

THE PHYSICAL PROPERTIES OF LIQUID METALS

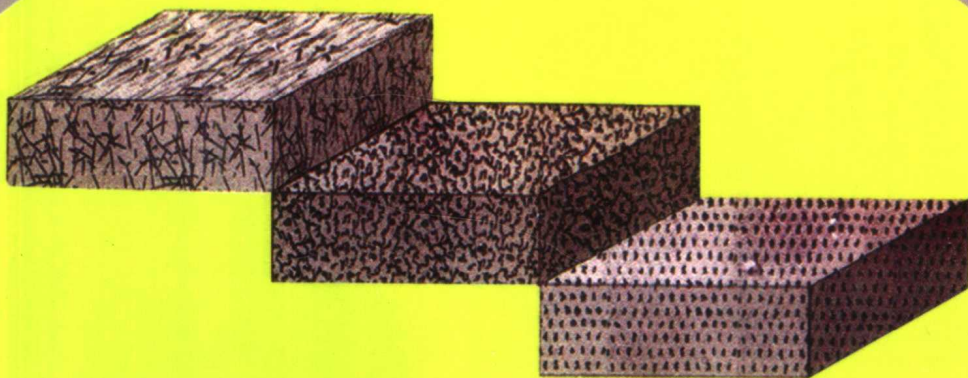
液态金属的物理性能

[日 本] TAKAMICHI IIDA

[加拿大] RODERICK I. L. GUTHRIE

合著

冼爱平 / 译
王连文



科学出版社

www.sciencep.com

液态金属的物理性能

The Physical Properties of Liquid Metals

冼爱平 译
王连文

科学出版社
北京

图字:01-2005-1702号

内 容 简 介

本书全面论述了液态金属物理性能的相关理论和实验数据,主要内容包括了液态金属的短程有序结构,液态金属的密度,热力学性能(蒸气压,热容及液态金属中的声速),液态金属的黏度,扩散率以及电阻和热导率。全书收集了大量的液态金属实验数据并整理、归类成各种图表进行分析。本书的特色是将液态金属的理论模型,经验公式与现有实验数据进行仔细的比较和分析,对本领域的研究人员及材料工程师在选取数据,理解和分析数据以及进行实验研究方面都有很好的参考价值。

本书适用于相关大专院校和科研院所的设计和研究人员、教师、研究生及大学本科高年级学生参考。

The Physical Properties Of Liquid Metals

Takaimchi Iida and Roderick I. L. Guthrie, 1988

Oxford University Press Inc. New York

First published 1988, First published as a paperback 1993

ISBN 0-19-856394-9

图书在版编目(CIP)数据

液态金属的物理性能/(日)飯田孝道,(加)格斯里著;洗爱平等译. —北京:科学出版社,2005

原书名:The Physical Properties Of Liquid Metals

ISBN 7-03-015152-6

I. 液… II. ①飯…②格…③洗… III. 液体金属-物理性能-研究 IV. TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第018620号

责任编辑:孙庆华 / 责任校对:侯沈生
责任印制:李廷宝 / 封面设计:张祥伟

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

丹东印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第一版 开本:850×1168 1/32
2006年1月第一次印刷 印张:9.5
印数:1-1000 字数:257 000

定价:20.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

致谢

首先我们要感谢时任 Osaka 大学冶金系主任的 Z. Morita 教授，由于他的安排，1981 年作者之一 T. Iida 去 McGill 大学进行了为期一年的学术休假，本书的两位作者才有机会写作本书。本书的写作也得益于 Z. Morita 教授在这一领域出色的研究成果和他对这一领域的杰出贡献。

我们要感谢作者所在的 Osaka 大学和 McGill 大学，以及加拿大自然科学与工程研究委员会（赐予作者之一 T. Iida “国际科学交流奖金”作为对本书写作过程中的财政支持）。同时作者还要感谢 McGill 大学冶金工程系主任的 G. Farnell 教授在本书写作过程中给予的各种帮助。

K. Rivett 小姐，P. Majumdar 女士和 J. Ritch 小姐完成了本书手稿的录入工作，作者在此表示感谢。

最后作者感谢我们的家人 6 年来对我们工作的理解和支持。
向以下图、表的授权使用单位表示感谢。

图、表序号	授权使用单位
图 1.1(a)	Van Nostrand Company, New York, U. S. A.
图 1.2	Scientific American; W. H. Freeman and Co., Publishers, New York, U. S. A.
表 1.1	Iwanami Shoten, Publishers, Tokyo, Japan Pergamon Journals Ltd., Oxford, U. K. The Metals Society, London, U. K.
表 1.2	Pergamon Journals Ltd., Oxford, U. K.
表 1.3	J. of Chemical Physics, New York, U. S. A.
表 2.1	McGraw - Hill, New York
图 2.23	McGraw - Hill, New York
图 2.25 ~ 2.29	Iron and Steel Inst. of Japan, Tokyo, Japan
图 3.3	Japan Soc. For Promotion of Science, Tokyo, Japan

图、表序号	授权使用单位
图 3.9 ~ 3.11	J. of Chemical Physics, New York, U. S. A.
图 3.12	J. of Physical Chemistry, Washington, D. C., U. S. A.
图 3.13	Metallurgical Transactions, Pittsburgh, Pa., U. S. A.
图 3.14	Japan Soc. For Promotion of Science, Tokyo, Japan Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
图 3.15	Japan Soc. For Promotion of Science, Tokyo, Japan
图 3.16	Materials Science & Engineering, Lausanne, Switzerland
图 3.19 ~ 3.21	Japan Soc. For Promotion of Science, Tokyo, Japan
图 4.1, 4.2(a) ~ (g)	Pergamon Journals Ltd., Oxford, U. K.
图 4.3(a), (b)	
图 4.12, 4.13	Soviet Physics Acoustics New York, U. S. A.
图 5.1	Iron and Steel Inst. of Japan, Tokyo, Japan
图 5.2	Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
表 5.2	J. of Chemical Physics, New York, U. S. A.
图 5.14, 5.15	J. of Physical Chemistry, Washington, D. C., U. S. A.
图 5.16	Marcel Dekker, New York, U. S. A.
图 5.17	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan.
图 5.18	Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
图 5.19, 5.20	J. of Physical Chemistry, Washington, D. C., U. S. A.
图 5.21 ~ 5.23	Metallurgical Transactions, Pittsburgh, U. S. A.
图 5.24	Metallurgical Transactions, Pittsburgh, U. S. A.
图 6.6	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan
图 6.7	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan
图 6.8, 6.12, 6.13,	
图 6.15, 6.16	Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
图 6.14	Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
图 6.17, 6.19	Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
图 6.20	J. of Physical Chemistry, Washington, D. C., U. S. A.
图 6.21	Canadian Institute of Metallurgy, Montreal, Canada
图 6.23	Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
图 6.24	Journal of Inorg. Nuclear Chemistry, New York, U. S. A.
图 6.25	Japan Institute of Metals, Sendai, Japan
表 6.7	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan
图 6.30 ~ 6.33	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan
表 7.3	J. of Chemical Physics, New York, U. S. A.

图、表序号	授权使用单位
图 7.5	Journal of Physics and Chemistry of Liquids, Gordon and Breach, London U. K.
图 7.8 ~ 7.10	High Temp. Science, Clifton, New Jersey, U. S. A.
表 7.4	Metallurgical Transactions, Pittsburgh, Pa, U. S. A.
图 7.11	Metallurgical Transactions, Pittsburgh, Pa, U. S. A.
图 7.12	Acta Metallurgica, Bethesda, Md., U. S. A.
图 7.13	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan
图 7.14	Metallurgical Transactions, Pittsburgh, Pa, U. S. A.
图 8.1	Physical Reviews, New York, U. S. A.
图 8.2	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan
表 8.2	Tetsu - to - Hugane, Tokyo, Japan
图 8.3	Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan
图 8.4	Philosophical Magazine, Univ. Of Leicester, U. K.
图 8.5 ~ 8.7	North Holland Physics Publishing, Amstertam, Holland
图 8.8	Philosophical Magazine, Univ. Of Leicester, U. K.
图 8.9	Plenum Press, New York, London
图 8.12	McGraw - Hill Book Co. New York - Toronto - London

译者的话

与固态金属丰富的文献资料相比，关于液态金属物理性能的科学文献和技术数据相对较少。实验方法也各不相同，实验数据相对比较分散，实验数据之间的可比性以及理论与计算结果的差别缺少系统的研究和分析，同时这些实验结果发表在不同的专业期刊上，查找起来十分不便。尤其是这方面中文书籍更少，因此我深感国内液态金属领域方面的研究人员和技术人员都需要这样一本有关这方面的综合性的专业学术著作。

日本大阪大学的飯田孝道教授与加拿大麦基尔大学格斯里教授合著的这本《液态金属的物理性能》一书与以往的同类专业著作不同，书中没有采用大量复杂的数学推导和数理方程演化，而是简明扼要地介绍了关于各种液态金属性能相关的理论阐述、数学表达、实验技术和经验公式，尤其是书中收集了大量液态金属物理性能的技术数据，并对这些数据与现有理论的偏差、实验方法的误差等做了广泛的评述。本书对从事与液态金属相关的研究人员和设计人员，包括冶金学者和专业的材料工程师尤其是具有相关工科背景的读者，是一本难得的好书。

我在2000年夏访问中国科学院物理研究所陆坤权研究员时，从一本博士论文的引证文献中发现了这本书的出处，并在国家图书馆找到了英文原著。读之手不释卷，深感是一本本领域很有价值的学术著作。因此产生了翻译并出版的想法。为此我与飯田孝道教授进行了联系，得到他的热情支持。他不但送给我一本1993年的第二版原著，还详细地标明相对第一版中作出的一系列修改之处。通过进一步联系，本书作者之一格斯里教授给我回信，同意我们翻译并出版这本书，并附上了书面许可。此前英国牛津大学出版社已将版权转让给格斯里教授（详见原书作者信

函)。在此我向本书作者飯田孝道教授和格斯里教授深表谢意。

本书由我和王连文翻译。其中我译第一章至第五章，王连文译第六章至第八章。孙校开阅读了第一章至第三章的初稿，并进行了若干修改。于永田阅读了全书的初稿，并做了一些文字修改。最后全书由我负责校对和定稿。由于我们是初入液态金属研究领域，书中难免存在不少错误，尤其是一些专业术语不一定恰当，望读者能及时指出，以便再版时更正。

王连文

2005. 6. 15

原书作者信函

(版权授权书)

亲爱的先生或女士：

我同意洗爱平教授将我们的英文著作 *The Physical Properties of Liquid Metals* (牛津大学出版社, 1993 年版) 翻译成中文并公开出版。

罗格里克· 格斯里 (Roderick I. L. Guthrie)

2003 年 4 月 4 日

罗格里克· 格斯里 教授

麦吉尔大学金属工艺中心主任, 冶金学麦克唐纳教授

加拿大蒙特利尔, 大学街 3610 号

电话 514 - 398 - 1551

传真 514 - 398 - 4168

电子信箱 rod@mmpc.mcgill.ca

非常感谢你们的翻译, 并祝你成功!

原书作者信函 (版权授权书)

Dear Sir or Madam:

I agree with that Prof. A. P. Xian to translate and to publish the English book, "The Physical Properties of Liquid Metals" published by Oxford University Press in 1993, into Chinese version.

Yours Sincerely

Roderick I. L. Guthrie

Signature and date *4th April 2003*

Professor Roderick I. L. Guthrie
Macdonald Professor of Metallurgy, FRSC, FCIM. Eng.
Director, McGill Metals Processing Centre
3610 University Street
vong Bldg., RM 2M051
Montreal, QC, H3A2B2, Canada
Tel: 514 - 398 - 1551, Fax: 514 - 398 - 4168
E - mail: rod@mmpc.mcgill.ca

*Many thanks for the translation &
Good wishes for your success.*

作者前言

在所有涉及液态金属的工艺流程中，要清晰地理解其中的各种控制机制，必须了解关于液态金属的物理化学知识（如它们的各种物理性质和化学性质）。在过去的30年中，冶金科学和工业技术取得了很大的进展。关于提炼冶金学方面已有许多相关著作，如Darken和Gurry（1953）所著的《金属的物理化学》，Richardson（1974）所著的《冶金中熔体的物理化学》等。这些著作涵盖了熔体物理化学的大部分领域，如结构、物理性质、热力学、动力学和反应动力学。从冶金学者的观点来看，这些著作具有很高的价值。然而，前者主要强调经典热力学，而后者则主要描述经典热力学和反应动力学。而对于液态金属的结构和物理性质，尽管已经认识到这些知识对于液态金属加工十分重要，但目前尚没有一本适用于冶金学者及材料工程师的专著。另外，在前述的两本著作中，已对液态金属的结构及物理性质进行了相当的描述，但深入理解液体结构及物理性质与液态加工时各种工艺现象之间的联系仍具有很重要的意义，尤其是制备高质量的金属材料，需要有关于液态金属或合金物理性质的详细知识。类似地，与平衡热力学不同，对过程冶金学进行原子尺度的微观分析方法可以提供一个基本构架，以理解和阐明冶炼或精炼工艺中的反应速率问题。

目前，在涉及液态金属加工的工艺中，流体力学正在发挥着越来越大的作用。在这种连续理论的处理方法中，液态金属物理性质的数值一般为常数。如果原子尺度处理方法取得成功，我们就可以预测这些数值。然而，目前通常用实验数据对液态金属的物理性质进行计算，还没有精确的理论预测方法。由于液态金属各种物理参数的实验值之间存在着较大的离散性，如果缺乏关于

液态金属物理性质相关理论的知识，我们很难评估和判断某一个数值是可靠的或者是比较可靠的。因此，对于冶金学者和其他从事液态金属加工的工程人员来讲，了解液态金属的物理性能十分必要。

在过去的30年中，大部分关于连续理论的著作中均缺少对液态金属物理性质的详细描述。本书的目的是对目前液态金属的相关知识进行一个总结，书中收集了关于液态金属物理性质的各种理论模型，经验关系式和实验数据。本书主要针对大学本科生、冶金学者和材料工程师，并假定读者具有基本的统计力学和量子力学的相关知识。书中给出理论方程的表达式，但并未给出这些理论公式的详细解释。本书也可供对液态金属原子性质感兴趣的工程师或冶金学者参考。

全书共有八章及两个附录。第一章论述液态金属的一般性质。第二章是关于液态金属和合金结构的导论，主要描述在液态理论中两个基本的物理量，即双体势和双体分布函数。因为液体物理性质的理解必须以原子排列知识为基础，本书特别对双体分布函数做了详细的描述。第三章描述液态金属的密度。尽管密度是一个不可缺少的基本量，但目前仅有很少的综述性的资料可资利用。第四章是关于液态金属的热力学性质。它包括蒸气压，比热和声速。第五章是关于液态金属表面张力，以及相关的实验方法和实验数据。第六章主要讨论液态金属的黏度。特别对液态金属黏度实验数据之间具有很大的离散性的现象进行了分析。第七章主要讨论液态金属中的扩散，以及在实验测量方面存在的问题。最后，第八章讨论了液态金属的电导和热导。本书描述了测量液态金属物理性质（包括密度，表面张力，黏度，扩散率和热导率等）的基本实验方法。另外，书中许多表达式都适用于熔融金属盐，并在附录1中给出了几个实例。

近30年来，液态金属理论方面取得了很大的进展；同时大量的实验研究帮助我们进一步地理解液态金属的性质和基本行为。然而，从工程冶金的角度来看，目前关于液态金属物理性质

的知识还很不够，对液态金属和合金精确而可靠的数据仍很缺乏，非常需要进行系统的研究。

最后，作者希望本书中收集的各种液态金属物理性质的数据不只是一些单纯的数据图表，同时它对使用者理解和认识液态金属加工工艺过程中的微观机制有重要的学术价值。

1986年7月

Osaka

Montreal

T. Iida

R. I. L. Guthrie

附原书摘要

Abstract

The manufacture of high metallic materials requires a detailed knowledge of the theory of liquid metals. In particular, transport phenomena and their phenomenological constants are of critical importance to the understanding, design, and quantification of liquid metal processing operations. This book provides the first comprehensive critical survey of those microstructural characteristics of liquid metals which determine their macroscopic properties of viscosity, surface tension, density, heat capacity, thermal conductivity, electrical resistivity, diffusion, and velocity of sound transmission. The experimental techniques used to obtain these data are also reviewed.

The result is a valuable set of correlations and reference data which enable the reader of understand the basic phenomena underlying the properties of liquid metals. As such, the book will be invaluable for metallurgists and materials engineers working in this area.

本书所用的符号

() 中的数字为公式序号

大写斜体字母

A	面积
A	参数(2.9);或常数
A_i	第 i 组元单分子层所占面积
A^*	约化面积
B	常数
B_s	等熵体积模量
C	常数
$C_{Aw}(\eta)$	修正系数
C_p, C_v	等压、等容热容
D	自扩散系数(常数)
$D_i, D_{s,m}$	溶质、溶剂(或基体金属)的扩散系数
D^*	约化的线直径(3.6);约化扩散率(7.24)
E	动能
E, E_a	振子在液体、空气中的共振振幅(6.4)
E_F	Fermi 能
E_v^*	势垒高度
$\zeta(Q)$	$\{g(r)_{-1}\}$ 的 Fourier 变换
H	焓
H	高度
H^E	混合焓(混合热)
H_0	0K 时的蒸发焓
H_μ, H_D	黏性流动或扩散的表观激活能
$1/H$	形状因子
$\Delta^1 H_m$	熔化焓
$\Delta^E H_b$	沸点 T_b 时的蒸发焓
$\Delta^S H_0$	0K 时的升华焓
I	(X 射线)强度

I	转动惯量
I, I_0	出射或入射 X 射线强度(3.4)
K	与覆盖度无关的吸附系数
K, K_0	仪器常数
K_f	弹性常数
M	原子量;质量(6.9)
N	原子数目
N_A	Avogadro 常数
P	压力
ΔP	压力变化
$P(T)$	概率函数
$P(A), P(B)$	振子 A、B 的比例
P_l	Legendre 多项式
P_m	最大(气)泡压
R	气体常数
R	半径
S	熵
S^E	过剩熵
$\Delta_s^l S_m$	熔化熵
$\Delta_s^g S_b$	沸点 T_b 处的蒸发熵
S_A	表面积
$S(Q)$	结构因子(干涉函数)
$S_{\text{conf}}(Q)$	偏结构因子
T	绝对温度
T	时间周期
T^*	约化温度($T^* = T/T_c$; $T^* = Tk/\varepsilon$)
U	内能
U	声速
$U(Q)$	膺势
U_c	内聚能
U_D	流动性
V	体积
V	原子体积

V_A	二元系中原子 A 占据的原子体积
ΔV_m	熔化时体积的变化
V^E	过剩体积
$W(\phi)$	热波动的概率
X, X, Y	
Z, Z'	(座滴法中的)参数
Z	第一配位数
Z	价电子数(4.35), (4.36)
Z^E	过剩价
Z_i, Z_s	体相或表面原子的第一配位数

小写斜体字母

a	平均原子间距;常数
a_s, a_i	组元 s 或 i 的活度
b, c, d	常数
c	浓度
d	原子直径 (Pauling 离子半径给出的相应值)
d	溶质和溶剂原子间距离
dv	体积元(2.4);速度增量(6.1)
e	电子电荷
f	原子的散射因子
f	表面堆垛因子(5.21)
f	活度系数(6.52)
$f(s), f_z$	原子间力
f, f_a	原子在液体或空气中的共振频率 (6.4)
g	重力加速度
$g(r)$	双体分布函数
$g_{sp}(r)$	偏双体分布函数
h	浸入深度
h, \hbar	Planck、Dirac 常数 ($\hbar = h/2\pi$)
i	化学常数
k	Boltzmann 常数
k_F	Fermi 球半径 (Fermi 波矢)