



研究生教育“十二五”规划教材

夹杂物干涉机制及其对材料细观损伤的影响机理

郭荣鑫 夏海廷 颜 峰 著



科学出版社

研究生教育“十二五”规划教材

夹杂物干涉机制及其对材料 细观损伤的影响机理

郭荣鑫 夏海廷 颜 峰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书基于 Eshelby 等效夹杂物方法,以多夹杂物间的干涉机制及其对材料细观损伤的衍生和演化的影响为研究对象,通过数值计算、数字全息干涉实验和有限元分析技术,对复合材料的损伤演化问题进行详细阐述。

全书由 6 章构成。第 1 章对夹杂物领域的研究现状进行综述;第 2 章基于 Eshelby 等效夹杂物方法,参考 Moschovidis 方法,编写能用于计算不同类型多夹杂物应力应变场的数值计算程序;第 3 章通过与文献中的计算结果比较,验证本书编写的多夹杂物数值计算程序的合理性和可靠性;第 4 章在不同疲劳应力水平下,对颗粒增强铝基复合材料细观损伤的衍生和演化情况进行细观观测;第 5 章开发数字实时全息测量系统,研究典型构型空洞和裂纹的干涉应变场,与本书的计算结果进行对比分析;第 6 章改进多颗粒随机分布有限元模型,分析颗粒增强复合材料中颗粒的开裂、脱粘、微裂纹萌生演化等细观损伤的衍生和演化机理。

本书可作为材料科学与工程、工程力学等专业的研究生教材,也可供相关专业的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

夹杂物干涉机制及其对材料细观损伤的影响机理 / 郭荣鑫, 夏海廷, 颜峰著. — 北京: 科学出版社, 2019.4

研究生教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-060773-7

I. ①夹… II. ①郭… ②夏… ③颜… III. ①夹杂(金属缺陷)-研究生-教材 ②复合材料-损伤(力学)-研究生-教材 IV. ①TG111.2 ②TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 043355 号

责任编辑: 朱晓颖 陈 琼 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 4 月第一次印刷 印张: 8 3/4

字数: 224 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

材料的细观损伤影响着材料的局部性能，同时对材料的宏观有效性能有着直接影响。细观损伤的衍生机理、演化规律及它们对材料性能的影响是材料细观损伤的研究主题和材料细观模型必须反映的物理内涵。工程实践及科学研究表明，材料的损伤和失效与夹杂物的存在密切相关。夹杂物引起的非均匀性往往使得材料的局部损伤演化更加复杂。其中，材料各类微结构(包括空洞、微裂纹、夹杂、界面失效等)间以及微结构和宏观缺陷之间存在的相互干涉机制，是研究材料的细观损伤及其演化规律、确定材料局部性能时必须要考虑的重要方面，也是当前材料学和力学等领域的前沿课题。

目前，关于夹杂物的理论研究已有许多优秀的论著，但针对多夹杂物应力应变场的实验研究则很有限。与此同时，实验研究的不足也使我们对于理论及数值计算分析结果的认识产生了诸多的局限性和不确定性，从而影响理论的创新和数值计算的发展。为此，作者近年来基于等效夹杂物方法，采用数值计算、数字全息干涉实验和有限元分析技术等手段开展研究工作，对多夹杂物间的干涉机制及其对材料细观损伤的衍生和演化的影响进行研究，本书是作者多年来研究成果的系统总结。

全书共分 6 章，第 1、6 章由颜峰执笔，第 2、3 章由郭荣鑫执笔，第 4、5 章由夏海廷执笔，博士研究生索玉霞、付朝书、刘兴姚协助完成了全书的统稿工作。第 1 章对夹杂物领域的研究现状进行综述；第 2 章基于 Eshelby 等效夹杂物方法，参考 Moschovidis 方法，编写能用于计算不同类型多夹杂物应力应变场的数值计算程序；第 3 章通过与文献中的计算结果比较，验证本书编写的多夹杂物数值计算程序的合理性和可靠性；第 4 章在不同疲劳应力水平下，对颗粒增强铝基复合材料细观损伤的衍生和演化情况进行细观观测；第 5 章开发数字实时全息测量系统，研究典型构型空洞和裂纹的干涉应变场与本书的计算结果进行对比分析；第 6 章改进多颗粒随机分布有限元模型，分析颗粒增强复合材料中颗粒的开裂、脱粘、微裂纹萌生演化等细观损伤的衍生和演化机理。

本书得到了国家自然科学基金和云南省应用基础研究计划重点项目的支持，在此衷心感谢国家自然科学基金委员会和云南省科学技术厅对作者研究工作的长期支持。同时还要感谢在书中被引用的论著的作者，感谢昆明理工大学对本书的支持，感谢作者的研究生在本书编写过程中所给予的帮助。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请同行和读者批评指正。

作 者

2018 年 10 月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	夹杂物研究进展	1
1.2.1	夹杂物对基体力学性能的影响	1
1.2.2	夹杂物理论的发展与应用	2
1.3	颗粒增强金属基复合材料的研究进展	6
1.3.1	颗粒增强金属基复合材料的发展应用	6
1.3.2	颗粒增强金属基复合材料的研究现状	6
1.4	目前研究工作存在的主要不足	16
1.5	本书的主要研究内容	16
第 2 章	等效夹杂物研究方法	18
2.1	Eshelby 解析方法	18
2.1.1	均匀性夹杂物	19
2.1.2	弹性模量与基体弹性模量相同的各向同性椭球夹杂物	20
2.2	Moschovidis 数值方法	23
2.2.1	椭球夹杂物本征应变的多项式描述	24
2.2.2	等效方程和应变场	25
2.3	Eshelby 方法与 Moschovidis 方法的比较	26
2.4	多个非均匀性夹杂物等效方程	26
2.5	本章小结	28
第 3 章	多夹杂物数值计算	29
3.1	多夹杂物数值计算程序	29
3.1.1	主程序基本步骤	29
3.1.2	主程序中的张量处理	29
3.1.3	主程序中的部分变量、过程和函数	30
3.1.4	与计算 D_{ijkl} 及其各阶导数 $D_{ijkl,q}$ 相关的子程序	33
3.2	多夹杂物数值计算程序计算结果分析	33
3.2.1	与球形空洞精确解的比较	33
3.2.2	与单个空洞和两个空洞数值计算结果的比较	34
3.3	多夹杂物间的应力场计算及其相互影响分析	38
3.3.1	孔洞群及裂纹群的局部应力场	39

3.3.2	硬质夹杂物区域的局部应力场	41
3.3.3	不同类型夹杂物间相互作用的影响	45
3.4	本章小结	48
第4章	颗粒增强铝基复合材料细观损伤实验分析	50
4.1	试样制备及材料性能测试	50
4.1.1	试样制备	50
4.1.2	材料的微屈服性能及弹性模量测试	50
4.2	复合材料微结构细观观测	52
4.2.1	拉伸疲劳试验	52
4.2.2	压缩疲劳试验	57
4.3	细观观测结果讨论	61
4.4	本章小结	63
第5章	数字实时全息干涉实验	64
5.1	全息技术发展概要	64
5.2	数字全息技术	65
5.3	数字全息干涉术的基本理论	65
5.3.1	传统全息的二次曝光法的基本原理	65
5.3.2	数字全息干涉术的记录与再现	67
5.4	传统4f系统的改进及数字实时全息测量的实现	69
5.4.1	等效4f系统	70
5.4.2	测量数据处理原理	71
5.4.3	消零级衍射干扰的处理	72
5.5	数字全息干涉实验	74
5.5.1	酒精灯火焰的数字全息再现	74
5.5.2	夹杂物应变场数字实时全息与传统实时全息测量结果比较	77
5.6	数字实时全息测量系统讨论	79
5.7	夹杂物应变场的数字全息测试及其与数值计算结果的比较	80
5.7.1	空洞	81
5.7.2	裂纹	83
5.8	本章小结	85
第6章	有限元损伤分析技术	87
6.1	弹性力学的基本方程和变分原理	87
6.1.1	弹性力学基本方程的矩阵形式	87
6.1.2	虚功原理	91
6.1.3	线弹性力学的变分原理	92
6.2	颗粒增强复合材料有限元模型的建立	92

6.2.1 立方胞体模型	93
6.2.2 多颗粒随机分布胞体模型	94
6.2.3 轴对称胞体模型	95
6.2.4 平面应变胞体模型	96
6.2.5 数值模拟的控制方程	96
6.2.6 模型的边界条件以及网格设置	98
6.3 颗粒增强复合材料的有限元损伤分析	99
6.3.1 对颗粒增强复合材料弹性模量的有限元计算	99
6.3.2 颗粒增强复合材料拉应力状态下的应力分布情况及细观损伤分析	100
6.3.3 有限元计算与实验比较及损伤分析	103
6.3.4 轴对称计算与数字全息干涉实验的比较	105
6.4 本章小结	106
参考文献	107
附录 A 数值计算程序中采用的公式和定义	114
附录 B 球形增强颗粒 RSA 方法的 APDL 程序实现	127
附录 C 多颗粒随机分布胞体模型中颗粒的位置及半径	130

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

夹杂物广泛存在于各类材料中, 它们或是材料在制造、加工过程中产生的缺陷, 或者是为改善材料性能而加入或加工产生的其他相, 如钢材和粉末高温合金中普遍存在的各类氧化物、复合材料中的增强相、双相钢中的马氏体相等。夹杂物对材料的力学性能、电学性能、热物理性能等都有着重要的影响。复合材料中增强相(颗粒、纤维等)的性能、数量、尺寸、形状和分布就与复合材料的宏观性能密切相关。对材料进行复合的根本目的是要把不同材料的优点有机地结合起来, 制备出满足工程需要的新型材料。复合材料也因此成为具备很强可设计性的材料, 并不断朝着结构与功能一体化的方向发展, 以更好地满足不同工业领域的特殊需要。目前, 复合材料在一些重要的工业领域, 如航空航天、汽车、船舶、化工、军事、核能和电子等, 得到了越来越广泛的应用。复合材料已经成为影响这些领域发展水平和发展速度的重要因素。

工程实践及科学研究表明, 材料的细观损伤和失效与夹杂物的存在密切相关, 而且夹杂物引起的非均匀性往往会在复杂的静动态载荷下引起材料局部损伤演化, 其静动态损伤、断裂问题比均匀材料要复杂得多, 这主要表现在这种材料的静动态断裂特性与夹杂物及它们间的相互影响密切相关并随空间位置而改变。对复合材料而言, 要理解不同组分的复合使材料性能得到改善的原因, 就必须研究复合材料组分间的相互作用和载荷传递机理。因此, 对复合材料性能的研究包括局部性能和宏观有效性能两个方面。前者的关键是求取复合材料内部的弹性场, 而后者则包括对复合材料宏观刚度预报和宏观强度预报两个问题。由此可见, 对复合材料性能的研究是一个跨越宏、细、微三个空间尺度的新领域。相比较而言, 对复合材料局部性能的研究是一个更为困难、更加深入、更有意义的问题。可见, 分析夹杂物的影响机制, 研究材料在细观尺度下的微结构损伤演化规律, 包括微空洞的形核、长大, 以及微裂纹的生成、扩展和汇合, 建立材料细观结构与材料变形、损伤及失效间的关联机制, 确定细观层次上的材料破坏控制参量, 最终建立细观结构、内部缺陷与宏观力学性能之间的定量关系。从科学意义上看, 这是为了在更深的层次上研究材料的性能, 更好地解决材料的失效问题, 实现研究方法由宏观向微观的过渡; 从技术上看, 这是由于计算机技术、图像处理技术、实验测试分析技术的发展为细观损伤的数值计算和实验分析提供了更多可行的手段; 从工程上看, 这对于材料的设计和制造工艺的改进, 以及材料综合性能的提高, 同样具有重要的意义。

1.2 夹杂物研究进展

1.2.1 夹杂物对基体力学性能的影响

夹杂物这一称谓由来已久, 一般泛指材料(基体)中存在着的第二相, 而且这些第二相

大都以颗粒状存在,典型的夹杂物颗粒尺寸为 $1\mu\text{m}$ 至数百微米。由于夹杂物的物理性能、力学性能、化学成分等(如强度、硬度、弹性模量、泊松比、热膨胀系数等)与基体材料不同,夹杂物对材料性能有着显著的影响。

钢中的夹杂物是最早受到关注,同时也是研究较多的夹杂物。50 多年前,人们第一次认识到以氧化物为主的非金属夹杂物是高强钢疲劳裂纹的重要起源。这些非金属夹杂物还会在钢材成形时产生裂纹,从而导致成形性和疲劳寿命恶化,或者成为钢材轧制时线状缺陷产生的诱因,极大地影响产品的质量。50 多年来针对钢材中非金属夹杂物的研究工作主要集中在以下方面:①夹杂物的化学组成、形态与分类;②夹杂物的尺寸;③夹杂物的来源;④夹杂物存在的位置;⑤夹杂物的形状。这些研究成果对钢材冶炼起了重要的指导作用。例如,Murakami 等在非金属夹杂物对钢的疲劳性能的影响方面做了大量的工作,提出了夹杂物等效投影面积模型,利用夹杂物参数 $4S$ (S 为夹杂物在垂直于应力轴平面的投影面积)成功地解释了高强钢中非金属夹杂物的一系列疲劳行为。大量的科学研究和工程实践均证明,对具体构件,夹杂物尺寸存在一个临界尺寸,小于该尺寸时,疲劳裂纹将不再从夹杂物处萌生,这个尺寸称为临界夹杂物尺寸。因此不必过分追求夹杂物尺寸的最小化。这为节约生产成本提供了一种途径。在细观研究方面,王习术等就夹杂物的形状和尺寸对疲劳裂纹萌生及扩展影响的原位实验观测表明:超高强度钢中夹杂物几何长轴与外力方向间的夹角决定了裂纹萌生的位置;在界面裂纹向基体扩展的过程中,夹杂物的几何尺寸对裂纹扩展的贡献限定在基体裂纹长度小于夹杂物长轴尺寸。通常认为钢中非金属夹杂物的存在是有害的,主要表现在对钢的强度、延性、韧性、疲劳性能等方面的影响。然而,少数夹杂在一定条件下会改善材料的性能,例如,某些氧化物夹杂(如钛等金属氧化物)对热影响区(heat affected zone, HAZ)晶粒长大有抑制作用,可以简化热处理过程、节省合金元素,有效提高钢铁材料的性能,属于有益夹杂物。谢锡善等采用扫描电镜原位拉伸和原位疲劳直接跟踪观察人工植入夹杂物(Al_2O_3)的粉末高温合金中夹杂物的微观力学行为(特别是裂纹的萌生、扩展以致断裂的过程),同时采用 ANSYS 有限元软件,计算在受力状态下夹杂物及其周围基体的应力应变场分布,进而从宏观力学角度分析有夹杂物时材料的微观力学行为。

合金材料尤其是粉末高温合金材料中的非金属夹杂物问题,也是 20 多年来材料学和冶金学普遍关注的问题。高温合金材料是航空、航天、能源和化工等工业在高温、复杂载荷与环境下应用的关键材料。在原始粉末颗粒边界(prior particle boundary, PPB)问题基本解决后,粉末高温合金发展所遇到的最大障碍是非金属夹杂物的存在。这也是我国粉末高温合金研制所遇到的最困难问题。20 多年来,对夹杂物所进行的研究工作包括夹杂物的鉴别、评价,夹杂物对粉末高温合金宏、微观性能的影响,特别是对低周疲劳性能的影响,减少夹杂物数量、减小夹杂物尺寸的措施以及考虑夹杂物因素的粉末高温合金寿命预测方法等。

1.2.2 夹杂物理论的发展与应用

对夹杂物的开拓性工作是由 Eshelby 完成的,他建立的等效夹杂物方法奠定了细观力学(介观力学)的基础。Eshelby 针对无限大弹性体中本征应变的椭球颗粒给出了椭球内外

弹性场的一般解,并利用应力等效的方法(后来发展成为等效夹杂物理论)得到了非均匀椭圆夹杂物的内外弹性场。Hershey 和 Kröner 先后提出自洽方法来研究多晶体材料的弹性能。自洽方法以 Eshelby 的关于无限大弹性体中夹杂物问题的解为基础,原则上适用于无限大的多晶体。他们把单晶颗粒看作嵌入具有多晶体宏观力学性能的无限大均匀介质中的一个夹杂物,然后利用 Eshelby 等效夹杂物方法建立了单晶力学性能与多晶体宏观力学性能间的隐性关系。Hill 利用自洽方法证明了含球形夹杂物复合材料的有效体积模量和剪切模量在 Hashin 和 Shtrikman 基于变分原理推导的任意形状晶体的弹性模量的上下限之间。Budiansky 根据 Eshelby 等效夹杂物方法导出了含球形夹杂物多相复合材料的有效体积模量、剪切模量和泊松比之间的三个耦合方程,并成功预测了多相复合材料的等效弹性模量。Eshelby 等效夹杂物方法在夹杂物含量较高时误差偏大,而自洽方法在夹杂物弹性常数与基体弹性常数相差较大及夹杂物含量较高时,对复合材料有效弹性常数的预测结果会背离基本常识,因此 Kerner 在 Eshelby 等效夹杂物方法和自洽方法的基础上提出了广义自洽模型。该模型由夹杂物、基体壳和有效介质构成。其中,夹杂物的体积与基体壳边界所围成的体积之比等于复合材料中夹杂物的体积分数。与自洽模型相比,就颗粒增强复合材料而言,广义自洽模型更为合理。Mori 和 Tanaka 利用体积分对內应力进行宏观平均,提出了著名的 Tanaka-Mori 定理(也称 Tanaka-Mori 方法),这是计算微裂纹体有效性质的两种方法之一。它假设每一个微裂纹位于无损基体中,微裂纹的相互作用效应则通过对远场应力的修正反映出来,因此,这种方法也称为有效场法。另一种计算微裂纹体有效性质的方法是以自洽方法为代表的有效介质法,它假设每一个微裂纹位于一个区别于无损基体的有效介质中,而远场所施加的是实际应力。杨卫则将等效夹杂物方法推广到任意夹杂形状的多晶体滑错体,提出了均值自洽理论,通过网栅试件显微实时加载,定量观测了多晶滑错体大变形下晶界的面内和离面滑错特征,构筑了自洽有限元。Zheng 等人提出了一种考虑复合材料中夹杂相互作用的新方法——相互作用直推(the interaction direct derivation method, IDD)法。该方法与 Tanaka-Mori 方法一样简便,但精度更高。

综上所述,材料微结构(空洞、微裂纹、夹杂、局部化带、界面、位错)的形核机理和演化规律决定着材料的局部性能,同时对材料的宏观有效性能也有着直接的影响。因此,各类微结构间的相互影响机制以及它们和宏观缺陷之间都存在着的相互作用,是研究材料的细观损伤及其演化规律、确定材料局部性能时必须要考虑的重要方面。Sternberg 和 Sadowsky 曾就无限大体中两个球形空洞的情形给出了精确解。对于其他的夹杂物问题则目前还没有精确解。1975 年, Moschovidis 将等效夹杂物方法用于单个或两个夹杂物(球体或椭球体)的数值计算。Moschovidis 主要计算了在均匀外载荷作用下无限大各向同性体中的单个或两个球体和椭球体夹杂物内外部的应力应变场。另外,上述各种方法给出的都是近似解,而且必须利用数值方法通过计算机才能求出。1981 年,张宏图 and 折晓黎利用夹杂理论导出了一般形状的单个夹杂所产生的拘束应力场(本征应力场),并计算了在单向载荷作用下椭圆形夹杂的端部应力场,将夹杂理论应用于宏观断裂研究中,也讨论了马氏体相变和形变孪晶所伴随形成的微观裂纹的情形。这是国内研究夹杂物方法较早的理论成果。王锐在 1990 年求解了一个圆形夹杂对裂纹尖端应力场的影响,并以此计算了夹杂物对裂纹应力强度因子的影响,讨论了裂纹尖端微米量级的夹杂物因应力场诱发的相变而对陶瓷产生

的相变增韧。其研究成果对于研究材料的细观损伤是有一定实际意义的,细观观测发现裂纹的扩展与其前方相邻的损伤带有强烈的相互作用。因此,夹杂物之间的相互作用也就逐渐受到人们的重视,成为研究的热点之一。著名学者 Chudnovsky、Kachanov、Horii 等研究了一个主裂纹和若干微裂纹之间的相互作用以及异性夹杂物之间的相互作用。结果显示,位于裂尖过程带中的微裂纹群在一定条件下(微裂纹与主裂纹的相对位置以及外载荷的方向)会对主裂纹的应力场产生重要的影响:屏蔽效应(shielding effect)或增强效应(amplification effect)。这种屏蔽效应或增强效应就是微裂纹对材料的增韧或劣化。因此,裂纹的存在并不总是引起材料的损伤。李佳音研究了大量微裂纹的相互作用,针对微裂纹群提出了一种近似计算微裂纹相互作用的方法,并将其应用于拉伸和压缩情况下微裂纹体的尺寸效应分析以及有效弹性模量的计算。这种方法也是基于 Eshelby 等效夹杂物概念提出的,并利用细观力学中有效介质的概念考虑了有限尺寸区域外的大量微裂纹对待求的有限尺寸区域内微裂纹的影响。但该方法主要针对的是平面情况下的裂纹构型和裂纹密度。1989 年, Gong 和 Horii 基于 Horii 的虚拟力法,利用复变函数推导出了主裂纹及其前端若干微裂纹的应力强度因子近似表达式。赵爱红和虞吉林应用 Eshelby-Tanaka-Mori 方法对含三相正交夹杂的正交异性复合材料建立了等效弹性模量与夹杂体积分数、方位和形状的解析显式。Tszeng 提出了一种无量纲夹杂物方法,该方法的本构关系和对应变的分类与 Eshelby 等效夹杂物方法类似,但在增强相应力方程计算式中引入了增强相体积分数,对于增强相外部各点的应力仍采用 Eshelby 等效夹杂物方法进行计算。2000 年, Tszeng 运用这种无量纲夹杂物方法计算了弹性模量大于基体材料的单个增强相(硬质夹杂物)的界面应力,发现即使在基体材料发生弹塑性变形的情况下,在增强相两极和赤道界面区域的材料也处于弹性变形状态。当然随着基体变形的增加,处于弹性变形界面区域的尺寸也会逐渐减小。另外,无论基体的变形情况如何,最大的界面法向应力都与 von Mises 等效应力近似呈线性关系。Tszeng 针对不同体积分数的碳化硅(SiC)颗粒增强 2124 铝基复合材料进行了计算分析,其计算结果显示最大的 von Mises 等效应力出现在增强相两极与赤道之间,具体位置则与增强相几何尺寸有关。Li 等研究了材料的形态特征和基体材料特性对断裂与界面脱粘的影响,发现一些材料的损伤主要以颗粒脱粘进一步断裂的形式产生,局部损伤大幅减少了材料的延展性,缩短了其疲劳寿命。上述研究的模拟结果表明,增强颗粒与基体的界面不仅是主要的细观损伤源,而且界面结合情况对复合材料的宏观性能有很大影响。1997 年, Roatta 和 Bolmaro 假设材料符合 Prandtl-Reuss 塑性应变律,参考 Eshelby 等效夹杂物方法,建立了用于分析椭圆增强颗粒在塑性应变初期的弹塑性应变场,以 SiC 颗粒增强 2124 铝基复合材料作为高弹性模量比(夹杂物/基体)的实例进行了计算分析,并与有限元模拟的结果进行了比较。2003 年, Shodja 等基于 Eshelby 等效夹杂物方法和 Hill 理论,提出了任意方位裂纹在相互影响的情况下应力强度因子的计算式。该方法可用于计算在非均匀载荷作用下, I、II、III 及混合型裂纹的应力强度因子。Xiao 等也基于 Eshelby 等效夹杂物方法计算了各向同性材料中夹杂物的应力强度因子,讨论了应力强度因子随夹杂物与基体间弹性模量比的变化情况。2006 年, Benedikt 等在考虑夹杂物间相互干涉的情况下,采用 Eshelby 等效夹杂物方法计算了位于无限大各向同性基体中的多个球形夹杂物的三维弹性应力场,采用泰勒(Taylor)级数展开式来近似求解 Eshelby 的等效方程,并计算了球心

连线相互垂直的5个和随机分布的40个硬质球形夹杂物($E_f/E_m=16$)两种情况下夹杂物内部沿半径方向的应力分布情况。Nakasone 等考虑到 Eshelby 等效夹杂物方法在计算上需要进行难度较大的数学表述,计算烦琐,而且无法解决球形和椭球形以外的其他形状夹杂物。因此,他们基于 Eshelby 等效夹杂物思路,位移函数仍然用格林函数表示,但本征应变的系数却用极坐标下的 I 积分来表示,从而建立了新的可以计算三角形、矩形等形状夹杂物弹性应力场的数值计算方法。这种方法虽然数学处理简便,计算过程较快,但主要用于单个夹杂物的二维问题分析,对于多夹杂物干涉下的弹性应力场计算则显得不足。闫相桥将适用于单一裂纹的 Bueckner 原理扩充到含有多裂纹的一般体系,将原问题分解为远处承受载荷不含裂纹的均匀问题和远处不承受载荷但在裂纹面上或孔洞表面上承受面力的多裂纹多空洞问题,提出了平面弹性介质中裂纹间及空洞与微裂纹相互作用的数值计算方法,并先后分析了多空洞多裂纹相互作用、有限长主裂纹与微裂纹的相互作用、主裂纹与微裂纹的相互作用。此外,闫相桥还采用边界元计算了无限大板椭圆孔的分支裂纹问题。

纵观现有的夹杂物局部应力应变场研究成果,可以发现大量的研究工作是针对有限数量的夹杂物(多为球形),考虑夹杂物间相互干涉的夹杂物局部应力应变场的计算,大多采用有限元和边界元等方法完成。在数值计算方面,Eshelby 等效夹杂物方法是目前最有影响力的、受到普遍认同的细观分析方法,夹杂物间的相互干涉对夹杂物应力应变场的影响是目前材料细观损伤研究工作中必须考虑的重要因素。

在实验研究方面,张讯和李金瀛曾对垂直于外加应力且相互平行的三个裂纹的屏蔽效应进行过光弹实验。廖敏和杨庆雄采用变柔度方法来计算多裂纹间的相互影响,并在实验上针对 LY12CZ 制作的双孔疲劳试件,用应变片测量了孔端应变随加载循环的变化情况;邹化民等分别用常规正焦会聚束电子衍射(convergent-beam electron diffraction, CBED)和大角度 CBED 技术测试了复合材料界面残余应变场。施忠良等则通过 X 射线衍射、场发射扫描电镜和透射电镜观察并研究了 SiC 颗粒增强铝基复合材料界面组织组成、特征及其反应产物的微观形貌。刘俊友等用 X 射线衍射和扫描电镜研究了界面反应与界面产物对 SiC 颗粒增强铝基复合材料性能的影响。洪宝宁和徐涛采用由显微图像序列计算细观变形场方法直接对夹杂物附近萌生疲劳裂纹过程进行细观(小于 $0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}$)实验观察,研究萌生疲劳裂纹过程中的循环塑性应变场及其随循环次数变化的规律。姜铃珍等用反射式激光全息干涉测量了 I 型裂纹尖端的应变场,并结合断裂力学理论在定量分析方面进行了有益的尝试。2006 年,汤庆辉和叶彬应用光弹性方法对单、双侧多裂纹应力强度因子进行了测试和比较分析,确定多裂纹情况的应力强度因子,旨在为复杂多裂纹结构的安全评定提供必要的依据。Fitzpatrick 等利用中子衍射来测量 SiC 颗粒增强铝基复合材料中疲劳裂纹尖端的应变场。Nugent 等联合应用光弹性技术和示踪技术从实验上测量了延性材料中单个弹性夹杂物周围的应力应变场,并与 Eshelby 的计算结果进行了比较。Baruchel 等用 X 射线断层摄影术实时研究了 SiC 颗粒增强铝基复合材料的细观损伤演化。

从目前国内外就多夹杂物开展的实验研究工作来看,研究内容主要针对单个夹杂物(裂纹居多)的应力应变场,实验方法也多种多样,其中,洪宝宁和徐涛、Baruchel 等的工作使用的是目前最先进的细观观测手段,对实验设备和实验技术的要求较高,而

且后者的精度偏低且费用很高。相比较而言,以全息、光弹性和散斑为代表的光测力学方法仍是目前最方便、快捷、节约、应用最多、能较好满足多夹杂物干涉测量要求的实验方法。

1.3 颗粒增强金属基复合材料的研究进展

1.3.1 颗粒增强金属基复合材料的发展应用

随着科技的发展,现代科学技术对材料有了更高的要求,不仅要求材料具有良好的综合性能,如低密度、高强度、高刚度、高韧性、高耐磨性以及抗疲劳性等,还要求材料能在极端环境(高温、高压、高真空、强腐蚀和辐照等)中服役。传统单一功能属性的材料已很难满足工业需求,因此需要将具有不同性能的材料复合在一起形成多相材料,使之具有各组分材料的特点,以满足高新技术发展的需求。

颗粒增强金属基复合材料(particulate reinforced metal matrix composites, PRMMCs)由陶瓷等增强体与金属基体复合而成,它既具备基体材料的良好韧性又表现出陶瓷相高强度、高刚度的优点,同时体现出较高的比强度、比刚度以及热稳定性、耐磨性能等。PRMMCs作为一种高性能材料,最初是为军事系统服务的,自20世纪60、70年代一经出现,就引起了世界各国研究人员的广泛关注。经过五十多年的发展,在PRMMCs研究开发和工程应用方面人们均取得了重要突破,将其广泛应用于航空航天、电子电器、汽车以及先进武器系统等工业领域。此外,PRMMCs制备工艺相对简单,具备很强的可设计性,欧美等发达国家已经对该类高性能材料进行了规模化工业生产,并把此类材料的应用和开发列为21世纪新材料研究的重点方向。

随着PRMMCs在工程结构及复杂工作环境领域的应用,其基本力学性能、疲劳断裂性能及动态冲击力学性能的研究越来越得到研究工作者的青睐。增强相的加入使得复合材料强化和断裂损伤机制较基体材料复杂,影响因素众多,大致分为以下几类。

(1)基体本身,对基体进行二次加工,使材料微结构进行二次改造从而提高基体的强度等,如基体时效处理、晶粒细化等。

(2)增强颗粒含量、尺寸、形状等。

(3)基体和增强相的界面处理,通过物理、化学工艺使基体和第二相在界面处粘结强度提高,从而改善其物理、机械性能,如颗粒表面清洗、化学镀铜等工艺。

(4)制备工艺。由于PRMMCs的制备方法多样,不同制备工艺对材料的最终形成机理及强度的形成均有较大差异。另外,制备工艺过程中的过程参数对复合材料性能的影响也较为突出,如热压烧结工艺的球磨工艺、烧结时间等。

1.3.2 颗粒增强金属基复合材料的研究现状

1. 颗粒增强金属基复合材料的制备

颗粒增强金属基复合材料的概念提出后,如何开发出一种简单经济、微观组织结构分

布合理、力学性能优越的制备工艺一直是材料科研工作者致力于攻克的难题之一，从基体和增强相的选择到工艺参数的确定和改进等都需要经过大量的实验验证、理论创新以及持续改进。从国内外相关文献来看，颗粒增强金属基复合材料的制备工艺主要有粉末冶金、摩擦搅拌焊接法、喷射沉积、挤压铸造。现对几种制备工艺的发展和特点进行简要介绍。

1) 粉末冶金法

粉末冶金是以金属粉末为原料，经过成形和烧结，制造金属材料、复合材料以及各种类型制品的材料制备技术，其基本工艺是：制取原材料粉末，生坯制作，特定温度下烧结成型，使最终材料或制品具有所需的性能，具体步骤见图 1-1。

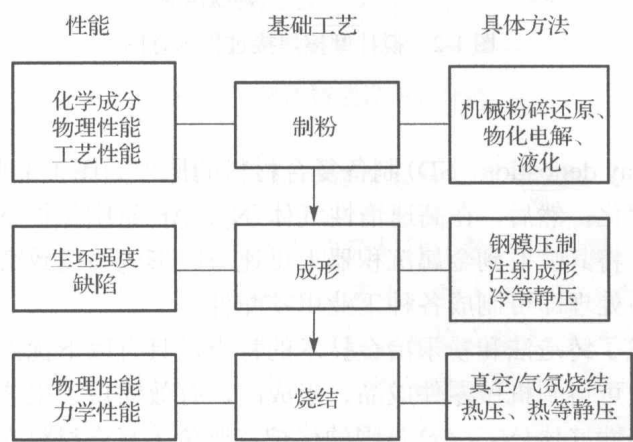


图 1-1 粉末冶金基本工艺

2) 摩擦搅拌焊接法

摩擦搅拌焊接法(friction stir processing, FSP)源于摩擦搅拌焊接工艺，是一种新型材料加工制备方法。一般的，制备金属基复合材料的 FSP 工艺又可以分为直接法和间接法。直接法是将增强颗粒预先置于金属板材内进行摩擦搅拌焊接，直接将颗粒均匀地搅进基体当中，并达到致密化，最终形成复合材料；间接法是先将增强相颗粒与基体粉末混合，然后冷压或热压烧结成块状生坯，最后对生坯进行摩擦搅拌焊接，使颗粒分布均匀、致密，形成复合材料。

FSP 工艺过程主要有添加增强相、封口和摩擦搅拌三个步骤，如图 1-2 所示。首先将金属板材开槽，槽的大小视样品大小而定，随后将增强颗粒添加到槽中，然后将金属板材固定在工作台上并用平头搅拌头封口，再用锥形搅拌头进行搅拌摩擦加工。高速旋转的搅拌头在轴向压力的作用下钻入板材。高速旋转的搅拌头在库仑摩擦和剪切摩擦作用下产生大量的热量，这些热量将导致搅拌头附近的金属迅速升温并且很快软化，在旋转作用下材料发生大范围的迁移。此外，搅拌头在高速旋转的同时将沿着槽向前走刀，在走刀的过程中增强材料被向前和旋转的推动力分散在基体材料附近，部分被包裹，这样搅拌摩擦加工后就制备了增强复合材料。

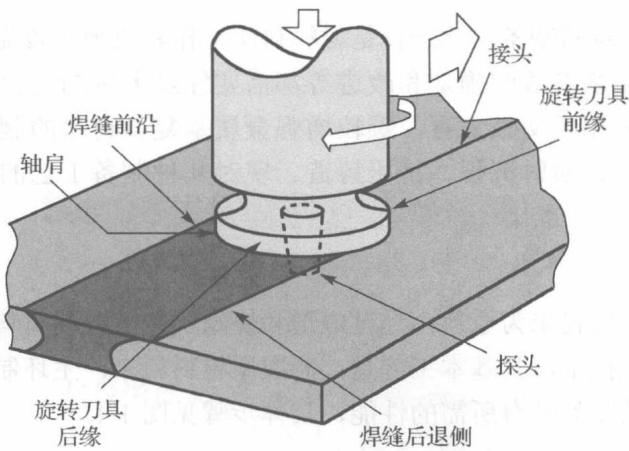


图 1-2 搅拌摩擦焊接过程示意图

3) 喷射沉积法

喷射沉积法 (spray deposition, SD) 制备复合材料的原理如图 1-3 所示。首先，在真空熔炼室中将金属基体熔化；然后，在高速惰性气体 (N_2 、 Ar) 氛围保护下，将金属液流雾化成弥散的液态雾滴，并将其喷射到金属沉积器上迅速凝固形成高度致密的预成形复合材料毛坯；再经过机加工后处理即可制成各种工业用零配件。

喷射沉积法集成了铸造法和粉末冶金技术的特点，具有以下优点：喷射成形对原材料只须进行一次加工便可得到机械零件成品、半成品，有效缩短了工艺流程，大大降低了生产成本；由于受到惰性气体 (N_2 、 Ar) 氛围的保护，避免了复合材料在混粉、烧结、挤压等过程中的氧化和掺杂等问题；喷射成形技术通用性强、产品多样性较广，在某些领域，可代替传统的粉末冶金技术。

4) 挤压铸造法

挤压铸造法 (squeeze casting method, SCM) 是指在压力的作用下，将液态的金属液体浸入预制增强体中，从而制备复合材料的一种工艺。图 1-4 演示了挤压铸造法制备复合材料的基本过程。其工艺流程主要有两步：预制增强体块和复合材料的挤压铸造。首先，采用注入模、干压或粉浆浇铸等方法制备增强体预制块，然后将其置于压铸模具中；其次，通过加热升温使金属基体熔化成液态并浇入模具中，再通过压力机施加压力使液态金属渗入到预制块中，待其凝固即可制成复合材料。这种方法制备的复合材料会有一定量的气体残留，但总体质量保持较好，工艺稳定性好。

挤压铸造法的设备复杂程度低，操作方便，制备过程周期短，成本低，适宜大规模生产。另外，挤压铸造工艺对增强体和基体润湿性能要求较低，具备生产大块体和高颗粒含量复合材料的能力。

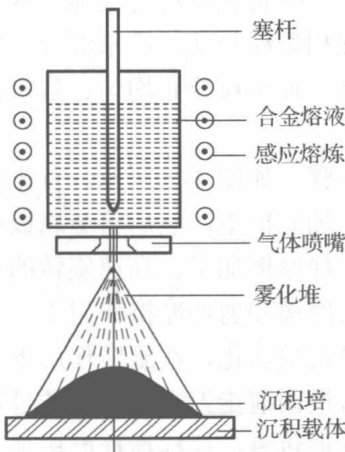


图 1-3 喷射成形过程示意图

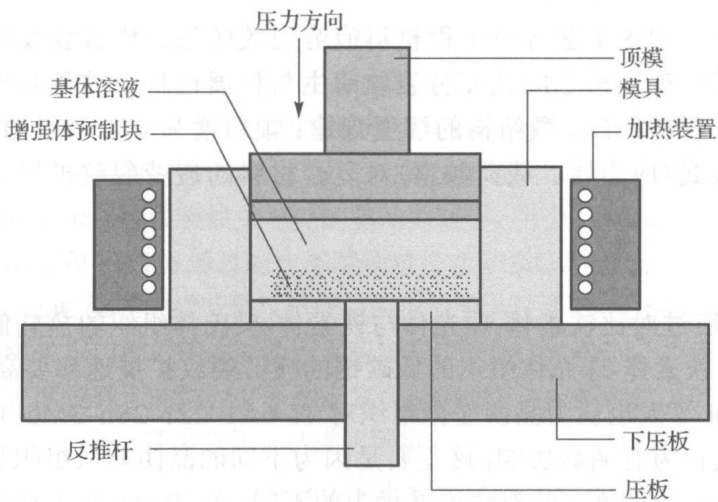


图 1-4 挤压铸造设备示意图

2. 宏观尺度下颗粒增强金属基复合材料疲劳裂纹扩展研究

对于工程实际问题，作用在受力构件上的荷载往往随时间呈循环变化，理论上将这种在交变荷载作用下产生的失效破坏，称为疲劳破坏。对于疲劳破坏而言，最开始采用无限寿命设计和安全寿命设计进行选材及构配件设计。无限寿命设计作为最早发展起来的设计方法，它要求受力构件在无限长的使用期内，不发生疲劳破坏失效。随后安全寿命设计方法逐渐发展起来，这种设计方法认为在规定寿命使用期内，不允许构件出现疲劳裂纹。这种设计方法的依据是材料的 $S-N$ 曲线，但 $S-N$ 曲线测试对试样的表面粗糙度要求十分严格，不允许出现宏观缺陷，但在材料和构件的生产加工过程中，或多或少地都会引入或残留各种工艺缺陷和加工痕迹，这种工艺缺陷和加工痕迹可以统称为裂纹。因此，用传统的设计方法来评价带裂纹构件是不可靠的，且存在诸多隐患。

在现代工业活动中，真实的结构往往都存在裂纹等先天缺陷，对于此类含裂纹的构件，其发生破坏时的服役荷载一般远低于传统设计方法确定的容许强度。特别的，实际工程结构的服役时间长、所处环境较复杂，更容易产生严重变形、萌生裂纹，从而导致结构快速失效。据不完全统计，超过 80% 的工程结构的断裂失效因疲劳而起，同时因疲劳引起的工程事故不胜枚举，每年造成的经济损失超过 1000 亿美元。然而，这其中的大部分损失可以通过采用合理的设计方法来避免。

颗粒增强金属基复合材料在制备过程中难免引入空洞、颗粒分布不均匀、界面粘接不牢等工艺缺陷。随着复合材料在工业生产中应用越来越广，不可避免地受到循环载荷的长时间作用，所以疲劳性能是复合材料设计中必须要考虑的一个非常重要的性能指标。因此，系统的开展颗粒增强复合材料的疲劳性能的相关研究是一个刻不容缓的课题。1990 年，Ritchie 等人对颗粒增强复合材料的疲劳行为进行了首次报道；几乎在同时期，我国的李昆等人开启了颗粒增强复合材料的疲劳裂纹扩展行为的研究。自此，不同体系下的 PRMMCs 的疲劳裂纹扩展行为的研究成果被陆续报道。

在复合材料疲劳行为的相关研究课题中，最热门的研究内容包括：材料晶粒、颗粒

含量、颗粒尺寸、制备工艺等对工程材料疲劳裂纹萌生、疲劳裂纹扩展行为和疲劳寿命的影响；材料微观结构之间在疲劳裂纹萌生与扩展过程中的相互作用机制，材料在循环载荷作用下材料组织、微结构的演变规律；颗粒增强复合材料的高低周疲劳寿命；不同疲劳加载方式(应力比、载荷频率)对复合材料的疲劳裂纹扩展行为的影响。现逐一介绍如下。

1) 晶粒尺寸

Guan 等人通过对比铁素体-珠光体与铁素体-贝氏体组织的热轧低碳钢的疲劳裂纹扩展行为，得出铁素体-珠光体组织的低碳钢的疲劳裂纹扩展速率要高于铁素体-贝氏体组织；同时，Shi 等人也认为晶团显微组织对 Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb 钛铝合金的疲劳裂纹扩展行为有明显影响，这主要是因为不同的晶团显微组织导致裂纹扩展路径偏折程度不同，从而导致疲劳裂纹扩展行为的不同；而 Wang 等人通过研究不同微观结构的钛铝合金疲劳裂纹扩展以及裂纹闭合行为，最终发现导致裂纹扩展速率变化的内在影响机制是塑性和粗糙度诱发的裂纹闭合效应以及裂纹扩展路径的偏折。另外，Du 等人通过研究 700℃、800℃、900℃ 下不同晶粒尺寸 IN792 高温合金的疲劳行为发现，晶粒尺寸对高温合金的疲劳寿命有明显的影响，但随着温度的升高，这种影响显著降低；Järvenpää 等人也认为晶粒尺寸对 301LN 型不锈钢的疲劳极限和疲劳寿命有较大影响，且认为通过晶粒细化可以改善 301 型不锈钢的疲劳抗力。这说明基体材料的晶粒尺寸等微观结构对材料的疲劳行为的影响是明显的，晶粒细化可以提高金属材料的疲劳寿命和疲劳抗力。

2) 颗粒含量

增强颗粒的加入使复合材料的微观结构变得异常复杂，这终将导致复合材料的疲劳性能和基体的疲劳性能差异显著，这给材料研究者带来了较大的挑战，同时也是一个机遇，引起了大批国内外研究者的兴趣。增强体的加入，一方面使得基体的强度、弹性模量得以提高；另一方面，颗粒的存在限制了基体的塑性变形。因此，复合材料疲劳裂纹扩展机制较基体材料要更加复杂多变。

Sugimura 和 Wang 等人分别研究了颗粒体积分数对 SiC_p/Al 和 $\text{TiB}_2/\text{A356}$ 颗粒增强复合材料的影响，得到的相关结论是：复合材料的疲劳裂纹扩展速率比基体快，另外随颗粒含量的增多而加快。这主要是因为循环载荷作用下，增强颗粒的断裂导致裂纹扩展抗力降低。Llorca 和 Yang 等人发现用粉末冶金法制备的 $\text{SiC}_p/2618\text{Al}$ 合金和 TiB_2/Fe 颗粒增强复合材料，由于颗粒的加入提高了裂纹扩展门槛值，在近门槛值区，裂纹扩展速率要慢于基体材料；但随着应力强度因子的增加，裂纹扩展速率要大于基体材料，且最终的断裂韧度要低于基体材料。李微和 Gasem 等人分别对颗粒增强复合材料 $\text{SiC}_p/\text{Al-7Si}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/6061\text{Al}$ 进行相关研究，得出的结论是：随着颗粒含量的增加，疲劳裂纹扩展速率减小。颗粒的加入使裂纹扩展路径变得更加曲折，这一方面降低了裂纹尖端的扩展驱动力；另一方面增加了纹面的粗糙度，由粗糙度引起的裂纹闭合效应降低了裂纹扩展驱动力，从而减小了裂纹扩展速率。

3) 颗粒尺寸

从相关研究成果来看，复合材料的疲劳行为和增强体的尺寸大小密不可分。颗粒尺寸