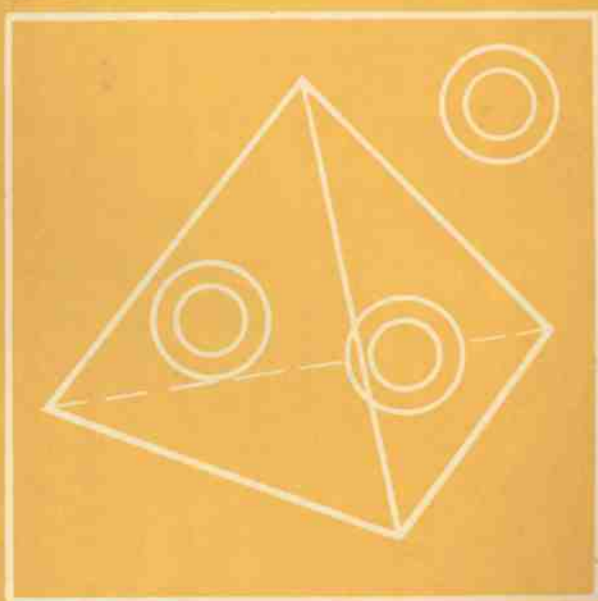


体视学与图像分析 研究进展

赵敏伦 丁孔奇 路肃 赵咏秋 等译
任德麟 刘建功 等校

ISS



1961

1982

3.14
32

冶金工业出版社

体视学与图像分析 研究进展

赵敏伦 丁孔奇 等译
路肃 赵咏秋
任德麟 刘建功 等校

北京
冶金工业出版社

1996

冶金显微学教材 显微技术

图书在版编目 (CIP) 数据

体视学与图像分析研究进展/赵敏伦等译;任德麟等校.
北京:冶金工业出版社,1996.6
ISBN 7-5024-1895-4

I. 体… II. ①赵…②任… III. ①体视显微镜-应用-研究-进展②显微组织(金相学)-图像分析-研究-进展
IV. TG113.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 10271 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京市社科印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1996 年 6 月第 1 版, 1996 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15.625 印张 380 千字; 244 页; 1-800 册

26.00 元

冶金工业出版社

0001

序

体视学，或显微组织定量学，是近三十年迅速发展起来的一门新兴科学。它涉及各种三维空间图像定量分析的有关理论基础、实验技术、仪器设计与制造，在材料科学、医学、生物学、地球学、土壤学和航测遥感学等领域得到了广泛的应用。

湖北省体视学会秘书长赵敏伦同志组织选译了第六届欧洲体视学会议英文论文集，是一件很有意义的工作。在这本中译本中，读者可以看到体视学理论研究的最近成果，找到体视学实际应用的最新例子。

我希望，本书的出版对感兴趣的读者能有所裨益。

任德麟

1996年4月

译 者 的 话

第六届欧洲体视学会议于1993年9月在捷克首都布拉格召开。这次会议展示了90年代体视学理论和应用研究的最新成果。会后到1994年6月为止,分三卷发表了英文论文集,共收论文109篇,内容涉及材料科学、医学、生物学、地球学、土壤学等领域。

论文集英文本由各国论文作者用英文撰写打印汇编而成。中译本选译了译者认为最精华的部分论文。对原文中个别不清楚的图和文字错误处,译校者作了适当删改。参考文献多为作者本国文献,在我国不易查找,故略去。

除了封面署名者外,参加翻译工作的还有阮幼冰、汪美蕾、吴秀芝、何选明、刘继雄、朱海珍、王先松、庞科等。

由于论文集内容十分丰富、新颖,限于译者水平,书中的缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

中译本的出版,得到了英文论文集主编 Miroslav Kalisnik 教授的赞同,中国体视学会负责人刘国权教授、张振声教授和湖北省体视学会负责人任德麟教授、汪厚植教授、宋亦王教授的大力支持。华中理工大学朱光喜教授、同济医科大学阮幼冰教授和武汉冶金科技大学沈士德教授等也给予了热情帮助与指导,在此一并表示衷心的感谢。

译 者

1996年4月1日

目 录

体视学在材料科学与工程中的应用	1
材料研究中的分形	12
多晶材料中重结晶的定量研究	18
应用概率模型描述液相烧结期间碳化钛的生长过程	21
宽度尺寸颗粒的定量测定	26
根据各种形状和尺寸的多面体建立的多晶体 结构模型的体视学参数	31
双相不锈钢中奥氏体晶粒形状的傅立叶分析	37
氮化硅陶瓷微观结构的分形性和多分散性	42
分类分析在多晶体晶粒生长模型研究中的应用	47
多晶体材料中晶粒尺寸分布的计算机辅助方法	52
热轧制的模型化对工具钢碳化物相的影响	55
单向凝固树枝状结构的体视学表征	61
碱土金属对非金属夹杂形态学参数的调整作用	65
精削加工后 Al-Si 合金表面层结构变化的定量分析	70
用 SEM 图像测定纤维的长度和直径分布	75
形态学研究对开发陶瓷电容器的重要性	80
烧结摩洛哥粘土的图像分析	84
烧结时间和温度对 BaTiO ₃ —陶瓷显微结构特征的影响	88
用短纤维复合材料的断裂表面拔拉的纤维长度 来评估纤维—基体粘结力的概率特性	94
成型压力对 BaTiO ₃ 陶瓷的显微结构和电性能的影响	99
用图像分析方法测定硬化混凝土的三维气孔特征	104
钢铁质量控制的定量组织判据	108
双相钢显微组织定量描述	122
淬火温度对铸造双相不锈钢显微结构与性质的影响	128
用共焦扫描激光显微镜对空间纤维排列的体视学研究	134
远距离图像的分割方法	139
图像分析中的多标度和多重分形	144

体视学在材料科学与工程中的应用

【美国】 Arun M. Gokhale, Nishkamraj U. Deshpande
School of Materials Science and Engineering
Georgia Institute of Technology

【摘要】 过去10年左右,理论体视学已经有了明显的进展。但至少在材料科学领域,体视学的实际应用还不能与体视学理论的迅速进步并驾齐驱。在材料科学中,尽管显微结构、性质、加工研究极为重要,但除体积分数和颗粒尺寸以外的体视学测量却应用极少。本文的目的在于讨论体视学在材料加工研究中的某些应用。其中,显微结构的定量及其评价导出了有用的信息。

【关键词】 显微裂纹 烧结 断口组织观察 金属基复合材料 重结晶 铝合金 蠕变断口

引言

过去10年期间,体视学理论有非常显著的进步,目前已能对显微结构的基本特征,即总体积、表面积、长度、数量及其相关性进行有效的评价。通过数点法(Underwood, 1970)或者带形、探针法(ribbon probe, 译者注)(McMillan, 1992)容易得到体积分数,用垂直断面法(Baddeley, Gundersen and Cruz-Orive, 1986)可以测出表面积,用垂直片法(Gokhale, 1990, 1992, 1993)可以对长度、密度进行有效的评价,用垂直投影法(Cruz-Orive and Howard, 1991)可以测出绝对特征长度,用析像管和相关三维探针(stereo, 1984, Cruz-Orive, 1987, DeHoff, 1987, Gundersen, 1988)能够测出数量和连通性。这些进展均有助于使体视学成为一种能表征显微结构的实用、通用和有效的工具。此外,这些进展还使体视学能够表征显微结构特征的空间分布(Stoyan, 1985, Cruz-Orive, 1989, Jensen, Kieu and Gundersen, 1990)。为了表征断口表面,体视学中已经提出了一种通用的非假定技术,即从垂直面断口轮廓评价断口表面的粗糙度(Gokhale and Underwood, 1990, Gokhale and Drury, 1990, 1993)。某些性质,例如分维数也能从二维断面测出(Mandelbrot, 1983, Drury and Gokhale, 1993)。数字形态学的发展(serra, 1988, Meyer 1992)提供了一种可用于自动图像分析或人机对话图像分析的精密技术。至少在材料科学中,体视学和图像分析的应用还跟不上理论的迅速发展。除了颗粒尺寸和体积分数之外,体视学测量并不经常用于表征材料的结构。但是,当体视学正确地应用于研究材料工程时,就会得出有关材料工程的新观念和定量数据。体视学和图像分析在材料科学中的这些应用可能涉及以下广阔领域。(1) 定量表征复合材料在诸如相转变、烧结、形变和破坏过程中的结构演变,以获得

有关可导致结构改变的过程的基本信息。

(2) 用体视学定量表征非平面和几何形状复杂的断口表面, 即断口组织的显微镜定量测定。

(3) 提出显微结构与性质间的定量关系。

本文提出体视学应用的目的是为了说明体视学和图像分析是怎样用来获取关于材料行为的有用信息的。本文的下一节讨论的这类应用, 包括复合材料在周期性受热过程中的破坏演变, 以及铁粉在烧结时“曲颈”的生长速率。在随后的章节中再讨论体视学和图像分析在断口研究(断口组织学)中的应用。

显微结构演变

材料的加工, 例如相转变、烧结、形变、蠕变、疲劳、周期性受热等, 将导致显微结构的改变。显微结构的演变基本上取决于显微结构界面、线、点的运动(即伸展或收缩)。由于过程延迟的影响, 新的特征形成了(晶核生成), 或原有的特征消失了, 显微结构的演变, 改变了显微结构特征的数量。在这种情况下, 具有根本重要性的运动学信息是显微结构特征的增长速率(或者更精确地说是界面与边缘运动速率等的分布)和重要显微结构特征的形成和消失速率。这些速率不一定是时间的函数, 但可能与变形(例如在形成期间微孔生长), 或循环次数(由于疲劳或周期性受热), 或任何一个可导致显微结构改变的自变量有关。通过在不同时间(或在不同的循环次数等)测定变化过程中所关注的尺度与拓扑学性质, 可对演变过程进行研究。显微结构性质的数据可以用来提取关于成核和生长的信息(见 Gokhale 和 DeHoff, 1985, DeHoff, 1986, Gokhale, 1992, Vandermeer, 1992)。具体步骤可用以下两个例子加以说明。在这两个例子中, 演变过程是比较简单的。

金属基复合材料的循环受热

图 1 是金属基复合材料(MMC)的显微照片。这种 MMC 是由氧化铝纤维连续而均匀排布在含铝 2.5% 的锂合金基体中形成的(断口平面垂直于纤维)。这种纤维和基体的热膨胀系数有较大的差别(超过 5 倍)。由于这种热不匹配, 周期性受热产生周期性的热应力, 从而使复合材料产生并发育微裂纹。图 2 为样品在室温至 325°C 的温度范围经受 3000 次循环受热后的显微照片。在纤维之间可观察到微裂纹。研究这种热致微裂纹的形成与发育, 并将温度循环参数、MMC 的显微结构与微裂纹的形成与生长速率关联起来, 具有重要的实际意义。

显微裂纹由一个边缘连接着的两个表面构成。每个显微裂纹均具有体积、表面积和与之相关的欧拉(Euler)特征数。显微裂纹的发育增加了它的体积与表面积。因此, 测定体积分数 V_v , 每单位体积的总表面积 S_v 和显微裂纹的数量密度, 并将它们作为热循环次数 n 的函数, 可提供关于显微裂纹形成和发育的定量信息。

Gokhale 和 Whited (1992) 用周期性受热在 10 次至 5000 次之间的一系列样品, 通过测定其显微裂纹的 V_v 和 S_v , 测定其在垂直于纤维轴向的平面上每单位面积中显微裂纹的数量 N_A , 监测了显微裂纹的演变(实验细节见 Whited, 1992)。体积分数采用数点法测定。而显微裂纹总表面积则采用垂直断面法测定(Baddeley 等, 1986)。选取垂直于样片平面的方向作为垂直轴, 从用摆线实验针定位的三个互成 120 夹角的断面上测得 S_v 。业已表明, 用

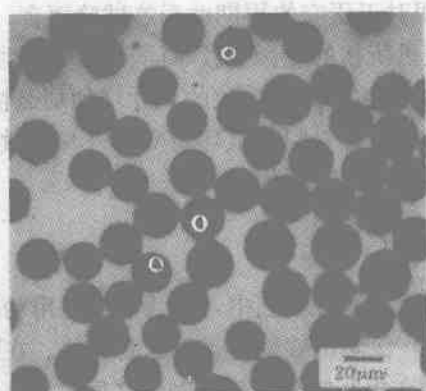


图1 MMC 原始样品

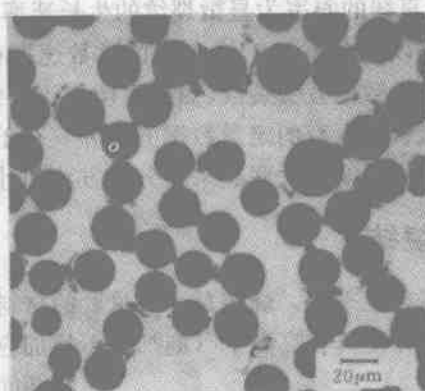


图2 MMC 经 3000 次周期性受热后的显微照片

这种复合实验针（称为“三等分器”）可以正好在与各向异性有关的三个相交断面上有效而精确地测出 S_v (Drury 和 Gokhale, 1993)。图 3 为单位面积上显微裂纹的数量 N_A 与垂直于纤维的平面上单位面积纤维的根数 N_f 之比相对于样品所经历周期受热次数 n 的关系曲线图。注意到 N_A/N_f 并不随周期性受热次数变化而有明显的改变是很重要的。从简单的几何条件出发，这种情况可以表示为：

$$N_A/N_f = N_v \bar{L}/N_f$$

式中： N_v 是单位体积显微裂纹的数量； \bar{L} 是平行于纤维方向上显微裂纹的平均长度。由于纤维的密度 N_f 不取决于热循环次数，即 N_A/N_f 是一个常数，因此可以得出：(1) 单位体积显微裂纹的数量 N_v 并不随周期性受热次数而增加，因此，大多数显微裂纹是在过程的最早期的阶段形成的；(2) 显微裂纹在其形成之后不久，平行于纤维方向即达到饱和长度，这个尺寸不再随后来的周期性受热而明显增大。显微裂纹发育的这样一种几何模式，可以表明 S_v/N_A 之比直接给出了显微裂纹尺寸的平均值，该值随周期性受热次数增加而增大 (Whiled, 1992, Gokhale 和 Whiled, 1992)。图 4 给出了 S_v/N_A 与周期性受热次数 n 的关

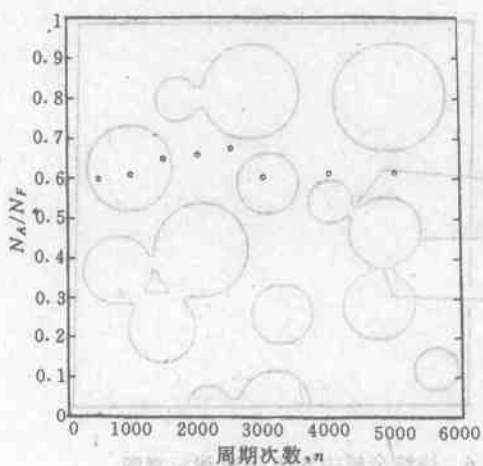


图3 N_A/N_f 与周期性受热次数 n 的关系曲线

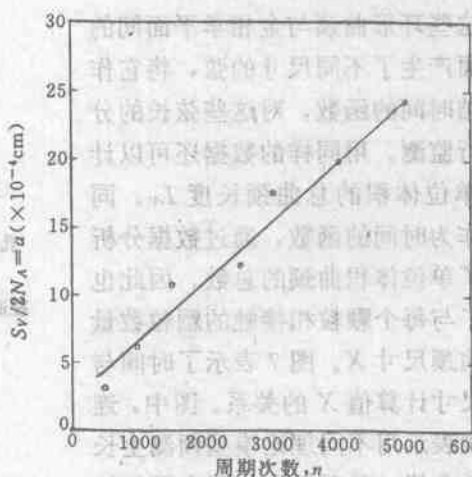


图4 S_v/N_A 与周期性受热次数 n 的关系曲线

系曲线。直线的斜率为显微裂纹的生长速率,该值表明对于研究的周期性受热试验而言,显微裂纹是以一个 $5 \times 10^{-5} \text{mm/s}$ 的常数速率在发育。这里所指的显微裂纹不同于由周期性机械应力所导致的疲劳裂纹。热致显微裂纹不像机械应力产生的疲劳裂纹的尺寸增加那么快。关于显微裂纹发育的定量数据的研究,对于开发和改善复合材料的破坏演变,将其显微结构与其破坏及演变关联起来的分析方法和计算机模型化是很有用的。

铁粉的烧结

从工艺上来说,烧结是一种重要的材料加工技术,在这种工艺中,块状部件是用粉末通过加压并使其在高温下(施加或不施加应力或压力)保温足够长的时间而制成的。在烧结期间,“曲颈”在相互接触的粉末颗粒之间发育(见图5),随着时间的延长,曲颈尺寸增大,固体与孔隙间的界面总面积减小。在烧结期间,质量的传递可以通过若干不同的机理进行。某些关于烧结的理论模型都假定了一个速率控制机理,并预测曲颈的发育规律。通过测定它们在所研究系统中的适用性来检验这些模型是我们关心的。

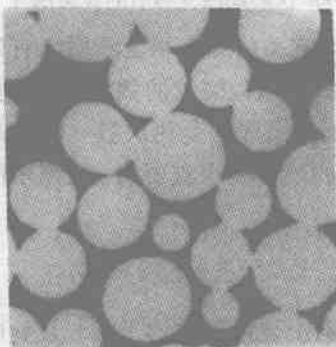


图5 铁粉在 1050°C 烧结 24h 的显微照片 ($56\times$)

Gokhole Basaváia ha 和 Vpadhyaya (1988) 为了完善关于曲颈发育的体视学模型,以尺寸范围接近(直径 $62\sim 74\mu\text{m}$) 的球形铁粉为样品,对其烧结期间的曲颈演变进行了详细的体视学研究。一系列的样品被松散堆积烧结,分别在 950°C 、 1000°C 、 1050°C 下烧结 $0\text{h}\sim 34\text{h}$ 的不同时间,在各种情况下均采用干氢气和氩气气氛保护。一个曲颈是两个粉末颗粒和孔隙空间的 SSP (固-固-孔) 三重线接触(见图6)。

由于粉末颗粒是球形的,而且粒度近似单一,因此曲颈(SSP三重线)应该是环形的,并且它们的取向各向同性。

这些环形曲颈与金相学平面间的横切面产生了不同尺寸的弦,将它作为烧结时间的函数,对这些弦长的分布进行监测。用同样的数据还可以计算出单位体积的总曲颈长度 L_V 。同样,作为时间的函数,通过数据分析得到了单位体积曲颈的总数,因此也得到了与每个颗粒相接触的颗粒数量以及曲颈尺寸 X 。图7表示了时间与曲颈尺寸计算值 X 的关系。图中,连续曲线表示用不同理论模型预测生长动力学曲线。很明显,与每个颗粒接触的颗粒数量随时间的延长变化不

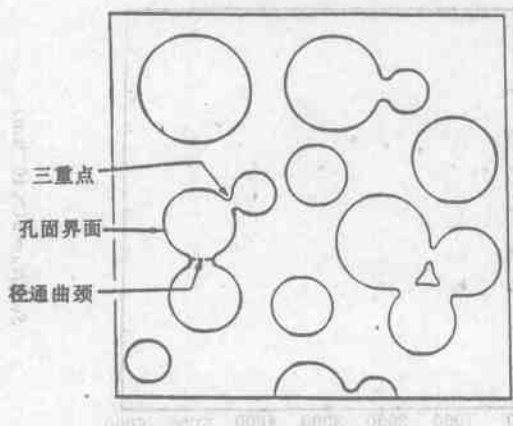


图6 烧结金属中 SSP 三重线示意图
(三重线、孔隙界面、弦通曲颈)

犬,因而几乎所有的曲颈都是在烧结过程的初期阶段形成的,它们的数量基本取决于颗粒在粉末基质中的堆积方式。表面与颗粒边界的扩散受烧结控制的模型所预测的曲颈尺寸和生长速率明显地高于观测值。在表面,颗粒边界和体积扩散具有“平行”的扩散路径。因此,扩散最快者应该成为控制动力学因素。然而图7示出,尽管表面和颗粒边界扩散模型预测到高得多的曲颈尺寸(从而是动力学因素),但实验数据却显示出比这些模型的预测要低得多的生长动力学。因此,必然得出的结论是,这些模型由于假定的步骤不是速率控制步骤,因而是不适用的。这些模型仅考虑曲颈几何学特征所作的简化假设很可能是不可用的。

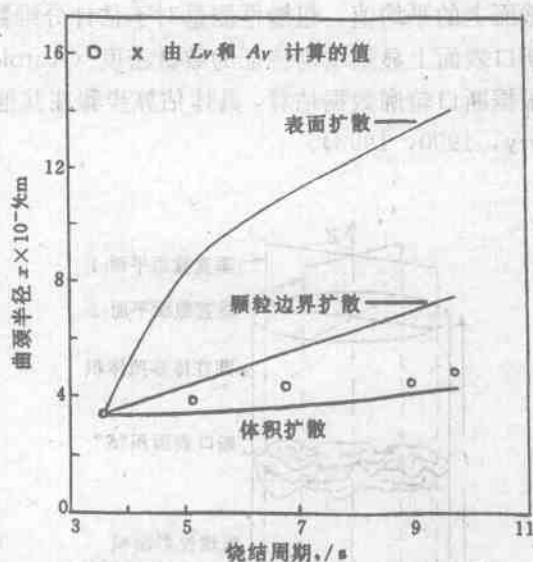


图7 曲颈尺寸的实验值与计算值的比较,曲颈半径与 950°C 下烧结周期 $t^{1/5}$ 的关系

断口表面的表征

损坏与断口形成的终点就是断口表面。断口表面通常是具有复杂几何形状的非平面型粗糙表面。断口表面的形态学及其显微结构特征可能包含有关断口形成机理和显微结构特征在断口形成过程中的作用的信息。断口表面的几何特性可以归纳为如下几种类型:

- (1) 断口表面的整体形态学描述,例如粗糙性,分维数和各向异性等。
- (2) 特征专门性质,例如凸凹不平高度、韧窝尺寸和重叠范围等。
- (3) 由断口表面显微结构特征决定的几何形状。例如断口表面夹杂物的面积分数和数量密度。

通常采用 SEM 观测断口组织,这种技术可给出非平面表面的投影平面。由断口表面与金相学平面间的断面产生的断口轮廓也可以提供有关断口表面的信息。这种技术称为轮廓曲线测定。因此,体视学方法用 SEM 或者轮廓曲线仪测定断口表面特性是必要的。

采用下面的非假定体视学关系式 (Gokhale 和 Underwood, 1990),可由垂直截面上的断口轮廓测量值,对断口表面粗糙性参数 R_i (它是断口表面的真实面积与其投影面积之比) 进行估算。

$$R_i = \overline{R_i} \Psi \quad (1)$$

Ψ 为轮廓结构系数,在此

$$\Psi = \int_0^\pi \left[\sin \alpha + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \alpha \right] f(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

式中: R_i 是垂直截面上断口轮廓的轮廓粗糙性参数 (见图 8); α 是断口轮廓在给定点的切线与垂直轴之间的夹角; $f(\alpha)$ 是这些定向角度的频率函数。式 (1) 中的“—”表示在垂

直截面上的平均值。粗糙性测量对于估计分维数 (Drury 和 Gokhale, 1993), 计算参数如在断口表面上显微结构特征的数量密度 (Antolovich 等, 1990) 均是有用的。 R_L 和 $f(\alpha)$ 可根据断口轮廓数据估算, 具体估算步骤在其他地方已经说明 (Baneryi, 1988, Gokhale 和 Drury, 1990, 1993)。

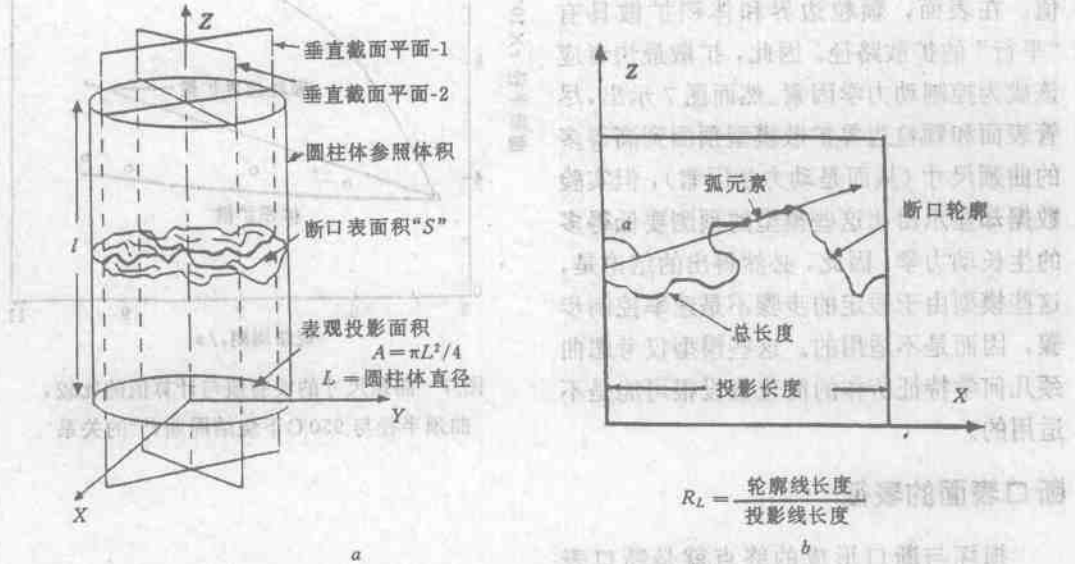


图 8 断口表面的垂直截面 (a) 和轮廓取向角 α (b)

特征专属性质的估算在过去没有得到足够的重视。最近 Gokhale 和 Drury (1993) 提出了一种计算方法, 可从断口轮廓数据直接计算出平均凸凹不平高度和高度分布。这种方法已经用来研究镍铬铁合金-718 在疲劳裂纹发育期间的裂纹闭合 (Drury, 1992)。由轮廓数据还可直接估算凹入或重叠的断口轮廓长度的分数。Mishra (1992) 已采用这种方法研究蠕变断口表面。以下将讨论在表征断口表面方面的几个体视学实际应用。

重结晶对铝合金断裂路径的影响

熟铝合金 7050 是十分普及的结构材料。这种合金的加工通常采用热轧, 在型材中出现因热轧而产生的重结晶区域, 热轧 7050 合金的断口表面经常含有脆性的晶界区域和有延性韧窝穿晶区域。断口的性质明显决定于穿晶断口表面积的分数。用 SEM 观察断口显微组织, 可以识别出断口表面的穿晶区域和晶界区域 (见图 9)。重结晶区域的存在和数量影响了这些材料的断裂路径和断裂行为 (Staley, 1976)。因此, 找出合金中重结晶区域的体积分数与穿晶断口表面的面积分数间的定量关系是令人关心的。为了研究这种关系, 制备了一系列具有不等量重结晶区域的铝合金 7050 样品。通过标准拉伸试验产生断口表面。图 9 显示出用这种方法产生的典型断口表面。用数点法估算出断口表面中穿晶区域的面积分数。用通过整块材料的一个切面估算出重结晶区域的体积分数。图 10 给出了断口表面上穿晶区域的面积分数与材料中重结晶区域的体积分数之间的关系曲线。在穿晶型断裂路径的分数与重结晶区域的体积分数之间有严格的对应关系。随着重结晶颗粒的体积分数增加, 穿晶

断口的范围缩小。因此,通过控制合金中重结晶颗粒的数量,可在相当程度上控制材料的断裂行为。这个例子表明,简单的体视学测量如数点法是怎样能产生对合金开发有用的定量信息的。

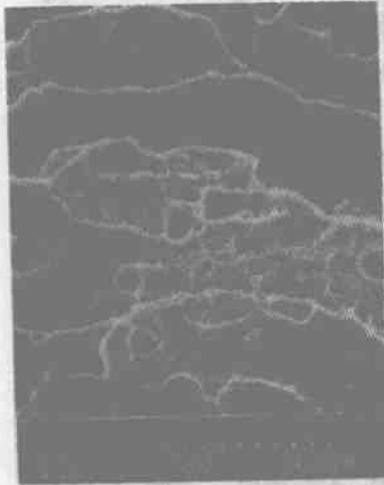


图9 合金7050的SEM显微照片

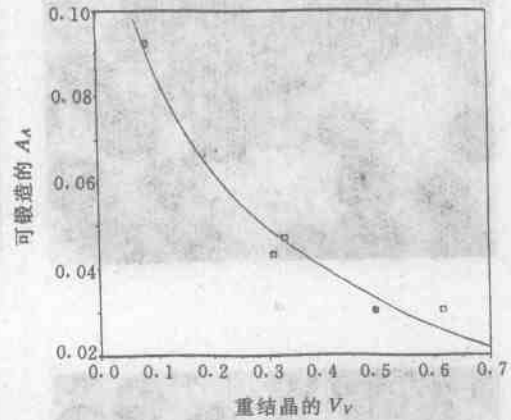


图10 V_V 与可延性 A_A 的关系

金属基复合材料的工艺缺陷

金属基复合材料(MMC)通常都含有工艺缺陷,这些缺陷对它们的损坏与断裂行为有不利的影响。图11的照片显示MMC中存在的工艺缺陷,如孔隙、氧化夹杂物、纤维碎片和超粗纤维,这种MMC由 $Al-Li$ 合金基质和单向连续氧化铝纤维制成。在这种情况下,了解哪一种缺陷对破坏过程有最大的影响是非常重要的,以便找出对策,通过控制工艺参数,减少或消除这种对材料性质影响最大的加工缺陷。正如图12所示,所有四种工艺缺陷在断口表面均存在。因此,定性地观察不能得到任何结论,而体视学和定量断口显微测定方法可以解决这个问题(Drury, 1989, Antolovich等, 1990)。对相对于拉伸轴向有不同取向的样品进行拉伸试验,得到一系列拉伸断口表面,测出其工艺缺陷的数量密度和面积分数。采用通过MMC整体而随机定向金相学截面进行同样的测定。所得到的加工孔隙和氧化夹杂物的数据(见表1)表明:

表1 断口表面和块样金相截面上每个缺陷的面积分数、数量密度和平均面积

取向	面积分数		数量密度/ μm^{-2}		平均面积/ μm^{-2}	
	孔隙	氧化颗粒	孔隙	氧化颗粒	孔隙	氧化颗粒
0°	0.0063 ^①	0.0050	11.3 ^①	4.0	560	1250
30°	0.0035 ^①	0.0040	8.2 ^①	4.8 ^①	430	830
60°	0.0104 ^①	0.0083 ^①	13.7 ^①	5.5 ^①	760 ^①	1510
90°	0.0118 ^①	0.0063 ^①	15.5 ^①	7.5 ^①	760 ^①	840
块样	0.0004	0.0015	1.6	1.9	250	790

① 与块样的相应值只具有统计意义的差别。

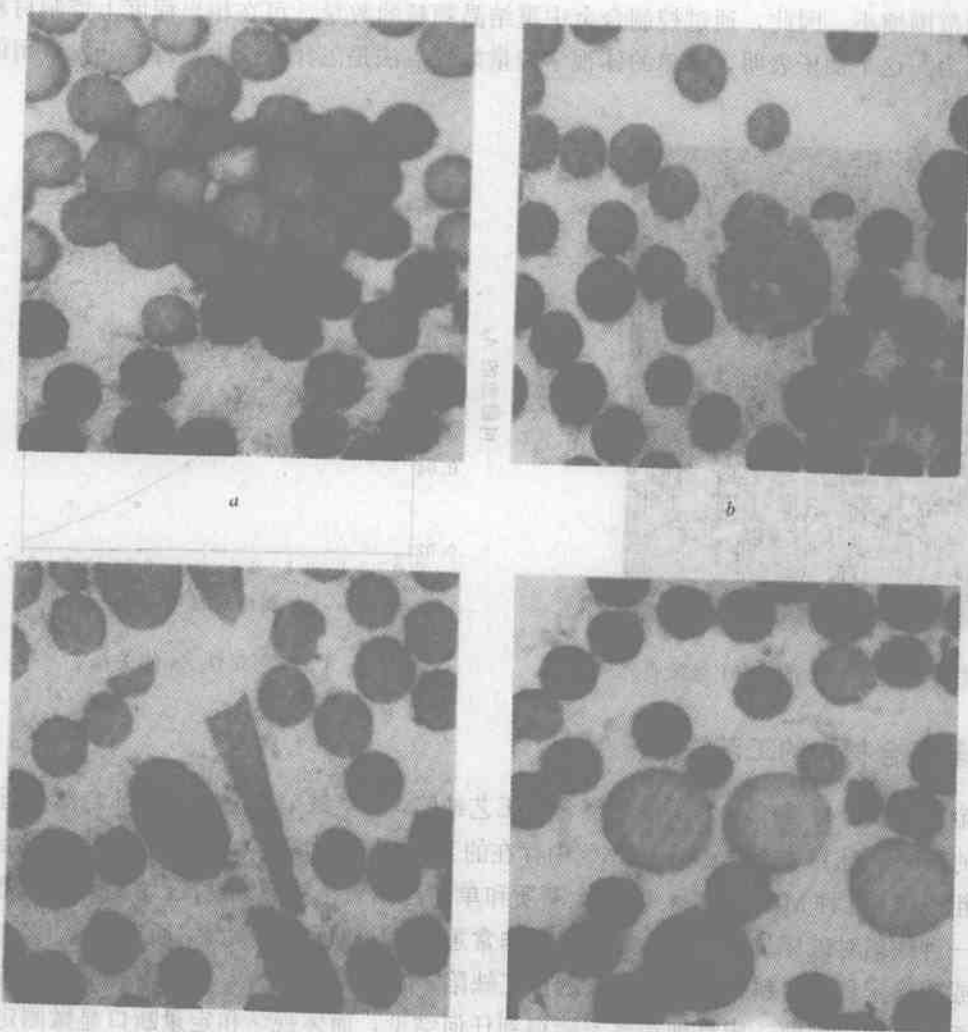


图 11 MMC 中工艺缺陷的显微照片 (×500)

a—加工孔隙；b—氧化夹杂物；
c—纤维碎片；d—超粗纤维

(1) 在所有的样品中断口表面上加工孔隙的数量密度和面积分数明显高于金相学截面随机切过块样时的相应的平均值。这说明断口表面优先开始于加工孔隙，因此加工孔隙是有害的。

(2) 断口表面氧化夹杂物的数量密度和面积分数略高于它们在块样中的相应值，而这种差别在某些样品中只具有统计学意义。

(3) 断口表面上的氧化夹杂物的面积分数与加工孔隙的面积分数具有可比性。但是在块样中，氧化夹杂物的面积分数则显著高于加工孔隙的相应值。

这个例子表明，断口表面上这两种缺陷面积分数的相似性并不一定意味着它们在破坏过程中同等重要。只有与块样的相应值比较以后，才能得出恰当的结论。在这个特殊的场合，所得数据指出加工孔隙比氧化夹杂物更为有害。

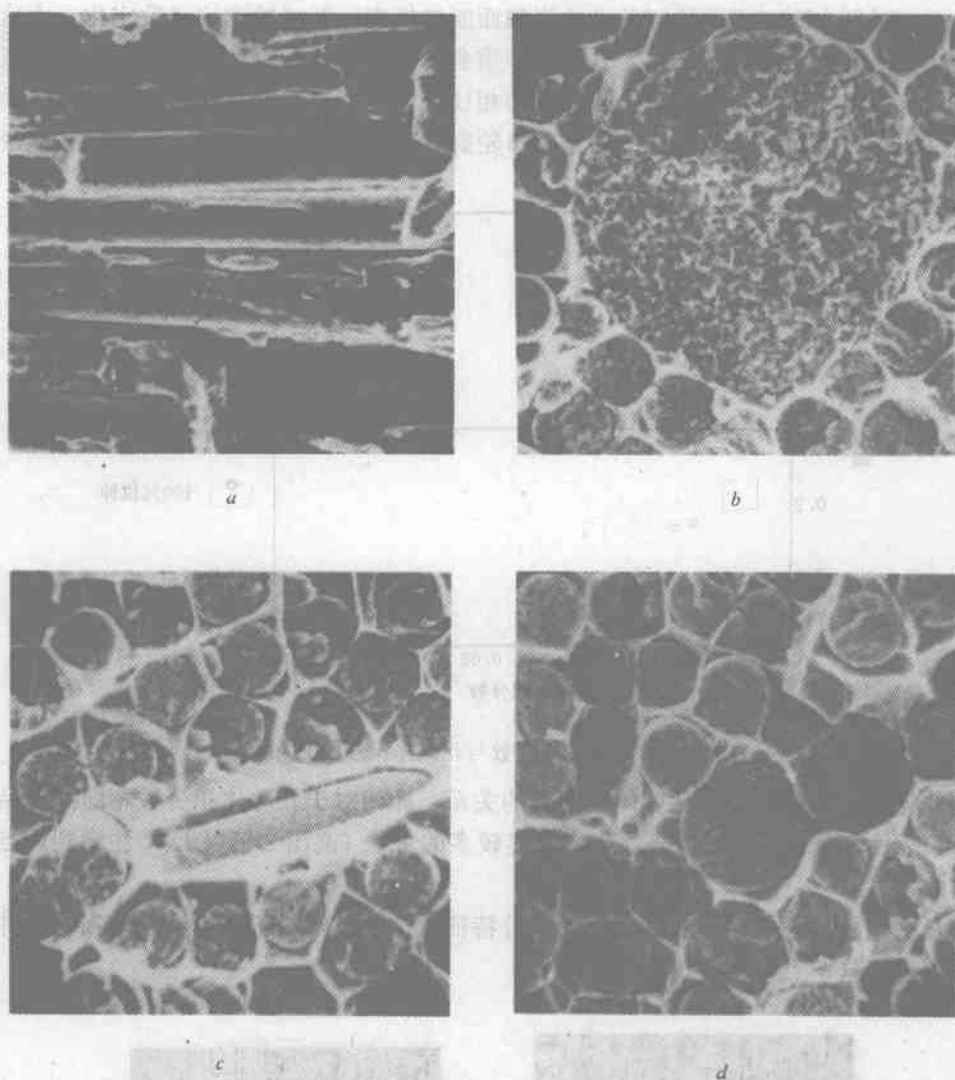


图 12 MMC 中工艺缺陷的 SEM 显微照片 ($\times 500$)

a—加工孔隙；b—氧化夹杂物；
c—纤维碎片；d—超粗纤维

蠕变断口表面

由于许多不同原因，如蠕变、氧化、拉伸超负荷等，用于高温设备的部件可能损坏。通过检测损坏部件的断口表面获得关于损坏模式的信息是必要的。为了准确区分蠕变断口与拉伸断口的形态学特征，Mishra (1992) 和 Gokhale, Drury, Mishra (1993) 研究了大量的蠕变和拉伸断口表面。在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及不同的应力水平下，用无氧高导电性铜 (OFHC) 进行了间歇蠕变试验，试验周期介于蠕变寿命的 $10\% \sim 90\%$ 之间。在同样的应力水平下也产生了蠕变断口。蠕变作用导致空洞与裂纹在颗粒边缘发育和生长。这些孔隙的体积分数随时间延长而增加。因此，间歇蠕变试验样品包含数量不等的孔隙，对每个间歇蠕变试验后的样品再进行拉伸试验，以便从已有不同体积分数孔隙（仅由于蠕变产生）的样品得到拉伸

断口表面。对每个断口表面均制备了垂直截面断口轮廓，断口轮廓均已数字化，由这些轮廓数据计算出了轮廓粗糙度参数、分维数和重叠的轮廓分数。很明显，粗糙度和分维数均随孔隙数量的增加而增大。与拉伸断口表面相比，蠕变断口表面更粗糙更扭曲。但是蠕变断口与拉伸断口表面间最重要的不同是断口轮廓重叠的程度。图 13 表示了拉伸和蠕变断口

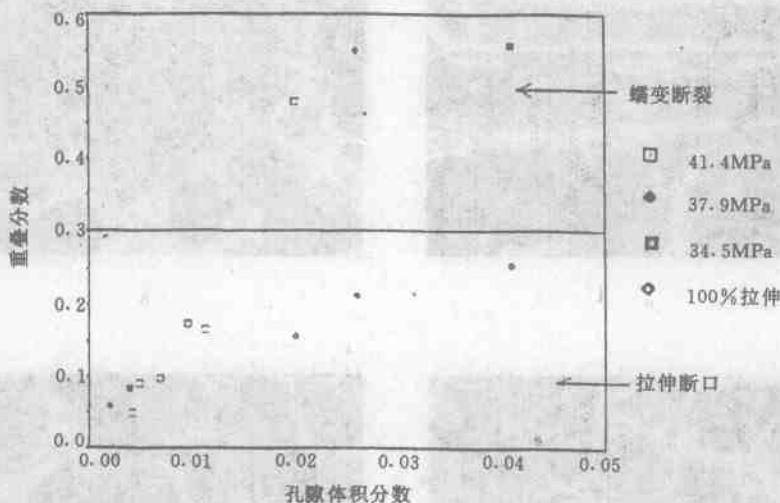


图 13 铜中轮廓重叠分数与孔隙体积分数 V_v 的关系

表面重叠轮廓长度的分数与孔隙体积分数的关系。即使对于孔隙体积分数相同的样品，与拉伸断口表面相比，蠕变断口表面也有明显较多的重叠（高出 2 倍以上），注意到这点是很有意义的。

大量的重叠似乎是蠕变断口表面的区分特征。这种见解对于高温设备中损坏部件的分析是有用的。这一点可从图 14 看出。

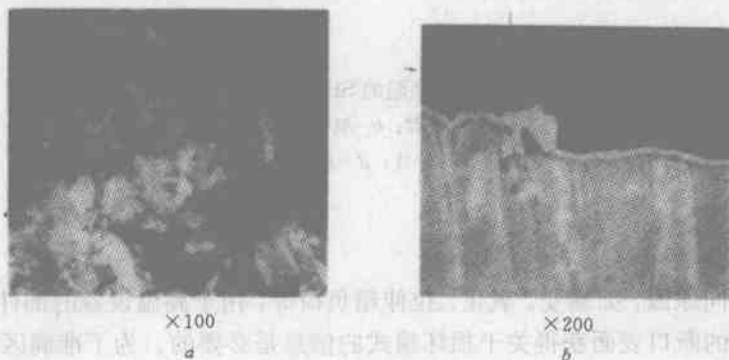


图 14 铜的断口轮廓显微照片

a—蠕变断口 ($\times 100$); b—拉伸断口 ($\times 200$)

结 语

本文提出了体视学在材料研究中的某些实际应用。这些应用表明，即使是简单的数点