



国家级精品课程教材

材料科学与工程系列精品教材

材料加工原理

主编 李言祥

副主编 李文珍 朱跃峰

清华大学出版社

国家级精品课程教材

材料科学与工程系列精品教材

材料加工原理

主编 李言祥

副主编 李文珍 朱跃峰

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是为材料科学与工程学科本科生编写的教材,也适用于机械工程学科材料成形与控制专业。内容包括:基于液—固转变的材料加工;基于气—固转变的材料加工;基于固态转变的材料加工。这是同类教材中首次采用按材料加工制备过程中的主要相变类型进行的内容分类。教材将在更广阔的领域为学生打下加工过程中材料成分、组织及性能的形成和变化规律的知识基础。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

材料加工原理/李言祥主编. —北京:清华大学出版社,2017
(材料科学与工程系列精品教材)
ISBN 978-7-302-47154-7

I. ①材… II. ①李… III. ①工程材料—加工—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 116587 号

责任编辑:赵 斌

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:26

字 数:627 千字

版 次:2017 年 7 月第 1 版

印 次:2017 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.80 元

产品编号:074585-01

前言



材料是可以用来制造产品的物质,是人类社会发展的物质基础。把材料制造成产品的过程和方法就是材料加工。因为物质产品总有一定的形状和尺寸,所以材料加工也称为成形制造。材料加工的方法千变万化,不同的材料需要用不同的适宜加工方法,同样的材料制造不同的产品也需要用不同的适宜加工方法。成形制造属机械工程学科。在制造学科领域,材料在制造成产品过程中的尺寸、外形、表面状态和最终性能是其主要关注和控制内容。材料加工关注制造过程中材料内部成分、组织和性能的变化,其学科属性是材料学科,属于材料工程。本书以金属材料为主要加工对象,根据加工过程中材料经历的主要相变,分为基于液—固转变的材料加工;基于气—固转变的材料加工和基于固态转变的材料加工三篇。这种按材料加工过程中经历的主要相变类型进行内容分类的结构,将使学习者更好地了解制造过程中材料成分、组织及性能的形成和变化规律及其材料学原理。

本书的编写目的是为了适应学科调整的要求。《材料加工原理》前一版本出版于2005年。当时是为了适应清华大学学科调整,即将原来的铸造、锻压、焊接等专业合并成机械工程专业,所以《材料加工原理》包含了《铸件形成原理》《塑性加工原理》和《焊接冶金原理》的内容。

随着清华大学材料学院的成立,原机械工程系的材料加工工程学科转入材料学院。材料学院与机械工程系在学科定位,整体培养方案等方面有很大差别。所以,材料加工原理教材需要重新编写,内容需做较大调整,以适应材料学院的培养要求。

本书是为材料科学与工程学科本科生编写的教材,也可作为机械工程学科材料成形与控制专业的教学参考书。教材将在更广阔的领域为学生打下加工过程中材料成分、组织及性能的形成和变化规律的知识基础。这是同类教材中首次采用按材料加工制备过程中的主要相变类型进行的内容分类。

本书由李言祥主编(第1篇主编及第1、2、3章撰稿),李文珍(第4章初稿,第3篇主编),朱跃峰(第5章初稿,第2篇主编)副主编,赵明(第6、7、8章初稿编写),巩前明(第9、12章初稿编写),张华伟(第10、11章初稿编写)参加编写。

编者

2017年3月

目录



第1篇 基于液—固转变的材料加工

1 液态金属与凝固结晶	3
1.1 液态金属的结构和性质	3
1.1.1 金属从固态熔化为液态时的变化	3
1.1.2 液态金属的结构	6
1.1.3 液态金属的性质	9
1.2 凝固结晶热力学和动力学	16
1.2.1 金属液—固转变的热力学条件	16
1.2.2 均质形核	18
1.2.3 异质形核	20
1.2.4 晶体长大	22
习题	26
参考文献	27
2 液态金属的流动与凝固传热	28
2.1 液态金属的流动性和充型能力	28
2.1.1 液态金属流动性与充型能力的基本概念	28
2.1.2 液态金属的停止流动机理	29
2.1.3 液态金属充型能力的计算	30
2.2 液态金属的流动	31
2.2.1 凝固过程中液体流动的分类	31
2.2.2 凝固过程中液相区的液体流动	32
2.2.3 液态金属在枝晶间的流动	34
2.3 凝固传热	35
2.3.1 铸造过程中的传热	35
2.3.2 焊接过程中的传热	41

习题	45
参考文献	45
3 凝固过程与组织控制	47
3.1 凝固过程概述	47
3.1.1 凝固过程简介	47
3.1.2 凝固过程中的溶质分配与传质	48
3.2 单相合金的凝固	52
3.2.1 平衡凝固	53
3.2.2 近平衡凝固	54
3.2.3 界面稳定性与晶体形态	61
3.3 多相合金的凝固	68
3.3.1 共晶合金的凝固	68
3.3.2 偏晶合金的凝固	74
3.3.3 包晶合金的凝固	76
3.4 凝固组织控制	78
3.4.1 普通铸件的凝固组织与控制	78
3.4.2 定向凝固组织控制	84
3.4.3 焊缝凝固组织控制	88
3.4.4 快速凝固	93
习题	99
参考文献	100
4 熔体质量控制	101
4.1 气体与液态金属的相互作用	101
4.1.1 氢与液态金属的相互作用	101
4.1.2 氮与液态金属的相互作用	105
4.1.3 氧与液态金属的相互作用	107
4.2 熔渣与液态金属的相互作用	111
4.2.1 熔渣及其特性	111
4.2.2 活性熔渣对金属的氧化	117
4.2.3 脱氧处理	119
4.2.4 渗金属反应	124
4.2.5 脱硫与脱磷	125
4.3 液态金属的处理与保护	129
4.3.1 液态金属的净化处理	129
4.3.2 液态金属的细化处理	131
4.3.3 液态金属的变质处理	136
4.3.4 液态金属的保护	140

习题	143
参考文献	144
5 凝固缺陷	145
5.1 偏析	145
5.1.1 微观偏析	145
5.1.2 宏观偏析	151
5.2 气孔	155
5.2.1 析出性气孔	155
5.2.2 侵入性气孔	158
5.2.3 反应性气孔	158
5.2.4 气孔的有害作用及防止措施	159
5.3 非金属夹杂物	159
5.3.1 非金属夹杂物的来源和类型	159
5.3.2 非金属夹杂物的影响	159
5.3.3 控制非金属夹杂物的措施	160
5.4 缩孔与缩松	161
5.4.1 金属的收缩	161
5.4.2 缩孔与缩松的形成	162
5.4.3 影响因素和防止措施	163
5.5 应力与裂纹	164
5.5.1 金属凝固过程中的内应力	164
5.5.2 凝固裂纹	166
习题	170
参考文献	170
 第 2 篇 基于气—固转变的材料加工 	
6 气—固转变基础	173
6.1 气体与固体	173
6.1.1 气体分子运动论	173
6.1.2 固体表面的特点	177
6.1.3 物理吸附和化学吸附	178
6.1.4 吸附几率、吸附(弛豫)时间和吸附等温线	181
6.2 薄膜的生长模式	183
6.2.1 核形成与生长	184
6.2.2 连续薄膜的生长	187
6.3 薄膜的外延生长	188
6.3.1 晶格匹配与外延缺陷	188
6.3.2 外延薄膜的成分控制	189

6.3.3 外延生长的特点	190
6.4 非晶薄膜	192
6.5 薄膜的内部应力与附着强度	193
6.5.1 热应力和生长应力	194
6.5.2 附着力	195
6.6 台阶覆盖率	196
习题	196
参考文献	197

7 物理气相沉积 I——真空蒸发镀膜

198

7.1 真空蒸发原理	198
7.1.1 真空蒸发物理过程	199
7.1.2 蒸发热力学	199
7.1.3 残余气体对蒸发过程的影响	202
7.1.4 蒸发粒子在衬底的沉积	204
7.2 物质的蒸发特性及膜厚分布	204
7.2.1 点蒸发源	204
7.2.2 小平面蒸发源	205
7.2.3 细长平面蒸发源	206
7.2.4 环状蒸发源	207
7.2.5 蒸发源与衬底的相对位置	208
7.3 蒸发源的类型	210
7.3.1 电阻蒸发源	210
7.3.2 电子束蒸发源	213
7.3.3 高频感应蒸发源	215
7.3.4 激光熔融蒸发源	215
7.4 特殊的真空蒸发	215
7.4.1 分子束外延法	215
7.4.2 电弧蒸发法	217
7.4.3 热壁法	218
7.4.4 离子镀	218
习题	219
参考文献	219

8 物理气相沉积 II——溅射镀膜

221

8.1 溅射原理	221
8.1.1 溅射过程	221
8.1.2 溅射机理	223
8.1.3 溅射特性	224

8.1.4 辉光放电	229
8.2 溅射技术	234
8.2.1 二极直流溅射	234
8.2.2 射频溅射	235
8.2.3 磁控溅射	236
习题	243
参考文献	243
9 化学气相沉积	244
9.1 概述	244
9.2 化学气相沉积基本原理	245
9.3 化学气相沉积热力学	247
9.4 化学气相沉积动力学	248
9.5 化学气相沉积成膜的影响因素	252
9.6 常用化学气相沉积工艺简介	253
9.6.1 常压和低压化学气相沉积	253
9.6.2 等离子体化学气相沉积	255
9.6.3 金属有机化合物气相沉积	257
9.6.4 激光(诱导)化学气相沉积	259
9.7 几种常用薄膜的制备	260
9.7.1 二氧化硅(SiO_2)薄膜	260
9.7.2 氮化硅(Si_3N_4)薄膜	261
9.7.3 氮化钛(TiN)薄膜	262
9.7.4 硅化钨(WSi_x)薄膜	263
9.7.5 多晶硅薄膜	264
9.7.6 金属薄膜	265
习题	266
参考文献	266

第3篇 基于固态转变的材料加工

10 塑性成形的物理基础	269
10.1 冷塑性成形	269
10.1.1 单晶体的塑性变形机理	270
10.1.2 多晶体的塑性变形机理	272
10.1.3 合金的塑性变形	274
10.1.4 冷塑性变形对组织性能的影响	275
10.2 热塑性成形	277
10.2.1 软化	278
10.2.2 热塑性变形机理	282

10.2.3	合金的热塑性变形	283
10.2.4	热塑性变形对组织性能的影响	283
10.3	超塑性成形	285
10.3.1	超塑性变形的特点	285
10.3.2	超塑性变形的类型	286
10.3.3	超塑性变形对组织性能的影响	288
10.3.4	超塑性变形机理	289
10.4	塑性和变形抗力的影响因素	290
10.4.1	塑性指标和塑性图	290
10.4.2	塑性的影响因素	291
10.4.3	提高塑性的途径	300
10.4.4	变形抗力及其影响因素	300
	习题	302
	参考文献	303

11 塑性成形的力学基础 304

11.1	基本假设	304
11.2	应力分析	305
11.2.1	外力、内力、应力和点的应力状态	305
11.2.2	直角坐标系中一点的应力状态	306
11.2.3	张量	306
11.2.4	任意斜面上的应力	307
11.2.5	主应力及应力张量不变量	309
11.2.6	主切应力和最大切应力	312
11.2.7	应力球张量和应力偏张量	314
11.2.8	八面体应力和等效应力	316
11.2.9	应力莫尔圆	318
11.2.10	应力平衡微分方程	321
11.3	应变分析	323
11.3.1	应变的概念	323
11.3.2	应变与位移的关系	326
11.3.3	应变张量分析	328
11.3.4	应变协调方程	334
11.3.5	平面问题和轴对称问题	335
11.3.6	应变增量和应变速率	338
11.3.7	有限变形	340
11.4	屈服准则	342
11.4.1	Tresca 屈服准则	342
11.4.2	Mises 屈服准则	343

11.4.3	屈服准则的几何表示	345
11.4.4	两屈服准则的统一表达式	348
11.5	本构方程	350
11.5.1	塑性应力应变关系	350
11.5.2	弹性应力应变关系	351
11.5.3	塑性变形的增量理论	352
11.5.4	塑性变形的全量理论	355
11.6	塑性成形问题求解方法	356
11.6.1	主应力法	357
11.6.2	主应力法的应用——长矩形板镦粗时的变形力和平均压力	357
	习题	359
	参考文献	362

12 粉末冶金原理

12.1	概述	363
12.2	粉末的制备及表征	364
12.2.1	粉末的制备	364
12.2.2	粉末的表征	375
12.3	粉末的成形	378
12.3.1	成形前粉末的预处理	378
12.3.2	粉末压制成形原理	378
12.4	粉末的烧结	386
12.4.1	烧结的基本过程	386
12.4.2	烧结的热力学问题	387
12.4.3	烧结驱动力	388
12.4.4	物质迁移及烧结动力学	390
12.4.5	烧结过程的孔隙变化	396
12.5	粉末冶金材料的结构、特性及工程应用	397
12.5.1	粉末冶金材料的性能特点	397
12.5.2	粉末冶金材料的工程应用	399
	习题	400
	参考文献	401

第 1 篇 基于液—固转变的 材料加工



液态金属与凝固结晶

几乎所有金属制品在其生产制造过程中都要经历一次或多次熔化和凝固过程。金属处于液态时的性状对后续的加工过程和制成品的内部组织与性能会有重要的影响。本章首先讨论液态金属的结构与性质,分析和比较金属从固态熔化为液态时的体积和结构变化,液态金属的黏度与表面张力及其影响因素;然后讨论金属从液态向固态转变的热力学和动力学条件,主要是凝固结晶过程中形核与长大的规律及固液界面的结构与形态。

1.1 液态金属的结构和性质

液态是物质处于固态和气态之间的中间状态。目前人类对液态物质的认识远没有对气态和固态的认识深入。气态是组成物质的原子或分子充满整个空间或容器的无序态。绝大多数固态物质是晶体,其组成物质的原子或分子在空间呈周期性规则排列,是一种高度有序的状态。那么液态呢?是有序的还是无序的?这是本节要讨论的主要内容。

材料加工过程中遇到的液态金属都是从固态熔化而不是从气态液化得到的。另外,从温度上看,材料加工过程中遇到的液态金属的温度不会超过其熔点 T_m $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。表 1-1 列出了几种常用金属的熔点与沸点。从表 1-1 可以看出,除 Mg、Zn 等少数金属之外,液态金属的温度总是接近熔点而远离沸点的。因此,有理由相信,液态金属应该接近固态而不是气态。

表 1-1 几种常用金属的熔点与沸点

$^{\circ}\text{C}$

金属	Sn	Zn	Mg	Al	Ag	Cu	Mn	Ni	Fe	Ti
熔点 T_m	231	419	649	660	960	1084	1224	1455	1536	1660
沸点 T_b	2750	911	1105	2500	2164	2570	2050	2890	2876	3260

1.1.1 金属从固态熔化为液态时的变化

首先让我们来看一看金属熔化时的体积变化。表 1-2 是常用金属熔化时的相对体积变化 $\frac{V_l - V_s}{V_s}$,其中 V_l 和 V_s 分别为液态和固态时的比容(比容 = $\frac{1}{\text{密度}}$)。

表 1-2 几种常用金属熔化时的体积变化

%

金属	Sn	Zn	Mg	Al	Ag	Cu	Fe	Ti
$(V_l - V_s)/V_s$	2.6	6.9	4.2	6.6	4.99	4.2	4.4	3.2

从表 1-2 可以看到,金属熔化时的体积增大量在 3%~7% 的范围内。而金属从绝对零度到熔点温度的固态体积膨胀量几乎都约为 7%。图 1-1 是金属的热膨胀系数与熔点温度的关系。若按体积膨胀 7% 计算,则有:

$$\alpha_v T_m = 0.07 \quad (1-1)$$

$$\alpha_l T_m = 0.0228 \quad (1-2)$$

式中, α_v 和 α_l 分别为金属的平均体膨胀系数和平均线膨胀系数。

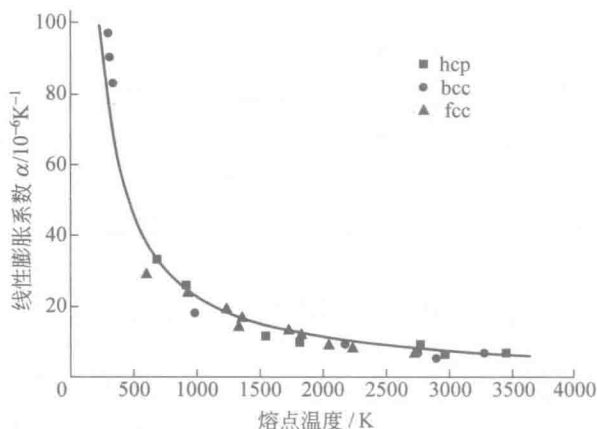


图 1-1 金属的热膨胀系数与熔点温度的关系

图 1-1 中实线为按 $\alpha_l T_m = 0.0228$ 作出的。可见大多数金属的 α_l 均在该线附近。因此,金属熔化时的体积膨胀一般不超过固态时的体积变化总量。固态金属的结构可以看作由理想的晶体结构加上缺陷(空穴、间隙原子、位错、晶界等)组成。随着温度的升高,固态金属中缺陷的数量增加,活动性增大。当超过熔点温度时,缺陷的巨大数量和活动性终于使固体结构溃散。但由于体积变化不大,液态金属的结构不可能变为完全无序。

从金属键的本质可知,金属原子的结合主要靠带正电荷的离子和在正离子之间高速运动着的共有电子之间的静电引力。同时,由于存在正离子之间以及电子之间的静电斥力,原子间存在着一定的作用力之间和能量之间的平衡关系。在一定的温度下,这些作用力和能量的大小与原子之间的距离有关,可用图 1-2 所示的双原子模型来表示。当 B 原子距 A 原子的距离为 R_0 时,引力与斥力相等,B 原子所受合力为零,势能 W 最小,B 原子处于最稳定的状态。

由于随距离的缩短斥力比引力增长得快,当 $R < R_0$ 时,B 原子受到的合力是 A 原子的斥力,而且距离进一步缩短时,斥力增加很快。受斥力场的作用,势能随之增加。从力的作用看,斥力趋向于把 B 原子推回 R_0 处。而用能量的观点,则是 B 原子趋向于降低势能。同样,由于随距离的增加,斥力比引力减小得快。当 $R > R_0$ 时,B 原子受的合力是引力,势能也倾向于使两原子趋向接近。因此, R_0 是两原子之间的平衡距离。如果假定 A 原子固定,则 B 原子以 R_0 为平衡位置。任何偏离平衡位置都引起原子所受引力和斥力的不平衡,势能升高,最后仍趋向势能最低的平衡位置。

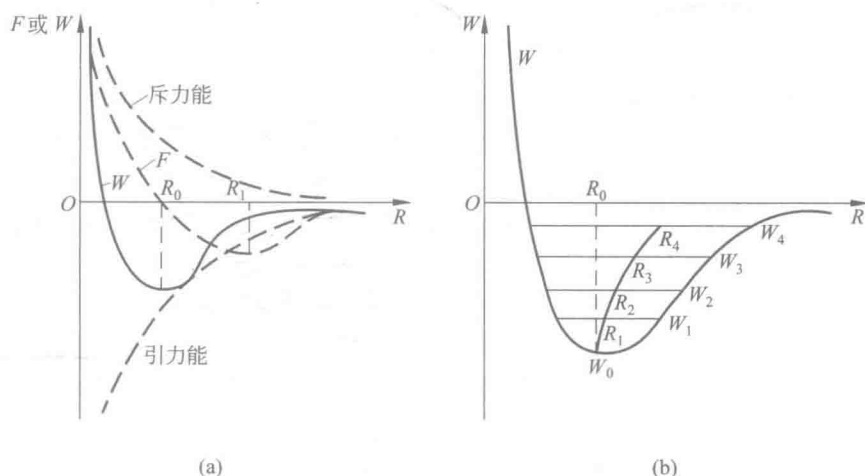


图 1-2 双原子作用模型

(a) 原子间的作用力; (b) 加热时原子间距和原子势垒的变化

原子在平衡位置上不停地振动着。当温度升高时,振动频率增加,同时振幅也加大。在双原子模型中(图 1-2(b)),假定位于坐标原点的 A 原子固定,而右边的 B 原子可自由振动。当温度升高时,B 原子的自由振幅加大。此时,如果 B 原子以 R_0 为中心向左与向右振幅加大的尺度都一样的话,其平衡位置仍然是 R_0 ,这样就不会出现膨胀。但实际上,原子之间的势能与原子间距的关系是极不对称的,向右是水平渐近线,向左是垂直渐近线。这就意味着当温度升高使能量从 W_0 升高到 W_1 、 W_2 、 W_3 时,原子之间的距离也将由 R_0 增大到 R_1 、 R_2 、 R_3 。也就是说,原子之间的距离随温度升高而增大。从图 1-2(b)可以看出,造成这种情况的原因是,当原子发生振动,相互靠近时,产生的斥力比远离时产生的引力大,从而使原子间势能增大,上述原子之间作用力的不对称也表现得越突出。因此,随着温度的升高,金属就会膨胀。但这种膨胀只改变原子间的距离,而不改变原子间排列的相对位置(晶格结构)。

除了原子间距离的加大造成金属的膨胀之外,自由点阵—空穴的产生也是造成金属膨胀的重要原因。在实际金属中,原子间的相互作用将产生一定大小的势垒。由于势垒的存在,限制了原子的活动范围,使其在一定的点阵位置附近以振动的形式运动。随着温度的升高,会有越来越多的原子的能量高于势垒。这部分原子就可以克服周围原子的束缚,跑到金属表面或原子之间的间隙中去。原子离开其点阵位置之后,留下来的自由点阵位置称为空穴。空穴产生后,造成局部势垒下降,使得邻近原子进入空穴位置,这样就造成空穴的移动。温度越高,原子的能量越高,产生的空穴数越多,金属的体积膨胀量也越大。在熔点附近,空穴的数目可以达到原子总数的约 1%。

当把金属的温度加热到熔点时,会使金属的体积突然膨胀 3%~7%。这种突变反映在熔化潜热上,即金属在此时吸收大量的热量,温度却不升高。从前面的分析可以看到,这种突变不可能完全是由于原子间距的增大或空穴数量的增大造成的,因为它们不可能突变,而只能理解为原子间结合键的突然破坏。关于金属从固态向熔体转变的机制,可以由两种途径来实现。第一种途径,通过单个原子的分离来实现,即



第二种途径,熔化过程由原子集团的逐渐分裂来实现,即



其中, a 为原子或原子集团;下标 $i, n-1, n$ 分别表示原子集团中的原子数。

在实际的熔化过程中,不排除两种方式并存的可能性,但是从能量最小原则可以判断,应优先采取第二种途径。

1.1.2 液态金属的结构

如上所述,金属熔化是由于金属键的破坏,金属原子可以摆脱周围原子的束缚而自由运动。对于纯金属的理想单晶体,熔化过程将在熔点温度下恒温进行。实际金属一般都是多晶体,同时晶体内存在大量的缺陷,熔化过程在晶界和晶体缺陷处首先发生。由于晶界和晶体缺陷处原子的能量较高,无需加热到熔点,这些地方的原子就能越过势垒而运动,熔化过程随即发生。因此,熔化过程在熔点以下就已经开始。晶粒尺寸越细,晶内缺陷越多,熔化开始温度越低。熔点温度实际上是熔化结束温度。液态金属可以过冷到熔点以下不发生凝固,但固态金属不可能过热到熔点以上不熔化。

由于表面上原子排列的不完整性,使得表面上原子的能量较内部原子的能量高,表面原子摆脱键能束缚就比较容易,熔化也可以在熔点以下的较低温度发生。如果固态金属的尺寸很小,达到纳米量级,这种表面易熔化的效应就可以从宏观上表现出来,金属微粒的熔点随其尺寸减小而下降(如图1-3所示)。因此,通常所说的熔点温度,不光是指熔化过程的上限温度,而且还有一个只针对大块固体而言的限制条件。在当今的纳米技术、纳米材料的时代,更应该对熔点温度与材料颗粒尺寸的关系有清楚的认识。

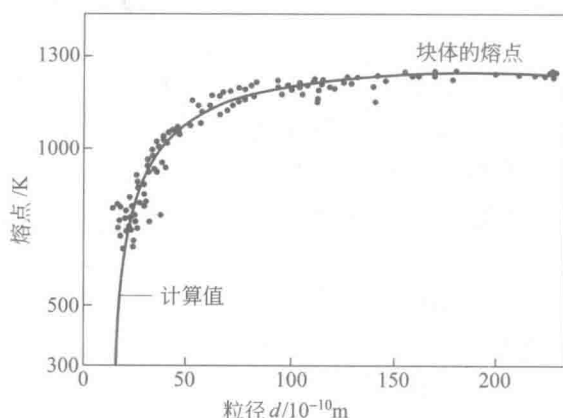


图 1-3 Au 微粒的熔点与粒径的关系

按式(1-4)的模型,实际金属的熔化过程可描述为:金属加热,温度升高,晶格尺寸增大(膨胀),缺陷增加 $\Rightarrow$ 晶界原子大量脱离晶格束缚,晶粒分离,晶内缺陷进一步增多、加大 $\Rightarrow$ 晶粒内部缺陷处的原子大量脱离晶格束缚,晶粒解体为小颗粒直至原子集团。当晶粒解体到小颗粒的尺寸达到图1-3所示纳米量级以下时,由于表面效应将引起熔点的显著下降,熔化过程将在“过热”条件下迅速发生,这时固体将不复存在。

由上面的分析可以看到,若纯金属熔化成熔体,其结构将由原子集团、游离原子和空穴组成。其中原子集团由数量不等的原子组成,其大小为亚纳米(10^{-10} m)量级。在原子集团