

新世纪高等学校研究生适用教材

材料加工物理

The Physics of Materials Processing

王惜宝 主编

材料加工物理



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

新世纪高等学校研究生适用教材

材料加工物理

The Physics of Materials Processing

王惜宝 主编

内 容 提 要

本书包括材料热力学、金属结构理论、晶体缺陷理论、扩散与固态相变理论、固溶体及其沉淀和分解、金属的强化理论以及金属的塑性变形理论等涉及材料在加工过程中基本结构、组织、性能及其变化规律的七个方面的基础知识。

本书可作为材料加工专业的研究生学习材料物理课程的教材,也可作为焊接、热处理、锻压、铸造、模具等专业的研究生、教师以及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工物理/王惜宝主编. —天津:天津大学出版社,
2011. 8

新世纪高等学校研究生适用教材

ISBN 978-7-5618-4092-4

I. ①材… II. ①王… III. ①工程材料—加工—物理
性能 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 167306 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 天津泰宇印务有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 26
字 数 649 千
版 次 2011 年 8 月第 1 版
印 次 2011 年 8 月第 1 次
印 数 1 - 2 000
定 价 46.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

材料加工物理是专门为材料加工专业的硕士研究生学习较为深入的材料物理基础理论而编写的一本教材。材料加工专业的主要任务是通过更高效的热加工方法将各种材料加工成具有更好使用性能的零部件或结构件。材料加工工艺对材料加工性能以及加工后零部件性能的影响,是通过材料的加工工艺条件对材料本身组织结构的影响实现的。因此,支撑材料加工专业最基本的理论基础是关于材料组织结构和性能方面的基础知识。在本科阶段,材料加工专业的学生系统学习了金属学及热处理课程,该课程知识主要是让学生在材料金相组织层次(微米尺度)上去理解材料性能随热处理工艺变化而改变的组织基础。围绕着对金属的组织变化规律的学习,使学生建立材料的成分—工艺—组织—性能之间的内在联系。到了硕士研究生阶段,由于培养目标是材料加工领域的研究型人才以及能够解决复杂工程技术问题的高级工程技术人才,因此,要求学生对材料加工过程出现的各种现象具有更敏锐的洞察力和更深刻的理解力。

众所周知,金属材料性能变化的结构基础是金属材料的组织变化,而金相组织只是金属材料的基本晶体结构在微米尺度上的一种表现形式,材料组织变化的物理本质是材料内部各种组元(原子)浓度及其组合方式的改变。因此,要深刻了解材料在热加工过程中材料的各种复杂的组织和性能变化规律,就必须对引起这种组织和性能变化背后材料更微观尺度上的物理变化规律有一个充分的认识。材料加工物理就是一门从原子及晶体结构层次上认识材料在加工过程中组织和性能变化规律的课程。只有具备了扎实深厚的材料加工物理基础,材料加工的研究人员和工程技术人员才能深刻认识材料在各种复杂的加工条件下其组织结构的复杂变化规律,从而通过改变加工工艺去控制材料的成形性能和所形成的各种结构件的性能,并在此基础上去研发各种更先进、更合理的材料加工工艺。

材料加工物理内容涵盖了材料热力学、金属结构理论、晶体缺陷理论、扩散与固态相变理论、固溶体及其沉淀和分解、金属的强化理论以及金属的塑性变形理论等涉及材料在加工过程中基本结构、组织、性能及其变化规律的七个方面的基础知识。本教材的各章节的内容就是围绕着材料组织、结构、性能形成及其变化的物理本质及物理过程而安排的。考虑到材料研究的需要,教材中部分章节收入了较为深入抽象的理论内容,希望研究生通过对这些基本理论的学习,对材料组织、结构及其性能形成的物理本质和变化规律有一个更为深刻的理解,在认识材料组织、结构及其性能的形成和变化规律中,去品味自然结构的和谐与平衡,去感悟人与自然的相处之道!

材料加工物理实质上就是材料物理,是一本适合材料加工专业研究生研读的材料物理。

材料物理的相关理论经一百多年的研究整理,已经形成一套完整的理论体系。本教材除绪论之外的各章节的内容基本上全部取自相关的参考资料,编者只是基于本课程的教学需要

和材料加工学科研究生对材料基础理论知识结构的需要,对内容进行了一些编辑和删减,在此,特对本书所有相关参考资料的作者表示诚挚的谢意!

在本教材的编写过程中,研究生杨智华、徐连锋、肖川、王瞰、李丽鸽、李庆、吴道亮、张盼盼、王金枝、李乡亮等同学在文字录入、图表处理、图文格式编排等多方面给予了大力协助,在此表示衷心感谢!

编者

2011年3月于天津



目 录

绪论	(1)
0.1 材料加工物理课程的内涵和外延	(1)
0.2 材料的结构与性能	(3)
第1章 材料热力学基础	(8)
1.1 材料热力学的基本概念	(8)
1.2 内能、焓、热容和热力学第一定律	(10)
1.2.1 热力学第一定律	(10)
1.2.2 比热容与温度之间的关系	(12)
1.3 熵和热力学第二定律	(13)
1.3.1 熵的定义和热力学第二定律	(13)
1.3.2 熵变的计算	(14)
1.4 热力学第三定律和绝对熵、标准熵	(16)
1.5 自由能函数	(17)
1.5.1 自由能函数的表达式	(17)
1.5.2 自由能函数的物理意义	(19)
1.6 统计熵和混合熵	(20)
1.6.1 统计熵	(20)
1.6.2 混合熵	(21)
1.7 同素异晶转变热力学	(22)
1.8 偏摩尔量和化学位	(24)
1.8.1 偏摩尔量	(24)
1.8.2 化学位和多相平衡	(25)
1.9 活度	(28)
1.10 界面热力学	(29)
1.10.1 界面的一般理论	(29)
1.10.2 相界面的热力学关系式	(31)
1.11 微粒的蒸气压和固体粒子的溶解度	(36)
1.12 晶粒的长大	(37)
1.13 金属和合金的表面能	(39)
1.13.1 表面能的估算	(39)
1.13.2 影响表面能的因素	(41)
1.13.3 晶界界面能的测定	(42)
第2章 金属结构理论	(43)



2.1 组成材料的基本粒子	(43)
2.1.1 关于基本粒子研究的动态	(43)
2.1.2 原子的基本结构	(43)
2.2 原子结构研究的相关理论及其方法	(46)
2.2.1 玻尔的量子化理论	(46)
2.2.2 海森堡的测不准原理	(47)
2.2.3 基于量子力学的电子波动理论	(48)
2.3 分子结构和结合键	(56)
2.3.1 原子间的作用力	(57)
2.3.2 离子键	(59)
2.3.3 共价键	(60)
2.3.4 金属键	(61)
2.3.5 分子键	(62)
2.3.6 氢键	(63)
2.3.7 真实晶体的键合特征	(63)
2.4 晶体中的电子状态	(64)
2.4.1 德鲁特-洛伦兹(Drude-lorents)理论	(65)
2.4.2 自由电子理论	(65)
2.4.3 靠近费米能级的能量	(66)
2.4.4 能带理论	(68)
2.4.5 能带理论的应用	(75)
2.5 金属的晶体结构	(82)
2.5.1 纯金属及固溶体晶体的基本结构	(83)
2.5.2 金属间化合物的晶体结构	(87)
2.6 晶体材料常见性能的物理本质	(88)
2.6.1 密度	(89)
2.6.2 强度和硬度	(94)
2.6.3 弹性及弹性变形	(98)
2.6.4 金属的导电性	(102)
2.6.5 材料的导热性	(105)
2.6.6 其他物理性能	(107)
第3章 晶体缺陷理论	(109)
3.1 点缺陷	(109)
3.1.1 点缺陷的产生及其形成能	(110)
3.1.2 点缺陷的运动	(111)
3.1.3 点缺陷的平衡浓度的估算	(112)
3.1.4 过饱和空位的形成以及空位对性能的影响	(114)
3.2 线缺陷	(115)
3.2.1 位错概念的提出	(115)

3.2.2	位错基本类型及特征	(117)
3.2.3	位错的运动	(123)
3.2.4	位错的应力场	(128)
3.2.5	位错的来源和增殖	(132)
3.2.6	实际金属中的位错组态	(134)
3.2.7	位错的观测	(143)
3.3	面缺陷	(145)
3.3.1	晶界	(145)
3.3.2	亚晶界	(153)
3.3.3	孪晶界	(154)
3.3.4	相界	(155)
3.4	晶体缺陷之间的交互作用	(157)
3.4.1	位错与位错之间的交互作用	(157)
3.4.2	位错与点缺陷之间的交互作用	(162)
3.5	晶体缺陷理论的应用	(165)
3.5.1	裂纹形核和扩展的位错理论	(165)
3.5.2	对晶体缺陷的几点新认识	(177)
第4章	金属中的扩散及相变理论	(179)
4.1	Fick 扩散第一定律及应用	(179)
4.1.1	Fick 扩散第一定律	(179)
4.1.2	扩散的本质及扩散系数的物理含义	(180)
4.1.3	Fick 扩散第一定律的应用	(181)
4.2	Fick 扩散第二定律及其在材料研究中的应用	(192)
4.2.1	Fick 扩散第二定律	(192)
4.2.2	扩散第二定律方程的解	(193)
4.2.3	Fick 扩散第二定律的应用	(199)
4.3	扩散的微观机制	(208)
4.3.1	间隙扩散机制	(208)
4.3.2	空位扩散机制	(209)
4.3.3	离子晶体与共价晶体中的扩散	(210)
4.3.4	非晶体中的扩散	(212)
4.4	扩散热力学	(212)
4.4.1	扩散激活能及其影响因素	(212)
4.4.2	扩散系数的热力学解释	(214)
4.4.3	反应扩散	(216)
4.4.4	高速扩散通道	(217)
4.5	沉淀相粒子的长大和粗化过程所涉及的扩散问题	(220)
4.5.1	沉淀相粒子的长大	(220)
4.5.2	沉淀相粒子的粗化	(225)



4.6	固态相变的理论基础	(227)
4.6.1	固态相变的分类与特征	(227)
4.6.2	相变驱动力与形核驱动力	(232)
4.6.3	固态相变的形核	(234)
4.6.4	新相长大	(238)
4.7	钢中发生的共析转变、贝氏体转变和珠光体转变	(244)
4.7.1	共析转变	(244)
4.7.2	贝氏体转变	(250)
4.7.3	马氏体相变	(263)
4.8	相场模型原理及其在晶粒长大计算中的应用	(273)
4.8.1	相场模型的建立	(275)
4.8.2	相场模型的求解和应用	(276)
第5章	固溶体及其沉淀与分解	(277)
5.1	固溶体	(277)
5.1.1	固溶度和固溶体的类型	(277)
5.1.2	一次固溶体	(279)
5.1.3	有序固溶体	(292)
5.2	中间相	(295)
5.2.1	电子相	(295)
5.2.2	拉弗斯相和密堆原理	(296)
5.2.3	过渡族元素构成的中间相	(298)
5.2.4	σ 相	(299)
5.2.5	β -W 结构	(299)
5.2.6	间隙相	(300)
5.2.7	中间相的结构缺陷	(301)
5.3	固溶体的沉淀	(301)
5.3.1	沉淀的条件和分类	(301)
5.3.2	沉淀相粒子的形核	(304)
5.3.3	沉淀过程举例	(311)
5.4	固溶体的调幅分解	(318)
第6章	金属及合金的强韧化理论	(320)
6.1	纯铁的塑性变形行为	(320)
6.1.1	纯铁(α -Fe)的塑性变形	(320)
6.1.2	纯铁(bcc)的塑性	(321)
6.1.3	纯铁(bcc)屈服强度和流变应力的温度敏感性	(322)
6.1.4	纯铁(bcc)的韧性与冷脆性	(324)
6.1.5	纯铁(fcc)的强韧性与塑性变形行为	(325)
6.2	强化机制的分类	(325)
6.3	固溶强化	(326)



6.3.1	均匀固溶强化理论	(326)
6.3.2	柯氏气团	(330)
6.3.3	史氏气团	(333)
6.3.4	铃木气团	(335)
6.3.5	气团拖曳与动态应变时效	(337)
6.3.6	空位与位错的交换作用	(341)
6.3.7	置换固溶和间隙固溶与塑性	(342)
6.4	第二相强化	(344)
6.4.1	沉淀强化机制	(346)
6.4.2	弥散强化机制	(347)
6.4.3	第二相粒子强化的应用	(348)
6.5	细晶强化	(359)
6.5.1	细晶粒强化与刃型位错的塞积	(359)
6.5.2	关于 k_y 值	(361)
6.5.3	在易于交滑移时晶界的强化作用	(362)
6.5.4	孪晶与位错的交互作用	(363)
6.5.5	次生滑移的强化作用	(363)
6.5.6	细化晶粒与塑性	(364)
6.5.7	钢材晶粒尺寸的控制	(365)
6.6	位错强化与加工硬化	(367)
6.6.1	位错强化	(367)
6.6.2	位错强化与塑性和韧性	(369)
6.6.3	金属的加工硬化	(371)
6.6.4	加工硬化的微观解释	(373)
6.6.5	硬化第三阶段与加工软化	(377)
6.7	强化作用的叠加	(379)
第7章	金属的塑性变形	(381)
7.1	滑移变形	(381)
7.1.1	滑移变形的物理现象	(381)
7.1.2	滑移时的晶体学特征	(383)
7.1.3	临界分切应力定律	(385)
7.1.4	滑移过程的一般叙述	(386)
7.2	孪生变形	(391)
7.2.1	孪生变形的物理现象	(391)
7.2.2	孪生变形的结晶学关系	(392)
7.2.3	孪生变形的一些特点	(394)
7.2.4	孪生形成机制	(398)
7.3	多晶体的塑性变形	(398)
7.3.1	多晶体与单晶体的比较	(399)



7.3.2 多晶体变形的不均匀性	(400)
7.3.3 晶体结构对多晶体塑性的影响	(400)
7.3.4 内应力及其影响	(400)
7.3.5 晶界的作用	(401)
7.4 形变组织	(401)
7.4.1 形变组织的意义及其表示方法	(402)
7.4.2 组织形成理论	(402)
参考文献	(404)



绪 论

0.1 材料加工物理课程的内涵和外延

材料物理是材料类研究生必修的一门专业学位课程。而材料加工物理则是为材料加工专业的研究生学习材料物理知识而专门收集、整理、缩写的。因此材料加工物理实质上就是材料加工专业学生学习的材料物理。材料物理是什么呢？为什么要学习材料物理呢？材料物理课程的内涵和外延又是什么？也许，在满怀信心准备学习本课程之前，对这些问题还必须先了解清楚。

在介绍材料物理课程的内涵之前，有几个名词需要先进行仔细的思考 and 甄别。

1. 什么是“材料”？

作为材料学院的研究生，大家对“材料”这个名词可谓再熟悉不过了，各位也天天在跟各种材料打交道，但是，大家是否思考过到底什么是“材料”？“材料”与“物质”之间有什么区别？这是一个非常基础的问题，看起来应该从哲学角度去认识。

从一般意义上看，大家研究或使用材料都有很强烈的目的性，也就是说从使用属性来说材料都存在使用价值或潜在的使用价值。而从其自然属性来说，材料则是由基本粒子构成的物质。所以，从物理本质上看，“材料”应该是那些具有使用价值或潜在使用价值的“物质”。

然而，人们又何曾发现没有使用价值的物质？某些物质现在看来似乎没有使用价值，但那只是暂时没有发现它的使用价值，通过努力，在不远的将来它的使用价值一定可以被发现，这也正是科学研究的目地：认识自然、利用自然。因此，从这一角度看，“材料”就是“物质”。

2. 什么是物理？

大家从中学就开始学物理课程，那么什么是“物理”呢？这又是一个十分基础的问题。大多数物理教科书，对“物理学”有过定义：物理学是研究物质结构、物质相互作用和运动规律的自然科学。由此可见，“物理”就是指物质的基本结构及物质间相互作用和运动规律。

然而，研究物质结构及其相互作用和运动规律有很多方法，如我国传统的以“五行”、“八卦”为基础的“易学”和“中医学”，这些理论的建立都是基于对自然或人体现象及其属性的观察、总结、分析后依据某一种“空想出来”的逻辑建立起来的。不否认这种方法有其科学的合理成分，如辩证的、对立统一的、联系的、全面的等诸多理性成分，有的还与现代物理学的研究成果不谋而合，但这些理论的建立却不以实验结果为基础，因此不能被纳入“物理学”领域。

真正的物理学是一门以实验为基础的研究物质结构、物质相互作用和运动规律的自然科学，它是高度量化的精密科学，被人们公认为最重要的基础的科学。当然，对物质结构的认识有不同的层次和不同的角度，因而，物理学也出现了不同的分支，如高能物理学、固体物理学、应用物理学、金属物理学、生命物理学（生理学），等等。

然而，在实际的物理学研究实践中，虽然实验是必需的研究手段，但实验在物质结构及其



运动规律的研究中只能提供若干个验证的点,并不能将实验覆盖整个物理学研究的全过程。因此,要依靠严密的数学推理将实验点与点之间连接起来。由此可见,物理学的发展与数学密不可分。

3. 材料物理的内涵和外延

(1) 材料物理的内涵

“材料”和“物理”的含义告诉我们“材料物理”实质上就是“物理”,是介绍物质结构、物质相互作用和运动规律的一门课程。然而,由于材料所覆盖范围太广,结构层次又不同,因此,对材料结构及其相互作用和运动规律的认识根本无法在一门课程中进行全面介绍,也没有哪一门课程能容纳如此浩瀚无垠的物理知识。鉴于本教材的适用对象——金属类专业特征,本课程虽名为“材料物理”,但主要介绍基于原子结构水平的金属类材料的结构及其相互作用和运动规律,因此取名“金属物理”也许更为贴切。不过由于研究生学位课程按一级学科设置,因此本课程还是沿用“材料物理”的课程名称。

另外,虽然本课程主要介绍金属类材料的结构及其相互作用和运动规律,但对金属结构理论和规律的介绍是基于对物质共性结构理论的认识上进行的。而且从原子结构水平来看,金属结构理论及其研究方法与自然界其他物质结构基本一致。由此可见,本课程的知识对研究生从物理本质上认识自然世界具有重要的支撑作用。

(2) 材料物理的外延

由于哲学是自然科学规律的总结,因此学习材料物理的过程,实际上也是在认识材料的基本结构及其运动规律的过程中去品味哲学内涵的过程,这就是材料物理的哲学性。

说到物理的基础性,我们认为所有物质之间的相互作用在最基本层次上都是物理的过程,因此认识物质的物理过程是支撑其他自然学科发展的不可缺少的知识基础。

说到物理学的重要性,正如国际纯粹物理和应用物理联合会第23届代表大会的决议《物理学对社会的重要性》指出的,物理学是一项国际事业,它对人类未来的进步起着关键性的作用:探索自然,驱动技术,改善生活以及培养人才。

实际上,物理学的发展不仅仅体现在人类对物质结构、物质相互作用和运动规律认识的进一步深入,也体现在人类认识自然的科学思想方法的进步和创新。诚如诺贝尔物理学奖得主、德国科学家玻恩所言:“与其说是因为我发表的工作里包含了一个自然现象的发现,倒不如说是因为那里包含了一个关于自然现象的科学思想方法。”物理学之所以被人们公认为一门重要的科学,不仅仅在于它深刻地揭示了客观世界的规律,还因为它在发展、成长的过程中,形成了一整套独特而卓有成效的思想方法体系。

因此我们学习材料物理,不仅仅要认识材料的基本结构、相互作用和运动规律,还要学习材料物理研究的思想方法(这种思想方法的核心就是实事求是地通过实践去认识事物及其运动规律的本质)。同时,还要细细去品味由材料的基本结构及其运动规律所体现出来的哲学思想。

材料物理是求真求实的学科。物理最讲实证,物理最讲真实。物理学家在科学研究活动中最基本的态度就是实事求是。因此通过学习材料物理,我们也应该学到物理的“求真务实”的内在品性。

材料物理学的思想与方法不仅对物理学本身有价值,而且对整个自然科学,乃至社会科学的发展都有着重要的贡献。有人统计过,自20世纪中叶以来,在诺贝尔化学奖、生理学或医学

奖,甚至经济学奖的获奖者中,有一半以上的人具有物理学的背景,这意味着他们从物理学中汲取了智能,转而在非物理领域里获得了成功。

物理学在研究过程中表现为“求真”,在研究目的性上除了为探索自然奥秘的“求知”之外,更体现为利用自然规律造福人类的“为善”,因此,它在目的性上体现出“求知为善”;在研究结果方面,物理学揭示了自然物质结构及其运动规律,让人们能真正领略到大自然那种本质的、内在的“和谐相处、平衡共存”的和谐之美、平衡之美,这种和谐之美、平衡之美源自自然的本性,却正是人类之追求!人类只有深刻领悟自然结构的那种和谐之美,才能超于自然又融于自然、回归自然,与自然和谐相处。对我们每一个人来说,只有参透自然结构及其运动规律的和谐、平衡之本质,我们才能在急功近利的浮华社会中保持一份淡定和宁静,达到“宁静以致远”的境界。由此可见,物理学本身兼具真、善、美的三重属性,我们完全有理由说,材料物理不仅是一门课程、一种知识,更是一种文化、一种修为,而且是一种高层次、高品位的文化和修为。正如有位物理学家曾经说过的那样,物理学不仅帮助人们不断认识自己和环境,而且可促使人的生活趋于高尚。

让我们来学习材料物理、品味材料物理、感悟材料物理、鉴赏材料物理吧!虽然要领略材料物理的“真、善、美”及其哲学思想并非易事,因为它们深藏在书本知识的后面,只有在你真正参透书本知识并融会贯通之后才能逐步领悟到,而对于一个刚踏入材料领域的研究生来说,材料物理内容繁杂,要学好它也并非易事,但正因为如此,这种“材料物理的美”才不是那些浮躁势利之人所能领略!只要你有心,材料物理一定能帮助每位用心研读它的研究生在视野、思维、学识乃至品性修养方面都迈上一个新的台阶!

0.2 材料的结构与性能

1. 材料的性能

材料最主要的属性是它的使用属性,作为从事机械、材料工程领域的工程技术人员,也许最关心的就是材料的宏观性能,因为这直接决定了材料所要采取的加工工艺与所制造的构件的使用性能。

(1) 材料性能的物理本质

从宏观层面看,材料的性能多种多样,如物理性能、化学性能、力学性能、热学性能、电学性能,等等。但从物理本质上看,材料性能又是什么?理解材料性能的物理本质对于了解影响材料性能的主要因素,从而找到改善材料性能的途径具有重要意义。

编者认为,从普遍意义上看,所谓性能就是材料的材质特性和组织结构特性应对外界载荷变化的一种反应的宏观表现。材料对热载荷的应对反应体现的就是其热学性能,对力学载荷的应对反应体现的就是其力学性能,等等。这里所涉及的组织结构特性不仅包括其相组成的结构、形态、尺寸、位向和组成比例等组织特性,还包括诸如位错、空位、晶界等晶体缺陷以及各类夹杂、气孔、裂纹等显微或宏观缺陷在内的各个层次的缺陷特性。组织和缺陷在很多情况下是难以分开的,因为每种组织中都包含大量缺陷(详见后文)。但为了充分突出缺陷对材料性能的影响的重要性,在此把结构缺陷单独作为一个影响因素进行分析。由此可见,材料的宏观性能是由材料的材质、组织和结构缺陷三个因素共同决定的(见图 0-1 所示)。当然,具体到材

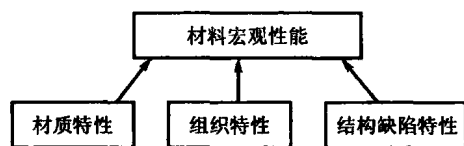


图 0-1 决定材料性能的本质因素

料性能的实际指标(测试结果)除了受材料本身的因素影响外,还会受到外界载荷特性的影响。例如,某种材料的抗拉强度值,不仅取决于这种材料的材质、组织和结构缺陷,还与测试时拉伸载荷及其加载速度有关系。一种材料的熔点测试值,不仅取决于这种材料的材质、组织和结构缺陷,还与

测试熔点时的加热速度有关联。

(2) 材质特性是决定材料性能的基础因素

材料的成分—工艺—组织—性能是材料研究的一条不变的主线,此处的组织不仅指相组织,还应包括组织中各种各样的缺陷。材料的成分是决定材料性能的最基本因素。材质因素主要是通过影响组织结构而对材料的性能产生影响的。材质影响组织结构的方式有两种:一是材料的成分因素通过与加工工艺的结合形成各种组织和结构,即通过浓度与能量的耦合改变异类原子间的相互作用特性,从而影响材料的组织结构;二是材料的本质特性通过自身原子结构特性直接影响组织结构。以铁碳合金材料为例,不同含碳量的铁碳合金通过与各种加工工艺结合可以获得各种不同的组织,从而获得不同钢铁材料的性能;但是,如果是不同种类的材料,即使获得了相同的晶体结构,也会有不同的性能。如由铁原子组成的体心立方结构晶体(β -Fe)和由钛原子组成的体心立方晶体(β -Ti),虽然同样是体心立方结构,但具有截然不同的性能, β -Fe 室温强度只有 100 ~ 200 MPa,而 β -Ti 室温强度则可高达 1 372 ~ 1 666 MPa,这就是材质本身的原子结构特性对材料组织性能产生的直接影响。

(3) 组织特性是决定材料性能的直接因素

材质特性是决定材料性能的基础因素,而组织特性则是决定材料性能的直接因素。材质因素对材料性能的影响在很大程度上要通过组织特性才能实现。就像盖房子一样,水泥和砖瓦等建筑材料体现的是材质特性,由建筑材料堆砌而成的地基、墙体等建筑结构体现的是组织特性,建筑材料的性能对房屋结实程度的影响显然要通过地基、墙体等建筑结构的可靠程度体现出来。

这里所讨论的材料组织特性单指组成相的种类、结构、晶粒尺寸、形态、位向及比例,等等,即通常所说的“组织”,是组成材料宏观结构的微观基本单元。如果是单晶材料,晶体组织通过其晶体结构的稳定性和晶体学取向影响晶体的宏观性能。而对于多晶体材料,影响材料宏观性能的因素除了每个晶体相的结构稳定性和晶体学取向及尺寸之外,还有各个晶体相之间的堆砌方式、分布状态、相对取向关系以及相对含量等各晶体相之间的协调因素。而且在大多数情况下,各晶体相之间的协调因素对材料性能的影响更为重大。如果把多晶体材料看成是一个由各种不同晶体组成的多晶体社团,每个晶体的性能固然重要,然而各个晶体之间只有充分协调匹配才能使这个社团在应对外部载荷时获得最佳的性能。在多晶材料中,担当这种协调作用的就是“晶界”。例如,在承受某一个方向的力学载荷时,多晶体材料在“晶界”的协调下,各个晶粒都会根据载荷的大小逐渐将自己最强大的承载位向转向最大受力方向,以便使整个材料发挥最佳的承载性能,从而使整个材料的屈服强度越来越高。如果材料内部组织中存在一些晶粒尺寸较大,位向性又强,且承载过程中难以转动的组织(如上贝氏体组织、魏氏组织等),那么这种材料的承载能力就一定不会很高。这就是多晶材料中晶界协调作用的重要性,这也是自然结构中“和谐”的表现和“和谐”的重要性。由此可见,“和谐的组织”是保证材



料具有优越性能的重要条件,组织越和谐,材料的强韧性会越好。也许,作为人类社会结构的参与者,我们也应从中领悟一点处世之道。

(4) 结构缺陷特性是影响材料性能的最敏感因素

前面我们已经提到,组织和缺陷在很多情况下是难以分开的,因为每种组织中都包含着大量的缺陷,特别是非平衡冷却条件下形成的组织,如贝氏体、马氏体组织等内部都包含着大量位错,这些组织的性能与其高密度的位错有直接关系。因此材料的组织与结构缺陷之间常常相互联系,相互影响。

但有的缺陷,如空位、夹杂、夹渣、气孔、显微裂纹的形成与各种组织之间并无直接关系。为了充分突出缺陷对材料性能影响的重要性,在此还是把缺陷单独作为一个重要的影响因素进行分析。

材料的晶体缺陷是材料内部原子的堆砌过程中造成的纳米级甚至更小尺寸的缺陷。而诸如夹杂、夹渣、气孔、显微裂纹等缺陷则是材料在结晶过程和固态冷却过程中形成的微米级甚至更大尺寸的缺陷。

对于完整的晶体结构来说,晶体缺陷一定是该晶格中最薄弱的部位。同样,对于均一的固溶体材料来说,内部所包含的各种缺陷也必定是该材料最薄弱的部位,材料在承受外界载荷时,最先产生应对反应的必定是缺陷部位,因为此处承载能力最低。这就会导致在其他部位完好无损的情况下在缺陷处发生率先破坏,而材料是否会产生整体宏观破坏,则要看完整部分的晶体能否有效阻碍缺陷处破坏的快速扩展。因此,从微观机制上看,材料的宏观破坏都是由内部缺陷处的微观破坏扩展造成的。由此可见,缺陷的性质、尺寸和数量对材料的性能的影响最为敏感。怪不得有人说,金属材料的性能是由缺陷决定的。

用一个不太恰当的比喻,这就像一个水桶,评价水桶盛水的性能不仅要看水桶“好的地方有多好”,更要关注“坏的地方有多坏”、“被腐蚀的地方还剩下多少承载能力”。如果水桶有一小块地方快腐蚀漏了,其他地方即使都是铜墙铁壁,也无济于事。由此可见,对于连续介质材料,最薄弱的地方是决定材料性能的最关键地方,这就是缺陷对材料性能的影响。

对于常见的金属材料来说,缺陷种类很多,除上面提到的各种缺陷之外,对于特定构件来说,还可能存在着各种各样的形状、结构缺陷。关于夹杂、气孔、裂纹等显微或宏观缺陷以及形状、结构缺陷对材料性能的影响,已经在焊接冶金学、材料力学、断裂力学等课程中有所涉及,本课程不再重复,本课程中主要关注晶体材料内部无处不在的晶体缺陷及其对材料性能的影响规律。

2. 材料的组织结构

(1) 决定材料组织结构的基本因素

由前面的分析可知,材料的性能是由材料的成分和组织结构决定的。那么除了材料成分因素之外,材料的组织结构又是由什么来决定的呢?它们又是如何决定材料性能的呢?理解这些问题,对于认识组织结构的形成本质及其影响因素,以便更好地控制和改善材料的组织结构都有重要的价值。

简单地说,决定材料组织结构的基本因素是材料的成分和加工工艺。

材料的成分决定了材料的材质特性,而材料的加工工艺则通过赋予材料热、力或辐射等作用决定了材料所具有的能量特性。材料材质特性和能量特性的耦合就决定了材料的组织结构。



因此,更准确地说,决定材料组织结构的基本因素是材料的材质特性、所具有的能量特性及其两者之间的耦合。如果把材料内部及其所处的环境看成是一个多种组元、多因素的复杂系统的话,那么,在某个时间和空间节点处,材料所形成的组织和结构的状态就是这个复杂系统内材料的材质特性和能量特性在这个时空节点上所达到的一个综合平衡的暂态结果,这种组织状态虽然不是所期望的最佳组织,但却是一种自然平衡的结果,是一种自然的选择,也是该时空条件下的最佳选择。说它是一个暂态结果,是因为随时间或空间的改变,这种平衡可能会被逐渐改变。

(2) 材质特性对材料组织结构的作用

材料的成分是构成组织结构的物质基础,材质特性的体现及其对材料组织结构的影响主要有以下三个方面。

第一方面,材质特性体现在内含的各种原子的种类、原子结构、原子直径、原子质量及其电子云结构等原子结构特性方面。这种原子结构特性将直接决定同类原子之间的结合方式和堆砌方式,即决定同类原子之间的键合性质和组织的晶体结构,同时也决定了此类材料对外界条件变化的基本应对反应,即决定了材料基本的物理化学性能。当然,这种原子结构特性也将影响与其他异种原子之间的结合形式。这部分内容将在“金属结构理论”一章进行详细介绍。

第二方面,材质特性体现在各种原子之间的相互作用特性方面,即材料所包含的异类原子之间如何结合、如何堆砌、堆砌成何种晶体结构,等等。这种相互作用特性不仅受到原子结构特性的影响,而且受到材料内各种原子浓度特性的影响,同时还会受制于各类原子的能量特性(包括热、力和辐射等能量的作用),因此相互作用过程相当复杂。

对于固体材料,原子之间的相互作用特性具体表现在异类原子之间在原子结构特性、浓度特性和能量特性的耦合下是形成固溶体还是化合物,是形成短程有序的中间相还是形成长程有序的金属间化合物,即决定了异类原子间会形成相组织的类型和性质。

各种原子之间的相互作用特性与原子结构特性、浓度特性和能量特性有什么样的关系?各种固溶体、中间相又有什么样的性能?有关这方面的内容将在“固溶体及其沉淀与分解”一章进行详细介绍。

材料材质特性第三个方面的体现是各种原子的浓度特性,即组成材料的各种原子的浓度及分布。材料的浓度特性对异类原子之间的相互作用特性和扩散行为都具有重要的影响。

材质特性的原子结构特性、浓度特性和相互作用特性三者共同构成了材料组织的物质基础,它们的作用既有各自特点,又有相互的联系。例如,材料中某些元素的浓度分布会因为它与周围其他元素之间的相互作用特性的差异而改变;同样,材料中某些元素之间是否能形成某种特定的键合类型和晶体结构,也要取决于这些元素在该材料中的浓度分布,浓度低的地方可能会形成固溶体,而浓度高的地方则可能会形成中间相。

(3) 能量特性对材料组织结构的作用

如前所述,材料的加工工艺通过热、力或辐射等作用赋予了材料特定的能量特性。这些能量包括由传热引起的热能(动能)、由受力引起的弹性能(势能)以及由受辐射引起的原子附加热能或动能。能量因素对材料组织结构的作用主要是通过影响原子之间的相互作用特性和原子的扩散行为来实现的,能量因素必须与材质因素相结合才会对材料的组织结构产生作用。由于能量是驱动原子进行运动的必要条件,因而,能量因素是驱动组织结构形成和改变的原动力,是支撑材料组织结构形成的除材质因素之外的另一根支柱。