



液态金属物质科学与技术研究丛书

液态金属物质科学基础 现象与效应

刘 静 编著

LIQUID METAL

 上海科学技术出版社



液态金属物质科学与技术研究丛书

液态金属物质科学基础 现象与效应

刘 静 编著

LIQUID METAL

 上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

液态金属物质科学基础现象与效应 / 刘静编著. —
上海: 上海科学技术出版社, 2019. 1

(液态金属物质科学与技术研究丛书)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4207 - 2

I. ①液… II. ①刘… III. ①新材料应用—研究 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 222199 号

液态金属物质科学基础现象与效应

刘 静 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www. sstp. cn)

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 26.25 插页 4

字数 330 千字

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4207 - 2/O · 64

定价: 248.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

序

液态金属如镓基、铋基合金等是一大类物理化学性质十分独特的新兴功能材料,常温下呈液态,具有沸点高、导电性强、热导率高、安全无毒等属性,并具备常规高熔点金属材料所没有的低熔点特性,其熔融状态下的塑形能力更为快捷打造不同形态的功能电子器件创造了条件。然而,由于国内外学术界以往在此方面研究的缺失,致使液态金属蕴藏着的诸多新奇的物理、化学乃至生物学特性长期鲜为人知,应用更无从谈起。这种境况直到近年才逐步得到改观,相应突破为众多新兴学科前沿的发展提供了十分重要的启示和极为丰富的研究空间,正在催生出一系列战略性新兴产业,将有助于推动国家尖端科技水平的提高乃至人类社会物质文明的进步。

早在 2001 年前后,时任中国科学院理化技术研究所研究员的刘静博士就敏锐地意识到液态金属研究的重大价值,他带领团队围绕当时在国内外均尚未触及的液态金属芯片冷却展开基础与应用探索,以后又开辟出系列新的研究方向,他在清华大学创建的实验室随后也取得众多可喜成果。这些工作涉及液态金属芯片冷却、先进能源、印刷电子与 3D 打印、生命健康以及柔性智能机器等十分宽广的领域。经过十多年坚持不懈的努力,由刘静教授带领的中国科学院理化技术研究所与清华大学联合实验室在世界上率先发现了液态金属诸多有着重要科学意义的基础现象和效应,发明了一系列底层核心技术和装备,建立了相应学科的理论与技术体系,系列工作成为领域发展开端,成果在国内外业界产生了持续广泛的影响。

当前,随着国内外众多实验室和工业界研发机构的纷纷介入,液态金属研究已从最初的冷门发展成当前备受国际瞩目的战略性新兴科技前沿和热点,科学及产业价值日益显著。可以说,一场研究与技术应用的大幕已然拉开。毫无疑问,液态金属自身蕴藏着十分丰富的物质科学属性,是一个基础探索与实际应用交相辉映、极具发展前景的重大科学领域。然而,遗憾的是,国内外学术界迄今在此领域却缺乏相应的系统性著述,这在很大程度上制约了研究与应用的开展。

为此,作为国际常温液态金属物质科学领域的先行者和开拓者,刘静教授及其合作者基于实验室十七八年来的研究积淀和第一手资料,从液态金属学科发展的角度出发,系统而深入地提炼和总结了液态金属物质科学前沿涌现出的代表性基础发现和重要进展,形成了本套丛书,这是十分及时而富有现实意义的。

《液态金属物质科学与技术研究丛书》的每一本著作均系国内外该领域内的首次尝试,学术内容崭新独到,所涉及的学科领域跨度大,基本涵盖了液态金属近年来衍生出来的代表性科学与应用技术主题,具有十分重要的科学意义和实际参考价值。丛书的出版填补了国内外相应著作的空白,将有助于学术界和工业界快速了解液态金属前沿研究概况,为进一步工作的开展和有关技术成果的普及应用打下基础。为此,我很乐意向读者推荐这套丛书。

周 远

中国科学院院士

中国科学院理化技术研究所研究员

前言

液态金属是种类众多的单质、合金或其衍生金属材料,在常温下呈液态,具有沸点高、导电性强、热导率高等特点,制造过程无需高温冶炼,环保无毒。以往,由于此类材料的科学与应用价值未被充分认识到,致使相应研究在国际上长期处于沉寂。近年来的大量突破性发现深刻表明,作为珍宝般的新兴物质科学,液态金属蕴藏着诸多令人匪夷所思的新奇特性,打开了无比广阔的应用领域。也正因如此,液态金属有关成果被认为是人类利用金属的第二次革命。

在当前国际上业已变得相当热门的液态金属诸多科学研究与技术探索上,中国可以说幸运地成为了先行者和开拓者。早在 2000 年伊始,笔者以中国科学院“百人计划”学者的身份在中国科学院理化技术研究所工作期间,在写作一本有着浓厚芯片散热背景的学术著作《微米/纳米尺度传热学》时,脑海中就不时闪现出采用液态金属冷却高热流密度芯片的设想,这实际上促成了以后的一系列基础和应用探索的展开。经过十多年持续不断的工作,笔者在中国科学院理化技术研究所带领的研究小组,包括后来在清华大学创建的实验室,有幸于世界上率先发现了液态金属一系列全新的科学现象、基础效应和变革性应用途径,开辟了多个当前业已变得相当重要的领域,在此基础上笔者团队提出了创建液态金属谷以及发展全新工业的构想,并将其付诸实践。然而,作为在液态金属黑夜中摸索过来的科技工作者,笔者和团队的一个深切体会是,液态金属物质科学在漫长的发展过程中可以说基本上无人问津,更不用说有喝彩了,原因主要还在于世人长期以来对其知之甚少。不过,令人欣慰的是,这种状况正随着研究的逐步拓展得以大大改观。近年来,我们欣喜地看到,世界范围内众多团队纷纷介入液态金属的研究和应用,成果迭出。毋庸置疑的是,液态金属已从最初的冷门发展成全球热点,正迅速崛起为引领物质科学发展的革命性领域之一,亟待人们去探究。

读者要问,液态金属为何能引发如此广泛热烈的兴趣呢?实际上,仅从材料的属性而言就不难看出,液态金属可以说以一种物质形式将诸多尖端功能

材料的优势集于一体,其性能易于按照人们的需要而灵活展现。像这样可以在常温下于液相、固相之间随意切换,具有高导电性、导热性甚至半导体特性的材料,在传统的材料体系中是十分罕见的。而且,满足这些特性的潜在液态金属或其衍生材料的种类成千上万,并处于快速增长中。因此,液态金属已渗透到几乎所有的自然科学和工程技术领域甚至文化创意行业,影响范围甚广,正为能源、电子信息、先进制造、国防军事、柔性智能机器人,以及生物医疗健康等领域的发展带来颠覆性变革,已催生出一系列战略性新兴产业,将有助于推动国家尖端科技水平的提高、全新工业体系的形成和发展,乃至人类物质文明的进步。“一类材料,一个时代”,液态金属时代实际上已朝着人类走来。

当前,世界科技正处于革命性变革之中,以物质、能量、生物和信息为特征的液态金属前沿学科,堪称催生突破性发现和引领技术变革的科技航母。作为一大类物理化学行为十分独特的新兴功能物质,液态金属正为大量科学与技术探索带来前所未有的观念性启示,可望为有关科技领域的变革性发展乃至开辟全新工业创造巨大机遇,社会价值和科学意义十分深远。

显然,在液态金属几乎所有的研究和应用中,对其基本属性的认识无疑是最为根本的环节。然而,遗憾的是,学术界迄今在此领域的论述存在大量空白,制约了进一步研究与应用的深入。本书正是在这样的背景下总结汇编而成。当然,由于液态金属涉及领域众多,要在一本书中全面系统介绍其内容是不可能的,因此许多基础现象和效应的内在机理在此并不过多触及,留待专题著作集中阐述。

本书是笔者带领的中国科学院理化技术研究所、清华大学联合团队的集体贡献,部分发现来自云南中国液态金属谷科研机构的工作。实验室师生们都曾记得,在液态金属研究远未像今天如此热门的早些年,笔者曾多次在内部会议上强调,对尚处于早期阶段的液态金属科学,实验室应努力争取于未来发现至少5个重要的基础现象和科学效应。幸运的是,这一愿望很快得以实现,有关发现在国际上引发一系列重大反响。也因如此,笔者自己变得有些“得寸进尺”,继而提出实验室新的努力愿景,直接将最初定下的目标扩展成发现50个以上基础现象和效应。笔者内心深处的愿望是,希望团队能够不断开拓创新,去发现各种可能的秘密。原因很简单,探索液态金属实在是件美妙之事,而这一领域确实盛开着无数绚丽的科学之花。对于如此丰富多彩的液态金属物质世界,有着无尽的科学前沿,值得人类永无止境地追求。

鉴于液态金属物质科学研究显而易见的意义,笔者深感有必要将这一领域的基本效应、现象和基础知识及时传达给世人,以期有效引导和集合各方力

量,来共同促成科学进步,从而更好地服务于社会,这也是出版本书的初衷。本书不求穷尽液态金属全貌,主要汇集了其中的一些典型现象与效应,以及部分由此引发的重要应用问题。限于时间和精力,本书主要以笔者实验室近十六七年来的研究成果为代表对液态金属予以解读,也包括国内外同行的部分典型工作,旨在能为读者提供基本素材,以助其快速了解液态金属领域概况,从而为今后工作的开展打下基础。

本书的整理、写作开始于2016年夏,初步材料完成后却搁置多时。这期间,由于实验室研究工作开展的如火如荼,笔者大多时候只能边完成手头工作,边组织实验室讨论,同时断断续续对本书加以修订、撰写和补充。本书得以最终出版,真是要感谢上海科学技术出版社包惠芳老师的敦促和鼓励,使得笔者终于下定决心将本书及时呈现出来。

在本书持续近两年的整理、写作过程中,可以说,笔者实验室几乎全体师生均投入相应内容的讨论、整理和撰写,不完全列举如下:王倩、盛磊、饶伟、何志祝、桂林、高猛、邓中山等;博士后:梁书婷、汤剑波、王磊(大)、马荣超、王磊(小)、于永泽、衣丽婷、路金蓉、胡靓、崔云涛、刘福军、杨利香等;博士生:杨小虎、袁彬、谭思聪、丁玉杰、赵曦、徐硕、张伦嘉、叶子、周旭艳、王荣航、陈森、汪鸿章、王雪林、国瑞、袁博、田露、王荣航、孙旭阳、郭藏燃等;硕士生:张仁昌、王康、梅生福、桂晗、赵正男等。本书部分研究得到中国科学院院长基金、中国科学院前沿计划及国家自然科学基金重点基金资助(No. 91748206)。在此谨一并致谢!

限于时间,加之作者水平有限,本书不足和挂一漏万之处,恳请读者批评指正。

刘 静

2018年6月

目录

Contents

序 前 言

第1章	概述	1
1.1	引言	1
1.2	常温液态金属	1
1.3	液态金属丰富的物质属性开启科学发现之旅	3
1.4	液态金属优异的热流体特性为先进冷却与能源利用 提供全新机遇	5
1.5	液态金属天然的机电特性催生变革性电子增材制造 理论与应用技术	6
1.6	液态金属独特的材料属性促成颠覆性生物医学理论与 技术体系的构建	9
1.7	液态金属罕见的多能性促成全新柔性机器理论与应用 技术的构建	11
1.8	小结与展望	12
	参考文献	13
第2章	液态金属材料物质基本属性	17
2.1	引言	17
2.2	液态金属体积热膨胀效应	18
2.3	液态金属血压计流体压力效应	19
2.4	低熔点金属的低温脆断效应	20

2.5	液态金属与硅油基底的润湿性	20
2.6	液态金属与常见固体基底的黏附效应	21
2.7	液态金属防辐射特性	23
2.8	含湿液态金属材料的大尺度膨胀效应	25
2.9	轻量化电磁性多孔液态金属柔性材料	27
2.10	金属颗粒驱动液态金属流动并予以示踪的效应	30
2.11	液态金属-溶液界面对金属颗粒的电化学焊接效应	32
2.12	微重力条件下的液态金属变形效应	35
2.13	外太空存在液态金属的可能性	37
2.14	基于液态金属的可变形全液态量子器件	40
2.15	快速冷却处理对液态金属物理性能的影响	46
	参考文献	48
第3章	液态金属表面光学特性与色彩效应	51
3.1	引言	51
3.2	液态金属的质地与颜色	51
3.3	液态金属色彩的尺寸效应	52
3.4	液态金属的呈色效应	53
3.5	银白色液态金属的冷色效应	54
3.6	液态金属表面的着色	55
3.7	彩色荧光化液态金属及仿生变色龙机器	57
3.8	液态金属镜面光学效应	60
3.9	液态金属多孔化结构的透光效应	63
3.10	无极灯中汞的光致激发效应	65
3.11	液态金属液相放电触发的等离子体现象与光量子效应	66
3.12	液态金属结构色效应	68
	参考文献	70
第4章	液态金属表面与界面特性	71
4.1	引言	71

4.2	液态金属原子级别般的光滑表面形貌	71
4.3	液态金属的超常表面张力	73
4.4	液态金属表面张力的影响因素	74
4.5	溶液内液态金属的电润湿行为	76
4.6	电场作用下的液态金属周期性搏动现象	78
4.7	液态金属毛细现象	78
4.8	液态金属在微流道中的充填行为	79
4.9	液态金属在碱性溶液中的电双层效应	80
4.10	液态金属逆电润湿效应与能量捕获	81
4.11	液态金属氧化效应与各类基底间的润湿性	82
4.12	润湿性差异引发的液态金属自驱动	83
4.13	液态金属的普适化印刷效应	84
4.14	直写式液态金属柔性打印	85
4.15	通过改变基底润湿性实现液态金属在纸表面打印	87
4.16	基于液态金属柔性印刷电子的个性化应用	88
4.17	液态金属的金属键润湿特性	89
4.18	液态金属的惯性拖曳效应	90
4.19	具有自动封装功能的液态金属书写笔	92
4.20	液态金属 3D 打印成型中的界面扩散效应	92
4.21	液态金属的挤出膨胀效应	94
4.22	液态金属 Kirkendall 效应	95
4.23	液态金属材料复合效应	96
4.24	在空气中 3D 打印液态金属功能电子电路时的黏附效应	96
	参考文献	99

第 5 章	液态金属与各类介质之间的相互作用	103
5.1	引言	103
5.2	液态金属-溶液-空气触发的呼吸获能效应	103
5.3	金属液滴融合过程中的振荡效应	107
5.4	不同大小金属液滴融合过程中的弹射效应	108

5.5 电控作用下金属液滴在同类金属液池表面上的冲浪效应 109

5.6 振动诱导的液态金属法拉第波及液滴不融合效应 111

5.7 液态金属表面的 Leidenfrost 沸腾现象 112

5.8 液态金属吞噬外界颗粒的胞吞效应 114

5.9 溶液内石墨表面自发触动的液态金属自旋效应 117

5.10 石墨基底表面诱发的液态金属振荡现象 117

5.11 液态金属在石墨表面上的自由塑形效应 119

5.12 电场控制下液态金属大尺度变形跨越障碍 122

5.13 液相环境中的液态金属 3D 打印与快速成型 124

5.14 液体介质中的液态金属悬浮效应及 3D 打印 127

5.15 液态金属对特定基底的腐蚀与雕刻加工 129

5.16 液态金属低温相变强化黏附效应及柔性电子转印方法 130

参考文献 134

第 6 章 液态金属基础流体效应 137

6.1 引言 137

6.2 基于液态金属流体特性的水平仪 137

6.3 金属液滴撞击液池的飞溅现象 138

6.4 常温液态金属液滴撞击加热固体壁面的行为 145

6.5 表面含包覆膜的金属液滴撞击基底现象 148

6.6 液态金属与印刷基底之间的撞击黏附效应 150

6.7 经处理得到的液态金属墨水液滴撞击柔性材料表面情形 154

6.8 液态金属在纤维丛材料表面的弹跳行为 156

6.9 液态金属的流动生电效应 157

6.10 通过振动频率和强度调控液态金属的分散和重新聚合 158

6.11 通过溶液沸腾诱发的液态金属分散现象 160

6.12 液态合金微液滴在电场下的介电电泳效应 162

6.13 在微流道中产生液态合金液滴的流体剪切机制 163

6.14 液态金属无管虹吸效应 163

参考文献 166

第 7 章 液态金属的操控及驱动	169
7.1 引言	169
7.2 温差驱动的液态金属热虹吸效应	170
7.3 相变热气驱动效应触发液态金属双流体运动	171
7.4 Galvani 腐蚀电偶效应诱发的液态金属 Marangoni 流动效应	173
7.5 溶液中 pH 梯度驱动液态金属运动	175
7.6 光化学驱动的液态金属弹珠运动现象	175
7.7 溶液内液态金属喷射过程中的自剪切现象	177
7.8 溶液中液态金属在电场诱导下的射流效应	180
7.9 液态金属的超强引射效应	182
7.10 多相体系中的液态金属电激发效应	185
7.11 分布电场驱动的液态金属与水复合流体定向流动现象	186
7.12 交流电场诱发的液态金属流动与共振现象	188
7.13 交流电场下液态金属液滴的泵送效应	190
7.14 电场下水电解产氢强度的交流抑制效应	191
7.15 溶液中液态金属在磁场与电场耦合作用下的旋转效应	192
7.16 溶液中液态金属在电磁驱动下旋转时表面出现的褶皱波现象	195
参考文献	197
第 8 章 液态金属热学效应	199
8.1 引言	199
8.2 金属液滴的升降温特性	199
8.3 金属液滴的过冷度效应	201
8.4 液态金属的热界面效应	203
8.5 纳米液态金属材料及其导热效应	205
8.6 液态金属复合材料导热导电和力学效应的纳米改性	206
8.7 液态金属中高导热电绝缘性材料的隔离分散效应	209
8.8 低熔点金属相变吸热效应	214
8.9 纳米颗粒或运动触发的液态金属加速性液固相变效应	217
8.10 液态金属相转变储能材料	217

8.11	3D 打印中的液态金属液固相变成型效应	218
8.12	激光熔化处理金属中诱发的表面涟漪效应	220
8.13	水银的蒸发相变效应	220
8.14	液态金属的热管效应	221
8.15	低熔点合金的聚能与焊接效应	223
8.16	液态金属各向异性导热薄膜效应	223
8.17	液态金属微流体效应及应用	224
	参考文献	227
 第 9 章 液态金属电学效应		229
9.1	引言	229
9.2	液态金属柔性介质的电磁屏蔽效应	229
9.3	液态金属的流动变形电学效应	230
9.4	液态金属的断裂与缩颈效应	231
9.5	液态金属微胶囊自修复电路	232
9.6	基于液态金属常温焊接特性的电路修复	233
9.7	液态金属的皮表柔性电子特性	234
9.8	液态金属导线的柔性可拉伸电学效应	237
9.9	印刷式液态金属柔性电子可拉伸变阻效应	238
9.10	电迁移现象与液态金属薄膜的断裂效应	242
9.11	电场触发的液态金属自收缩效应及限流器效应	244
9.12	液态金属导电物在基底表面的机械擦除机制	245
9.13	基底表面液态金属电路的化学擦除机制	247
9.14	基底表面液态金属电路的电化学擦除机制	250
9.15	液态金属微流道电阻加热效应	251
	参考文献	252
 第 10 章 液态金属磁学效应		254
10.1	引言	254
10.2	关于传统流体与液态金属的润滑效应	254

10.3	液态金属磁流体润滑	255
10.4	磁性液态金属撞击磁体行为	256
10.5	磁控液态金属微型马达	260
10.6	电磁致动的液态金属柔性机器人	261
10.7	液态金属磁流体音响	263
10.8	液态金属流动诱发的电磁效应	264
10.9	液态金属电磁悬浮控制	265
10.10	液态金属适形化微波传输电磁效应	266
	参考文献	267
第 11 章	液态金属化学效应	269
11.1	引言	269
11.2	镓的氧化还原效应	269
11.3	化学物质触发的液态金属汞心脏振荡效应	270
11.4	基于电化学效应的常温液态金属柔性电池	271
11.5	液态金属催化效应触发的铝水反应制氢	274
11.6	含铝液态金属产氢行为的界面触发效应	275
11.7	金属基底强化的噬铝液态金属产氢效应	278
11.8	液态金属表面自发产生的柱状氢气流喷射现象	279
11.9	电化学探针效应	280
11.10	钠钾合金水热效应	281
11.11	钠钾液态金属与水反应时的热效应	283
11.12	钠钾液态金属的生物化学效应	285
	参考文献	286
第 12 章	液态金属力学效应	288
12.1	引言	288
12.2	液态金属复合材料的压缩导电效应	288
12.3	液态金属复合材料的低温膨胀导电效应	290
12.4	可固化后承力的液态金属骨水泥	291

12.5 基于液固相态转换效应的液态金属外骨骼 293

12.6 液态金属触发的弹性膜电致应变效应 295

12.7 液态金属液压传动效应 297

12.8 以液态金属为车轮的微型车辆的运动问题 298

参考文献 299

第 13 章 液态金属传感与能量转换效应 300

13.1 引言 300

13.2 关于不同金属之间的热电效应 300

13.3 液态金属与匹配金属的热电特性 301

13.4 液态镓基热电偶的热电特性 303

13.5 基于液态金属的纸上可印刷式热电温度传感器 305

13.6 基于液态金属的柔性可印刷式热电发生器 307

13.7 液态金属柔性电阻温度传感效应 311

13.8 基于液态金属的可拉伸电容式传感器 312

13.9 基于液态金属电化学效应的血糖测量 314

13.10 液态金属可穿戴柔性电子服装 316

参考文献 318

第 14 章 液态金属柔性可变形机器效应 319

14.1 引言 319

14.2 可变形机器人与液体机器的崛起 319

14.3 科幻电影中的液态金属终结者机器人掠影 322

14.4 电场控制下的液态金属多变形现象及柔性机器效应 322

14.5 电场控制下的液态金属薄膜超大尺度收缩形变效应 324

14.6 电场作用下的液态金属液滴合并行为 327

14.7 液态金属球高速自旋及诱发周围流体漩涡对现象 328

14.8 电场作用下的液态金属定向水平运动行为 329

14.9 电控液态金属机器泵送周围流体及药物行为 331

14.10 液态金属大尺度可逆变形的电化学协同控制机制 332

14.11	液态金属在石墨表面的自发铺展效应	335
14.12	电场作用下液态金属在石墨表面的逆重力蠕动爬坡	337
14.13	自驱动液态金属软体动物	339
14.14	液态金属机器自驱动运动的动力发生方式	341
14.15	自驱动液态金属机器的分离与融合效应	343
14.16	自驱动液态金属微小马达的宏观布朗运动现象	344
14.17	液态金属过渡态机器变形与运动效应	346
14.18	自驱动液态金属马达的规则排列	349
14.19	自驱动液态金属马达之间的碰撞与合并行为	350
14.20	电场控制下液态金属马达的定向加速运动	350
14.21	自驱动液态金属马达的磁陷阱效应	352
14.22	镀有磁性功能层的自驱动液态金属机器的电磁调控效应	354
14.23	液态金属阿米巴变形虫效应	356
14.24	酸性溶液中铜离子激发的可自发生长的液态金属蛇形运动	356
14.25	金属丝在液态金属机器本体上的自激振荡效应	359
14.26	溶液中金属微颗粒触发的液态金属跳跃现象	361
	参考文献	363
第 15 章	液态金属生物医学应用相关效应	365
15.1	引言	365
15.2	前景广阔的液态金属生物医学材料学	365
15.3	液态金属 CT 造影效应及高清晰血管网络成像	366
15.4	无定形液态金属电极	371
15.5	植入式医疗电子在体 3D 打印成型技术	373
15.6	液态金属神经连接与修复技术中的电学生物学效应	376
15.7	实验动物小鼠液态金属神经连接	378
15.8	液态金属连通破损神经驱动死亡动物躯体运动实验	379
15.9	用于治疗皮表黑色素瘤的液态金属低压电学生物学效应	382
15.10	生物皮表液态金属受电场触发的变形效应	382
15.11	液态金属适形化电化学肿瘤治疗方法	385