

高等教育“十二五”规划教材

材料成形原理

Cailiao Chengxing Yuanli

郭学锋 张绪平 田爱芬 杨 志 崔红保 等编

中国矿业大学出版社



划教材

材料成形原理

郭学锋 张绪平 田爱芬 杨志
崔红保 等 编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本教材绪论介绍材料加工发展概况和课程性质。第一编讲解材料凝固理论;第二编讲解塑性成形理论;第三编讲解材料焊接成形热过程;第四编讲解塑料和粉末冶金成形基础。

本教材适合我国高等院校材料科学与工程或机械工程大类材料成形专业学生使用,也可以作为机械类专业、电气类专业和矿业工程专业学生用参考书,或作为相关技术专业人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形原理 / 郭学锋等编. — 徐州:中国矿业大学出版社,2013.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2135 - 3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第274211号

书 名 材料成形原理
编 者 郭学锋 张绪平 田爱芬 杨 志 崔红保
责任编辑 杨 洋
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 27.25 字数 680 千字
版次印次 2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

制造金属机械零件或机械零件毛坯的主要方法包括铸造、塑性加工、焊接、机械加工和粉末冶金五种方法。

铸件是将金属液体浇入铸型,随后发生金属液体冷却和凝固而形成的机械零件或机械零件毛坯。从金属液体到铸件,除了发生金属的冷却和凝固,没有任何多余的人工工序。因此,凝固过程对于铸件的形成至关重要。

塑性成形加工是将金属加热后,通过适当的变形制备成为符合要求的机械零件或机械零件毛坯。根据加热温度是否高于被加工金属的再结晶温度,可以分为热(变形)和冷(变形)加工。根据变形程度和变形的复杂程度,变形加工可以一步或多步成形。

焊接不能像铸造一样直接制造出非常复杂的零件,但是利用焊接工艺,不仅可以直接将金属原材料焊接成机械零件或毛坯,而且可以将铸件连接起来,形成更为复杂的机械零件。

机械加工是一种后续加工,利用机械加工可以将铸件、焊件和塑性加工工件进一步精密加工成为机械零件。

粉末冶金是通过粉末压坯和烧结两道工艺形成机械零件的加工工艺。

除了上面提到的五种加工工艺,在后续发展过程中还出现了多种复合工艺。例如,将铸造和挤压复合后形成的半固态铸造和挤压铸造,将铸造技术与粉末冶金相结合的喷射成形技术等。

对于一个确定的机械零件,其制造方法并非唯一。采用任何一种方法,取决于其制造工艺的复杂程度和费用。铸造工艺不仅可以制造复杂零件,同样可以制造一些超薄和高精度零件。由此可见,深入开发铸造技术以满足更多的要求,需从铸件形成过程的基础理论入手,深入分析铸造工艺的优缺点和极限。

其他几种成形工艺也各有特点,何时采用何种方法需要综合考虑。因此,深入学习本课程内容,对于合理选择机械零件或机械零件毛坯的加工工艺十分重要。为了理解每种工艺的特点,必须学透相应的基本原理,这也是本教材的目的。

材料成形与控制专业现状包括铸造工艺与设备(铸)、塑性加工工艺与设备(锻)和焊接工艺与设备(焊)三个专业,属于宽泛培养。为此,相继出版了如邢建东编写的《材料成形原理》宽泛教材。教育改革,专业课程学时压缩,一般课

程学时都在 20~36 学时左右。目前普遍采用的办法是简编教材,压缩学时。如果仅仅从学时考虑,材料成形原理课时有限,教材篇幅不应很长。然而,每次拿起国外的教材,尤其是美国教材,虽然不同学科教材内容千差万别,但是其共同点是内容多,篇幅长,系统性强。同样的情况在初中和高中也是如此。教师讲授的学时不多,而且具有跳跃性。学生根据自己的爱好,在教师引导下或专注于某一方面,可以进行深入系统学习。因此,一本系统的教材,既可以用于短学时宽泛教育,也可以用于部分学生的系统训练。我们尝试性借用了这一概念,结合我们几个煤矿类学校的实际情况和社会的需求,编写了本教材,分为四篇内容。教师可以选讲,学生也可以选学(或通篇自学)。这种思路是否正确,需要时间来验证。

本教材由四编组成。第一编凝固原理由河南理工大学郭学锋、崔红保、黄丹和王英共同编写。其中崔红保编写 1.2 节、1.3 节、2.1 节,黄丹编写 1.4 节、1.5 节,王英编写 2.2 节、2.3 节;第二编塑性变形原理由中国矿业大学张绪平、任耀剑编写,其中第 3 章由任耀剑编写,第 4 章和第 5 章由张绪平编写;第三编焊接成形热过程与技术由西安科技大学杜双明、田爱芬编写,其中第 6 章由田爱芬编写,第 7 章由杜双明编写;第四篇其他成形原理由辽宁工程技术大学杨志、付大军编写,其中第 8 章由杨志编写,第 9 章和第 10 章由付大军编写。全书由郭学锋统稿。

作者
2013 年 4 月

目 录

第一编 凝固原理

第 1 章 材料凝固原理	3
1.1 材料凝固概述	3
1.2 液态金属的结构和性质	4
1.3 液态金属充型能力	17
1.4 凝固基本理论	30
1.5 铸件的凝固	57
第 2 章 凝固伴生现象	75
2.1 偏析	75
2.2 气孔	86
2.3 收缩	100
思考题	132
参考文献	133

第二编 塑性变形原理

第 3 章 塑性变形材料学基础	137
3.1 金属的塑性	137
3.2 金属塑性加工的宏观规律	166
思考题	177
第 4 章 塑性变形力学基础	178
4.1 应力分析与应变分析	178
4.2 金属塑性变形的本构方程	195
4.3 平面问题和轴对称问题	209
4.4 金属塑性加工的摩擦与润滑	237
思考题	240

练习题·····	241
第5章 金属塑性加工变形力计算方法 ·····	243
5.1 金属塑性加工变形力的主应力法·····	243
5.2 滑移线理论及应用·····	251
思考题·····	279
练习题·····	279
参考文献·····	281

第三编 焊接成形热过程

第6章 材料焊接成形热过程 ·····	285
6.1 材料成形热过程的基本特点·····	285
6.2 材料加热过程的热效率·····	286
6.3 焊接温度场·····	289
6.4 焊接热循环·····	300
6.5 焊接冶金过程·····	303
思考题·····	350
第7章 常用金属材料的焊接 ·····	351
7.1 金属的焊接性·····	351
7.2 碳钢的焊接·····	353
7.3 合金钢的焊接·····	354
7.4 有色金属的焊接·····	362
7.5 焊接应力与变形·····	366
思考题·····	374
参考文献·····	376

第四编 其他成形原理与成形技术

第8章 塑料成形技术 ·····	379
8.1 塑料的组成、分类及主要成形方法·····	379
8.2 塑料成形理论基础·····	390
思考题·····	394
第9章 粉末冶金及陶瓷成形技术 ·····	395
9.1 粉末冶金及陶瓷成形过程概论·····	395
9.2 原材料加工·····	400

目 录

9.3 粉末成形	407
9.4 烧结	411
9.5 粉末合金及陶瓷成形技术的新发展	422
思考题.....	427
参考文献.....	427

第 一 编

凝 固 原 理

第1章 材料凝固原理

金属从高温可流动的液态冷却到较低温度的不具有流动性的固态称为凝固。凝固是一种非常复杂的过程,包括物理、化学和物理化学的变化和反应。根据冷却条件的不同,凝固过程可以选择不同的路径。例如,凝固过程中通过结晶成核和长大可以形成单晶体或多晶体。凝固过程中如无结晶,可以形成金属玻璃,当然也可以形成晶体与玻璃的混合物。凝固过程中,如发生结晶,就是一种相变过程。伴随着凝固和相变会发生一系列的伴生现象。材料的凝固原理就是研究凝固前后金属液态的结构、凝固热力学和动力学与凝固伴生现象的一门学科。而铸件形成过程中的凝固过程,除了研究凝固本身之外,还涉及金属熔体的充型过程和凝固过程的伴生研究。

1.1 材料凝固概述

金属凝固过程是一个非常复杂的物理和物理化学过程,如凝固过程中的温度变化、体积和尺寸变化、结构变化、热量和熵值变化、物理冶金反应、结晶和潜热的释放等。

凝固过程中会发生温度的变化。温度变化不仅是一个温度连续降低的过程,如果发生结晶,凝固时会因潜热放出,出现短时温升,也就是会出现再辉。凝固时过冷度越大,再辉就越明显。有兴趣的学生可以查阅相关金属深过冷研究的相关内容。

凝固过程中还会发生体积的变化。一般情况下,由于温度降低,凝固时体积减小。但是,也会发生体积膨胀的现象。例如,灰铸铁凝固过程中因石墨析出会引起膨胀,金属铋凝固过程中也会发生膨胀等。

金属凝固过程中若发生结晶,结晶时会放出潜热而引起温度的升高。这个问题可以反过来考虑,金属加热时由固态变为液态,部分原子之间的结合被破坏而吸收了较多的能量。反过来,金属熔体凝固过程中形成完整结合键,会释放出能量,而引起温度的升高。这种温度升高现象称为再辉,放出的能量称为潜热。如果凝固过程中金属液体冷却到玻璃化温度或以下,金属不再发生结晶,而是直接转变成为金属玻璃。由此可见,金属玻璃与金属熔体结构上没有很大的差别,还是长程无序。因此,有时候也被称为不能流动的金属熔体,或者是发生凝固的金属熔体。

金属发生凝固时,金属熔体的结构发生变化。若转变成金属玻璃,金属熔体短程有序,结构原子集团变大,原子间距缩短,一般情况下体积减小。若发生结晶,金属的结构会发生变化,从短程有序转变为具有特定晶体结构的长程有序。结晶时,如果形成一个晶核,可以生长成单晶体。如果单晶体生长界面为平界面,晶体内部缺陷较少,这样的单晶体一般称为物理单晶体。物理单晶主要用于功能材料,也就是主要使用其功能特性。如果生长过程中界面失稳,界面不再保持平界面,形成的单晶为工业单晶,主要使用其结构性能,如飞机用的

单晶叶片,这类单晶被称为工业单晶。通常情况下,金属结晶都会形成多晶体,结晶时一般按照树枝晶生长。

一般情况下,金属凝固过程中会发生溶质的再分配,最后成分未必均匀。如果较大范围内成分不均匀,一般称为宏观偏析。如果在晶体内部存在成分不均匀,一般称为微观偏析。

凝固过程中原子“整齐化”排列过程会引起熵值的变化。发生结晶时,由于原子排列的整齐化,熵值减小。

由此可见,凝固过程是一个十分复杂的过程,牵涉到成分的变化、能量的变化和动量的变化。

1.2 液态金属的结构和性质

铸造是将金属加热到液态,使其具有流动性,然后浇入到具有一定形状的型腔铸型中,液态金属在重力场或外力场(压力、离心力、电磁力等)的作用下充满型腔,冷却并凝固成具有型腔形状的铸件。液态金属的凝固过程所形成的一次结晶组织关系到铸件和铸锭的性能。如果一次结晶过程中缺少有效措施以防止伴生的铸造缺陷,则将严重的损害铸件或铸锭的性能。而金属凝固过程中的一些现象,如结晶、溶质的传输、晶体长大、气体溶解和析出、非金属夹杂物的形成、金属体积变化等都与液态金属结构及其物理性质有关。所以,研究液态金属的结晶过程和掌握好结晶的基本原理十分重要,而且对于优化铸件或铸锭的结晶组织与性能以及预防某些铸造缺陷的产生具有重要的意义。因此,有必要先对液态金属的结构了解一番。液态金属的研究可从两个方面着手:一是间接方面,金属由液态变成固态,从这两者物理性质变化的差异来判断液态金属的结构;另一方面是直接利用高温 X 射线衍射的方法来研究液态金属的结构。

1.2.1 金属的熔化

(1) 金属的加热膨胀

晶体的结构和性能主要取决于组成晶体的原子结构和它们之间的相互作用力与热运动。晶体中原子并不是固定不动的,只要温度高于热力学温度零度(0 K),每个原子皆在平衡位置附近振动,即所谓热振动。温度升高时振动能量增加,振动频率和振幅加大。原子间距离将随温度的升高而增加,即产生热膨胀。温度升高时,原子的振动能量增大。原子作热振动时,一旦偏离平衡位置,就引起势能升高、动能降低。当动能全部转化为势能时,原子则不能继续偏离,此时所能偏离的距离就是原子的最大偏离距离。以后在引力或斥力作用下,原子向平衡位置返回运动,势能又逐渐转化为动能。到达平衡位置时,势能为最小值,动能达到最大值。在动能作用下,原子继续向前运动,直到动能又全部转化为势能。如此反复,振动不已。

此外,晶体中每个原子的振动能量不是均等的,振动方向杂乱无章,每个原子在三维方向都有相邻的原子,经常相互碰撞,交换能量。在碰撞时,有的原子将一部分能量传给别的原子,而本身的能量降低了。结果是每时每刻都有一些原子的能量超过原子的平均能量,有些原子的能量则远小于平均能量。这种能量的不均匀性称为能量起伏。由于能量起伏,一些原子则可能越过势垒跑到原子之间的间隙中或金属表面,而失去大量能量,在新的位置上作微小振动。一旦有机会获得能量,又可以跑到新的位置上。如此下去,它可以在整个晶体

中“游动”，这个过程称为蒸发，不同金属原子之间相互扩散就是内蒸发造成的。当结点上的原子跑到间隙中时，就会把周围的原子挤开一些。离位原子可能会跑到金属表面，甚至跑出金属以外，造成金属的蒸发。除原子间距增大造成膨胀之外，空穴的产生也是物体膨胀的原因之一。原子离开点阵后，留下了自由点阵——空穴。空穴的产生使局部地区能垒降低，邻近的原子则进入空穴位置，造成空穴的移动。这样，在实际晶体中，除按一定点阵排列的原子外，尚有离位原子和空穴。空穴首先产生于金属表面，再从表面向内部扩展。温度越高，原子的能量越大，产生的空穴数目越多，从而使金属膨胀。在熔点附近，空穴数目可达原子总数的10%。

(2) 金属的熔化

实验证明，金属的熔化是从晶界开始的。由于晶界上原子排列的相对不规则性，许多原子偏离平衡位置，具有较高的势能。把金属加热到熔点附近时，离位原子数大为增加。在外力的作用下，这些原子作定向运动，造成晶粒间的相对流动，称为晶界黏滞流动。晶粒内部也有相当数量的原子频频跳跃、离位，空穴数大为增加。接近熔点时，晶界上的原子则可能脱离原晶粒表面，向邻近晶粒跳跃，晶粒逐渐失去固定形状。将金属加热至熔点时，金属体积突然膨胀3%~5%，等于固态金属从热力学温度零度(0 K)加热到熔点前的总膨胀量。金属的其他性质如电阻、黏性等发生突变，吸收大量热能——熔化潜热，而金属的温度不升高。这些突变现象是不能仅仅用离位原子和空穴数目的增加加以解释的，因为空穴数目的增加不可能是突变的。因此，对于这种突变，应当理解为金属已熔化，已由固态变为液态，发生状态改变而造成的。

1.2.2 液态金属的结构

目前，获得液体结构信息的主要方法是高温 X 射线衍射和中子衍射。理想晶体的 X 射线衍射谱线一般是由一组明锐而对称的衍射峰组成。作为对比，气体的 X 射线衍射谱没有明锐的峰，而是一组连续的谱线。后者可以解释为低密度气体中不存在任何规则排列的原子。液体的 X 射线衍射谱线是一种在空间和时间上的平均结果，如图 1-1 所示。

图 1-1 中， Nf^2 曲线对应于(理想)气体； I 为 X 射线在 2θ 处的衍射强度； λ 为入射光速波长； N 为原子总数； f 为原子散射因子。

液体介于气体和固体之间，大量的实验数据证明它更接近于固体，在接近熔点附近更是如此。首先，从熔化潜热和汽化潜热的对比来看，汽化潜热 L_g 与熔化潜热 L_l 之间的比值(L_g/L_l)是很大的，如表 1-1 所示。以面心立方结构为例，其汽化潜热比熔化潜热约大 28 倍，这就意味着将固体原子完全变成气态所需的能量要比将同样的原子从固态转变成液态所需的能量多 28 倍。

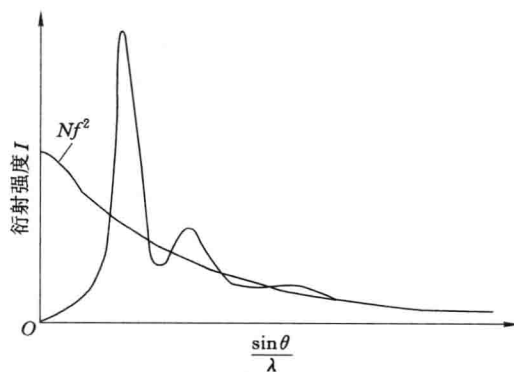


图 1-1 液体的 X 射线衍射图样

表 1-1

一些金属熔化潜热和汽化潜热的比较

金属	晶体结构	熔点/°C	熔化潜热 $L_l/(J \cdot mol)$	沸点/°C	汽化潜热 $L_g/(J \cdot mol)$	L_g/L_l
Al	面心立方	660.2	10 676	2 450	284 534	26.7
Au	面心立方	1 063	12 686	2 966	342 522	27.0
Cu	面心立方	1 083	13 021	2 595	305 636	23.5
Pb	面心立方	327.4	5 107	1 737	177 520	34.8
Zn	密排六方	419.5	6 698	906	116 727	17.4
Cd	密排六方	321	6 112	765	19 434	3.2
Mg	密排六方	651	9 043	1 103	131 758	14.6

以金属铝为例,其在固态时的配位数为 12,而其在气态时为 0。因此,将金属铝从固态转变成气态,就意味着要破坏一个原子周围 12 个近邻的金属键。每个结合键由两个原子来承担,故一个原子其结合键的数量为 6,在金属内部每个原子的潜热应等于破坏 6 个结合键所做的功,也就是 6 个结合键的能量。当金属铝在熔化时,其结合键不完全被破坏,可以认为其结合键有 $6 \times (1 \div 28) \approx 0.2$ 个被破坏,或者每个结合键被削弱了 $1/28$ 。从上例可以看出,液态与固态相比,其原子结合键的削弱是不大的。由此可见,液体的结构与固体的结构是有相似之处的。固体、液体与气体不同之处的计算机模拟结果如图 1-2 所示。

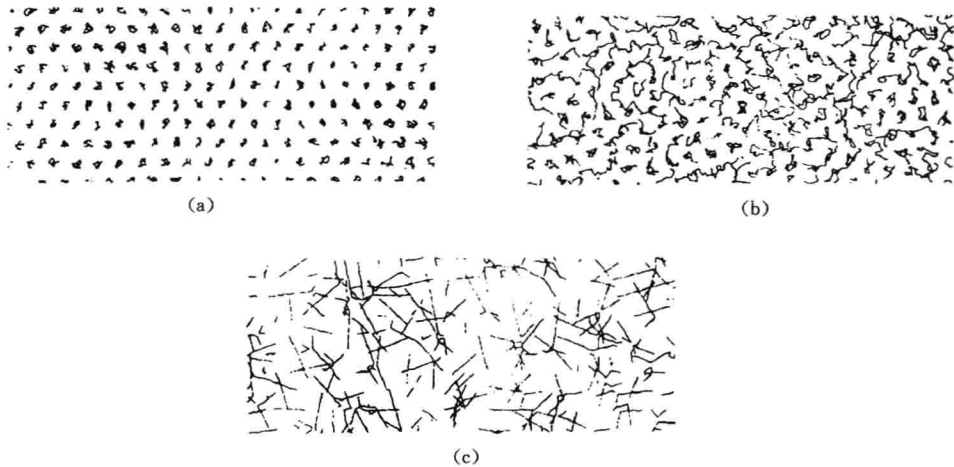


图 1-2 固体、液体和气体中分子运动轨迹的计算机模拟结果

(a) 固体;(b) 液体;(c) 气体

表 1-2 为部分金属熵值的变化,表中列出了这些金属从 25°C 到熔点间熵值变化和熔点时金属由固态转变为液态时熵值的变化及它们之间的比值。可见,在金属原子由固态转变为液态时,其熵值的增加相对于熔点前的熵值并不算大,特别对于金属活性较强的元素更是如此。熵的增值越大,意味着金属由固态转变为液态时原子的排列结构紊乱性越大;反之;其紊乱性就越小。所以,从金属由固态转变为液态过程中熵的增值来看,可以再次说明在熔点附近金属的液态结构与固态结构相差不会太大。

表 1-2 某些金属熔化时熵值的变化

金属	从 25 °C 到熔点熵值变化 $\Delta S/(J/K)$	熔点时的熵值变化 $\Delta S_m/(J/K)$	$\Delta S_m/\Delta S$
Cd	4.53	2.46	0.54
Zn	5.45	2.55	0.47
Al	7.51	2.75	0.37
Mg	7.54	2.32	0.31
Cu	9.79	2.30	0.24
Au	9.78	2.21	0.23
Fe	15.50	2.00	0.13

1.2.3 理想金属的液态结构

理想模型的概念对物质性能的研究十分重要,可以定义一个假想的物质,其具有实际物质的特性,以便进行理论简化和数学处理,这种方法的优点在于物理概念清晰。对气体和固体来说,这种理想模型早已确定。与固体和气体不同,对液体的行为描述遇到了很大的困难。从微观上来看,液体最大的特点是它的剪切模量为零,即它具有流动的能力。与固体相应的性质相比,液体的黏度很低而扩散率很高。从原子尺度来讲,由于周围原子热运动产生的密度涨落使原子很容易迁移。考虑某一时刻液体中的一个原子,它将与周围原子相互作用,并且像固体中原子一样进行着热振动,在下一时刻,它有可能像气体中的原子一样进行自由移动。这一原子反复进行这种运动循环,并从一个位置迁移到另一个位置。迄今人们对液态金属结构的特点有如下共识:

① 原子间仍保持较强的结合能,因此原子排列在较小距离内仍具有一定规律性,且其平均原子间距增加不大。金属固体是由许多晶粒组成,液体则是由许多原子集团所组成,在原子集团内保持类似固体的排列特征,而在原子集团之间的结合处则受到很大破坏。这种仅在原子集团内的有序排列称为近程有序排列。

② 由于液体中原子热运动的能量较大,每个原子在三维方向都有相邻的原子,经常相互碰撞,交换能量。在碰撞时,有的原子将一部分能量传给别的原子,而本身的能量降低了。结果是每时每刻都有一些原子的能量超过原子的平均能量,有些原子的能量则远小于平均能量。这种能量的不均匀性称为能量起伏。

③ 液体中存在的能量起伏造成每个原子集团内具有较大动能的原子能克服邻近原子的束缚(原子间结合所造成的势垒),除了在集团内产生很强的热运动(产生空位及扩散等)外,还能成簇地脱离原有集团而加入到别的原子集团中,或组成新的原子集团。因此所有原子集团都处于瞬息万变的状态,时而长大时而变小,时而产生时而消失,此起彼落,犹如在不停顿地游动。这种结构的瞬息变化称为结构起伏。

上述三个特点决定了液态金属的基本特征为:① 有固定的体积;② 有很好的流动性;③ 各种物理化学性质接近于固态,而远离气态。

目前,人们还未找到理想的液体模型,这在很大程度上造成描述液体状态的困难。然而最近人们用相对简化的硬球模型对液态金属的一些性质进行了相当成功的解释,在这一模

型中原子是作为一种惰性硬球来描述和处理的。

1.2.4 液态金属结构的理论模型

(1) 无规密堆硬球模型(Bernal 多面体)

Bernal 的无规密堆硬球模型认为,这些多面体相互关联,彼此分享相接触的多边形面及其交线,构成了液体的空间网络拓扑结构。这种液体结构状态为单一的且随时间和空间变化的相,多面体的体积和比例也随温度而连续改变。

(2) 液态金属的晶体缺陷模型

在研究熔化现象及其规律的过程中发现,金属熔化时体积和能量的改变很小。液体与固体金属的这些相似性激发人们发展了各种缺陷模型。它们几乎与每一种晶体缺陷相对应,诸如点阵空位、位错和晶界等模型。

① 微晶模型——液态金属有很多微小晶体和面缺陷组成,在微晶体中金属原子或离子组成完整的晶体点阵,这些微晶体之间以界面相连接。微晶的存在能很好地解释液态金属中的短程有序性。因而,该模型能较好地描述近液相线(低温)液态金属的微观结构。

② 空穴模型——金属晶体熔化时,在晶体网格中形成大量的空位,从而使液态金属的微观结构失去了长程有序性。大量空位的存在使液态金属易于发生切变,从而具有流动性。随着液态金属温度的升高,空位的数量也不断增加,表现为液态金属的黏度减小。

③ 位错模型——液态金属可以看成一种被位错严重破坏的点阵结构。在特定的温度以上,在低温条件下不含位错(或低密度位错)的固体点阵结构由于高密度位错的突然出现而变成液体。

④ 综合模型——该模型认为,液态金属是由大量不停“游动”着的原子团簇组成,团簇内为某种有序结构,团簇周围是一些散乱无序的原子。这些原子簇不断地分化组合,一部分金属原子(离子)从某个团簇中分化出去,同时又会有另一些原子组合到该团簇中,此起彼伏,不断发生着这样的涨落过程,似乎原子团簇本身在“游动”一样,团簇的尺寸及其内部原子数量都随温度变化而变化。

上述各种缺陷模型,从不同角度定性地描述了过热度不很大的液态金属的结构特征,特别是综合模型,目前仍广泛为人们所接受。但这些模型均难以进行定量计算。

1.2.5 实际金属液态的结构

以上描述的是理想纯金属的液态结构,其中只存在游动原子集团和原子集团间的空穴,液态中的原子存在着很大能量起伏,故原子集团有大有小。

实际上,上述纯金属是不存在的。实际金属中,即使非常纯的金属中总存在着大量杂质原子。这些杂质往往不只是一种,而是多种多样的,它们在液体中不会很均匀地分布。它们的存在方式也是不同的,有的以溶质方式,有的与其他原子形成某些化合物。下面以最简单的模型进行分析,假定液体中只存在一种杂质原子。当金属中存在第二种原子时(如合金),情况就复杂多了。由于同种元素及不同元素之间的原子间结合力是不同的,结合力较强的原子容易聚集在一起,把别的原子排挤到别处。如果 A—B 原子间的结合力较强,则足以在液体中形成新的化学键,在热运动的作用下,出现时而化合,时而分解,也可称为临时的不稳定化合物,或者在低温时化合,在高温时分解。例如,S 在铁液中高温时可以完全溶解,而在较低温度下则可能析出 FeS。当原子间或同类原子间结合非常强时,则可以形成比较强而

稳定的结合,在液体中就出现新的固相(如氧在铝中形成 Al_2O_3 , 氧与铁中的硅形成 SiO_2 等)或气相。

实际金属比上述现象复杂得多,因为:① 工业应用的金属主要是合金,而且是多元合金;② 原材料中存在多种多样的杂质,有些杂质的化学分析值虽然不高,甚至低于 10^{-4} 数量级,但其原子数仍是惊人得多;③ 在熔化过程中,金属与炉气、熔剂和炉衬的相互作用还会吸收气体带进杂质。因此,实际金属的液态结构是非常复杂的。它也有着游动原子集团、空穴以及能量起伏;在原子集团和空穴中溶有各种各样的合金元素及杂质元素。多由于化学键力和原子间结合力的不同,还存在着浓度起伏以及成分和结构不同的游动原子集团。在一些化学亲和力较强的元素的原子之间还可能形成不稳定的或者稳定的化合物。所以实际金属在微观上是由成分和结构不同的游动原子集团、空穴和许多固态、气态或液态的化合物组成,它是一种“混浊”的液体。

1.2.6 液态金属的性质

(1) 液态金属的黏滞性

在自然界中,真实流体都有黏性,当一种不可压缩的液体受到一个恒定剪切力时,由于液体对运动的阻力,在垂直于剪切力的方向上将产生一个速度梯度。液体对运动的这种阻力称为黏滞力。当液体的某一部分与其他部分以不同的速度流动时(即存在着速度梯度),黏滞力就会使相邻流速较慢的层面流动加快或使相邻流速较快的层面速度减慢。因此,黏滞力是在流体不同层面存在相对运动时才表现出来的液体的一种物理性质。

液态金属的黏滞性对铸型的充填流动特性、液态金属中的气体、非金属夹杂物的排除、对铸件凝固过程中的补缩、初生晶的形态、偏析的形成等,都有很大的影响。黏度的大小对是否能形成完整的铸件有着密切的关系。

如图 1-3 所示,假设流体各层之间的速度梯度为

$\frac{du_x}{dy}$, 根据牛顿液体黏滞流动定律:

$$F(x) = -\eta S \frac{du_x}{dy} \quad (1-1)$$

式中, η 为黏滞系数,又称为动力黏度; S 为液层之间的接触面积; $F(x)$ 为作用于液体表面的力; du_x/dy 为各层之间的速度梯度。

根据弗伦克尔关于液态结构的理论,黏滞系数(黏度表达式) η 可用下式表示:

$$\eta = \frac{2\tau_0 kT}{\delta^3} e^{\frac{U}{kT}} \quad (1-2)$$

式中, k 为 Boltzmann 常数; U 为无外力作用时原子之间的结合能; τ_0 为原子在平衡位置的振动周期; δ 为液体各原子层之间的间距; T 为热力学温度。

黏滞性在流体力学中有两个概念:一个是动力黏度,如式(1-2)所示;另一个是运动黏度。所谓运动黏度,就是动力黏度与密度的比值,即:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-3)$$

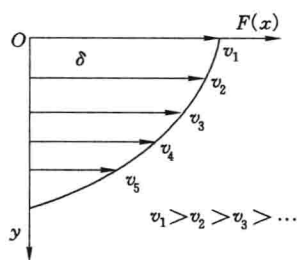


图 1-3 外力作用于液体各原子层速度