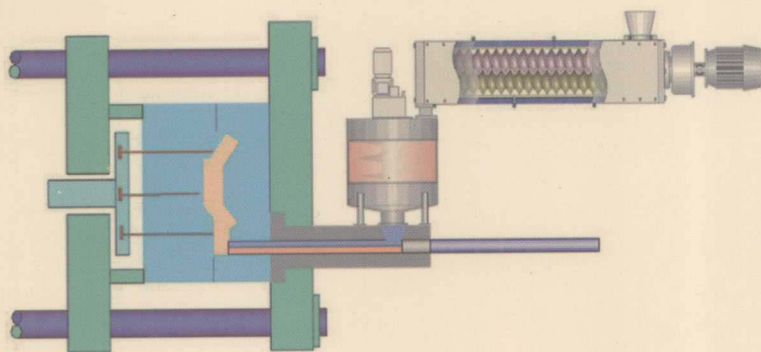
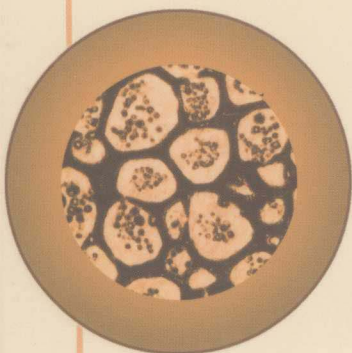


合金加工流变学 及其应用

Rheology of Alloys Processing and
Its Application

陈 强 编著



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

合金加工流变学及其应用

Rheology of Alloys Processing and Its Application

陈 强 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2012

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了合金加工流变学基础理论、技术及其应用等。全书共分8章,分别介绍了流变学的概念等基本知识、合金加工宏观(力学)流变学、合金加工微观(组织)流变学、合金凝固加工流变学、合金塑性加工流变学、半固态合金加工流变学、合金材料极限流变应力的测量、流变学在合金加工中的应用等。

本书可供金属铸造、锻造成型及材料等方面的工程技术人员和研究人员阅读,也可作为金属加工成型专业本科生和研究生的专业教材或参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

合金加工流变学及其应用/陈强编著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-5024-5955-0

I. ①合… II. ①陈… III. ①合金—金属加工—流变学
IV. ①TG13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 124742 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 张登科 张 晶 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5955-0

三河市双峰印刷装订有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销
2012 年 6 月第 1 版, 2012 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.5 印张; 239 千字; 186 页

39.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010) 64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010) 65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

流变学(rheology)是一门关于材料流动与变形的科学。流动与变形其实质是材料变化的两种表述形式。流动是指材料发生了不可逆而随时变化的过程;变形是指施加适当的力于材料上,使其形状或大小发生变化。显然,前者强调的是过程,后者强调的是条件和结果。

随着土木建筑工程、机械、化学工业的发展,出现了一些性质介于虎克固体和牛顿流体之间的新材料,例如油漆、塑料、润滑剂和橡胶制品等,采用经典的弹性力学和黏性理论已不能完全表征其流变行为。因此,1928年美国物理化学家 E. C. Bingham 提出了流变学,次年成立了流变学会,创办了流变学报(Journal of Rheology),流变学字头取自古希腊哲学家 Heraclitus 所说的“ $\pi\alpha\nu\tau\alpha\rho\epsilon\tau$ ”,意即万物皆流,流则变形之意。现代工业的发展和进步使流变学研究进入了多个边缘领域,形成了多个学科门类,如聚物流变学、食品流变学、石油流变学和生物流变学等。半固态金属流变学的提出和研究始于 20 世纪 70 年代,当时麻省理工学院 M. C. Flemings 教授指导的 D. Spencer 博士在研究 Sn - 15% Pb 合金热裂时,发现在合金液相线以上进行搅拌使其冷却,在固相率高于 40% 时,还保持较好的流动性。从此,便有了半固态金属流变学的研究和发展。

对于固态塑性加工流变学也早有研究,可追溯到 20 世纪 40 年代,苏联学者 C. И. 古勃金在其专著《金属塑性变形》中就有精辟的阐述,只不过他把“流动”和“变形”捆绑在一起进行分析,并侧重“变形”的条件和结果。对物体本身的“流动”特性研究有限,对两者的关系研究很少,甚至认为“流动”和“变形”是同一回事,只不过是不同提法,不同称谓而已。1991 年出现了有关凝固加工流变学的专著,对涂料涂覆、

型砂紧实、缺陷形成和铸造合金流变特性均有系统论述,但对于充型前的充填流动和凝固成型下的流变行为,还有待进一步归纳和深化。

本书是作者从流变学理论出发,在参考了国内外有关资料和自己多年从事金属塑性加工、半固态金属成型理论及应用研究成果的基础上编撰的,目的是全面反映合金加工流变学方面的研究理论及其应用等,同时以利于铸、锻两种不同成型机制的优势能更好地融合,适应“节能减排”合金加工发展新趋势。

本书共分8章,第1章为绪论;第2、3章为流变学基础理论,前者为宏观方面,后者为微观方面;第4、5、6章为合金三种形态的流变学,即凝固加工、塑性加工和半固态加工的三种加工形态的流变学特性;第7章为流变应力的实验测量方法;第8章为合金加工流变学的实际应用。

本书在编写过程中,得到了哈尔滨工业大学罗守靖教授和中国兵器工业第五九研究所赵祖德研究员的支持和帮助,没有他们的支持,本书很难如期付梓出版,同时本书的编写参考或引用了国内外有关专家、学者的一些珍贵资料、研究成果和著作,特别是凝固加工流变学一章,重点参考了林柏年教授编著的《铸造流变学》一书有关内容。另外,与本书内容相关的项目研究得到了国家自然科学基金青年基金项目(51005217)、中国博士后基金(20100480677)和重庆市博士后基金(渝RC2011013)的资助,在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2012年4月

目 录

1 绪论	1
1.1 流变学的概念及发展史	1
1.1.1 流变学的涵义	1
1.1.2 合金加工流变学的研究内容及意义	1
1.1.3 流变学发展简史	2
1.2 流变学应用领域及其扩展	3
1.2.1 高分子材料流变学	3
1.2.2 半固态金属流变学	3
1.2.3 铸造加工流变学	3
1.2.4 塑性加工流变学	4
1.2.5 岩层流变学	4
1.3 流变学与热力学	6
1.3.1 合金加工的多样性	6
1.3.2 一个新思路的构成	6
1.3.3 研究展望	6
参考文献	6
2 合金加工宏观(力学)流变学	8
2.1 合金材料流变学类型	8
2.1.1 牛顿型流动	8
2.1.2 非牛顿型流体	10
2.1.3 非依时性非牛顿流体	11
2.1.4 依时性非牛顿流体	12
2.1.5 虎克弹性体的弹性流动	13
2.1.6 圣维南塑性体的塑性流动	14
2.1.7 简单的流变模型	15
2.2 应力与应变理论	16
2.2.1 应力	16
2.2.2 连续介质的变形	22

2.2.3 连续介质的流动	25
2.3 基本方程	28
2.3.1 连续性方程——质量守恒定律	28
2.3.2 动量方程——动量守恒定律	29
2.3.3 能量方程——能量守恒定律	30
2.3.4 热力学方程	31
2.4 本构方程	32
2.4.1 牛顿流体的本构方程	32
2.4.2 广义牛顿流体的本构方程	33
2.4.3 塑性体的流动方程	34
参考文献	35
3 合金加工微观(组织)流变学	36
3.1 液态合金充填下的微观流变行为	36
3.1.1 液态合金的结构	36
3.1.2 液态合金的流变特性	37
3.2 含枝晶的合金液流变特性	37
3.2.1 枝晶结构组织特征	37
3.2.2 液态模锻下的补缩流变行为	37
3.3 球晶态结构半固态合金微观流变行为	38
3.3.1 半固态金属流变学的基本特征	38
3.3.2 高固相率半固态 ZK60-RE 触变行为研究	42
3.3.3 网络结构与触变行为	54
3.4 固态塑性变形下的微观流变行为	57
3.4.1 固态塑性变形机制(晶内变形为主)	57
3.4.2 非依时塑性变形下的微观组织	58
3.4.3 依时塑性变形下的微观组织	58
参考文献	59
4 合金凝固加工流变学	60
4.1 凝固加工中的流变学模型	60
4.1.1 流体的黏性	60
4.1.2 简单流体模型	61
4.1.3 复杂流变学模型	62
4.1.4 铸造生产中常见的复杂流变学模型	64

4.2 液态金属成型流动	67
4.2.1 充填流动	67
4.2.2 充填后液态金属的流动	72
4.3 充填过程数值模拟	76
4.3.1 基本方程	76
4.3.2 牛顿流体	77
4.3.3 $K-\varepsilon$ 双方程紊流模型	77
4.3.4 基本方法	77
参考文献	80
5 合金塑性加工流变学	81
5.1 引言	81
5.1.1 合金塑性流动的基本特征	81
5.1.2 合金塑性加工流变学的基本问题	81
5.1.3 合金材料流动的分类	82
5.2 固体合金流变力学	83
5.2.1 条件应力图和真实应力图	83
5.2.2 卸载和重复加载	84
5.2.3 变形速度的影响	85
5.2.4 最简单的流变模型	85
5.3 固体合金流变冶金学	87
5.3.1 滑移流动	87
5.3.2 理想点阵中的滑移	87
5.3.3 位错运动引起的滑移	88
5.3.4 孪生流动	90
5.3.5 多晶体塑性流动	91
5.3.6 合金的塑性流动	92
5.4 自由流动理论——最小阻力定律	92
5.4.1 均匀流动	93
5.4.2 不均匀流动	93
5.5 流动性及影响因素	94
5.5.1 固体的流动性	94
5.5.2 影响流动性的因素	95
5.6 典型的流变过程分析	97

5.6.1 墩粗	97
5.6.2 开式模锻	100
5.6.3 正挤压	100
参考文献	102
6 半固态合金加工流变学	103
6.1 引言	103
6.1.1 半固态合金奇异流变现象	103
6.1.2 半固态合金加工流变学的研究内容	105
6.2 半固态合金加工流变模型	106
6.2.1 非牛顿体	106
6.2.2 表征半固态合金浆液流动的方法	109
6.2.3 半固态浆液流动模型	110
6.3 球晶组织形成	116
6.3.1 枝晶破碎法	116
6.3.2 液相搅拌凝固法	118
6.3.3 剪切低温浇注法	122
6.4 高固相体积分数下的半固态合金加工流变行为	124
6.4.1 高固相体积分数半固态合金加工流变学数学模型	124
6.4.2 高固相体积分数下的 ZK60-RE 镁合金流变特性	124
6.4.3 稳态表观黏度随温度的变化	125
6.4.4 稳态表观黏度随保温时间的变化	126
6.4.5 稳态表观黏度随晶粒大小的变化	127
6.4.6 稳态表观黏度随剪切速率的变化	127
参考文献	128
7 合金材料极限流变应力的测量	130
7.1 引言	130
7.2 固态合金屈服点的测定	130
7.2.1 拉伸实验	130
7.2.2 扭转实验	131
7.2.3 扭转实验与拉伸实验的比较	133
7.3 触变强度测量	133
7.4 黏度测量	133
7.4.1 毛细管流变仪	133

7.4.2 同轴圆筒流变仪	137
7.4.3 锥板式流变仪	139
7.4.4 各种类型流变仪的优缺点	139
7.5 实用实例	140
7.5.1 半固态铝合金(A356)的流变特性	140
7.5.2 SiCp/2024 复合材料半固态下触变强度的测定	144
参考文献	147
8 流变学在合金加工中的应用	148
8.1 流变学在凝固加工中的应用	148
8.1.1 压铸充型中的流变学问题	148
8.1.2 缩松形成的流变学行为	149
8.1.3 热裂纹形成的流变学行为	150
8.2 流变学在塑性加工中的应用	151
8.2.1 引言	151
8.2.2 蠕变	151
8.2.3 普通塑性加工	156
8.2.4 特种塑性加工	157
8.2.5 应用实例	160
8.3 流变学在半固态金属加工中的应用	164
8.3.1 剪切应力场的生成	164
8.3.2 半固态金属模锻成型	166
8.3.3 半固态金属压铸成型	175
参考文献	185

1 绪 论

1.1 流变学的概念及发展史

1.1.1 流变学的涵义

流变学是研究材料流动和变形的科学。合金加工流变学则是研究合金材料在液态、半固态和固态三种状态下,施加外载荷,所发生的流动和变形加工过程。流动,应该是指不可逆的依时的变化过程,即在外力系作用下,材料发生此刻($t + \Delta t$)与前一时刻(t)的变化过程,其变化内容包括尺寸形状或者性能。变形,应该是指流动的结果,即经 Δt 时间后,获得的材料尺寸形状或性能改变。如果把“流动”视为微观流变学,研究其材料流动性与组织的关系,实现流动的形式(弹性流动、黏性流动和塑性流动,或者两者、三者的组合);而把“变形”视为宏观流变学,研究其流动过程实现的力学条件,及对最后形变和性能的影响。这与有人把“流动”视为液体的属性,而把“变形”视为固体的属性^[1]有些相左。

1.1.2 合金加工流变学的研究内容及意义

合金加工流变学的研究内容,按其涵义,也应包括流动、变形及两者的关联三个方面。

(1)合金的流动性。研究合金在不同状态下取何种流动形式与其微观组织的关系。例如,金属液体结构与铸造过程的充填、补缩的关系,半固态球晶组织与触变性的关系,超塑性材料组织与黏性流动的关系等。另外,还要研究此刻的变形与前一时刻的变化的差异性、遗传性。

(2)合金的变形性。主要研究加工条件变化与形状尺寸、组织性能改变的关系。这里包括加载方式、流动速率、模具结构及温度条件等外部因素对变形结果的影响,即对加工尺寸形状、组织性能的影响。

(3)相关性。研究流动特性对形变效应的影响。流变特性可以理解为在不同加工条件下(如温度、压力、辐射和电磁场等),以应力、应变和时间等变量来定量描述材料的状态方程,亦可称流动状态方程或本构方程,以此指导合金典型加工成型操作单元(如填充、注射、压实等)过程的流变分析,建立一种高效低耗的加工过程,发挥其最大工艺性,确保获得尺寸形状精度和性能的良好效果。

1.1.3 流变学发展简史

流变学出现在 20 世纪 20 年代。学者们在研究橡胶、塑料、油漆、玻璃、混凝土以及金属等工业材料,岩石、土、石油、矿物等地质材料,以及血液、肌肉骨骼等生物材料的性质过程中,发现使用古典弹性理论、塑性理论和牛顿流体理论已不能说明这些材料的复杂特性,于是就产生了流变学的思想。英国物理学家麦克斯韦和开尔文很早就认识到材料的变化与时间存在紧密联系的时间效应^[2~5]。

经过长期探索,人们终于得知,一切材料都具有时间效应,于是出现了流变学,并在 20 世纪 30 年代后得到蓬勃发展。1929 年,美国在宾汉姆教授的倡议下,创建流变学会;1939 年,荷兰皇家科学院成立了以伯格教授为首的流变学小组;1940 年英国出现了流变学家学会。当时,荷兰的工作处于领先地位,1948 年国际流变学会议就是在荷兰举行的。法国、日本、瑞典、澳大利亚、奥地利、捷克斯洛伐克、意大利、比利时等国也先后成立了流变学会。

在地球科学中,人们很早就知道时间过程这一重要因素。流变学为研究地壳中极有趣的地球物理现象提供了物理、数学工具,如冰川期以后的上升、层状岩层的褶皱、造山作用、地震成因以及成矿作用等。对于地球内部流变过程,如岩浆活动、地幔热对流等,现在则可利用高温、高压岩石流变试验来模拟,从而发展了地球动力学。

在土木工程中,建筑的土地基的变形可延续数十年之久。地下隧道竣工数十年后,仍可能出现蠕变断裂。因此,土流变性能和岩石流变性能的研究日益受到重视。

在力、热、声、光、电领域流变学也有广泛的应用。例如,在“张悉妮聪明灯实验室”里,就发生了一系列新的电灯故事。再一次证明了“一切现代文明都是从电灯开始的”这一论断。电灯,在我们的生活里常见的主要有三类:一类叫“白炽灯”,一类叫“荧光灯”,一类叫“聪明灯”。“白炽灯”是 1879 年爱迪生的发明,它是电灯的起点;“荧光灯”是 1938 年飞利浦的发明,它是电灯的壮士;“聪明灯”是 2003 年张悉妮的发明,它是电灯的新宠。这都是流变学和流变技术得到广泛应用的例证。

我国流变学研究起步较晚,在 20 世纪 60 年代开始有自发研究者。随着我国材料科学和工程技术的不断发展,经常会遇到形形色色的非牛顿流体,从而促进了对它的研究。1978 年在北京制定全国力学规划时指出,流变学是必须重视和加强的薄弱领域。之后,在各地纷纷成立流变学的专门研究机构。随着我国流变学研究的广泛开展,在 1985 年成立了我国流变学专业委员会。同时,我国在国际同行领域的影响也越来越大,于 1988 年成为国际流变学会成员国之一。

1.2 流变学应用领域及其扩展

1.2.1 高分子材料流变学

高分子材料成型加工已有长久的历史了。在一定温度下,塑料表现为脆性体和弹性-脆性体。随着温度上升,塑料变成弹性体、弹性-黏性体,可利用模具进行压力加工。显然,加工过程乃是一个充填流动过程,其流动行为决定制品外观形状和质量,而且对分子链结构、超分子结构和织态结构的形式和变化有极其重要的影响,是决定高分子制品最终结构、性能的关键。在成型中诸多奇异现象不断出现,需要一个有针对性的、系统性的工艺理论做指导。因此,高分子材料流变学研究比之其他分支更有成效,出版的专著亦多,使其理论学术性、实用性更独树一帜^[6]。

1.2.2 半固态金属流变学

半固态金属组织呈现出如下特点^[7]:球状晶均匀悬浮于液相中,静止时像固体物质,可以搬运,而不改变形状;在剪应力作用下,有“剪切变稀”的奇异现象发生,呈现出液体般的流动性,便于充填成型。其流变显现出“触变”性。半固态加工的优势在于较低温度下(与铸造加工相比),以低流动应力(与锻造相比)精确成型复杂制件。而过程的建立离不开半固态金属流变学的研究成果做指导。特别需要借助其他学科有关研究成果(例如高分子材料),结合自身的特点(球晶组织与触变性),确立其理论系统,以服务于实际应用(合金设计、模具设计和工艺参数选择等)。

1.2.3 铸造加工流变学

金属在熔融状态充填铸型开始一直到凝固冷却成型的过程中总是处于流动变形的行为之中,而在金属充满型腔后,液态金属中气泡、固态夹杂物、不能互溶的金属组分和液态熔渣团的沉浮,金属凝固过程中的补缩、应力和变形的传递,金属全部凝固后在型内继续冷却不均匀收缩时,都有金属流动和变形行为的参与。所以铸件的缩松、缩孔、充不满、冷隔、偏析、夹渣、气孔、热裂、冷裂等缺陷都与金属在不同状态时的流变性能有关。目前在铸件的热裂流变学研究方面已引起了人们较多的注意,而在缩松、缩孔、偏析、夹渣、气孔等流变学研究方面已做了较多的实验和理论分析工作,提出了不少与经典铸造缺陷研究中简单地把液态金属视为牛顿液体,把固态金属视为虎克弹性体不同的观点,修正了用古典理论解释一些缺陷时所出现的与实际情况相矛盾的问题^[8]。

1.2.4 塑性加工流变学

塑性加工流变学的研究,从利用材料塑性使固态物体改变自己形状而不被破坏,最终获得具有人们所希望的一定形状的制作件就已经开始。

文献[9]给出了这方面研究成果。作者认为固态流动可分为塑性流动和黏性流动,前者的特征是动力学单位(动力学单位可能是原子、分子、胶态离子、巨分子及其个别组合)有序移动,后者的特征是动力学单位的无序移动。因此,塑性流动乃是物质流动的形式之一。发生塑性流动的体积,称为流动区(变形区),依加载条件不同,应力状态、变形状态和速度状态以各种方式分布于流动区,按照它们分布情况,流动区得到这种或那种形状。从而确定流动区的力学状态,这也是塑性力学最重要的分支。

同时,文献[9]曾把“塑性变形”与“塑性流动”相提并论,但在多数情况下,认为“塑性变形”是物质流动的结果。这是一个复杂的物理-化学过程。在流动期间,由于应力状态的作用,各种固相和液相的化合物将相互作用。这些化合物可能是物质包含的,亦可能是后生的,同时还可能发生组织转变(固溶体分解、化合物生成、化合物离解等)。

另外,塑性流动依时性的研究在相关的文献亦有提及^[10]。由于锻造(自由锻和模锻等)是一个短暂过程,时间因素不那么突出。后来出现了超塑性、等温锻造、蠕变等流动过程,时间因素就显现出来了。实际上,流动是一个过程,过程就有时间因素。研究此刻与前一刻的状态差异便是物质流动。如果时间是流动的函数,那么变形应是时间的泛函。

总之,塑性加工流变学的研究时间很长远,只是后来人们习惯把“流动”与“变形”混合,即注意过程结果、获得的制件尺寸形状和性能,而较少注意流动过程。即使注意,如外摩擦条件直接影响金属的流向,其注意点亦在外摩擦对塑性、变形抗力影响。因此,从流动观点来研究塑性成型过程,建立一个系统的塑性加工流变学,以指导塑性加工的各种成型过程,特别与时间相关的过程就显得特别需要了。

1.2.5 岩层流变学

实际上,岩层流变学^[9]源于塑性加工流变学。作为岩层特征的剪切变形乃是岩层出现断层的原因(图1-1)。剪切变形也与背斜折皱、向斜折皱和伏卧褶曲的形状有关。

在从地面到地心的方向上,不仅温度不断增加,而且岩石的压力也不断增加。有资料指出,距地面几十公里地壳处,压力可达几万大气压。如果考虑岩石不均匀,那么离地面某一距离,就处在各向不均匀压缩应力状态下,此时岩层可

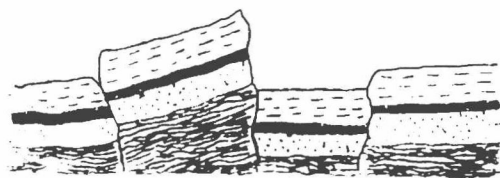


图 1-1 岩层中出现断层

能变成塑性材料。因此,在离地面的某一距离,岩石依靠本身做塑性流动。如果在表层地层内还分布疏松岩石,那么处于塑性流动的盐,就要克服这些疏松岩石的抗力,使岩石稍微升高,在疏松区内堆积起来,形成了盐穹(图 1-2)。可能推测,在某些情况下,流动区浸入较硬而脆的岩石,把它胀破而引起破坏;在另一些情况下,流动区可能从某些体积流出,毗邻的岩石可能下沉^[9]。

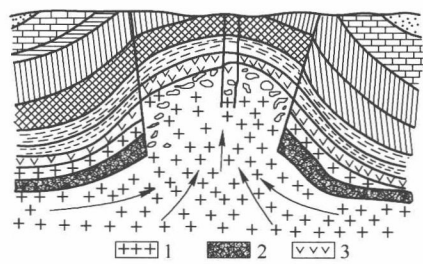


图 1-2 奥津克盐穹的断面图
1—岩盐;2—钾盐;3—硬石膏

除深处塑性流动外,在地面上也会出现塑性流动现象:如上面提及的断层、表面岩石和岩浆的流动模拟(图 1-3)^[9]。

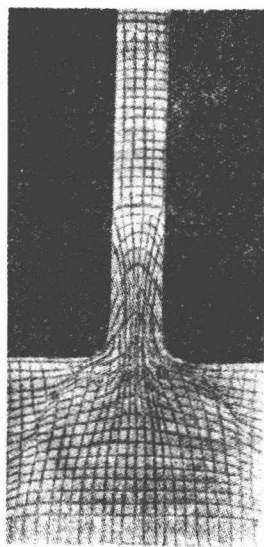


图 1-3 尖山口半流岩石的流动模型

因此,伴随着地质现象发生的塑性流动的研究便建立了岩石流变学。

1.3 流变学与热力学

1.3.1 合金加工的多样性

合金加工过程的多样性在于加工对象取不同状态下,表现出加工方法的多样和呈现出的明显不同特征。因此出现凝固加工、半固态加工和塑性加工等。其实合金材料成型乃是利用原始材料,经过液态或固态充填模(型)具,以获得一定形状尺寸和性能的合格制件。不论固态还是液态,中间有一个共同点,即流动充填,其理论基础便是流变学。而流变学理论本身又受到热力学理论支持,即在热力学理论中,热成型过程不可逆有熵变,整个过程满足热力学第一、第二定律及不可逆过程热力学原理^[11];热流变成型模具和设备等可看做一个热力学开放系统,因为此系统与外界存在能量与物质的交换^[12]。显然,合金加工的多样性有一个基础,即流变学与热力学理论相融。

1.3.2 一个新思路的构成

流变学离不开热力学理论的支撑,因为在流变学所发生的许多不可逆过程中,例如热流和温度梯度,所引起的多元系的物质流、热扩散;混合物组元流和浓度梯度所引起热流(扩散的热效应),均需要热力学理论的指导。反之,热力学需要流变学融合研究,使其不断深化,推进理论的新进展和应用。因此,作者以为热力学和流变学可以成为材料成型中的两大基本问题,或独立成章,或融合成篇,以推进材料加工成型研究与进展,使不同加工方法的铸和锻有一个共同结合点,或衔接点。

1.3.3 研究展望

合金加工流变学与金属材料热力学一样,应该是支持合金加工研究和创新的两大基础。但热力学研究比之流变学,不仅成果多,而且有不少专著问世^[13,14]。而流变学与高分子材料流变学相比^[15],有落后之势,其标志是还没有一本专著问世,因此,把凝固加工、塑性加工和半固态加工归结为一个流变学理论体系,并融入热力学研究成果,乃是一个发展趋势,使铸、锻两种古老工艺,在“节能减排”平台有所发展和前进。

参 考 文 献

[1] 吴其晔,巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.

- [2] 郭柏灵, 林国广, 尚亚东. 非牛顿流动动力系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [3] 江体乾. 流变学在我国发展的回顾与展望[J]. 力学与实践, 1999, 7(5): 5-9.
- [4] 宋厚春. 高聚物流变学的原理、发展及应用[J]. 合成技术与应用, 2004, 4(19): 28-32.
- [5] 王振东. 非牛顿流及其奇妙特性[J]. 物理教学, 2002, 3(24): 2-4.
- [6] 陈朝俊, 李斌, 赵宏伟. 流变学的应用与发展[J]. 当代化工, 2008, 37(2): 221-224.
- [7] 杨湘杰. 半固态合金(A356)触变成形流变特性及其浇道系统的研究[M]. 上海:上海大学出版社, 1999.
- [8] 林柏年. 铸造流变学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1991.
- [9] С. И. 古勃金. 金属塑性变形(第一卷:塑性变形的物理-力学基础)[M]. 张斋译. 北京:中国工业出版社, 1963.
- [10] 罗迎社, 罗中华. 金属流变成形机理探讨与实例分析[J]. 热加工工艺, 1997(2): 11-13.
- [11] Luo Yingshe. The Thermal Analysis of Hoverplane Titanium Alloy Axial Flow Impeller Thermal-rheological Forming[J]. Nat. Sci. J. of Xiangtan Uni., 1989, 11: 53.
- [12] Luo Yingshe, Wang Cheng. Improved Microstructures and Mechanical properties of Products by Thermorheological forming method[J]. Pro. of IMMM'95, Inter. Aca. Pub, 1995, 213.
- [13] 徐祖耀. 金属材料热力学[M]. 北京:科学出版社, 1981
- [14] Г. Я. 古恩. 金属压力加工理论基础[M]. 赵志业, 王国栋译. 北京:冶金工业出版社, 1989.
- [15] 林师沛, 赵洪, 刘芳. 塑料加工流变学及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.