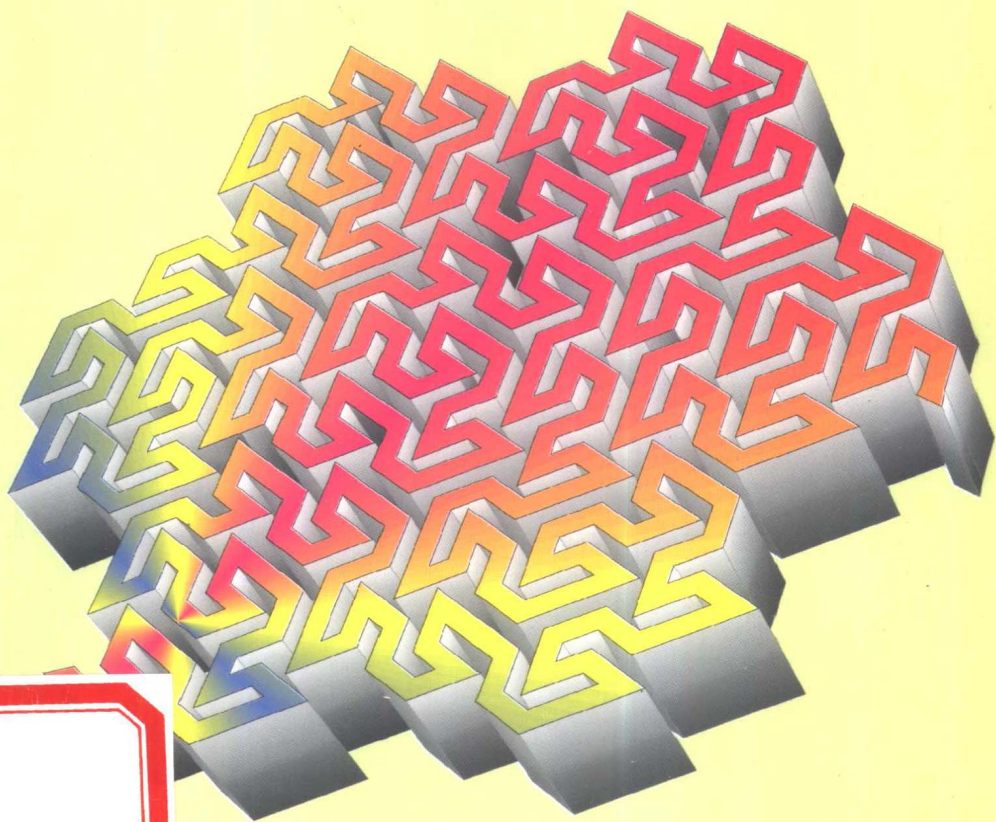


功能梯度材料基础 —— 制备及热机械行为

[美] S.Suresh 和 [瑞士] A.Mortensen 著

李守新 等译 王中光 校



國防工業出版社

中国人民解放军总装备部专项资金资助出版

功能梯度材料基础 ——制备及热机械行为

[美]S. Suresh 和[瑞士]A. Mortensen 著

李守新 等译

王中光 校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记号:图字:军-2000-003号

图书在版编目(CIP)数据

功能梯度材料基础:制备及热机械行为/(美)苏雷希(Surech, S.)著;李守新等译. —北京:国防工业出版社, 2000.8

书名原文: Fundamentals of Functionally Graded Materials

ISBN 7-118-02315-9

I. 功… II. ①苏… ②李… III. 复合材料
IV. TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第26004号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 5% 143千字

2000年8月第1版 2000年8月北京第1次印刷

印数:1-1500册 定价:12.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

译 者 的 话

由美国麻省理工学院 Suresh 教授和瑞士洛桑联邦技术学院 Mortensen 教授合著的《功能梯度材料基础——制备及热机械行为》1998 年由英国材料学会出版社出版。

本书系统地总结了功能梯度材料的制备方法及其热机械响应,对材料和机械工程方面的广大研究人员、工程师和学生都有开拓视野、活跃思维的巨大推动作用。

在国防科技翻译图书出版基金的资助下,我们将本书译成中文,由国防工业出版社出版。

本书由中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室的科技人员翻译。本书序、第一章及第二章 2.1 节由李小武翻译,第二章 2.2 节由张哲峰翻译,第二章 2.3~2.4 节由张广平翻译,第三章由李守新翻译。由王中光校对了全文,并由赵忠输入计算机磁盘。

由于译者水平有限,而本书内容涵盖很宽,不妥甚至错误之处难以避免,敬请广大读者多加指正。

最后,感谢本书作者和原出版社给予我们翻译和出版权,感谢国防工业出版社的大力支持,使本书能及时问世。

译 者

2000 年 3 月

序

在过去的十年中,功能梯度材料的科学与技术成为备受关注的焦点。从一系列重要的国际功能梯度材料专题会议,以及由美国和其它地方主要的材料学会举办的年会和专题讨论会的数量增多可以看出,无论是在工业上还是在学术上,对这类材料研究的迅猛发展是显而易见的。这些会议的论文集,以及其它一些编辑成的研究合订本和范围广泛的评论性文章构成了总结该学科目前发展动态的主要原始资料,并为该领域里的有关活动提供了重要的参考资料。然而,由于构成梯度材料这个领域的专题和基础概念的范围非常广泛,所以与此相关的这些原始资料有必要简化。

上述因素激发了《国际材料评论》编委会委托编写一份详细的评论性文章来讨论一些重要的基本问题,这些问题至少包括功能梯度材料的制备基础(第一部分)和热机械响应(第二部分)。我们曾有幸获得撰写这些文章的特权,这些文章于1995年和1997年分别发表在该期刊的第40(6)和42(3)卷上。本研究专著是对这两篇文章进行修改、扩充、更新和综合后的版本,并收集了这两篇文章出版之后发表在国际期刊和会议论文集上的一些新进展,同时又设法保持了原始评论性文章的整体结构、风格和要点。需要特别指出的是,我们始终把重点放在梯度金属和金属/陶瓷复合材料上,尽量在一个合理的范围内保持论题所覆盖的形式和深度。

本专著在论述功能梯度材料的基本概念和现象时,尽可能地与相关领域,如制备冶金学、复合材料合成法、复合材料力学与微观力学和断裂力学相联系。虽然本书没有列出详尽的所有相关参考文献的目录,但是,我们有目的地充分收集了对一般原始资料所作的引用,其中包括主要的会议论文集,从而为读者进一步查找某

个专题或材料提供途径。由于我们论述的重点是基本概念,因此对功能梯度材料的实际应用讨论得很少。另外,因为我们希望本书具有充分的清晰性,而功能梯度材料的设计方法学仍处于发展阶段,因此本专著中没有涉及该方面的内容,所以我们没有把功能梯度材料的设计作为一个主要章节包括进去。这种设计必然与构件的特殊几何尺寸和选择不同微观结构、成分和性能梯度的功能性性质紧密相关。尽管存在这些限制,本书尽可能地指出了基础原理在实际情况中的应用。在本书的一般参考文献中,可以找到从本书的许多概念中引伸出的与工业相关的生产过程和设计方法的更详尽的描述。

我们感谢英国材料学会和美国国际材料学会,它们促使这一评论性文章作为一部独立的研究专著,以一种合理的价格呈现给广大的研究人员、工程师和学生。我们对《国际材料评论》的 ASM 国际编委会,特别是对鼓励本专著出版的编委会主席 Norman Stoloff 教授表示感谢。我们还要感谢美国海军研究机构、美国能源部、美国国家科学基金委员会、美国先进国防研究项目机构和瑞士国家科学基金委员会,他们多年来对我们在各自实验室中在功能梯度材料的广阔领域里所进行的研究活动给予了支持。我们还要特别感谢与我们曾经合作过的同事,我们曾在这一学科上同他们进行过有益的讨论,或者从他们那里获得本书的插图。他们是 N. Cherradi, J. D. Embury, M. Finot, A. E. Giannakopoulos, B. Ilschner, O. Kesler, O. Kolednik, Y. Matsuzaki, S. Sampath, C. F. Shih, R. Watanabe 和 Y. Z. Yang。我们还要感谢在这本手稿的准备过程中我们的家庭所给予的支持。

S. Suresh 和 A. Mortensen

于美国马萨诸塞州剑桥和瑞士洛桑

1998 年 2 月

内 容 简 介

功能梯度材料的特性是在一个构件中引入显微组织与成分的逐渐变化,以使其满足在该部件中不同位置上不同的性能要求,进而使该部件整体上达到最佳效果。本专著是由作者们发表在《国际材料评论》上的两篇综述经过修改、扩充、更新及集成而成的。重点放在梯度金属和金属/陶瓷复合材料的制备及热机械响应的基础方面,试图保持内容的适当深度、论题的合理广度,包括了冶金制备、复合合成,复合材料的力学和微观力学,以及断裂力学。同时,也适当指出了将基本原理应用到实际情况中的例子。

本书的作者是本领域的著名学者,他们系统的总结与评述会使本领域的科技工作者获益非浅。同时本书的基本思想是完全可以应用到非常广泛的材料范围中,因为实际材料显微组织与成分很难达到均匀,存在梯度几乎是不可避免的,因而本书对于材料、机械、力学等领域的科技工作者、大学生和研究生都有很好的开阔视野、活跃思维的作用。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 功能梯度材料:基本原理和定义	1
1.2 历史发展过程	3
1.3 本专著的结构和范围	6
参考文献	7
第二章 制备	11
2.1 一般原理	11
2.1.1 制备类型	11
2.1.2 特征时间尺度	13
2.2 功能梯度材料的构造法制备	15
2.2.1 粉末致密化制备	15
2.2.2 涂层制备工艺	37
2.2.3 层合制备工艺	47
2.2.4 形变/马氏体相变	47
2.3 基于传输的功能梯度材料制备方法	48
2.3.1 质量传输制备	48
2.3.2 热过程	53
2.3.3 沉降和离心分离	55
2.3.4 浸渗,宏观偏析和 Darcy 离析流动过程	60
2.4 小结	69
参考文献	71
第三章 热机械响应	89
3.1 金属-陶瓷复合材料的有效性质的确定	91
3.1.1 混合律近似	91
3.1.2 修正的混合律近似	92

3.1.3 平均场理论	94
3.1.4 计算模型	99
3.1.5 尺度问题和离散的显微组织形变过程	106
3.1.6 梯度复合材料模拟中的某些关键问题	107
3.2 梯度多层结构的热弹性形变	108
3.2.1 均匀温度条件	109
3.2.2 非均匀温度和热冲击载荷	114
3.3 梯度多层材料中塑性流变的开始和传播	115
3.3.1 塑性图	116
3.3.2 塑性形变的微观力学	117
3.4 梯度多层结构的应力和变形的实验测量	124
3.5 梯度多层材料的大变形	128
3.6 梯度复合材料中制备引入的应力	133
3.7 边缘效应和奇异场	137
3.8 梯度材料的断裂和疲劳	140
3.8.1 非均质固体断裂力学	140
3.8.2 弹性梯度固体的守恒定律	142
3.8.3 梯度材料中的裂纹驱动力	144
3.8.4 疲劳裂纹在均匀及梯度层中扩展	146
3.9 抵抗压痕和磨损的梯度材料的工程表面	151
3.9.1 梯度材料的压痕	152
3.9.2 用压痕法确定梯度材料的力学性能	154
3.9.3 梯度表面摩擦阻力的可能改进	156
3.10 总结	160
参考文献	161

第一章 绪 论

1.1 功能梯度材料:基本原理和定义

许多结构件会遇到各种服役条件,因此,要求材料的性能应随构件中的位置而不同。例如,一把厨房用刀只需其刃部坚硬;而在其它地方,用于制造它的材料则必须具有高强度和韧性。同样地,一个齿轮轮体必须有好的韧性,而其表面则必须坚硬和耐磨。涡轮叶片的主体必须高强度、高韧性和抗蠕变,而它的外表面必须耐热和抗氧化。现行应用的许多最需要的材料都属于这个范畴。

众所周知,构件中材料成分和性能的突然变化常常会导致明显的局部应力集中,无论该应力是内部的还是外加的。人们同样知道,如果从一种材料过渡到另一种材料是逐步进行的,这些应力集中就会大大地降低。

这些考虑形成了大多数功能梯度材料基础的基本逻辑要素。根据定义,功能梯度材料是用来生产微观结构和(或)成分逐步过渡的构件,这种设计是要求功能性能随机件内部位置而变化决定的。就功能梯度材料而言,这些要求通过优化构件的整体性能而得到满足。

更具体地说,正如在本专著的随后几章中详细说明的一样,功能梯度材料能够以几种方式来改善一个构件的热机械特征:

(1) 热应力值可减至最小,而且适宜地控制热应力达到峰值的临界位置;

(2) 对于一给定的热机械载荷作用,推迟塑性屈服和失效的发生;

(3) 抑制自由边界与界面交接处的严重的应力集中和奇异

性;

(4) 与突变的界面相比,可以通过在成分中引入连续的或逐级的梯度来提高不同固体(如金属和陶瓷)之间的界面结合强度;

(5) 可以通过对界面的力学性能梯度进行调整来降低裂纹沿着或穿过一个界面扩展的驱动力;

(6) 通过逐级的或连续的梯度可以方便地在延性基底上沉积厚的脆性涂层(厚度一般大于 1mm)^①;

(7) 通过调整表面层成分中的梯度,可消除表面锐利压痕根部的奇异场,或改变压痕周围的塑性变形特征^②。

功能梯度材料方法目前还远未达到规范化。大多数情况下的工程实践都是用通常批量生产的大量的均质材料进行零件设计。当一个结构需要大量不同的材料时,就用各种连接和涂镀方法把几种均质材料沿着锐利的边界连接起来。因此,寻求改善材料的材料工程师的任务和使用可利用材料手册的结构部件设计师的任务一般是独立确定并加以执行的。在过去几十年里,设计者们可资利用的材料系列的规模和性能都有显著的提高,同时材料工程师们生产这些材料的有效方法也明显增多。特别重要的事实是,我们现在可以在一个宽的允许范围内通过对微观结构和成分进行调整来生产一系列“被设计的”材料,其中包括由金属和陶瓷组成的复合材料。随着这些新方法和新材料的出现,可以预计将发展根据应用需求而制造构件的新方法,这种方法被称为“反向设计过程”^[1,2]。这里提到的构件的设计和制造不是以现有材料系列为

① 这里举一个这种应用的例子。为了对用于地面交通工具的柴油机的活塞头进行热保护,通常在钢基底上喷涂一厚度大于 2mm 的氧化锆涂层。只有逐步增加从内界面到外表面的陶瓷含量和覆盖一些陶瓷含量不断增加的金属-陶瓷复合的次涂层,才能保证如此厚的涂层的力学完整性。如果直接在金属上覆盖陶瓷,甚至在构件投入使用之前就会导致界面脱层。

② 这些方法对于含热障的、抗摩擦或抗冲击的涂层,或改善了抗高应变速率变形和冲击性能的梯度甲板材料,或生物力学移植器件中活动连接面等的潜在设计都具有重要意义。设计连续增强复合材料中纤维排列的逐级梯度也可显著提高它们的缺口阻力,并抑制微观裂纹损伤。

基础的,而是建立在一套有效的基本材料要素和加工,以及结合梯度结构的三维力学分析的材料方法基础之上的。因此,这两个工程学科相互结合起来,协同地设计构件以及它的制造方法,进而作为一个工程方法而不是作为一个物理本质引出功能梯度材料的又一个定义。

1.2 历史发展过程

从这里所引用的例子可以看出,功能梯度材料并不是新的事物,它的概念在钢中的应用已有数千年的历史(例如,见图 1.1)。最近,将预先存在的不同相进行人为组合而成的复合材料的出现,使得有可能通过改变复合两相的配制,在这种材料内部形成精细的构造梯度。作为一个概念,Bever 和 Duwez 于 1972 年提出了这

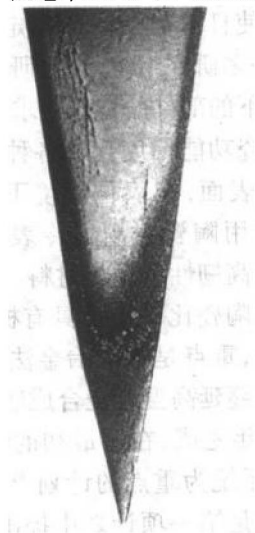


图 1.1 Noboyuki 提供的日本剑刃的腐刻截面图,表明从硬化的边缘到较韧的内部梯度转变
(取自 C.S. Smith, History of Metallography, MIT Press, Cambridge MA, 1960,获准翻印)

种可能性^[3],从 20 世纪 50 年代到 80 年代初,主要在美国的几位研究者就其在复合材料中的应用偶尔进行了尝试^[4,5]。在早期的研究当中,值得注意的是 Goetzel 等人在浸渗法制作金属陶瓷方面所做的精巧的、具有高度示范性的工作^[6,7],它包括了当前“FGM 研究”的许多特征。

作为一个规范化正式的概念和材料科学与工程类的国家研究项目,“功能梯度材料(Functionally Graded Materials)”(FGMs)这个词起源于 20 世纪 80 年代中期的日本。一系列的政府报告论述了日本在以太空飞机为重点的航天研究中大大增长的投入所预计的材料需求^[1,8~10],结论是,鉴于对高温结构件的许多严格要求,需要在结构中仔细地引入成分和微观结构梯度,以便(1)为构件的生产而最好地全面利用已有材料和(2)避免由于外加应力和(或)温度变化而在分割不同材料的锐利界面上引起的应力和(或)应变集中。这些研究结果促使日本于 1987 年制定了有关 FGMs 的一项庞大计划,该计划涉及许多研究组织,主要研究一边处于迅速冷却而另一边处于炙热环境下的部件的特殊要求。该项计划的整个组织包括适合于金属和陶瓷功能梯度化的各种无机复合体系的制备、设计和评估。对于热表面,在氧化环境下的服役温度指标约为 2000K,这些部位可选用陶瓷材料。冷表面附近的温度约低于 1000K,可选用高强度、高韧性和导热材料。在两种表面之间,利用一系列工艺按照基体/陶瓷比率设计具有梯度的金属基或碳基复合结构,在这些工艺中,重点是粉末冶金法、化学或物理气相沉积法、等离子喷涂法和自蔓延高温燃烧合成法。

这项计划于 1991 年完成,在这最初的尝试之后,1993 年又提出另一项以能量转化系统为重点的计划^[11~13]。第二项计划主要是针对功能材料,而不是第一项计划中提出的结构材料。这项计划的目标是利用热电材料或热离子材料对热能转化为电能进行优化,而引入材料的功能梯度化主要是为减小热应力。这项计划中特别重要的是在一个宽的温度范围内获得高的能量转化效率,这就需要制作梯度结构,它由一系列在一个宽的温度范围内具有峰

值热电指数 $Z = \alpha_S^2 \sigma_{el} / k_T$ (式中的 α_S 是 Seebeck 系数, σ_{el} 和 k_T 分别是材料的电导率和热导率) 的材料组成, 同时还应避免突然的材料过渡, 它会由于产生 Peltier 热 (即在由不同导电材料组成的电路中, 在两种不同材料的接点处产生而从另一个相对的接点处所释放的热量, 该热量与电流成正比) 而降低组件的效率^[14, 10, 15]。有关日本的这两个 FGM 协作计划的综述已在几篇文章^[1, 8, 11 ~ 13, 15 ~ 23]中给出。

除日本外, 从 80 年代末到 90 年代初, 在德国、瑞士、美国、中国和俄罗斯等一些国家, 功能梯度材料的研究迅速成为材料研究的活跃项目^[4, 24 ~ 40]。1995 年在德国发起了一项六年国家协调计划, 涉及大量实验室的参与。该计划由四个主要的讨论小组构成, 主要研究 (1) 同熔体有关的 (铸造、浸渗、晶体生长) 制备路线, (2) 以粉末为基础的制备工艺, (3) 涂层和热机械模拟, 以及 (4) 功能材料和生物医学材料。这项计划的另一个特征就是把公认的重点放在这些材料的制备上^[29]。

近几年来, 出现了特意引入梯度的其它许多目标应用, 包括: 金属与陶瓷的连接^[41, 42]、人体器官移植^[43 ~ 45]、爆发内燃机构件^[39, 46]、磁性装置^[47]、切割工具^[12]、建筑中的防火物^[48]、抗接触损伤的聚合物基复合材料^[49]和火箭推力燃烧室的衬里^[19, 50]。功能梯度材料因此而发展成为当前结构材料研究领域中的重要主题之一。正如前面所指出的, 为优化物理性质而在成分中仔细引入梯度的各种非结构应用中, 功能梯度材料也有重要意义。这样的应用超出了前面提及的计划范围, 有时并不称之为 FGMs。例如, 在光电装置中, 一个 InGaAs 梯度层被夹在具有固定成分的 GaAs 层和 InGaAs 层之间, 目的在于增大错配位错的平均间距, 并控制穿插位错的密度和空间分布^[51]。在能量转换应用中, 固体氧化物燃料电池堆的新型设计涉及金属 - 陶瓷的多层梯度结构, 它们与金属整体互连。这项应用中的梯度性过渡可降低成本、延长使用寿命和简化制造^[52]。类似地, 功能梯度变化也用于压电和铁电元件^[53, 54]。例如, 已制备出垂直于生长面的具有极化梯度的钾钽铌

铁电薄膜,其目的是通过一个脉冲电场进行励磁,在结构中产生自我极化^[54]。

最后人们越来越清楚,甚至远在三千年前梯度钢结构首次被生产出来之前,大自然就把这个概念引入许多生物体组织中。例如,骨头和竹子就是一种梯度结构,结构中的最强单元承受最高的应力。但是,在生命体的梯度结构与人造梯度结构之间存在很大的差异。生命组织有动态组合并修改它们所产生的结构的附加能力:有生命的“FGMs”也是“有智能的”,它们能够感受所处环境(包括局部的应力集中),而且用最真实和有力的话说,它们在结构的整个寿命期间,通过内部生长而原位形成^[56~59]。人造梯度材料至少在目前还缺乏这种功能。

1.3 本专著的结构和范围

在我们所提供的功能梯度材料研究的评论中,将把重点放在至少含有一种金属组成相,并至少能够提供部分结构功能的材料上。这篇评论的目的有以下几点:

第一,从本质上讲,功能梯度材料和功能分级的一般概念的研究是多学科的。当这个概念被正式提出时,在日本已得到了充分理解。然而,一旦进入工程实际,当前的许多研究还缺乏这个概念所要求的纵向结合。因此,这篇评论的目的之一就是要为不同学科的研究者们进行交流提供一个必要的共同基础。

其次,在这个研究主题上发表的文献给出了在许多似乎没有关联的方向上从事广泛活动的总体印象(缺少一个以把迄今为止的各自独立的活动进行统一化为中心的专题)。大量的高度专业化的会议论文集、期刊和其它场所报导了这些工作(其中有重点放在复合材料、冶金、陶瓷、生物材料、结构材料和器件材料上的期刊和致力于结构力学、微观力学、生物力学、能量转化、连接和设计的期刊,当然还有专利和商业性文献,它们都为 FGM 的研究和产品提供了相应的发表场所)。因此,我们试图尽最大可能对这个研究

活动领域所采用的多种制备和力学分析方法进行分类、综合和统一。

第三,通过提醒人们注意这样的事实,即在广泛应用的结构材料体系中(例如钢),功能梯度方法不仅被完善建立,而且被广泛地付诸实践,来尽力拓宽人们对功能梯度材料的认可。尽管在普遍使用的钢中缺乏一些新的问题(如模量梯度),但把这种已建立的方法(如梯度钢)应用于 FGMs 的研究还是有成效的。

本专著由主要的两章组成。第二章讨论 FGMs 的制备,给出生产功能梯度金属和金属/陶瓷材料制备方法的总貌。在进行一些总体讨论之后,我们把 FGM 制备方法分为两个主要系列:(1)按照一些预先设定的分布,在空间逐层地构造梯度材料的方法,和(2)利用流体流动、原子扩散或热传导等自然传输现象在成分和微观结构中制造宏观梯度的方法。每一种方法类型还包括不同的子类,我们将依次进行评述,其重点均分别放在特别有意义的问题和现象上。第三章的中心是 FGM 结构的热分析和力学分析,重点是热应力、制备过程引入的内应力、热机械变形中的几何变化、塑性形变的开始和扩展,以及其它形式的损伤和失效。这些都与含金属相的 FGM 结构紧密相关。然后,我们提出抑制和降低非弹性变形、裂纹萌生和亚临界断裂倾向,以及提高摩擦损伤阻力和消除自由表面和边界处应力集中的有害影响的策略。在每个子论题中,还评述了各种层次的模拟,它们把定量分析与微观结构尺度联系起来。在讨论中也试图通过实验与理论比较,描述建立方法是否成功,并突出了在材料设计、制备和性能方面取得的综合进展。

参 考 文 献

1. M. Niino and S. Maeda: *Iron and Steel Inst. of Japan Int.*, 1990, **30**, pp. 699-703.
2. T. Hirano and K. Wakashima: *MRS Bull.*, 1995, **20**, pp. 40-42.
3. M.B. Bever and P.E. Duwez: *Mater. Sci. & Eng.*, 1972, **10**, pp. 1-8.

4. B. Ilschner: *J. de Physique IV*, 1993, vol. Colloque C7, supp. to *J. de Physique III*, **3**, (EUROMAT '93 Proceedings), pp. 763-772.
5. Cherradi, D. Delfosse, B. Ilschner and A. Kawasaki: *La Revue de Métallurgie-CIT*. February 1996, pp. 185-196.
6. C.G. Goetzel and J.B. Adamcc: *Metal Prog.*, 1956,**70**, pp. 101-106.
7. C.G. Goetzel and H.W. Lavendel: *Proc. Conf. Plansee*, Plansee, Austria, 1964, F. Benesovsky, ed., pp. 149-162.
8. M. Koizumi: *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 1992, **13**, pp. 333-346.
9. M. Koizumi: *Int. J. of High-Temp. Self-Propagating Synth.*, 1992, **1**, pp. 103-110.
10. T. Hirai: *Materials Science and Technology - A Comprehensive Treatment*, Vol. 17B - Processing of Ceramics, Part 2, R.J. Brook, ed., VCH Publishers, Weinheim, FRG, 1996, pp. 293-341.
11. M. Koizumi and M. Niino: *MRS Bull.*, 1995, **20**, pp. 19-21.
12. Y. Miyamoto, M. Niino and M. Koizumi: *Proc. Conf. Functionally Graded Materials 1996*, Tsukuba, Japan, 1996, I. Shiota and Y. Miyamoto, eds, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-8.
13. S. Sasaki: *FGM News (Journal of FGM Forum)*, 1996, **31**, pp. 2-5.
14. W. Yourgrau, A. vanderMerwe and G. Raw: *Treatise on Irreversible and Statistical Thermodynamics*, Dover Books (Dover publication 1982, original publication by Macmillan, NY), New York, 1966.
15. T. Kajikawa: *Proc. Conf. Functionally Graded Materials 1996*, Tsukuba, Japan, 1996, I. Shiota and Y. Miyamoto, eds, Elsevier, Amsterdam, pp. 475-482.
16. M. Sunakawa: *Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics Techn. Paper*, 1991, AIAA-91-5096.
17. R. Ford: *Materials and Processing Report*, 1992, **7**, pp. 1-6.
18. A. Mortensen and M.J. Koczak: *J. of Metals*, 1993, **45**, pp. 10-18.
19. S. Suresh, A. Mortensen and H. McManus: *Functionally Graded Materials*, 1994, Proc. of the MIT-Office of Naval Research Joint Workshop, Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology.
20. M. Koizumi, M. Niino and Y. Miyamoto: *FGM News (Journal of FGM Forum)*, 1994, **24**, pp. 3-6, 15-18, 28-31.
21. R. Fukuda: *FGM-News*, 1995, **27**, pp. 6-9.
22. M. Niino: *FGM-News*, 1995, **27**, pp. 15-17.
23. J. Yoshino: *FGM-News*, 1995, **27**, pp. 18-21.
24. K. Fritscher and W. Bunk: *Proc. of the First Int. Symp. on Functionally Gradient Materials*, Sendai, Japan, 1990, M. Yamanouchi, M. Koizumi, T. Hirai and I. Shiota, eds, Functionally Gradient Materials Forum, pp. 91-96.
25. H.D. Steffens, M. Dvorak, and M. Wewel: *Proc. of the First Int. Symp. on Functionally Gradient Materials*, Sendai, Japan, 1990, M. Yamanouchi, M. Koizumi, T. Hirai and I. Shiota, eds, Functionally Gradient Materials Forum, pp. 139-143.
26. G.A. Schneider and G. Petzow: *Proc. of the First Int. Symp. on Functionally Gradient Materials*, Sendai, Japan, 1990, M. Yamanouchi, M. Koizumi, T. Hirai and I. Shiota, eds, Functionally Gradient Materials Forum, pp. 327-332.
27. W.A. Kaysser: *FGM News (Journal of FGM Forum)*, 1994, **24**, pp. 7-10.
28. W.A. Kaysser and B. Ilschner: *MRS Bull.*, 1995, **20**, pp. 22-26.
29. J. Rdel and A. Neubrand: *Proc. Conf. Functionally Graded Materials 1996*, Tsukuba, Japan, 1996, I. Shiota and Y. Miyamoto, eds, Elsevier, Amsterdam, pp. 9-14.
30. B. Ilschner and D. Delfosse: *Solid State Phenomena*, 1989, vols 8 & 9, pp. 61-70.