



R 半固态金属流变学

RHEOLOGY OF SEMI-SOLID METAL

罗守靖 程远胜 单巍巍 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

半固态金属流变学

Rheology of Semi-Solid Metal

罗守靖 程远胜 单巍巍 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

半固态金属流变学/罗守靖,程远胜,单巍巍编著. —北京:国防工业出版社,2011.3
ISBN 978-7-118-07088-0

I. ①半… II. ①罗… ②程… ③单… III. ①金属-流变学 IV. ①TG111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 213497 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售



*

开本 710×960 1/16 印张 20 字数 349 千字

2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

前 言

流变学(rheology)是一门研究物质流动与变形的科学。

流动与变形,实质是物质变化的一种不同表述。流动是过程,而变形是结果。例如,液体流动,表现为黏性行为,结果产生永久变形,并消耗部分能量;固体流动时,表现比较复杂。有弹性行为、黏性行为 and 塑性行为,或者两种、三种的复合。结果产生恢复的弹性变形,或不可恢复的塑性变形,或部分可以恢复的弹塑性变形,不消耗或消耗能量。液体与固体之间,尚存在一种软物质,称为半固态物质或半固态金属(semi-solid metal),其流动时,表现为黏塑性行为,结果产生永久变形,亦消耗能量。

流变学提出始于1928年,美国物理化学家 E. C. Bingham 正式命名,字头取自古希腊哲学家 Heraclitus 所说的“ $\pi\alpha\nu\tau\alpha\rho\epsilon\tau$ ”,意为万物皆流,流则变形。现代工业发展和进步,使流变学进入多个边缘领域,形成多个学科门类,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 Spencer 教授在研究 Sn-15% Pb 合金热裂时,发现在合金液相线以上,对其搅拌,使其冷却至固相体分率高于40%时,还保持有较好的流变性。利用半固态这一特征,便开创了半固态加工,包括半固态压铸、半固态模锻、半固态射注和半固态轧制等,成为古老的凝固(液态)加工和塑性(固态)加工的一个补充。铸和锻在这里获得链接,形成了一个完整的金属加工体系。

半固态流变学和其他流变学一样,是一门实践强、涉及多学科交叉的边缘科学。从宏观讲,有加工流变学,即流变产生的力学准则、流变结果的力学效应、实现流动过程的时间效应等;从微观讲,有结构流变学,即半固态流变学研究对象的触变效应、与内部网络组织解聚和重建密切相关。

半固态金属流变学起步虽晚些,但应用研究的活跃促使其研究从实验观察、分析提升到以现代流变学研究成果和应用成果为基础,初步构建了半固态流变学理论框架:提出半固态体是一个“触变体”,其特征是“剪切变稀”和“依时”行为。研究“触变体”本身的力学和物理化学特征及其“剪切变稀”条件、流动过

程、本构属性等,大大丰富了流变学理论。半固态金属流变学研究,促进了半固态加工应用的拓展。由于“剪切变稀”研究的深入,不仅大大提高成形时的固相体分率,降低成形温度,而且在剪切力作用下,黏度可迅速下降,恢复流动性。因此,半固态成形温度的选取,必须在流变学研究成果的指导下进行,才有可能既确保制品外在形状尺寸的精密和内在质量的稳定可靠,又能选取较低的成形温度,降低材料本身消耗、设备吨位和模具磨损。

半固态金属流变学虽然取得进展,但毕竟还年轻,其研究多是实验成果,缺乏理论的系统化。尤其它涉及多门学科,包括金属材料学、连续塑性力学、非线性传热、传质学,给半固态金属流变学研究带来了复杂、交叉的挑战。作者在多年从事半固态金属流变学研究及其应用的基础上,吸收国内外最新的研究成果和借鉴相关领域流变学研究成果,企望通过梳理工作,使半固态金属流变学有一本书公布于世,促使这门科学有更多人关注和介入研究,推动该学科的进步和应用发展。本书分6章,第2章、第5章和第6章由罗守靖编著,第1章、第4章由程远胜编著,第3章由单巍巍与程远胜合著,最后由霍文灿教授主审。

另外,书中多处引证国内外专家的研究成果,在这里对他们致以诚挚的感谢。

编著者
2010年11月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 流变学概念	1
1.1.1 流变学的发展简史	1
1.1.2 流变学的研究内容	2
1.1.3 流变学的研究方法	3
1.1.4 固—液流变学	4
1.2 触变学概念	4
1.3 半固态合金奇异流变现象	5
1.3.1 高黏度与“剪切变稀”行为	6
1.3.2 半固态金属的触变性	6
1.3.3 半固态合金流变成形与触变成形	7
1.4 半固态合金加工流变学研究内容及意义	8
参考文献	9
第2章 半固态合金流变学基础	10
2.1 流体的流变学类型	10
2.1.1 牛顿型流动	11
2.1.2 非牛顿型流体	12
2.1.3 非依时性非牛顿体	14
2.1.4 依时性非牛顿体	15
2.2 网络结构模型	17
2.2.1 物质内部结构的网络特征	17
2.2.2 网络形成熵	21
2.3 应力与应变理论	25
2.3.1 应力状态描述	25
2.3.2 应变速率	31
2.3.3 基本方程	36
参考文献	43

第3章 球晶组织形成及流变学	44
3.1 半固态球晶组织的描述	44
3.1.1 半固态金属浆料的微观结构模型	44
3.1.2 半固态金属浆料的表观黏度	45
3.1.3 平均粒子数(团聚程度)随时间的变化	46
3.1.4 结构参数的含义	46
3.2 半固态球晶组织形成	46
3.2.1 枝晶破碎法	46
3.2.2 液相搅拌凝固法	54
3.2.3 剪切低温浇注式	64
3.2.4 液态法非枝晶形成机制	66
3.2.5 ZK60-RE 半固态球晶组织生成	72
3.3 半固态球晶组织流变学	89
3.3.1 变温(连续冷却条件下)稳态流变行为	90
3.3.2 等温稳态流变行为	91
3.3.3 触变行为	92
3.3.4 半固态等温压缩法	95
3.3.5 高固相率半固态 ZK60-RE 触变行为研究	104
3.3.6 网络结构与触变行为	118
3.4 高固相率半固态 ZK60-RE 流变行为研究	121
3.4.1 高固相率半固态材料流变行为数学模型	121
3.4.2 高固相率半固态 ZK60-RE 镁合金流变行为研究	126
3.4.3 采用“时温叠加法”拓展实验结果	130
参考文献	131
第4章 半固态合金剪切流动及测量	134
4.1 剪切流动分析	134
4.1.1 引言	134
4.1.2 拖曳流动	134
4.1.3 压力流动	138
4.1.4 拖曳、压力组合流动	141
4.2 流变性能的测定	146
4.2.1 毛细管流变仪	146
4.2.2 同轴圆筒流变仪	150
4.2.3 锥板式流变仪	152

4.2.4 各种类型流变仪的优缺点	153
4.3 应用实例	153
4.3.1 Sn-15% Pb 半固态浆料流变性能测试	153
4.3.2 半固态铝合金(A356)的流变特性	156
参考文献	159
第5章 半固态金属流变学数值模拟	160
5.1 半固态金属流变学的基本特征	160
5.1.1 宏观特征	160
5.1.2 触变强度	161
5.1.3 触变学行为	162
5.2 低固相体分率压铸环境下触变成形过程的模拟	165
5.2.1 引言	165
5.2.2 液态压铸数值模拟	166
5.2.3 半固态压铸数值模拟	180
5.3 高固相体分率模锻环境下触变成形过程流变模拟	191
5.3.1 SiCp/2024 复合材料在半固态下的流变行为	191
5.3.2 高固相分数 SiCp/2024 复合材料的本构模型	201
5.3.3 SiCp/2024 复合材料半固态触变成形数值模拟	211
参考文献	225
第6章 典型半固态金属加工过程的流变学分析	227
6.1 剪切应力场生成	227
6.1.1 压缩变形下的剪切应力场	227
6.1.2 搅拌下的剪切应力场	229
6.2 半固态金属模锻成形	229
6.2.1 主要工艺过程	230
6.2.2 半固态模锻用模具设计流变学分析	231
6.2.3 半固态模锻模具结构分析	236
6.2.4 三种典型半固态模锻模具结构	243
6.2.5 工艺应用实例	246
6.3 半固态金属压铸成形	260
6.3.1 半固态压铸过程	261
6.3.2 半固态金属压铸流变学分析	262
6.3.3 压铸模设计中的流变学问题	266
6.4 半固态金属射注成形	282

6.4.1 触变射注成形·····	282
6.4.2 流变射注成形·····	283
6.4.3 射注成形流变学分析·····	284
6.4.4 应用实例·····	291
6.4.5 半固态加工技术缺陷分析·····	295
6.4.6 半固态加工适用范围的分析与展望·····	297
参考文献·····	301

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Concept of rheology	1
1.1.1 Development of rheology	1
1.1.2 Research contents of rheology	2
1.1.3 Research methods of rheology	3
1.1.4 Rheology of solid-liquid	4
1.2 Concept of thixotropy	4
1.3 Supernatural rheology of semi-solid alloy	5
1.3.1 High viscosity and “shear thinning” behavior	6
1.3.2 Thixotropy of semi-solid metal	6
1.3.3 Thixoforming and rheoforming of semi-solid alloy	7
1.4 Research contents and purpose of semi-solid alloy rheology	8
References	9
Chapter 2 Foundation of semi-solid alloy rheology	10
2.1 Rheology styles of fluid	10
2.1.1 Newtonian flowage	11
2.1.2 Non-Newtonian flowage	12
2.1.3 Non time dependence non-Newtonian fluid	14
2.1.4 Time dependence non-Newtonian fluid	15
2.2 Network structural model	17
2.2.1 Network characters of inner structure	17
2.2.2 Entropy of network forming	21
2.3 Theories of stress and strain	25
2.3.1 Stress status	25
2.3.2 Strain rate	31
2.3.3 Basic equations	36
References	43

Chapter 3	Formation of spherical microstructures and rheology	44
3.1	Spherical microstructures in semi-solid state	44
3.1.1	Microstructure model of semi-solid slurry	44
3.1.2	Apparent viscosity of semi-solid slurry	45
3.1.3	Variation of average particle population n (glomeration stage) with time	46
3.1.4	Meaning of structural parameters	46
3.2	Formation of spherical microstructures	46
3.2.1	Dendrite fragmentation	46
3.2.2	Stirring and solidification of liquid	54
3.2.3	Shearing and pouring in low temperature	64
3.2.4	Formation mechanism of non-dendrites in liquid state	66
3.2.5	Spherical microstructures formation of ZK60-RE in semi-solid state	72
3.3	Spherical microstructures rheology in semi-solid state	89
3.3.1	Stable rheology behavior in variable temperature (during continual cooling)	90
3.3.2	Stable rheology behavior in isothermal temperature	91
3.3.3	Thixotropy behavior	92
3.3.4	Isothermal compressing in semi-solid state	95
3.3.5	Thixotropy behavior of ZK60-RE with high solid volume fraction in semi-solid state	104
3.3.6	Network structure and thixotropy behavior	118
3.4	Rheology behavior of ZK60-RE with high solid volume fraction in semi-solid state	121
3.4.1	Rheology behavior mathematical model of semi-solid materials with high solid volume fraction	121
3.4.2	Rheology behavior of ZK60-RE with high solid volume fraction in semi-solid state	126
3.4.3	Results of time-temperature superposition	130
	References	131
Chapter 4	Shearing flow and measurement of semi-solid alloys	134
4.1	Shearing flow analysis	134
4.1.1	Introduction	134

4. 1. 2	Towing flow	134
4. 1. 3	Compressing flow	138
4. 1. 4	Combining flow of towing and compressing	141
4. 2	Rheological property measurement	146
4. 2. 1	Capillary rheometer	146
4. 2. 2	Coaxial cylinder rheometer	150
4. 2. 3	Cone plate rheometer	152
4. 2. 4	Advantages and disadvantages of these rheometers	153
4. 3	Application examples	153
4. 3. 1	Rheological property measurement of Sn-15% Pb semi-solid slurries	153
4. 3. 2	Rheological characters of semi-solid Al alloy(A356)	156
References		159
Chapter 5	Rheological numerical simulation of semi-solid metal	160
5. 1	Basic characters of semi-solid rheology	160
5. 1. 1	Macro-characteristics	160
5. 1. 2	Thixotropic strength	161
5. 1. 3	Thixotropic behavior	162
5. 2	Simulation of thixoforming during die-casting with low solid volume fraction	165
5. 2. 1	Introduction	165
5. 2. 2	Numerical simulation of liquid die-casting	166
5. 2. 3	Numerical simulation of die-casting in semi-solid state	180
5. 3	Rheo-simulation during thixo-forming with high solid volume fraction	191
5. 3. 1	Rheological behavior of SiCp/2024 in semi-solid state	191
5. 3. 2	Constitutive model of SiCp/2024 with high solid volume fraction in semi-solid state	201
5. 3. 3	Thixo-forming numerical simulation of SiCp/2024	211
References		225
Chapter 6	Rheology analysis of typical semi-solid metal processing	227
6. 1	Shear stress field formation	227
6. 1. 1	Shear stress field during compressing	227
6. 1. 2	Shear stress field during stirring	229

6.2 Die-forming of semi-solid metal	229
6.2.1 Main technological processes	230
6.2.2 Rheology analysis of dies design for die-forming in semi-solid state	231
6.2.3 Structural analysis of dies for die-forming in semi-solid state	236
6.2.4 Three typical die-forming die structures in semi-solid state	243
6.2.5 Application examples	246
6.3 Die-casting of semi-solid metal	260
6.3.1 Die-casting process of semi-solid metal	261
6.3.2 Rheological analysis Die-casting of semi-solid metal	262
6.3.3 Rheological problems of dies design for die-casting	266
6.4 Injection forming of semi-solid metal	282
6.4.1 Thixo-injection forming 触变射注成形	282
6.4.2 Rheo-injection forming	283
6.4.3 Rheological behavior of injection forming	284
6.4.4 Application examples	291
6.4.5 Defects analysis during semi-solid process	295
6.4.6 Prospects and analysis of application scope of semi solid process	297
References	301

第 1 章 绪 论

1.1 流变学概念

流变学是力学的一个新分支,它主要研究材料在应力、应变、温度、湿度、辐射等条件下与时间因素有关的变形和流动的规律。

1.1.1 流变学的发展简史^[1-4]

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、混凝土和金属等工业材料,岩石、土、石油和矿物等地质材料,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^[1,2]。

麦克斯韦在 1869 年发现,材料可以是弹性的,也可以是黏性的。对于黏性材料,应力不能保持恒定,而是以某一速率减小到零,其速率取决于施加的起始应力值和材料的性质,这种现象称为应力松弛;许多学者还发现,应力虽然不变,材料棒却可随时间继续变形,这种性能亦称为蠕变流动^[1-4]。

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,美国在宾厄姆教授的倡议下,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,荷兰流变学小组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。

流变学的发展同世界经济发展和工业化进程密切相关。现代工业需要耐蠕变、耐高温的高性能金属、合金、陶瓷和高强度的聚合物等,因此同固体蠕变、黏弹性和蠕变断裂有关的流变学迅速发展起来。核工业中核反应堆和粒子加速器的发展,为研究由辐射产生的变形开辟了新的领域。

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如冰川期以后地壳的上升、层状岩层的褶皱、造山作

用、地震成因以及成矿作用等,提供了物理—数学工具。对于地球内部过程,如岩浆活动、地幔热对流等,现在可利用高温、高压岩石流变实验来模拟,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。

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。随着流变学研究的广泛开展,我国在 1985 年成立了流变专业委员会。同时,我国在国际同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。流变学从一开始就是作为一门实验基础学科发展起来的,随着实验原理、测试技术和测试设备的发展以及电子计算机的应用,推动着流变学的研究正朝着更加广泛、更加深入的方向快速发展^[2]。

1.1.2 流变学的研究内容

流变学研究内容含各种材料的蠕变和应力松弛的现象、屈服值以及材料的流变模型和本构方程。

材料的流变性能主要表现在蠕变和应力松弛两个方面。蠕变和应力松弛是物质内部结构变化的外部显现。这种可观测的物理性质取决于材料分子(或原子)结构的统计特性。因此在一定应力范围内,单个分子(或原子)的位置虽有改变,但材料结构的统计特征却可能不会变化^[5-8]。

当作用在材料上的剪应力小于某一数值时,材料仅产生弹性形变;而当剪应力大于该数值时,材料将产生部分或完全永久变形,则此数值就是这种材料的屈服值。屈服值标志着材料由完全弹性进入具有流动现象的塑性变形界限值,所以又称弹性极限、屈服极限或流动极限。同一材料可能会存在几种不同的屈服值,比如蠕变极限、断裂极限等。在对材料的研究中一般都是先研究材料的各种屈服值。

在不同物理条件下(如温度、压力、湿度、辐射、电磁场等),以应力、应变和时间的物理变量来定量描述材料的状态方程,叫作流变状态方程或本构方程。材料的流变特性一般可用两种方法来模拟,即力学模型和物理模型。

在简单情况(单轴压缩或拉伸,单剪或纯剪)下,应力应变特性可用力学流变模型描述。在评价蠕变或应力松弛实验结果时,利用力学流变模型有助于了解材料的流变性能。这种模型已用了几十年,比较简单,可用来预测在任意应力