

[日 本] 飯田孝道 著  
[加拿大] 罗格里克· 格斯里

# 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:李延宝 / 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

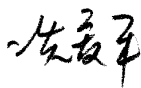
与固态金属丰富的文献资料相比，关于液态金属物理性能的科学文献和技术数据相对较少。实验方法也各不相同，实验数据相对比较分散，实验数据之间的可比性以及理论与计算结果的差别缺少系统的研究和分析，同时这些实验结果发表在不同的专业期刊上，查找起来十分不便。尤其是这方面中文书籍更少，因此我深感国内液态金属领域方面的研究人员和技术人员都需要这样一本有关这方面的综合性的专业学术著作。

日本大阪大学的饭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。为此我与饭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。



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](mailto:rod@mmpc.mcgill.ca)

非常感谢你们的翻译, 并祝你成功!

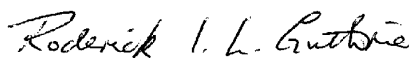


## 原书作者信函 (版权授权书)

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



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@mmpe.mcgill.ca](mailto:rod@mmpe.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
$G(Q)$	$\{g(r)_{-1}\}$ 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
$H_\mu, H_D$	黏性流动或扩散的表观激活能
$1/H$	形状因子
$\Delta_s^l H_m$	熔化焓
$\Delta_b^g H_b$	沸点 $T_b$ 时的蒸发焓
$\Delta_s^g H_0$	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
$\Delta P$	压力变化
$P(T)$	概率函数
$P(A), P(B)$	振子 A、B 的比例
$P_1$	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
$\Delta_s^1 S_m$	熔化熵
$\Delta_f^g S_b$	沸点 $T_b$ 处的蒸发熵
$S_A$	表面积
$S(Q)$	结构因子(干涉函数)
$S_{\alpha\beta}(Q)$	偏结构因子
$T$	绝对温度
$T$	时间周期
$T^*$	约化温度( $T^* = T/T_c$ ; $T^* = Th/\epsilon$ )
$U$	内能
$U$	声速
$U(Q)$	赝势
$U_c$	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
$\Delta V_m$	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
$g_{\alpha\beta}(r)$	偏双体分布函数
$h$	浸入深度
$h, \bar{h}$	Planck、Dirac 常数 ( $\bar{h} = h/2\pi$ )
$i$	化学常数
$k$	Boltzmann 常数
$k_F$	Fermi 球半径 (Fermi 波矢)



$l$	长度
$l$	界面的有效厚度
$m$	单原子质量
$m$	一个液滴的质量
$m, n$	参数
$n$	排斥力指数
$n$	分离离子的数目 (A. 6)
$n_0$	平均数密度 ( $n_0 = N/V$ )
$\dot{q}$	功率输入 (8.5)
$r$	径向距离
$r$	半径
$r. d. f.$	径向分布函数
$s$	表面张力修正
$s$	位移
$t$	时间
$u, v$	体相或表面原子间的交互作用能
$v$	浸入液体内部悬丝的体积 (3.1)
$v$	比容
$v_0$	密排摩尔体积
$v_F$	Fermi 速度
$v_f$	单个分子的平均自由体积
$w$	分离一个原子所需的功或能
$\Delta w$	表观重量损失
$x$	原子 (或摩尔) 分数
$x$	长度
$x, y, z$	坐标轴

## 希腊字母

$\alpha$	等压热膨胀系数; 吸收系数 (3.4)
$\alpha_0$	293K 时的体积热膨胀系数
$\alpha, \beta$	相
$\beta$	修正系数

$\beta_s$	滑动摩擦因数
$\Gamma_s$	过剩表面浓度
$\Gamma_s^0$	饱和表面覆盖度
$\Gamma$	表面张力
$\gamma_M$	混合物的表面张力
$\gamma_0$	溶剂的表面张力 (5.52); 总的摩尔表面能
$\Delta$	无维变量
$\delta, \delta_0$	对数衰减 (振幅)
$\varepsilon$	吸引势阱深度; 特征能量 ( $\varepsilon/k$ 能量参数)
$\zeta$	修正因子 ( <i>Roscoe</i> 方程)
$\zeta_f, \zeta_H$	
$\zeta_s, \zeta_{HS}$	摩擦因数
$\eta$	堆垛分数 (堆垛密度)
$\eta_i$	相位移
$\theta$	接触角; 角度
$\theta$	Einstein 特征频率 (6.21)
$2\theta$	散射角
$\theta_s$	覆盖分数 ( $\Gamma_s/\Gamma_s^0$ )
$\kappa$	发射系数
$\kappa_s$	等熵压缩系数
$\kappa_T$	等温压缩系数
$\Lambda$	液态金属密度随温度的变化率
$\lambda$	波长; 屏蔽半径
$\lambda$	热导率
$\mu$	黏度; 参数 ( $bT_c/\rho_c$ )
$\mu_A$	二元混合物的黏度
$\mu_k, \mu_\phi$	由动力学或原子间吸引力引起的粘度
$\mu^E$	剩余黏度
$\mu^*$	约化黏度
$\nu, \nu_L$	(由 Lindemann 公式计算得出的) 原子振动的平均频率
$\nu$	动力学黏度
$\xi, \xi_A$	参数或常数
$\pi$	圆周率

$\rho$	密度
$\rho_A$	合金的密度
$\Delta\rho$	数密度波动
$\rho_e$	电阻率
$\sigma$	有效硬球直径
$\sigma_e$	电导率
$\tau$	单位面积上的剪切力
$\Phi$	总的势能
$\phi$	剩余结合能
$\phi(r)$	双体势
$\phi_s(Q)$	势解中长程势部份的 Fourier 变换
$\chi$	电负性
$\omega_i$	横向角频率

## 角标

b	在沸点
c	在临界点
m	在熔点; $g(r)$ 曲线上第一个峰的位置; 最大值
g	气体
l	液体
s	固体

# 目 录

致谢 .....	( i )
译者的话 .....	( v )
作者前言 .....	( ix )
本书所用的符号 .....	( xiii )
<b>第一章 液态金属通论</b> .....	( 1 )
1.1 引言 .....	( 1 )
1.2 液态金属的一般性质 .....	( 11 )
参考文献 .....	( 18 )
<b>第二章 液态金属的结构</b> .....	( 20 )
2.1 引言 .....	( 20 )
2.2 分布函数 .....	( 21 )
2.3 纯金属液态的结构 .....	( 28 )
2.4 液态合金的结构 .....	( 39 )
参考文献 .....	( 49 )
<b>第三章 液态金属的密度</b> .....	( 50 )
3.1 引言 .....	( 50 )
3.2 密度的测量方法 .....	( 51 )
3.3 密度的计算 .....	( 61 )
3.4 液态金属和合金的原子体积 .....	( 70 )
3.5 液态金属和合金密度的实验数据 .....	( 72 )
参考文献 .....	( 80 )
<b>第四章 液态金属的热力学性质</b> .....	( 84 )
4.1 引言 .....	( 84 )
4.2 纯金属的蒸气压 .....	( 84 )
4.3 液态金属的热容 .....	( 95 )
4.4 声速 .....	( 99 )

参考文献 .....	(115)
<b>第五章 液态金属的表面张力 .....</b>	<b>(117)</b>
5.1 引言 .....	(117)
5.2 表面张力的实验测量 .....	(118)
5.3 表面张力的理论方程 .....	(128)
5.4 表面张力的半经验和经验方程 .....	(132)
5.5 表面张力的温度系数 .....	(140)
5.6 液态金属单质表面张力的实验数据 .....	(143)
5.7 溶质原子在表面的吸附 .....	(143)
5.8 二元合金的表面张力方程 .....	(153)
参考文献 .....	(156)
<b>第六章 液态金属的黏度 .....</b>	<b>(159)</b>
6.1 引言 .....	(159)
6.2 黏度的测量方法 .....	(160)
6.3 振荡容器法测量黏度 .....	(169)
6.4 黏度的理论公式 .....	(181)
6.5 黏度的经验公式和半经验公式 .....	(185)
6.6 单质液态金属黏度的实验数据 .....	(202)
6.7 液态合金的黏度 .....	(204)
参考文献 .....	(213)
<b>第七章 液态金属中的扩散 .....</b>	<b>(218)</b>
7.1 引言 .....	(218)
7.2 扩散系数的测量方法 .....	(221)
7.3 自扩散系数的理论表达式—— 液体的动力学理论 .....	(226)
7.4 硬球理论推导的扩散方程 .....	(227)
7.5 基于特定模型的扩散方程 .....	(229)
7.6 经验公式和半经验公式 .....	(231)
7.7 扩散系数与黏度的关系 .....	(234)
7.8 单质液态金属自扩散系数的实验数据 .....	(237)

---

7.9 液态合金中溶质的扩散 .....	(237)
参考文献 .....	(245)
<b>第八章 液态金属的电导与热导 .....</b>	<b>(250)</b>
8.1 引言 .....	(250)
8.2 液态金属及合金的导电性能 .....	(250)
8.3 液态金属的热导率 .....	(263)
8.4 液态金属电导率与热导率之间的关系 ——Wiedemann - Franz - Lorenz (WFL) 定律 .....	(267)
参考文献 .....	(267)
<b>附录 I 本书一些公式对熔融盐的应用 .....</b>	<b>(270)</b>
参考文献 .....	(279)
<b>附录 II 国际单位制与物理常数及转换因子 .....</b>	<b>(280)</b>

# 第一章 液态金属通论

## 1.1 引言

### 1.1.1 液相区域

众所周知，世界上所有的元素或化合物均以固体、液体或气体的形式存在，其存在方式主要取决于温度和压力条件。图 1.1a, b, c 分别给出了  $P-V-T$ ,  $P-T$  和  $P-V$  相图。金属可以存在于这些形式中的任何一种。

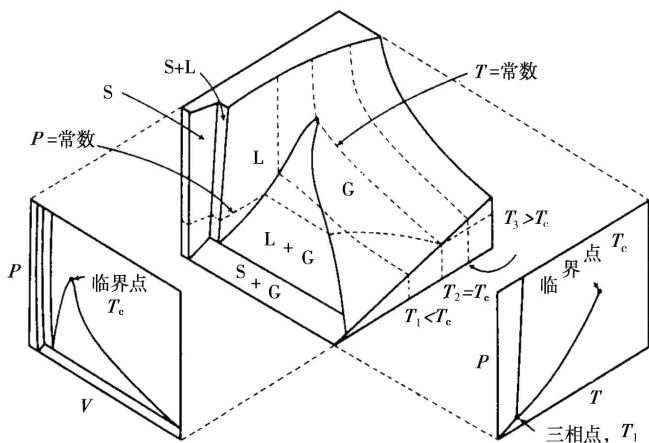


图 1.1(a) 简单物质的  $P-V-T$  相图<sup>[1]</sup>

在三相点，固体、液体和气体处于平衡态。图中临界点代表液体可能存在的上限温度。在临界点以上，由于无法区分液体或气体，这时物质处于一种密度均匀的流体状态。作为对照，熔化

线上则没有上临界点。临界点以下，可以观察到两个一级相变，即熔化和蒸发。相图中三相点是液体存在的最低温度，由于过冷现象，在  $T < T_1$  时，液体也可以以过冷状态存在。

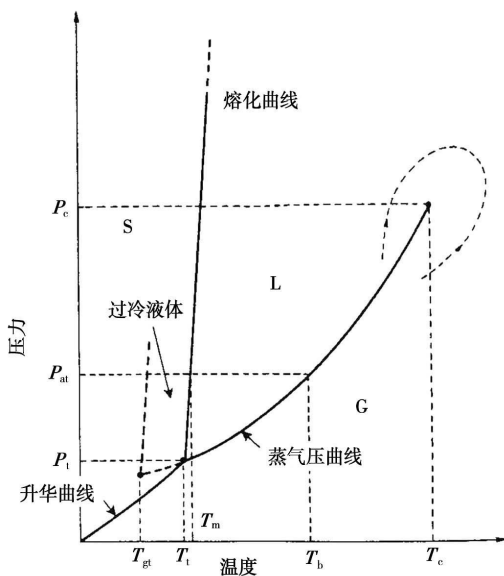
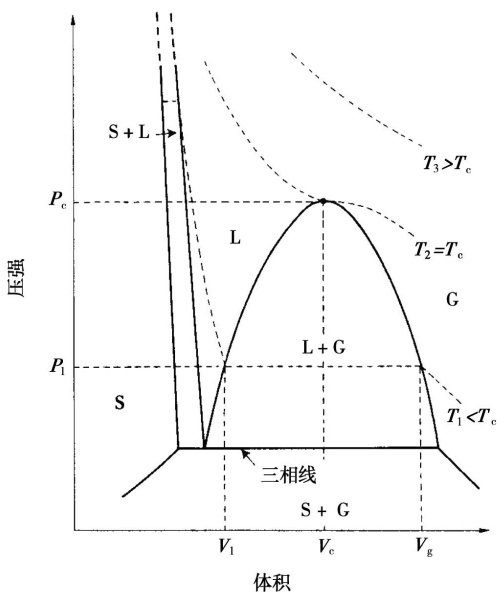


图 1.1(b) 简单物质的  $P-T$  相图

图中分别标出了玻璃化转变温度  $T_g$ ，三相点  $T_1$ ，熔点  $T_m$ ，沸点  $T_b$ ，临界点  $T_c$ ，以及三相点的压力值  $P_1$ ，常压  $P_{at}$ ，和临界点的压力值  $P_c$ 。回绕临界点的带箭头的虚线路径表示液体与气体之间的无相变转化。过冷液体是亚稳态的

液态金属或合金通常都在常压下进行制备或研究。表 1.1 给出了常压条件下 ( $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) 各种金属元素的熔点  $T_m$ ，沸点  $T_b$ ，液相存在的温区以及原子量（或相对原子质量），这些数据在液态金属物理性质的研究或计算中是常用的，例如原子体积，Lindemann 熔化定律、黏度、扩散定律和声速等。



图 1.1(c) 简单物质的  $P-V$  相图

$V_1$ 、 $V_g$  分别为在温度为  $T_1$ ，压力为  $P_1$  条件下处于平衡状态的液体和气体的体积。 $V_c$  为临界点的体积

表 1.1 常压下金属和半金属的原子质量  $M$ ，熔点  $T_m$ ，沸点  $T_b$  和液相存在温度区间

元素	$M$	$T_m/\text{K}$	$T_b/\text{K}$	$(T_b - T_m) / \text{K}$	
锂	Li	6.94	452.15	1590.15	1138
铍	Be	9.01218	1558.15	3053.15	1495
硼	B	10.81	2273.15 ~ 2773.15	(2823.15)	(50 ~ 550)
碳	C	12.011	-	-	-
钠	Na	22.98977	$371.05 \pm 0.05$	1150.65	$779.60 \pm 0.05$
镁	Mg	24.305	923.15	1380.15	457
铝	Al	26.98154	933.35	(2333.15)	(1400)
硅	Si	28.085	1687.15	2608.15	921
磷	P	30.97376	317.15 (白磷) <sup>a</sup> 866.15 (红磷) <sup>a</sup>	553 <sup>b</sup>	236

续表

元素	$M$	$T_m/K$	$T_b/K$	$(T_b - T_m) / K$	
钾	K	39.098	336.75 ± 0.05	1035.35	698.60 ± 0.05
钙	Ca	40.08	1124.15	1513.15	389
钪	Sc	44.9559	1812.15	(3000.15)	(1188)
钛	Ti	47.9	1998.15	3533.15	1535
钒	V	50.9415	(1973.15)	3623.15 <sup>a</sup>	(1650)
铬	Cr	51.996	2178.15	(2473.15)	(295)
锰	Mn	54.9380	1517.15	2368.15	851
铁	Fe	55.84	1808.15	3003.15	1195
钴	Co	58.9332	1765.15	3458.15	1693
镍	Ni	58.70	1728.15	3448.15	1720
铜	Cu	63.54	1356.15	2903.15	1547
锌	Zn	65.38	692.62	1203.15	510.53
镓	Ga	69.72	302.930 ± 0.005	2573.15 ± 150	2270 ± 150
锗	Ge	72.5	1231.65	(2973.15)	(1742)
砷	As	74.9216	1090.15 (36atm)	889.15 (升华点)	
硒	Se	78.9	493.35	958.15	464.8
铷	Rb	85.467	311.65	969.15	657.5
锶	Sr	87.62	1070.15	1912.15 ± 5	842 ± 5
钇	Y	88.9059	1782.15	3200.15	1418
锆	Zr	91.22	2130.15	4578.15 <sup>a</sup>	2448
铌	Nb	92.9064	2740	3173.15	433.15
钼	Mo	95.94	2895.15 ± 10	5073.15	2178 ± 10
锝	Tc	{98}	2413.15	(4523.15)	(2110)
钌	Ru	101.0	(2723.15)	(3973.15)	(1250)
铑	Rh	102.9055	2239.15	(4233.15)	(1994)
钯	Pd	106.4	1828.15	2473.15	645
银	Ag	107.868	1233.65	2253.15	1019.5
镉	Cd	112.41	594.05	1039.15 ± 2	445.1 ± 2
铟	In	114.82	429.55	2373.15	1943.6
锡	Sn	118.6	504.99	2548.15	2043.16
锑	Sb	121.7	903.65	1913.15 ± 8	1009.5 ± 8
碲	Te	127.6	722.95	1663.15	940.2
铯	Cs	132.9054	301.65	1033.15	731.5
钡	Ba	137.33	1263.15	1810.15	547
镧	La	138.905	1193.15	3742.15	2549
铈	Ce	140.12	1068.15	3741.15	2673
镨	Pr	140.9077	1208.15	3400.15	2192
钕	Nd	144.2	1297.15	3300.15	2003
钷	Pm	{45}	(1320) <sup>b</sup>	(2700) <sup>b</sup>	(1380)
钐	Sm	150.4	1345.15	2173.15	828
铕	Eu	151.96	1099.15	1712.15	613
钆	Gd	157.2	1585.15	(3273.15)	(1688)
铽	Tb	158.9254	1629.15	(3073.15)	(1444)
镝	Dy	162.5	1680.15	(2873.15)	(1193)
铥	Ho	164.9304	1734.15	(2873.15)	(1139)

续表

元素	$M$	$T_m/K$	$T_b/K$	$(T_b - T_m) / K$	
铒	Er	167. 2	1770. 15	(3173. 15)	(1403)
铥	Tm	168. 9342	1818. 15	(2000. 15)	182
镱	Yb	173. 0	1097. 15	1700. 15	603
镥	Lu	174. 96	1925. 15	3600. 15	1675
铪	Hf	178. 4	2480. 15	> 3473. 15	> 993
钽	Ta	180. 947	3123. 15	> (4373. 15)	> (1250)
钨	W	183. 8	3655. 15	5828. 15 <sup>a</sup>	2173
铼	Re	186. 207	3440. 15 ± 60	5873. 15 <sup>a</sup>	2433 ± 60
锇	Os	190. 2	(2973. 15)	(5773. 15)	(2800)
铱	Ir	192. 2	2727. 15	> 5073. 15	> 2346
铂	Pt	195. 0	2047. 15	4077. 15	2030
金	Au	196. 9665	1336. 15	2983. 15	1647
汞	Hg	200. 5	234. 28	629. 73	395. 45
铊	Tl	204. 3	575. 65 ± 0. 1	1730. 15 ± 10	1154. 5 ± 10
铅	Pb	207. 2	600. 55	2023. 15	1422. 6
铋	Bi	208. 9804	544. 10 ± 0. 05	1833. 15 ± 5	1289 ± 5
钋	Po	{209}	527. 15	1235. 15	708
砹	At	{201}	-	-	-
钫	Fr	{223}	-	-	-
镭	Ra	226. 0254	(973. 15)	(1413. 15)	(440)
锕	Ac	227. 0278	1323. 15	-	-
钍	Th	232. 0381	2088. 15	> 3273. 15	> 1185
镤	Pa	231. 0359	-	-	-
铀	U	238. 029	1405. 15	4091. 15	2686
镎	Np	237. 0482	921. 15	-	-
钚	Pu	{244}	912. 65	3508. 15	2595. 5
镅	Am	{243}	1123. 15 ~ 1473. 15	-	-
镆	Cm	{247}	-	-	-
锫	Bk	{247}	-	-	-
锇	Cf	{251}	-	-	-
镱	Es	{252}	-	-	-
镻	Fm	{257}	-	-	-
钷	Md	{258}	-	-	-
锎	No	{259}	-	-	-
铹	Lr	{260}	-	-	-

表 1.1 中数据, 除注有上标 a 和 b 的数据外其余均取自 [3]。

<sup>a</sup>数据取自 [4a]。

<sup>b</sup>数据取自 [5]。

{ } 中的数据表示该元素的具有最长半衰期的同位素的原子质量。

( ) 中的数据为有争议的数据。

> 表示高于或大于。

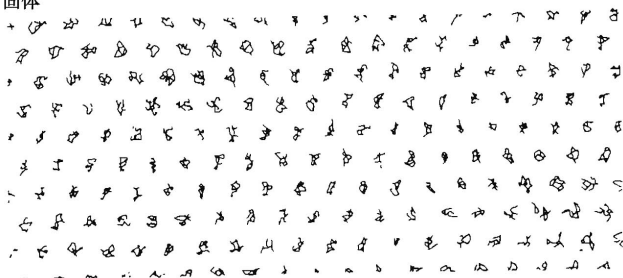
### 1.1.2 固体、液体和气体的特征

首先考虑液体状态的特征和结构,并从微观上比较它与固体或气体之间的差别。这里的讨论具有普遍意义,而非局限于液态金属。在过去的 80 ~ 100 年里,大量的研究主要针对固体或气体。在这些研究中既有实验也有理论,并由此积累了可观的知识。与固体或气体相比较,尽管最近已进行了相当的努力,但人们对液体结构和性质的相关知识还相当少,主要原因是对液体而言尚未建立一个理想的理论模型。

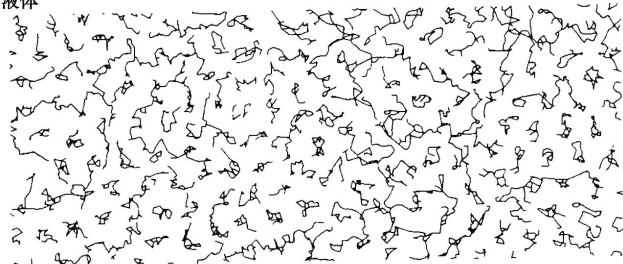
理想模型的概念对物质性能的研究十分重要,这一模型可以定义一个假想的物质,其具有实际物质的特性,以便进行理论简化和数学处理,这种方法的优点在于物理概念清晰。对气体和固体来说,这种理想模型早已确立。例如对于理想固体或完整晶体,原子规则的排列于晶格点阵上,这种规则排列是在三维空间上长程有序的,并且不受热激活扰动。理想固体是一个有固定形状的晶体。相反,理想气体中每一个分子可以在气体占有的整个体积内自由移动。这些简化的模型导致了对实际固体或气体研究中获得大量的研究结果(如 Einstein 比热公式, Brillouin 区和 Boyle - Charles 定律)。将这种理想模型进行修正后,就可以用于对实际物质的描述,并提供与实验数据近似的结果。

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。从原子尺度上讲,这表明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,它将与周围的原子相互作用,并且像它在固体中一样进行着热振动,在下一时刻,它又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。因此,对于清楚的理解液体的结构和性质,液体中原子之间的间距和弛豫时间是两个最关键的物理量。

## 固体



## 液体



## 气体

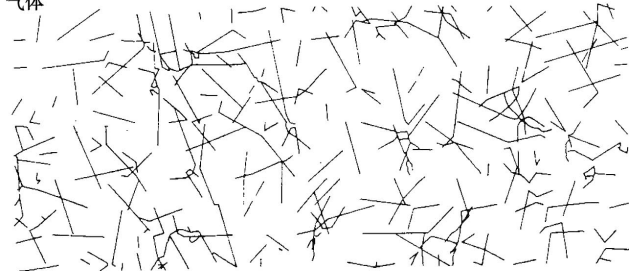


图 1.2 固体、液体和气体中分子的运动轨迹

该图是计算机模拟的结果。二维系统具有与实际物质相同的相和相变，但二维系统中分子的位置和运动情况比较容易表示。固体中分子只能在固定晶格附近作振动，而液体和气体中的分子则可以自由移动。液体和气体的主要区别在于二者密度和分子碰撞频率的不同。该程序求解了 500 个二维分子的运动方程并给出了分子的运动轨迹（取自 Barker 和 Henderson 1981<sup>[2]</sup>）

图 1.2 描述了固体、液体和气体中分子的运动轨迹。它是 Barker – Henderson 1981 年用计算机模拟的结果<sup>[2]</sup>。这个图很好的说明了物质三态的不同的原子特性。

表 1.2 金属元素相变时的焓变和熵变及液态金属在熔点时的蒸发焓

金属元素	$\Delta_s^l H_m$ kJmol <sup>-1</sup>	$\Delta_s^l S_m$ JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	$\Delta_f^l H_b$ kJmol <sup>-1</sup>	$\Delta_f^l H_b$ JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	$\Delta_s^l H_m / \Delta_f^l H_b$ %	$\Delta_f^l H_m$ kJmol <sup>-1</sup>
Li	12.93	6.45	148	92.7	2.0	157
Be	12.22	7.83	292	106	4.2	-
Na	2.64	7.12	99.2	85.9	2.7	107
Mg	8.8	9.54	128	93.9	6.9	133
Al	10.46	11.2	291	104	3.6	306
Si	50.6	30.0	383	108	13.2	392
K	2.389	7.11	79.1	75.8	3.0	87.6
Ca	8.4	7.55	151	85.9	5.6	158
Sc	(16.7)	(9.22)	-	-	-	(344)
Ti	14.6	7.51	426	120	3.4	438
V	16.7	7.68	-	-	-	485
Cr	20.9	9.81	342	116	6.1	351
Mn	14.6	9.62	220	94.3	6.6	246
Fe	13.77	7.61	340	109	4.1	357
Co	15.48	8.76	-	-	-	396
Ni	17.15	9.94	375	118	4.6	400
Cu	13.0	9.59	307	108	4.2	318
Zn	7.28	10.5	114	96.6	6.4	119
Ga	5.590	18.4	270	100	2.1	280
Ge	36.8	30.4	328	106	11.2	340
Se	5.9	12.0	-	-	-	-
Rb	2.197	7.06	75.7	78.8	2.9	85.2
Sr	10.0	9.61	1.54	93.1	6.5	160
Y	11.51	6.40	367	102	3.1	396
Zr	19.2	9.01	-	-	-	581
Nb	29.3	10.7	-	-	-	-
Mo	35.6	12.3	590	121	6.0	600
Pd	16.7	9.15	361	112	4.6	351
Ag	11.09	8.99	258	104	4.3	266
Cd	6.40	10.8	100	96.2	6.4	104