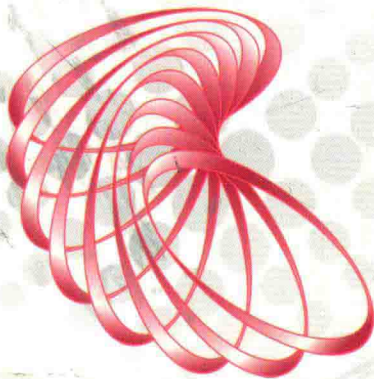


裂尖应变场

❖ 原位实验研究 ❖

Study on Strain Fields Around the Crack Tip by In-Situ Experiments

● 李继军 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国家自然科学基金

国家留学基金

资助项目研究成果

内蒙古自然科学基金

裂尖应变场原位实验研究

李继军 编著



机械工业出版社

本书在介绍固体缺陷及线弹性断裂力学理论、扫描电子显微镜原理及结构、几何相位分析方法等的基础上,将原位扫描电子显微镜实验与几何相位分析方法相结合,深入分析了 5A05 铝合金、多晶钼及单晶硅中微裂纹的萌生及扩展过程,研究了裂纹尖端的微米尺度及亚微米尺度应变场。

本书适合高等院校固体力学、断裂力学、材料力学及相关理工科专业的高年级本科生和研究生阅读,也可供上述学科的高等院校教师和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

裂尖应变场原位实验研究/李继军编著. —北京:机械工业出版社, 2018.5

ISBN 978-7-111-59821-3

I. ①裂… II. ①李… III. ①固体-缺陷-实验研究 IV. ①O483-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 075356 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王华庆 责任编辑:王华庆

责任校对:王明欣 封面设计:张 静

责任印制:孙 炜

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

140mm×203mm·4.25 印张·4 插页·124 千字

0 001—1900 册

标准书号:ISBN 978-7-111-59821-3

定价:25.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

微裂纹是固体材料中一种非常重要的缺陷，它在材料的强度、失效以及其他结构敏感性问题研究中起着至关重要的作用。微裂纹的扩展最终会导致材料断裂，甚至会造成灾难性的后果。尽管许多研究者在材料微裂纹方面做了大量的研究工作，但由于实验设备和技术上的局限性，人们对裂纹的形核及扩展机制、裂纹尖端的动态变化情况还不明确，许多很有价值的理论还需要用实验结果进一步验证和支持。因此，断裂理论的发展急需对微裂纹的形核、扩展过程以及微裂纹尖端应变场进行高精度实验观测。

原位扫描电子显微镜实验可以实时动态地研究材料在加载时的响应，近年来成为一种非常有效且直观的断裂研究手段。几何相位分析方法是一种基于高分辨率分析仪器和数字图像处理技术的高精度纳米尺度实验力学测试技术。本书将原位扫描电子显微镜实验与几何相位分析方法相结合，深入分析了5A05铝合金、多晶钼及单晶硅中微裂纹的萌生及扩展过程，研究了微裂纹尖端的微米尺度及亚微米尺度应变场，并与线弹性理论解进行了比较。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金（11562016，11672175，11762013）、国家留学基金（20145049）及内蒙古自然科学基金（2018MS01013，2013MS0107）经费资助，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，得到了上海海事大学赵春旺教授、内蒙古工业大学邢永明教授、内蒙古工业大学赵燕茹教授、内蒙古工业大学

郎凤超教授的悉心指导，在此向他们表示衷心的感谢；研究生张伟光、翟毅、李士杰、聂晓梦等参与了本书的校稿和检查等工作，在此对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于编写水平有限，书中错误和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

李继军

目 录

前 言

第1章 绪论	1
1.1 固体缺陷	1
1.1.1 点缺陷	2
1.1.2 线缺陷	5
1.1.3 面缺陷	6
1.1.4 体缺陷	7
1.2 微裂纹研究进展	9
1.3 实验力学测试技术的发展	14
1.4 本书内容安排	19
第2章 线弹性断裂力学理论	22
2.1 断裂力学概述	22
2.2 断裂的分类	25
2.3 线弹性断裂力学基础理论	29
2.3.1 Griffith 微裂纹理论及修正	30
2.3.2 裂纹尖端附近的应力场和应力强度因子	33
2.3.3 断裂韧性及裂纹失稳扩展判据	35
2.4 本章小结	37

第3章 扫描电子显微镜	38
3.1 扫描电子显微镜发展概述	38
3.2 扫描电子显微镜的性能特点	40
3.3 扫描电子显微镜的工作原理	42
3.4 扫描电子显微镜的结构	43
3.5 扫描电子显微镜的分类	46
3.6 扫描电子显微镜图像的衬度形成原理	49
3.7 本章小结	51
第4章 几何相位分析方法	52
4.1 几何相位分析方法的原理	52
4.2 几何相位分析的步骤	56
4.3 掩模大小对几何相位分析方法测定结果的影响分析	57
4.3.1 实验过程	57
4.3.2 结果与讨论	58
4.4 本章小结	61
第5章 5A05 铝合金微裂纹尖端应变场原位实验研究	62
5.1 实验方法	62
5.1.1 几何相位分析方法	62
5.1.2 数字图像相关方法	62
5.1.3 试样的制备	64
5.1.4 原位扫描电子显微镜三点弯曲实验	65
5.2 结果与讨论	66
5.2.1 微裂纹萌生及扩展分析	66
5.2.2 微裂纹尖端应变场分析	70

5.3 本章小结	77
第6章 多晶钼微裂纹尖端应变场原位实验研究	79
6.1 理论模型	79
6.2 实验方法	81
6.2.1 几何相位分析方法	81
6.2.2 试样的制备	81
6.2.3 原位扫描电子显微镜单轴拉伸实验	83
6.3 结果与讨论	84
6.4 本章小结	89
第7章 单晶硅微裂纹尖端应变场原位实验研究	91
7.1 理论模型	92
7.2 实验方法	92
7.2.1 几何相位分析方法	92
7.2.2 试样的制备	92
7.2.3 原位扫描电子显微镜单轴拉伸实验	94
7.3 结果与讨论	94
7.4 本章小结	100
第8章 总结和展望	102
8.1 总结	102
8.2 展望	106
参考文献	108



绪 论

1.1 固体缺陷

材料是人类社会发展的基石，人类社会的每一个阶段均是以某一种代表性的材料为特征的。21 世纪科技发展的主要方向之一就是新材料的研制和应用。固体材料因具有许多独特的性能，在国民经济建设、国防建设、科学技术及日常生活中得到越来越广泛的应用，一直是人们的研究对象。固体材料是由大量的粒子（离子、原子或分子）组成的，一般固体材料的粒子含量为 $10^{22} \sim 10^{23}$ 个/ cm^3 。根据组成粒子在空间排列的有序度和对称性，固体材料可以分为晶体（Crystal）、非晶体（Noncrystal）和准晶体（Quasicrystal）三类^[1]。

晶体的结构特点是，组成粒子在空间的排列具有周期性，表现为既有长程取向有序又有平移对称性，是一种高度长程有序的结构。

非晶体中，组成粒子的排列没有一定的规则，原则上属于无序结构；然而，近邻原子之间的相互作用，使得几个原子间距范围内在某些方面表现出一定的特征，因而可以看成具有一定的短程有序。

准晶体是一种介于晶体和非晶体之间的固体结构。在准晶体的原子排列中，其结构是长程有序的，这一点和晶体相似；但是，准晶体不具备平移对称性，这一点又和晶体不同。准晶体的发现是 20 世纪 80 年代晶体学研究中的一次重大突破。

鉴于晶体材料存在的普遍性和重要性，固体物理领域把晶体作为

主要的研究对象。在理想的完整晶体中，原子按一定的次序严格地处在空间有规则的、周期性的格点上。但在实际的晶体中，由于晶体的形成条件、原子的热运动及其他条件的影响，原子的排列不可能那样完整和规则，往往存在偏离了理想晶体结构的区域。这些与完整周期性点阵结构偏离的区域就是晶体中的缺陷，它破坏了晶体的对称性。实际晶体都或多或少地存在缺陷。晶体缺陷的存在对晶体的性能会产生显著的影响^[2]。例如，点缺陷会影响晶体的电学和光学性能，而位错等线缺陷会对材料的物理性能尤其是力学性能，产生极大的影响。因此，固体缺陷是固体力学、固体物理和材料科学等领域的重要基础研究内容之一。按缺陷在空间的几何构型可将缺陷分为点缺陷、线缺陷、面缺陷和体缺陷。这四类缺陷可分别用缺陷的延伸范围（零维、一维、二维及三维）来近似描述。

1.1.1 点缺陷

点缺陷是在结点上或邻近的微观区域内偏离晶体结构正常排列的一种缺陷。点缺陷是发生在晶体中一个或几个晶格常数范围内的缺陷，其特征是在三维方向上的尺寸都很小，也称为零维缺陷。点缺陷与温度密切相关，所以也称为热缺陷。点缺陷是最简单的晶体缺陷，其中包括空位、间隙原子、置换原子和色心。

（1）空位 空位就是没有原子的格点。晶体中的一个原子从正常格点上被移去，产生了没有原子的格点，就形成了空位（见图1-1）。如果离位原子逐步迁移到晶体的表面（或晶界面，孔洞、裂纹等的内表面），而使其原来的位置或其所经历的路径上的某个格点空着，这样的空位称为肖脱基（Schottky）缺陷（见图1-2）；如果离位原子从正常格点跳到晶体点阵的间隙位置，同时产生一个空位和一个间隙原子，这种形式的缺陷称为弗仑克尔（Frenkel）缺陷（见图1-3）。

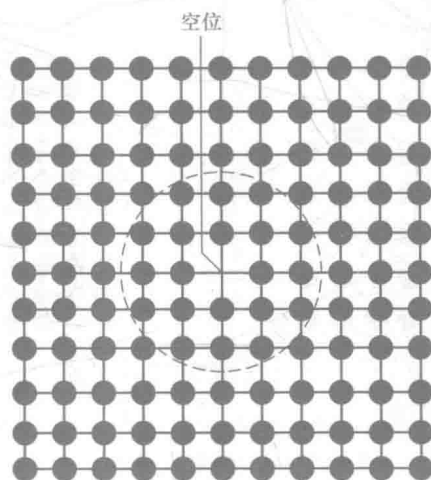


图 1-1 空位

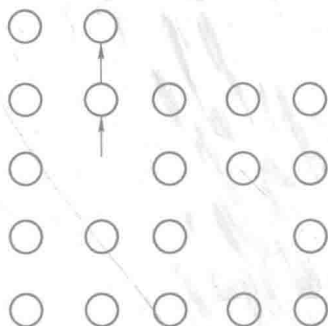


图 1-2 肖脱基缺陷

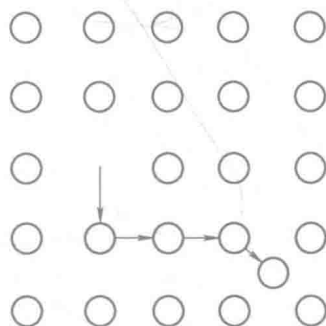


图 1-3 弗伦克尔缺陷

(2) 间隙原子和置换原子 晶体中都有间隙位置, 晶体中的原子有可能从晶格格点转移到晶格间隙中, 形成自间隙原子 (见图 1-4a), 同时产生一个空位。外来原子也有可能填入晶体中的间隙位置, 占据间隙位置的外来原子称为杂质间隙原子 (见图 1-4b)。

当外来原子的尺寸与晶体中的原子尺寸相当时, 有可能取代晶体

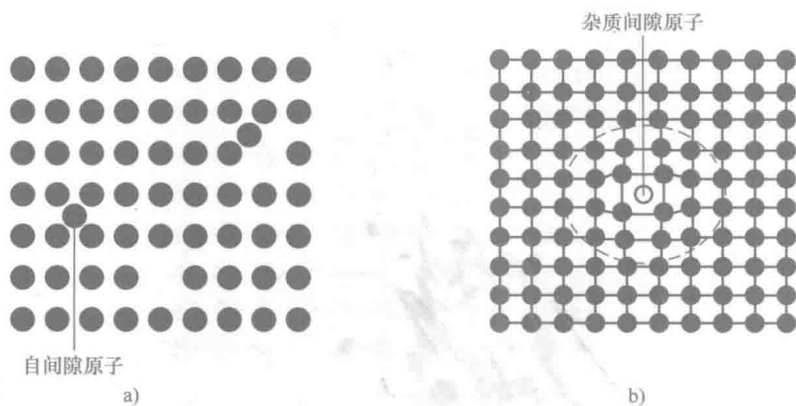


图 1-4 间隙原子

a) 自间隙原子 b) 杂质间隙原子

中的原子而占据晶格的格点位置，形成置换原子。

当点阵中有间隙原子或大的置换原子时，邻近的原子将被推开一些，产生压应力场。当点阵中存在空位或小的置换原子时，周围原子就向点缺陷靠拢，将周围原子间的距离拉长，产生拉应力场。点缺陷扰乱了周围原子的规则排列次序，造成晶格的局部畸变（见图 1-5）。

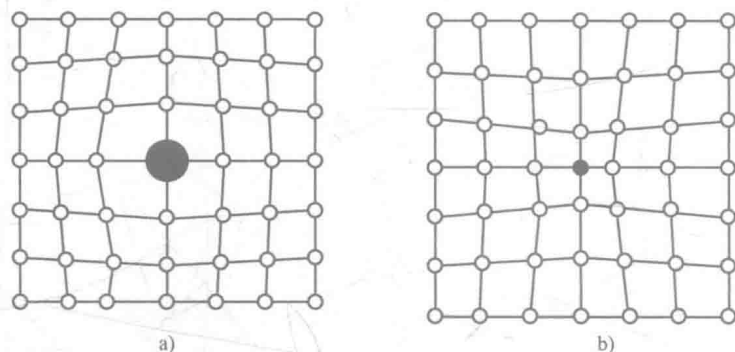


图 1-5 置换原子引起的晶格畸变示意图

a) 置换原子半径大 b) 置换原子半径小

(3) 色心 色心是指能吸收可见光的晶体缺陷。最简单的色心是 F 心，一个卤素负离子空位加上一个被束缚在其库伦场中的电子就构成了 F 心（见图 1-6）。

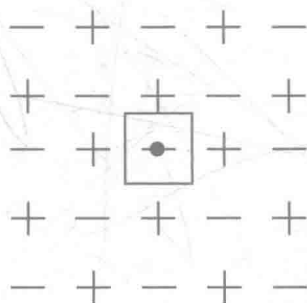


图 1-6 F 心的负离子空位和被捕获的电子

1.1.2 线缺陷

线缺陷是指晶体内沿某一直线，附近原子的排列偏离了完整晶格所形成的线型缺陷区。其特征是二维尺度很小，而第三维尺度很长，也称为一维缺陷。晶体中最重要的一种线缺陷是位错，由晶体中原子平面的错动引起。位错在晶体塑性变形、断裂、强度等一系列结构敏感性问题中均起着重要的作用^[3]。按照几何结构，位错可分为两种：刃型位错和螺型位错^[4]。

(1) 刃型位错 如果晶体内存在一个多余的半原子面，则在半原子面的中断处就形成了一个刃型位错（见图 1-7）。半原子面中断处的边缘线称为位错线，它也是晶体滑移区与未滑移区的交界线。

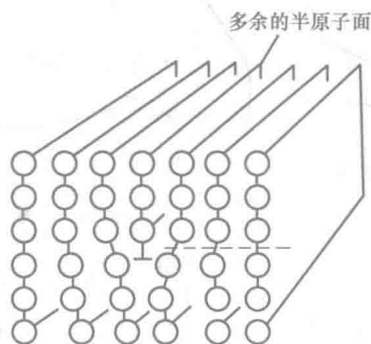


图 1-7 刃型位错

(2) 螺型位错 如果晶体内原来的一族平行晶面看起来仿佛沿一条轴线盘旋上升，且每绕轴线盘旋一周，就会上升一个晶面间距，则该轴线附近的狭长畸变区即为螺型位错（见图 1-8）。

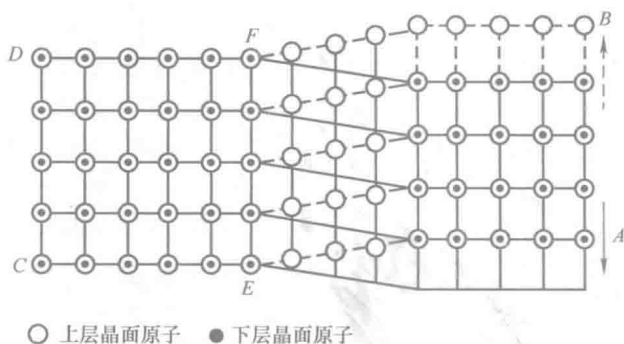


图 1-8 螺型位错

1.1.3 面缺陷

面缺陷是指偏离周期性点阵结构的呈二维形态分布的缺陷。面缺陷的二维尺度很大，而三维尺度很小，所以也称为二维缺陷。晶体中的面缺陷主要有表面、晶界、相界和堆垛层错等。

(1) 表面 固体与液体（或气体）的分界面，即原子排列的终止面，另一侧没有固体原子键合，其配位数少于晶体内部配位数，导致表面和临近的几层原子偏离正常位置，造成点阵畸变，因此表面能量高于晶内能量。同时，表面原子较易沿垂直于表面的方向位移，也较易形成空位。

(2) 晶界 实际使用的材料往往是多晶体，而不是按单一晶格排列的单晶体。多晶体由大量晶粒组成，晶粒的尺寸一般为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm}$ ，但也有大至几毫米的。多晶体中各晶粒的成分、结构完全相同，但彼此之间的位向不同。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。晶界的宽度一般为 5~10 个原子间距。晶界上原子排列不规则，晶格畸变较大，能量较高。其原子排列一般采取相邻两晶粒的折中位置，使晶格由一个晶粒的取向，逐步过渡为相邻晶粒的取向。晶界一般包括

小角度晶界、大角度晶界、亚晶界、共格晶界和孪晶界等。

(3) 相界 结构和成分不同,位向也不同的相邻晶粒之间的界面称为相界。相界对相变过程和多相合金的性能有直接影响。按照界面上原子的排列情况,可把相界分成共格相界、半共格相界和非共格相界三种类型。共格相界面是完全有序的,不存在错配区;半共格相界的错配区仅限于界面附近的位错行列;非共格相界则和大角晶界相似,界面上基本是无序的。共格相界面的界面能最低,非共格相界面的界面能最高。

(4) 堆垛层错 在晶体中的某些地方,原子按层周期性重复堆垛的次序发生差错造成的面缺陷称为堆垛层错。按照堆垛顺序变化的不同,可把堆垛层错分为内层错、外层错和孪生。

1.1.4 体缺陷

体缺陷是指晶体内偏离周期性点阵结构呈三维形态分布的缺陷。该缺陷在三维尺度上都很大,所以也称为三维缺陷。晶体中的体缺陷主要有微裂纹、空洞、气泡、包裹体和第二相等。在体缺陷中最重要的是微裂纹,微裂纹的存在会大大降低材料的强度,使得实际断裂强度远远低于理论强度^[5]。

在断裂力学中,根据外加应力与裂纹扩展方向之间的关系,将裂纹分成三种基本类型,即Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型(见图1-9),其他任何形式的裂纹都可看成是这三种基本类型的组合。

(1) Ⅰ型裂纹——张开型裂纹(见图1-9a) 外加正应力垂直于裂纹面,裂纹在外加应力的作用下张开并沿着与外加应力垂直的方向扩展,裂纹面的上、下两点有位移分量 v (v 为 y 方向上的位移分量)的间断。工程中属于这类裂纹的有板中的穿透裂纹(其方向与板所受拉应力方向垂直)以及压力容器中的纵向裂纹(见图1-10)等。

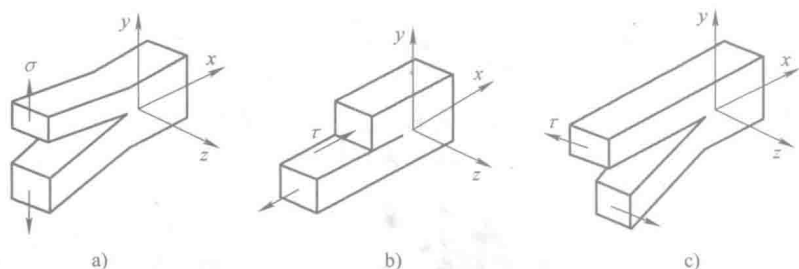


图 1-9 裂纹的三种基本类型

a) I 型裂纹 (张开型) b) II 型裂纹 (滑开型) c) III 型裂纹 (撕开型)

(2) II 型裂纹——滑开型裂纹 (见图 1-9b) 裂纹受到图 1-9b 所示剪应力的作用, 以滑动的方式扩展, 裂纹面的上、下两点有位移分量 u (u 为 x 方向上的位移分量) 的间断。例如, 齿轮或长键根部沿切线方向的裂纹引起的开裂, 或受扭转作用的薄壁圆管上贯穿管壁的环向裂纹在扭转力的作用下引起的开裂 (见图 1-11) 等, 均属于 II 型裂纹。

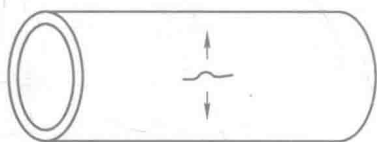


图 1-10 I 型裂纹 (张开型)

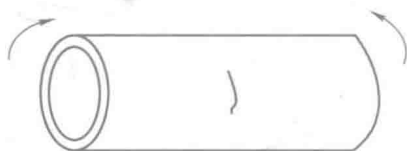


图 1-11 II 型裂纹 (滑开型)

(3) III 型裂纹——撕开型裂纹 (见图 1-9c) 裂纹受到图 1-9c 所示剪应力的作用, 以撕开的方式扩展, 裂纹面的上、下两点有位移分量 w (w 为 z 方向上的位移分量) 的间断。

在这三种裂纹中, 以 I 型裂纹最为常见, 也是最为危险的一种裂纹, 所以在研究裂纹体的断裂问题时, 对这种裂纹的研究最多。

1.2 微裂纹研究进展

断裂过程包括裂纹的形核和裂纹的扩展。对于材料的断裂机理分析来说,两者均是很重要的。就晶体材料而言,普遍接受的观点是,裂纹的形核是塑性变形局部受阻的结果。对这一观点的进一步解释,有位错塞积和位错反应两种机制。位错塞积机制由 Zener 于 1948 年首先提出并由 Mott 和 Stroh 发展完善^[6],所以该机制也称为 Zener - Mott - Stroh 机制。位错运动遇到障碍(晶界、第二相粒子以及不动位错等)时,如果其向前运动的力不能克服障碍的阻力,位错就会停在障碍面前,由同一个位错源放出的其他位错也会被阻在障碍前,这种现象称为位错塞积。紧挨障碍的那个位错称为领头位错或领先位错。塞积的位错数量越多,领头位错对障碍的作用力就越大,达到一定程度时,就会引起邻近晶粒的位错源开动,进而发生塑性变形或萌生裂纹。位错塞积机制说明了金属中塑性变形对裂纹形成的影响,这是其成功之处,但是在有些条件下该机制与实际情况有些差别。例如,对于裂纹的形成,该机制要求在滑移系前方应有阻碍位错滑移的障碍,而对于较纯净的单晶材料,其中不可能存在有效的障碍。与位错塞积机制不同,由 Cottrell 于 1958 年提出的位错反应理论不要求在晶体材料中有强有力的障碍,来维持位错的塞积,而是通过不同滑移面上的位错在一定的晶面发生反应而萌生微裂纹^[7]。该机制成功地解释了体心立方晶体的解理断裂现象,并从能量的角度分析了解理裂纹扩展的条件。

裂纹通过位错塞积或位错反应形核,其尺寸较小(若由 100 个位错塞积而成,则尺寸约为 $100 \times 10^{-8} \text{ cm}$;若由 10000 个位错塞积而成,则尺寸约为 $10000 \times 10^{-8} \text{ cm}$),属于微裂纹。微裂纹继续扩展会逐步演化为宏观裂纹(尺寸为 $0.1 \sim 10 \text{ mm}$)。尺寸为 $0.1 \sim 10 \text{ mm}$ 的