (БНР) 的拉伸试验	33
切口平试样弯曲 (БНИ) 试验	34
切口平试样紧凑拉伸试验 (ВР)	36
表面裂纹平试样的拉伸试验 (ОПТ)	37
圆周切口圆柱试样 (ОЦР) 的试验	39
双悬臂试样 (ДО) 及双悬臂异型 (楔型) 试样 (ДПО) 的试验	41
侧沟的制备	43
K_{Ic} 值的分散度	44
根据疲劳试验的结果确定断裂韧性	47
第三章 试验条件对断裂韧性的影响	55
一、用单试样多次试验确定断裂韧性的方法	56

1. 扩大用标准试样确定 K_{Ic} 的可能性	58
2. 建立 K -标定的新方法	61
3. 半成品截面上薄弱处的显露	64
4. 对在一个试样上多次确定 K_{Ic}	
方法优越性的定量评价	67

二、试验条件对断裂韧性的影响 68

1. 预制疲劳裂纹时加载的幅度对 K_{Ic} 的影响	68
2. 预制疲劳裂纹时的加载频率对 K_{Ic} 的影响	71
3. 加载速度对 K_{Ic} 的影响	72
4. 疲劳裂纹长度对 K_{Ic} 的影响	73
5. 试样厚度对 K_{Ic} 的影响	75
6. 预制疲劳裂纹和热处理工序的顺序对 K_{Ic} 的影响	80
7. 试验温度对 K_{Ic} 的影响	81
8. 疲劳裂纹前缘倾斜对 K_{Ic} 的影响	82
9. K_{Ic} 不取决于试样的几何形状	84

第四章 铝合金在平面应变条件下的断裂韧性 87

一、Al-Cu-Mg系结构合金 (Д16、AK4-1Т1)

的断裂韧性 94

1. 化学成分对Al-Cu-Mg系合金断裂韧性的影响	96
2. 组织状态和热处理对 Д16和AK4-1合金 断裂韧性的影响	101
3. Д16和AK4-1Т1合金半成品断裂韧性的各向异性	110
4. Д16与AK4-1Т1合金低温下的断裂韧性	115

二、Al-Zn-Mg-Cu系高强铝合金 (B95、B96、B96П)

的断裂韧性 119

1. 化学成分和杂质对Al-Zn-Mg-Cu系合金 断裂韧性的影响	121
2. 组织状态对Al-Zn-Mg-Cu系合金断裂韧性的影响	133
3. Al-Zn-Mg-Cu系合金断裂韧性的各向异性	145

4. 试验温度对断裂韧性的影响	147
三、可焊的热处理强化Al-Zn-Mg系	
(01911) 合金的断裂韧性	154
四、高强耐热结构用Al-Cu-Li系 (BAД23)	
和Al-Mg-Li系 (01420) 合金的断裂韧性	160
五、Al-Cu-Si-Mg-Mn系 (AK6, AK8)	
锻造合金的断裂韧性	167
六、Al-Cu-Mn系 (Д20, 1201) 耐热铝合金的	
断裂韧性	174
七、高塑性Al-Mg-Si系 (AB) 合金的断裂韧性	184
八、铝合金的比较分析图	191
1. 金属含杂质程度对铝合金断裂韧性的影响	192
2. 铝合金挤压半成品的组织对断裂韧性的影响	195
3. 半成品的生产方法对铝合金断裂韧性的影响	196
4. 切口取向对铝合金断裂韧性的影响	199
5. 试验温度对铝合金断裂韧性的影响	201
九、机械性能与断裂韧性之间的关系	204
第五章 铝合金在平面应力状态条件下的断裂韧性	207
一、从断裂力学角度看静力加载时的	
裂纹扩展阻力	208
二、按照板材试样的断裂图比较变形铝合金	213
三、铝合金在平面应力状态条件下的断裂韧性	
及各种因素对 K_{IC} 的影响	224
1. Д16合金的组织对 K_{IC} 的影响	232
2. 晶粒大小对AK4-1T1合金板材 K_{IC} 的影响	232
3. 金属在杂质方面的纯度对平面应力状态条件下的	
断裂韧性的影响	235
4. 合金在平面应力状态条件下的断裂韧性比较	237

第六章 铝合金中疲劳裂纹扩展速度与裂纹

尖端应力强度变化的关系·····	245
一、循环载荷下裂纹扩展速度参数的描述·····	246
二、铝合金中疲劳裂纹扩展速度与 加载循环参数的关系·····	250
1. 不对称循环系数 R 对疲劳裂纹增长速度的影响·····	251
2. 加载频率对疲劳裂纹扩展速度的影响·····	258
三、周围介质对铝合金中疲劳裂纹扩展 阻力的影响·····	259
四、铝合金按其抗疲劳裂纹扩展能力的比较·····	260
1. 再结晶和未再结晶组织对D16T合金疲劳裂纹 扩展动力学的影响·····	262
2. 时效制度、杂质纯度和冷变形程度对疲劳裂纹 扩展动力学的影响·····	263
3. 试样的取样方向对疲劳裂纹扩展速度的影响·····	268
附录 I 美国热处理强化变形铝合金半成品供给 状态的标志·····	271
附录 II 苏联、美国、法国和英国铝合金的标志·····	273
参考文献·····	274

第 一 章

什么是断裂韧性

随着技术的发展，几乎所有的部件、机器或结构虽然都在逐渐地增大载荷和它们的工作条件都在受到严格的限制，但是在单位有效功率或单位有效载荷下、它们的体积(质量)都在变小。这种情况不仅取决于特别规定的条件下(如：在一定的介质中耐蚀性好等)的所有高强度材料或新材料的研制，而且也取决于对所使用材料的性能可降低安全系数(称未知数)的仔细研究和实际地选择所需要的结构形状和尺寸。

除了严格限制材料的工作条件外，最近二十五到三十年间金属结构的外形尺寸显著增大，如大型桥梁、石油储存器、气体储存器、输送液态和气态产品用的大型管路、巨型海舰、潜水艇、飞机、火箭等。

引人注目的是在比屈服强度较低的平均工作应力下发生过毁灭性的断裂事故。因此可以认为，在结构上最适宜地使用材料的问题还没有彻底解决，与全面研究带有裂纹材料性能相关的断裂力学问题就是其中之一。在第一批断裂力学文献中Леонардо да Винчи, Галилей, Сен-Венан, Мор及其他人员集中地研究了物体的应变性，并根据各种强度理论建立了断裂准则。在这些研究中忽视了断裂过程的本身，因而认为，材料产生裂纹后便开始了它的“垂死挣扎”阶段，不能再继续使用了。

但是实际脆性物体(包括金属在内)都有各种缺陷——

微观裂纹，宏观裂纹，气孔，夹杂，位错和空穴的集聚。此外，工作结构上的部件，根据使用的情况都存在不同的应力集中。在使用的过程中，由于这些缺陷周围的高度集中的应力作用而产生裂纹或扩展原有裂纹并导致部件局部或全部断裂。

根据结构材料中存在裂纹和类似裂纹的缺陷这一事实认为，当最初和第一阶段使用结构时，脆性物体实际强度与理论强度的差异可以得到说明。

大约在1913年开始研究裂纹的扩展，当时出现了Инглис^[1]的文献，文中在典型的弹性理论范围内解决了有关在相同的应力场上无限体与隔离的椭圆形孔的平衡问题。随后Н.И.Мусхелишвили^[2]对任意应力场的复杂情况得到解决。

Гриффитс文献^[3]的出现开始了断裂力学的新阶段（仔细研究断裂过程本身的阶段）。根据这种见解当鉴定强度时考虑到在物体中已有的裂纹或类似它们的缺陷，这些实际缺陷的扩展决定着断裂的整个过程。当研究玻璃^[3-5]的强度时出色地确认了Гриффитс的设想。

Гриффитс的文献^[3,4]正确地被认为是脆性裂纹扩展理论的基础原理。他计算了内力—表面张力，并得出了对带有半长为 a 的（在应力作用在离裂纹无限远的条件下）直线裂纹的无限脆性物体的临界应力，当达到这种临界应力时，裂纹无外面供给能量将自然地扩展：

对于平面应力状态的条件：

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (1)$$

对于平面应变的条件：

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)a}} \quad (2)$$

式中 γ ——表面能；
 E ——弹性模量；
 ν ——泊松比。

Ирвин^[6]及Орован^[7]的文献是裂纹扩展理论的重要阶段，文中发展了准脆性断裂的概念。Ирвин和Орован注意到，当标准拉伸试验时某些材料是非常可塑的，在带裂纹试验时是按照准脆性机理断裂的，即塑性变形集中在靠近裂纹表面的很窄的一层。他们指出对这些材料可以使用 Гриффитс 的方程式，作用于裂纹表面的塑性变形功代替表面能，这种功可以大于表面能的几个数量级。

随着准脆性材料裂纹理论的深入传播和直线断裂力学的发展，在鉴定带裂纹物体的断裂阻力（所谓断裂韧性）方面已获得了很大成绩。最近10—15年间发表了许多从数学角度探讨的文献和实际确定断裂韧性的文献^[8—22]。

许多研究人员的文献指出，在很多情况下常规的机械性能（ σ_B ， $\sigma_{0.2}$ ， δ ， ψ ），往往也有特殊性能（ α_H ， σ_w 等）与结构材料在工作条件下的行为不相符合。毫无疑问，用实物的试验、在试验台上试验和运转的试验，可获得对材料的最好评价。但是这些试验由于它们的费用高、复杂及时间长，所以只对非常有限数量的制品可以进行试验；当然它们也不能用于选择材料、加工工艺和解决其它实际重要问题。所以在近期发表的文献中，有许多都阐述了试验室的机械试验方法的研究，这些试验室的机械试验方法可以鉴定脆性断裂的趋势并能最大限度地估计制品未来的使用条件的特点。

在带裂纹的结构部件里，如果裂纹的尖端产生塑性变

形，则不会发生毁灭性断裂。但在更脆的材料里，在比拉伸时强度低得多的载荷下靠近裂纹的尖端就开始脆性断裂。那时裂纹前缘通过材料的扩展是借助于在靠近裂纹尖端的个别的一些晶粒内以高速度重复断开的过程。这种断裂过程从能量的观点出发进行研究是合理的。

一、从能量理论观点看断裂韧性

释放出的能量值。图1a示出无载荷的带裂纹物体；把该物体在 z 轴的方向上给予一定的变形并 把 其 两 端 固 定（图16）；把同样物体挂上载荷 P （图1b）拉伸到图16 的 程 度。同时让裂纹长度增大到 δa 。对于图16示出的情况来说，总的弹性能量 E_y 在这种情况下随着裂纹长度增到 δa （图1b）而减少，物体变得更容易变形，载荷下落并在物体上作功而增大 E_y ，同时所挂的载荷位能 E_n 减少，这样， $E_y + E_n$ 的总和减少。这种减少取决于当裂纹尖端移到距离为 δa 时从研究的系统中可付出的功。计算裂纹前缘单位长度上和裂纹增大 δa 的单位长度时的功，可得出对裂纹移动所需要的力或释放出能量的值 G 。

使图1试样具有无限长并在平面应变的条件下增大裂纹，再使裂纹由 $X=a$ 到 $X=a+\delta a$ 向右移动。同时，根据文献〔28〕：

$$G = K^2 / 2M \quad (3)$$

对于平面应变条件：

$$M = \mu / (1 - \nu^2) = \frac{1}{2} E (1 - \nu^2)$$

对平面应力状态的条件：

$$M = (1 - \nu)\mu = \frac{1}{2} E$$

式中 μ ——切变模量。

G 值表明，它是当裂纹的尖端以单位行程移动时裂纹单位长度上的释放能量，并用单位长度上的单位力（公斤/毫米）来表示，在断裂力学中经常用单位面积上的功的单位（公斤·米/厘米²）表示它。

试验时裂纹增大的 $\Pi_{p\text{-}b\text{и}H}^{[23]}$ 概念是这样的，随着裂纹扩展所需要的力的增大而 G 也增大，并且在从裂纹尖端开始移动到失稳的一瞬间裂纹扩展阻力 R 对 G 起着反作用。

裂纹扩展阻力 R 可与因变形强化而增大的塑性变形的阻力相类似，它取决于在一般拉伸试验时施加的应力的增大。

R 曲线（图 2）有三种基本类型。曲线 a 、 b 及 b 是理想曲线，实际经常遇到的是带许多小的突进（曲线 r ）的曲线 b 。破断的失稳开始于由坐标开头引出的曲线与曲线 R 相接触的点上。根据这个点

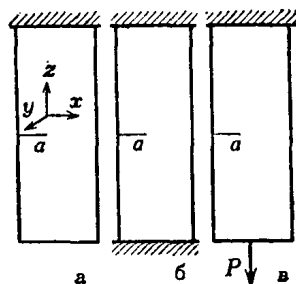


图 1 带裂纹的试样 (a)，承担一定变形的试样 (b)，给予一定载荷的试样 (b')

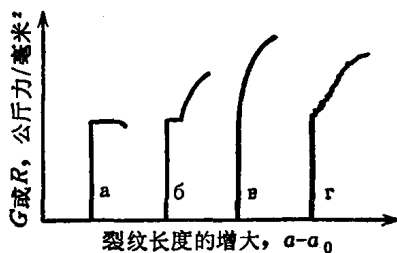


图 2 R 曲线的类型

a —全脆性材料； b —在平面应变条件下裂纹开始增大的材料； b' —塑性材料； r —带许多突进的

可确定该试验的临界 G_c 值，如文献 [24] 所指出， G_c 决定于裂纹的长度和试样的厚度（图3[25]）。

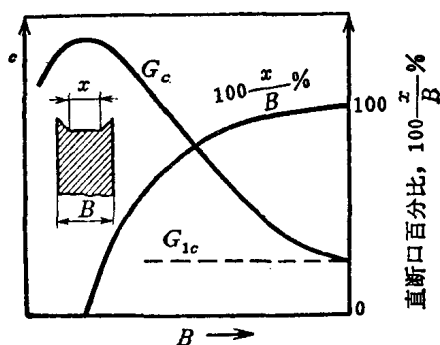


图 3 试样厚度对 G_c 值和断口特性的影响（简图）

根据普通的能量推测可以导出断裂应力的计算公式（Гриффитс公式）。如果在半无限载荷物体内部形成长为 $2a$ 的裂纹（观察单位厚度的物体，无限增加应力），则在尺寸为 a^2 的范围内释放出弹性能与 $\frac{\sigma^2}{E} \pi a^2$ 值成比例。对裂纹的形成

（ $2a$ 面积的自由表面上形成的）必定消耗功 $2a\gamma$ ，式中 γ 为表面能。当 $\frac{\sigma^2}{E} \pi a^2 = 2a\gamma$ 或达到临界应力 $\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}$ 时开始自然的发生脆性断裂。

方程式（1）及（2）是以Ирвин发展的现代断裂力学为基础的，因此必须指出它们固有的局限性：

（1）方程式说明全脆性材料的行为，在这种材料中不管是断裂的开始还是断裂的过程中塑性变形都没有发展（方程式只包括材料的表面能）。

(2) 方程式的导出是为了计算带有平面小裂纹的单位厚度无限薄板, 同时在裂纹附近没有应力场与薄板自由表面的相互作用。

(3) 方程式只得出失稳断裂开始的应力临界值, 而没有给予有关以前经过载荷的情况或有关以后断裂的扩展。

(4) 在弹性范围内从纯几何位置来研究断裂, 表面能是唯一的使用性能。

(5) 裂纹面垂直于无限附加的拉伸应力。

Ирвин^[6]及Орован^[7]把其它方面都列在这些方程式里。当准脆性断裂时他们使用了这些方程式, 但是他们用裂纹表面层的塑性变形的功 P 代替了表面能 γ , 这种功在某些值上大于材料的表面能:

$$\sigma = \left[\frac{2E(P + \gamma)}{\pi a} \right]^{1/2} \approx \left[\frac{2EP}{\pi a} \right]^{1/2} \quad (4)$$

因为 $P \gg \gamma$ 。通过 G_c 求出 $2P$ 值, 对带有半长为 a 的中心裂纹的半无限板得出断裂力学的基本方程式:

$$G_c = \frac{1}{E} \sigma^2 \pi a \quad (5)$$

此方程式的物理意义是这样, 带裂纹的半无限准脆性物体在载荷下——瞬间发生断裂, 这一瞬间, 在单位长度的裂纹以单位行程移动时释放出弹性应变能的强度达到该材料特有的临界值。由此, G_{Ic} 或 G_c 值相应地表示在平面应变和平面应力状态的条件下、失稳的裂纹长大所需的能, 或表示在裂纹本身任意长大的一瞬间单位面积的裂纹形成新的表面必须消耗的功。

G 值可以解释为一种力, 如同在无外力作用下, 裂纹自发地扩展的一瞬间, 为使裂纹移动在裂纹前缘的单位长度上

施加的力。这个力达到 G_{Ic} 或 G_I 的临界值的大小，取决于发展着的裂纹前缘应力状态的形式。线弹性理论给出应力、应变及能量之间的相同意义的关系单值比。因而断裂能量准则具有通过应力及应变来表示的自己的等量准则。发现它们在数学上是难以区分的。

二、从裂纹尖端附近的应力状态看断裂韧性

Ирвин^[26、27]从释放变形能量的强度的观点出发，研究了断裂能量准则与裂纹尖端应力状态的关系，并提出了能量等值观点与对应应力强度因子的分析。

一般情况下，在裂纹前缘前面的应力场可直接分为三种类型，其中的每一种都决定于局部变形的形式（图4）。

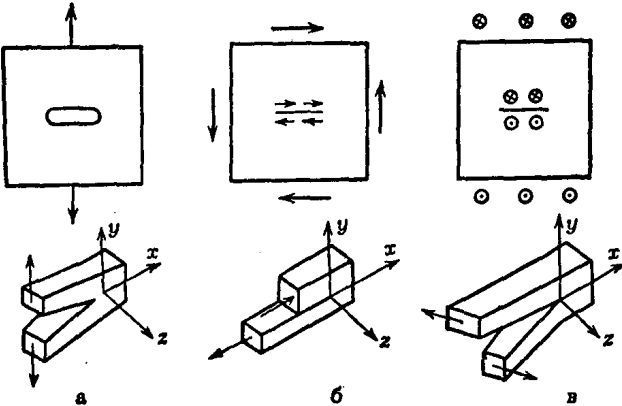


图 4 裂纹表面相互位移的三种主要类型

a—Ⅰ，б—Ⅱ，в—Ⅲ

弹性理论的平面问题。所有各种弹性理论的二维静态问题可分二类：

(1) 物体处在平面应变状态。这一类可以看作是处在在外载荷作用下的长直的圆柱体，但在圆柱体轴向位移的分量为零，而其余的各分量沿着圆柱体是不变的。

(2) 物体处在平面应力状态。例如，承受外载荷的薄板，载荷是这样分布的：作用于薄板侧表面的应力分量法向载荷为零。在这里采用的物体我们不一定理解为受自由表面限制的物体，但要理解为实际物体的任何部分，例如裂纹前面的塑性区。

在平面应变的状态下圆柱体的轴可沿 z 轴配置，这时 $W=0$ ， U 及 V 将只是 x 及 y (W 、 U 及 V ——矢量的分量) 的函数。

这样， $\frac{\partial}{\partial z}=0$ ， $W=0$ 。

图4a示出带裂纹的物体，当加拉伸载荷时裂纹张开。假如物体是无限大，则这种情况是平面应变。

函数 U 及 V 应是双调和的，即 $\nabla^2 \nabla^2 U=0$ 及 $\nabla^2 \nabla^2 V=0$ 。

当平行 xy 的平面上处于平面应力状态时应力分量 τ_{xz} ， τ_{yz} 及 σ_z 为零，然而移动矢量的分量 U ， V 及 W 在一般情况下不是依 z 而变化。

对所有三种类型的裂纹表面的相互位移用 Ирвин^[27]的方法确定其应力场和位移场。

按照图5示出的标号和坐标系，应力场及位移场的结果公式写成如下形式：

平面应变条件：