

# HANDBOOK ON LEAD-BISMUTH EUTECTIC ALLOY AND LEAD

PROPERTIES, MATERIALS COMPATIBILITY,  
THERMAL-HYDRAULICS AND TECHNOLOGIES

## 铅与铅铋共晶合金手册

——性能、材料相容性、热工水力学和技术

2007 版

OECD/NEA Nuclear Science Committee  
Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle  
Working Group on Lead-bismuth Eutectic

戎利建 张玉妥 陆善平 陈星秋 等译校  
王 培 熊 超 叶中飞 李依依



科学出版社



014038737

TB331-62  
01

本书译文的质量及其与原文的一致性完全由译者负责。  
如出现译文与原文不一致的情况，以原文为准。

# 铅与铅铋共晶合金手册

——性能、材料相容性、热工水力学和技术

2007 版

OECD/NEA Nuclear Science Committee  
Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle  
Working Group on Lead-bismuth Eutectic

戎利建 张玉妥 陆善平 陈星秋 等 译校  
王培 熊超 叶中飞 李依依



TB331-62

科学出版社

北京



北航

C1726319

## 内 容 简 介

本书共分为十四章。书中主要介绍了液态重金属的性质，铅铋共晶合金与铅的热物理性能及其电特性，如密度、摩尔体积、等压热容、黏度、热性能和电导率等；液态重金属的热力学性能、流动性能与化学性能；化学控制和检测系统，检测并调整氧气在液态重金属中的浓度，以减轻腐蚀和冷却剂污染问题；辐照铅铋共晶合金与辐照铅的性质，并从液态金属腐蚀性角度给出了与铁素体钢、马氏体钢和奥氏体钢的相容性。此外，书中还阐述了辐照质子及液态重金属对材料结构与性能影响的综合效应，以及腐蚀防护与反应堆热工水力学的特性等。

本书可供从事核工程、材料工程研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

本书原版由 OECD 以英文出版，书名是：

Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies

© 2007 OECD

版权所有

本中文版© 2014 中国科技出版传媒股份有限公司（科学出版社）

### 图书在版编目 (CIP) 数据

铅与铅铋共晶合金手册：性能、材料相容性、热工水力学和技术 / OECD/NEA Nuclear Science Committee 等；戎利建等译校. —北京：科学出版社，2013

书名原文：Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies

ISBN 978-7-03-039445-3

I. ①铅… II. ①经… ②戎… III. ①铅合金-共晶体复合材料-技术手册 IV. ①TB331-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 311401 号

责任编辑：童安齐 闫红霞 袁莉莉 / 责任校对：马英菊

责任印制：吕春珉 / 封面设计：耕者设计工作室

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

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 2 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2014 年 2 月第一次印刷 印张：37 3/4

字数：889 000

定价：198.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

## 经济合作与发展组织

经济合作与发展组织，简称经合组织（Organization for Economic Cooperation and Development, OECD），是一个由三十多个民主成员国组成的独一无二的论坛，旨在共同努力解决全球化趋势下经济、社会以及环境方面面临的挑战。同时，经合组织率先致力于了解并帮助成员国政府应对新的发展和关心的问题，例如公司管理、信息经济以及人口老龄化问题。该组织为政府间交流政策经验、对共同问题寻求解决方案、确定正确做法来协调国内及国际政策提供了平台。

经合组织成员国包括澳大利亚、奥地利、加拿大、比利时、捷克共和国、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、日本、韩国、卢森堡、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、斯洛伐克、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国、美国、智利、爱沙尼亚、以色列和斯洛文尼亚。欧洲经济共同体委员会参与经合组织的工作。

经合组织出版社广泛宣传对于经济、社会和环境问题的统计及研究，以及成员国达成一致约定的、指导方针以及标准。

\* \* \*

经济合作与发展组织秘书长对本书的出版全面负责。书中观点和引用的论据并不一定代表该组织或其成员国政府的官方意见。

## 核能署

经济合作与发展组织/核能署（Organization for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency, OECD/NEA）于1958年2月1日成立，其前身为欧洲经济合作组织欧洲核能机构，1972年4月20日日本成为该机构的非欧洲正式成员时才命名为现在的名称。目前核能署由31个经合组织成员国组成，包括澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、捷克共和国、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、日本、卢森堡、墨西哥、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、韩国、俄罗斯联邦、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。此外，欧洲共同体组织也参与核能署的工作。

核能署的使命是：

(1) 出于和平目的，通过国际合作帮助其成员国保持并进一步发展安全、环保、经济适用的核能技术所需要的科技和立法基础。

(2) 在一些关键问题上提供权威的评估并促成共识，为政府提供核能政策，以及在能源和可持续发展等问题上为经合组织提供更广泛的政策分析。

核能署的具体权限包括核能运行的安全和规程、核废料的管理、辐射防护、核科学、核燃料循环利用的经济性和技术性分析、核相关的法律 and 责任的界定，以及相关的公共信息管理。同时，原子能机构数据库为参与国提供核相关的数据和计算机程序服务。

在以上及其他相关的工作中，核能署与位于维也纳的国际原子能机构有着非常紧密的合作，相互之间签有一项合作协议。同时，与其他国际组织在核领域方面也有着密切的合作。

© OECD 2007

未经书面许可不得复制、拷贝、传播或翻译此书。如有需求，可向经济合作与发展组织出版社提出申请：[rights@oecd.org](mailto:rights@oecd.org) 或传真（+33-1）45 24 99 30。翻印本书的部分内容请致信申请，地址是 the Centre Francais d'exploitation du droit de Copie (CFC)，20 rue des Grands-Augustins，75006 Paris，France，fax（+33-1）46 34 67 19，（[contact@cfcopies.com](mailto:contact@cfcopies.com)）或 Copyright Clearance Center (CCC)，222 Rosewood Drive Danvers，MA 01923，USA，fax+1 978 646 8600，[info@copyright.com](mailto:info@copyright.com)（仅限美国地区）。

## 译者的话

战略性先导科技专项是中国科学院在我国至 2050 年科技发展路线图战略研究基础上, 瞄准事关我国全局和长远发展的重大科技问题提出的, 能够形成重大创新突破和集群优势的战略行动计划。2010 年 3 月 31 日国务院第 105 次常务会议审议通过中国科学院“创新 2020”规划时批准设立战略性先导科技专项。2011 年 1 月“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”专项正式启动, 随后国家自然科学基金委员会启动了“先进核裂变能的燃料增值与嬗变”重大研究计划项目。

2011 年“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”专项论证时, 中国科学院詹文龙副院长对我说材料问题就依靠金属所了, 我回所后组织我们两个研究室的相关科技人员开始调研并提出了计划。2012 年詹副院长把 OECD/NEA 核科学委员会出版的有关 ADS 系统的《铅与铅铋共晶合金手册》发给了我。该手册详细列出了一些基础的研究数据, 以及材料与铅和铅铋共晶合金的相容性、热工水力学数据, 并涉及 ADS 工程方面的技术和仪器研究与使用。这对我国正在开展的相关 ADS 嬗变战略性先导专项、核裂变能的燃料增值与嬗变及其相关材料方面的研究有重要参考价值。经科学出版社与原著方联系获得了翻译与出版的版权许可, 我们团队齐心协力于 2013 年 2 月将本书翻译成了中文。

本书总结了欧洲有关国家长期在 ADS 嬗变系统研究的成果和数据, 中文版的出版将会使我国相关科技人员更快、更方便地了解 and 掌握该方面的进展与成果。该书可作为相关科研机构和专业研究人员的参考书, 也适合于相关专业的研究生学习使用。希望本书的出版进一步促进 ADS 嬗变系统战略性先导科技专项等的发展, 早日实现相关研究的重大突破。

本书由李依依统稿与全书校对。参加本书翻译与校对的还有: 张玉妥、董红、孙佳(第一~三章); 陆善平、王培、董文超(第四章); 戎利建(第五章); 王培(第六章); 陆善平(第七、八章); 戎利建、宋元元(第九章); 熊超、陈波、马颖澈、刘奎(第十章); 陈星秋(第十一章); 王培、叶中飞、李殿中(第十二~十四章)。

中国科学院金属研究所 李依依  
2013 年 2 月

## 致 谢

核能署秘书处向铅-铋共晶工作组主席 Fazio C (卡尔斯鲁厄研究中心, 德国) 表示衷心的感谢, 特别是她的奉献精神和卓越的领导才能。同时也向为该手册准备工作奉献了很多时间和精力的各章节作者和撰稿人致以最诚挚的感谢, 特别感谢对提高该手册质量有重要贡献的同行评审人: Borgstedt H U (卡尔斯鲁厄研究中心, 德国)、Latgé C (法国原子能委员会, 法国)、Ballinger R (麻省理工大学, 美国) 和 Katsuta H (日本原子力研究机构, 日本)。另外, 对本工作发起倡议的 Pasamehmetoglu K (爱德华国家实验室, 美国) 及 Knebel JU (卡尔斯鲁厄研究中心, 德国) 也表示感谢!

## 前 言

燃料循环科学问题工作组是在核能署核科学委员会的主持下成立的，其任务是协调与各种现有先进核燃料循环方面（包括先进反应堆系统、相关的化学与工艺流程、燃料及材料的性能和发展、加速器和散裂靶）有关的科学活动。燃料循环科学问题工作组下设不同的小组，它们涉及核燃料循环中宽广的科学领域。

铅-铋共晶工作小组成立于 2002 年，它是燃料循环科学问题工作组的一个附属小组，其任务是协调并指导各参与方在铅-铋共晶方面的研究工作，同时加强相互间密切和广泛的合作。它的目标是制定一套与之相关的标准和要求以及标准化的试验方法、数据采集和分析，并被授权以手册的形式发表这些结果。由于在第四次国际论坛上选择铅作为冷却剂引起研究人员的广泛关注，铅-铋共晶工作小组决定收集整理铅-铋共晶和铅相关的数据和技术方面的内容，汇编成册。

这一版本的手册以开放的态度对铅和铅-铋共晶技术的发展做了最新的总结和展望，并对书中的数据和前后不一致的地方进行了严格的审查。



# 目 录

译者的话

致谢

前言

第一章 绪论	1
参考文献	7
第二章 热物理与电学性能	9
2.1 引言	9
2.2 Pb-Bi 合金相图	10
2.3 正常熔点	12
2.3.1 Pb	12
2.3.2 Bi	13
2.3.3 LBE 合金	14
2.4 熔化与凝固时体积的变化	15
2.5 正常熔点处的熔化潜热	17
2.5.1 Pb	17
2.5.2 Bi	18
2.5.3 LBE 合金	19
2.6 正常沸点	19
2.6.1 Pb	19
2.6.2 Bi	21
2.6.3 LBE 合金	21
2.7 正常沸点处的汽化潜热	22
2.7.1 Pb	22
2.7.2 Bi	23
2.7.3 LBE 合金	23
2.8 饱和蒸汽压	24
2.8.1 Pb	24
2.8.2 Bi	25
2.8.3 LBE 合金	26
2.9 表面张力	28
2.9.1 Pb	28
2.9.2 Bi	29
2.9.3 LBE 合金	30
2.10 密度	32

2.10.1	Pb	32
2.10.2	Bi	32
2.10.3	LBE 合金	36
2.11	热膨胀	37
2.12	声速和压缩性	38
2.12.1	Pb	39
2.12.2	Bi	40
2.12.3	LBE 合金	40
2.13	比热	42
2.13.1	Pb	42
2.13.2	Bi	43
2.13.3	LBE 合金	44
2.14	临界参数和状态方程	46
2.14.1	临界参数	46
2.14.2	状态方程	49
2.15	黏度	50
2.15.1	Pb	50
2.15.2	Bi	51
2.15.3	LBE 合金	51
2.16	电阻率	53
2.16.1	Pb	54
2.16.2	Bi	54
2.16.3	LBE 合金	55
2.17	热导率和热扩散率	57
2.17.1	Pb	57
2.17.2	Bi	58
2.17.3	LBE 合金	59
2.18	结论	61
	参考文献	63
<b>第三章</b>	<b>热力学关系和液态重金属与其他冷却剂的相互作用</b>	<b>68</b>
3.1	引言	68
3.2	焓、熵(固态和液态)——自由能和混合熵	68
3.3	纯度要求	70
3.4	金属和非金属杂质在 LBE 合金和 Pb 中的溶解度	72
3.4.1	金属元素在 LBE 合金和 Pb 中的溶解度	72
3.4.2	氧在纯 Pb 与 LBE 合金中的溶解度	73
3.5	扩散系数	76
3.5.1	某些金属元素的扩散系数	76
3.5.2	氧的扩散系数	79
3.6	化学反应与三元相图	80

3.7 Pb 和 LBE 合金与水的交互作用 .....	81
3.7.1 文献调研 .....	81
3.7.2 有关的风险 .....	83
3.7.3 数值模拟程序 .....	83
3.8 Pb 或 LBE 合金与 Na 的交互作用 .....	83
3.9 LBE 合金和 Pb 与有机化合物的交互作用 .....	86
参考文献 .....	86
<b>第四章 化学控制和监测系统 .....</b>	<b>90</b>
4.1 引言 .....	90
4.2 Pb 和 LBE 合金中氧含量的控制 .....	90
4.2.1 氧含量的上限 .....	91
4.2.2 氧含量的下限 .....	92
4.2.3 活性氧控制细则 .....	95
4.2.4 核系统的方针 .....	97
4.2.5 氧控制系统 .....	99
4.2.6 氧的均匀化问题 .....	100
4.3 杂质特征和控制要求 .....	102
4.3.1 杂质来源 .....	102
4.3.2 杂质行为和提纯要求 .....	104
4.3.3 活化杂质 .....	107
4.3.4 产率评估 .....	107
4.3.5 运行的结果 .....	108
4.4 化学监测仪器 .....	109
4.4.1 在线电化学氧传感器 .....	109
4.4.2 采样系统和分析方法的发展 .....	123
4.5 总结 .....	128
参考文献 .....	128
<b>第五章 铅铋共晶合金和铅辐照后的性能 .....</b>	<b>134</b>
5.1 引言 .....	134
5.2 理论考虑 .....	135
5.2.1 Po 的挥发特性 .....	135
5.2.2 Po 的挥发途径 .....	137
5.2.3 半经验 Miedema 模型估算含 Po 二元系统的热力学数据 .....	143
5.2.4 I 在液态 LBE 散裂靶中的热化学关系分析 .....	163
5.3 辐照后 LBE 合金的研究 .....	163
5.3.1 挥发性放射核素的释放 .....	163
5.3.2 液态 LBE 合金中 Hg 和 Tl 的热释放行为 .....	168
5.3.3 非正常情况下挥发性放射核素的释放 .....	171
5.4 辐照效应 .....	172
5.4.1 ISOLDE 设备中受质子辐照的熔融 Pb-Bi 靶的气态和挥发元素	

产出率的测量 .....	172
5.4.2 放射性实验 .....	180
参考文献 .....	182
<b>第六章 结构材料与铅铋共晶合金、铅的相容性：数据标准化、腐蚀机理和腐蚀速率 .....</b>	<b>184</b>
6.1 引言 .....	184
6.2 基本原理 .....	184
6.2.1 腐蚀 .....	184
6.2.2 氧化 .....	186
6.3 总结和文献数据评论 .....	190
6.4 结论和需要进一步补充的数据 .....	219
6.4.1 结论 .....	219
6.4.2 需要进一步补充的数据 .....	220
6.5 腐蚀测试过程的建议（标准化） .....	220
6.5.1 实验前准备 .....	220
6.5.2 测试条件 .....	221
6.5.3 实验后分析 .....	222
参考文献 .....	223
<b>第七章 铅铋共晶合金和铅对结构材料力学性能的影响 .....</b>	<b>226</b>
7.1 引言 .....	226
7.2 LME .....	228
7.2.1 润湿：从理想到实际的金属系统 .....	228
7.2.2 LME 判据和定义 .....	231
7.3 环境辅助断裂 .....	233
7.3.1 EAC 的定义 .....	233
7.3.2 EAC 发生的唯象判据 .....	233
7.4 奥氏体和铁素体/马氏体钢与 Pb、LBE 合金和其他液态金属接触的拉伸行为 .....	234
7.4.1 定义 .....	234
7.4.2 HLM 中光滑、粗糙和有缺口的马氏体钢试样的拉伸行为 .....	234
7.4.3 LME 效应：与 LBE 合金或 Pb 接触的 T91 钢的行为 .....	236
7.4.4 防止 LME 效应的主要要求 .....	242
7.4.5 可能被解释成 EAC 效应的实验结果 .....	243
7.5 与 Pb 和 LBE 合金接触的 316L 奥氏体钢和 T91 钢的疲劳特性 .....	246
7.5.1 定义 .....	246
7.5.2 与 LBE 合金接触的铁素体/马氏体钢的低周循环疲劳行为 .....	247
7.5.3 在 LBE 合金中保持时间对 T91 钢疲劳特性的影响 .....	248
7.5.4 在 LBE 合金中预先浸入对 T91 钢疲劳特性的影响 .....	249
7.5.5 LBE 合金对 T91 钢和 MANET-II 的疲劳裂纹扩展的影响 .....	249
7.5.6 LBE 合金对 T91 钢疲劳断裂表面形态的影响 .....	251

7.5.7	LBE 合金对 T91 钢和 MANET-II 疲劳裂纹萌生的影响 .....	252
7.5.8	与在 Li 中和 Na 中相比, 与铅合金接触的 316L 奥氏体不锈钢的低周疲劳行为 .....	254
7.6	蠕变特性: 定义及与 Pb 和 LBE 合金接触的 316L 奥氏体钢和 T91 钢的目前发展状况 .....	255
7.6.1	定义 .....	255
7.6.2	在空气及液态金属中 (除 Pb、LBE 之外) 的马氏体和奥氏体不锈钢的蠕变特性 .....	255
7.6.3	在 Pb 或 LBE 合金中, 奥氏体和铁素体/马氏体钢的蠕变和蠕变裂纹生长 .....	255
7.6.4	液态金属加速蠕变 .....	256
7.6.5	与 Pb 接触的 T91 钢的加速塑性应变 .....	256
7.6.6	与 LBE 合金或 Pb 接触的 T91 钢和 316L 奥氏体钢的蠕变裂纹生长 .....	256
7.7	断裂力学: 与 Pb 或 LBE 合金接触的 316L 奥氏体钢和 T91 钢的情况 .....	257
7.8	试验程序推荐规范 .....	257
7.8.1	LBE 合金中的力学试验 ASTM 标准 .....	257
7.8.2	HLM 实验装置的适应性 .....	260
7.8.3	试验过程的推荐规范 .....	260
7.9	总结 .....	261
	参考文献 .....	263
	附表 .....	271
第八章	辐照对结构材料和铅铋共晶合金相容性的影响 .....	304
8.1	引言 .....	304
8.2	LBE 合金中受质子和中子辐照的铁素体/马氏体钢 T91 (PSI) .....	304
8.2.1	LiSoR .....	305
8.2.2	辐照 .....	305
8.2.3	表面分析 .....	306
8.2.4	拉伸试验 .....	309
8.2.5	在 LANSCE WNR 设备中, 预氧化 HT9 的质子辐照 .....	312
8.3	在 BR2 (SCK · CEN) 中的中子辐照 .....	312
8.3.1	材料 .....	312
8.3.2	拉伸试验 .....	313
8.3.3	LBE 调节 .....	314
8.3.4	液态 LBE 合金和辐照 (1.7dpa) 对 AISI 316L 的影响 .....	314
8.3.5	液态 LBE 合金和辐照 (4.36 dpa) 对 T91 钢的影响 .....	315
8.3.6	液态 LBE 共晶合金和辐照 (4.36 dpa) 对 EM10 的影响 .....	316
8.3.7	液态 LBE 合金和辐照 (4.36dpa) 对 HT9 的影响 .....	317
8.4	在 PSI 的 SINQ 靶中质子谱和中子谱的辐照 .....	318
8.5	将来的辐照项目 (DEMETRA 项目) .....	319

参考文献 .....	320
<b>第九章 高温下铅和铅铋共晶合金的腐蚀防护</b> .....	<b>322</b>
9.1 引言 .....	322
9.2 表面保护方法 .....	323
9.2.1 稳定性氧化物的合金化 .....	323
9.2.2 耐腐蚀涂层 .....	326
9.2.3 LBE 合金的缓蚀剂 .....	328
9.3 合金和涂层的腐蚀测试 .....	329
9.3.1 表面合金 .....	329
9.3.2 块体合金 .....	329
9.3.3 涂层 .....	332
9.4 总结 .....	336
参考文献 .....	336
<b>第十章 低普朗特数的热工水力学</b> .....	<b>339</b>
10.1 引言 .....	339
10.2 液态金属特征 .....	339
10.3 守恒方程 .....	342
10.4 层流动量传输 .....	344
10.4.1 通道流或管道流 .....	345
10.4.2 边界层方程 .....	346
10.4.3 总结和讨论 .....	347
10.5 层流能量传输 .....	348
10.5.1 管道层流类型 .....	349
10.5.2 流体流动和传热参数 .....	350
10.5.3 热边界条件 .....	351
10.5.4 圆管中的层流传热 .....	352
10.5.5 层流传热小结 .....	357
10.6 湍流动量传输 .....	358
10.6.1 湍流描述 .....	359
10.6.2 湍流的雷诺方程和输运方程 .....	360
10.6.3 典型湍流模型 .....	361
10.6.4 边界层近似法 .....	362
10.6.5 小结 .....	363
10.7 湍流能量传输 .....	364
10.7.1 湍流能量传输的雷诺方程 .....	364
10.7.2 流体流动和传热参数 .....	364
10.7.3 湍流传热的实验观测 .....	367
10.7.4 湍流传热的闭合方法 .....	368
10.7.5 工程应用的传热关系式 .....	375
10.8 总结 .....	388

参考文献 .....	389
<b>第十一章 仪表仪器</b> .....	<b>401</b>
11.1 测量技术发展背景 .....	401
11.2 流量计 .....	402
11.2.1 电磁流量计 .....	402
11.2.2 以动量为基础的流量计 .....	408
11.2.3 压力和计数器流量计 .....	411
11.2.4 超声波传输时间法 (UTT) .....	415
11.3 压力传感器 .....	417
11.3.1 压力计的型号及操作经验 .....	417
11.3.2 在完全发展湍流管道流动中的压力校正 .....	418
11.4 局部速度测量 .....	420
11.4.1 超声波多普勒测速仪 .....	420
11.4.2 永磁探针 (PMP) .....	423
11.4.3 反应探针 (RP) .....	425
11.4.4 热线风速仪 (HWA) .....	426
11.4.5 过渡时间法 .....	428
11.4.6 中子放射线照相术 .....	430
11.4.7 纤维力学系统 (FMS) .....	431
11.4.8 毕托管和普朗特管 .....	432
11.5 空隙率传感器 .....	436
11.5.1 电磁传感器 .....	437
11.5.2 X射线、 $\gamma$ 射线和中子射线照相术 (NR) .....	439
11.5.3 电阻探针或导电探针 .....	449
11.5.4 两相流动的超声多普勒测速仪 (UDV) .....	454
11.6 温度测量 .....	456
11.6.1 热电偶 .....	456
11.6.2 热辐射表面温度测量 (HETSS) .....	461
11.7 电位计 .....	463
11.7.1 直接接触式传感器 .....	463
11.7.2 非侵入性液位计 .....	465
11.8 自由表面测量 .....	467
11.8.1 光学方法 .....	467
11.8.2 声学测距 .....	483
11.9 总结 .....	487
参考文献 .....	488
<b>第十二章 HLM 实验用设备</b> .....	<b>499</b>
12.1 引言 .....	499
12.2 技术设备及其应用 .....	499
12.3 材料测试设备及其应用 .....	509

12.4	热工水力学设备及其应用 .....	534
<b>第十三章</b>	<b>安全指南 .....</b>	<b>557</b>
13.1	Pb 对人体健康和环境的影响 .....	558
13.2	规章制度 .....	561
13.3	常见安全控制和实践 .....	564
13.4	HLM 研发中的安全操作 .....	565
	参考文献 .....	569
<b>第十四章</b>	<b>液态重金属冷却剂技术的展望及研发重点 .....</b>	<b>571</b>
14.1	引言 .....	571
14.2	HLM 系统在 600℃ 运行的技术差距、研发需求以及优先方向 .....	572
14.2.1	HLM 热物性质 .....	572
14.2.2	HLM 化学性质 .....	573
14.2.3	材料 .....	573
14.2.4	技术 .....	574
14.2.5	热工水力学 .....	574
<b>附录 I</b>	<b>投稿人名单 .....</b>	<b>576</b>
<b>附录 II</b>	<b>工作组成员 .....</b>	<b>579</b>



# 第一章 绪 论\*

随着核裂变能的开发与应用，人们对液态金属作为快堆堆芯冷却剂和聚变反应堆包层的研究不断深入。最近研究发现，加速器驱动系统（accelerator-driven systems, ADS）可以利用液态金属实现高放射性废料的嬗变。同时，液态重金属（heavy liquid metals, HLM）可以作为高功率散裂中子源的备选靶材。

ADS是具有次临界堆芯的核裂变反应堆，如有效增殖因子 $k_{\text{eff}} < 1$ 。为了获得稳定性的堆芯，ADS运行时需要一个额外的中子源。外部中子源是由质子加速器和散裂靶提供的（常考虑HLM）。质子撞击HLM产生的中子作为中子源，驱动次临界反应堆堆芯发生持续的链式反应，图1.0.1为ADS示意图。

中子散裂靶也为其他应用提供中子源。例如，即将在瑞士保罗谢尔研究所（Paul Scherrer Institute, PSI）SINQ设备上进行的兆瓦级国际合作实验（megawatt pilot experiment, MEGAPIE）的中子散裂靶就是基于加速器驱动系统的发展框架设计制造的，如图1.0.2所示。研究MEGAPIE中子散裂靶的目的是论证液态金属在SINQ设备上提供中子源的可操作性，也就是研究能提供中子的材料。

因为中子不能像常规的轻水堆一样被热能化，所以当快堆堆芯的中子谱接近裂变反应堆堆芯的中子谱时，快堆是裂变反应堆。只有恰当地选择快堆冷却剂，才能保证有效传热，使中子谱不发生明显的热能化。为了实现上述目标，通常选用液态金属（Na或Pb、LBE合金）或气体作为快堆冷却剂，如图1.0.3所示。

20世纪50年代，有些国家（如美国）开始了对HLM如Pb或LBE合金作为快堆冷却剂的研究。使用金属Na作为冷却剂可以获得较高的功率密度，从而使倍增时间降低。缩短倍增时间是当时的一个重要目标，因此20世纪60年代金属Na成为冷却剂的首选。而前苏联“阿尔法”级潜艇核反应堆用LBE合金作为冷却剂，这引起了人们对冷却剂技术和材料的广泛研究与开发。为了避免出现因渣的形成而发生堵塞现象，提高服役过程中专用钢的耐腐蚀性，应特别重视对液态金属的化学控制。

最近，俄罗斯重新掀起了将Pb、LBE合金作为民用快堆冷却剂的研究热潮。20世纪90年代初发展起来的BREST（俄罗斯模块式铅冷快堆）的概念广为人知，它与

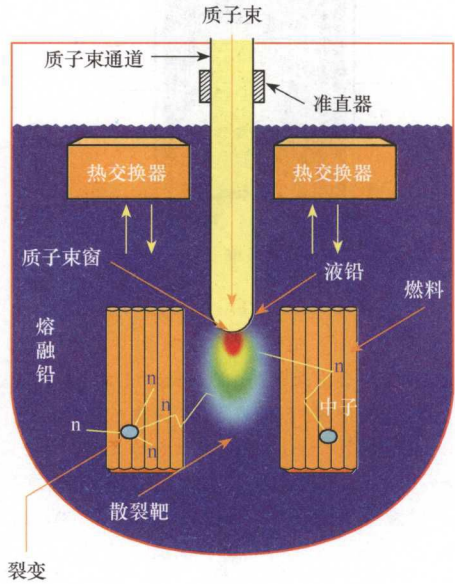


图 1.0.1 ADS 示意图（欧洲路线图）

\* 本章主要作者是 Fazio C，其他作者请见附录 I。