

核工程用材料的热物理性质

(第二版)修订和增补

[俄] 基里洛夫 主编
吴兴曼 郑颖 张玲 等译

中国原子能出版传媒有限公司

核工程用材料的热物理性质

(第二版)
修订和增补

[俄]基里洛夫 主编
吴兴曼 郑颖 张玲 等译



中国原子能出版传媒有限公司

图字(2011)01-2011-6491

图书在版编目(CIP)数据

核工程用材料的热物理性质(第二版)修订和增补 /
(俄)基里洛夫主编;吴兴曼,郑颖,张玲等译. —北京:
中国原子能出版传媒有限公司,2011.9
ISBN 978-7-5022-5326-4

I. ①核… II. ①基… ②吴… ③郑… ④张…
III. ①核工程-工程材料-热物理性质-研究 IV. ①TL34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 185635 号

核工程用材料的热物理性质(第二版)修订和增补

出版发行 中国原子能出版传媒有限公司(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 付 真
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市申画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 11.75 字 数 293 千字
版 次 2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5326-4 定 价 45.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

УДК 621. 039. 53/54(031)

К43

ББК 31. 46

审阅人:技术科学博士佛金、技术科学博士萨瓦金斯基、技术科学副博士鲁缅采夫(第2章)、技术科学博士波普科夫(第3章)、技术科学博士别特洛夫(第4、第5章)、技术科学博士波波夫(第6章)。

基里洛夫,捷连切娃,德尼斯金娜

К43 核工程用材料的热物理性质:下列专业大学生用的教学参考教材:14. 03. 05——核反应堆和动力装置,14. 04. 04——核电厂及其装置/基里洛夫教授主编;第二版,修订和增补——М. : ИздАт,2007. —200 с. —ISBN 978-5-86656-207-7(в пер.)。

内容简介

列举了用于一般工程估算的核动力下列基本材料的热物理性质数据:核燃料(金属燃料和陶瓷燃料)、冷却剂(气体、水、重水、液态金属)、慢化剂、吸收剂、结构材料。给出了确定材料下列性质的计算关系式和方程:热力学性质(密度、比焓、比定压热容、熔点和沸点、熔解热和蒸发热、蒸气压力、热膨胀、表面张力)、输运性质(热导率、热扩散率、黏度、积分热导率、电导率)和发射率。

提交了固态和液态材料性质随温度变化的表。给出一些燃料(U, Pu, Th, UO₂, UC)、水和液态金属的临界参数值。在第2版中增添了某些金属蒸气的热物理性质的数据。此外,注意到并修正了发现的第1版中的打印错误。

本教材帮助核动力的大学生和动力工程人员完成课程作业、毕业设计和解决各种工程课程的教学任务。本版不是标准文件,只具有参考特性。

УДК 621. 039. 53/54(031)

ББК 31. 46

参考教材手稿在俄罗斯基础研究基金和 Калуж 州政府的财政支持下完成(计划 № 05-02-96721)。

本教材中译本在中国原子能科学研究院快堆工程部经费支持下完成。

©作者集体,2007

©以列本斯基命名的国家科学中心
物理动力研究院,2005

ISBN 978-5-86656-207-7(в пер.)

中文版序

世界上第一座可控自持裂变链式反应堆于 70 年前在美国芝加哥大学建成,对这一划时代的原子能技术成就,芝加哥市政厅树碑纪念,碑文曰:“物理学家 E. 费米(Enrico Fermi)和他的同事们于 1942 年 12 月 2 日在运动场正面看台下临时实验室里实现了第一次自持可控核反应,这个实验的成功,把我们带入到对于现代科学展现巨大潜力的原子时代。”

经过半个多世纪的民用核电站技术的开发,当前世界上各种反应堆装置数量早已逾千台,运行的核电站反应堆共有 444 座,2010 年核电占世界总电力生产的 14%,核电站已积累了上万堆年的运行经验。我国自 2000 年至 2011 年 13 个机组 91 堆年平均负荷因子高达 86.94%,跻身世界先进水平。国内外核电站运行经验表明,核能是一种安全、可靠、经济,可作为基荷电站运行和大规模发展的清洁能源。

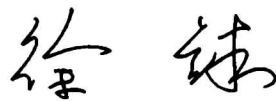
新世纪到来,主要核能国家提出发展第四代先进核能系统,最重要的目标是更高的安全性和核能的可持续发展。

随着经济的快速增长,我国需要加快核能的发展。

俄罗斯技术科学博士 П. Л. Кириллов 主编的《核工程用材料的热物理性质》一书,全面地收入了各种核燃料、慢化剂、冷却剂、结构材料和控制材料等的热物理特性及其他物理特性数据,书写格式亦便于查阅。对核动力专业大学生完成课程作业、教师准备讲课任务和反应堆工程技术人员考虑工程技术问题,是一本较好的参考资料。作者亦建议进行核工程正式设计时还应采用更有权威性的材料特性数据资料。

基于大量核工程专业学生亟待培养,核工业技术人员需对所从事的专业对象进行设计、运算、分析和论证,中文版译者为了适应我国核能快速发展,抽空翻译了这本工具书,相信查阅本书的同志们会获得方便和收益。

中国实验快堆工程部总工程师



2011. 7. 14

中文版前言

从 20 世纪 90 年代开始,中国原子能科学研究院就与俄罗斯物理动力研究院以中国实验快堆(CEFR)为平台在快堆领域开展了大量的技术合作与交流。在此过程中,俄罗斯物理动力研究院及其专家以各种形式向我们介绍了众多核能及快堆领域先进的知识及经验。其中,Кириллов П. Л. 先生在交流的过程中,给我们推荐了他主编的《核工程用材料的热物理性质》一书。这是一本教材式的出版物,列举了用于一般工程估算的核动力相关的基本材料的热物理性质数据,给出了主要材料的性质的计算关系式和方程,提交了固态和液态材料性质随温度变化的表以及给出一些燃料、水和液态金属的临界参数值。这些材料的数据和经验关系式汇集了俄罗斯物理动力研究院多年来的实验研究成果,在俄罗斯核科学技术的发展过程中发挥了重要的作用。

此书翻译成中文后,我的同事们觉得这是一本非常好的书籍。他们同时也向我建议,正式出版以使我国更多的从事核专业的同事,或与核专业有关的学生和科研及设计人员参阅。于是,在征得 Кириллов П. Л. 先生及俄罗斯物理动力研究院同意后,我们重新对本书进行了认真的翻译和校对,衷心希望它的正式出版,能给此领域的中国同行们带来一些帮助。

感谢郑颖和张玲同志在第 4 章和第 5 章的翻译过程中对我的大力协助。感谢中国实验快堆原指挥长陈叔平教授在本书的翻译、译校和专业校对以及出版全过程中给予的大力支持、帮助和关怀。同时,还要感谢中国原子能科学研究院中国实验快堆工程部所有领导对本书出版的支持和帮助,特别是总工程师徐銖教授在百忙之中为本书写序。还要感谢我的同事江林、刘建、刘舒在翻译过程中给予的大力帮助。最后,对中国原子能出版传媒有限公司(原子能出版社)的辛勤工作表示感谢。

由于译者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

中国实验快堆工程部

吴光曼

2011. 7. 14

前 言

在设计核动力装置时,要求知道各种材料的热物理性质。在俄罗斯研发核动力工程的最初 15 年(1950—1965 年)间材料热物性的研究成果都反映在国内参考文献[1]中。

奥布宁斯克核动力研究院在 1987—1994 年间出版了几版简短的针对大学生的材料热物性方面的教学参考书^[2-4]。

尽管如此,根据对核动力装置所用主要材料的热物性领域目前的认识水平,出版这方面的参考书仍然是一项紧迫任务。编写的这本教材将帮助核动力专业的大学生和动力工程人员做课堂作业、毕业设计和解决各种工程课程教学任务。

本书的课题结构与国际原子能机构颁布的《水冷动力堆材料的热物性》报告^[5]内容一致,也与美国阿贡国家实验室(ANL)国际核安全中心(INSIC)在互联网上公布的“MATPROP”材料性质数据库的分类^[6]一致。同时考虑了物理动力研究院热物理数据中心数据处理方法学和奥布宁斯克核动力大学的教学经验。

书中提供的数据取自编译的公开出版物(290 多篇参考文献),它们以杂志上的论文、国际会议公报、专著、参考书、教学出版物、IAEA 报告和互联网等形式公布,为全社会共享的资料。材料的热物性不仅仅取决于温度,还取决于结构、孔隙率、热处理、制造工艺、辐照作用等其他通常难以确定的因素,这些因素会导致数据不一致,因而在解决具体问题时必须考虑这种情况。

本书给出各种材料在固态和液态下的数据,包括热力学性质(密度、比焓、比定压热容、熔点和沸点、熔解热和蒸发热、热膨胀、表面张力)、输运性质(热导率、积分热导率、热扩散率、电导率、黏度)和发射率。材料在相应温度范围内的热物性表根据本教材中给出的公式、用 EXCEL、MATHCAD 程序算得。

本书包括 6 章和 4 个附录。每章末尾给出该章的参考文献。第 1 章给出大多数广泛使用的材料在标准状况(20 °C, 0.1 MPa)下的物理常数^[7-8]、电磁辐射谱范围^[9]和热物性。在图和表格中给出了各种物质和金属热导率的对比特性。

第 2 章是核燃料的各种数据,包括易裂变材料和各类燃料的一般特性。本章汇总了金属燃料(铀、钚、钍)和陶瓷燃料(二氧化铀、二氧化钚、混合燃料 MOX、氮化物燃料和碳化物燃料)的热物性。

在第 3 章中研讨了各种冷却剂的热物性,包括某些气体、水(H_2O , D_2O)、液态金属、它们的蒸气和合金(Na、NaK、Pb、PbBi、Li 等)。液态金属和合金的特性数据取自参考文献[10],蒸气的性质取自参考文献[11]。轻水的性质依据参考文献[12-13]中的表,重水的性质取自 Hill 表,该表由加拿大原子能有限公司(AECL)根据双方科技合作协议提供给俄罗斯物理动力研究院。编者认为,本教材中不适合包括高温有机冷却剂、熔融盐以及其他前瞻性冷却剂,虽然有人一直在进行研究,但是目前尚未在核工程技术中得到应用。

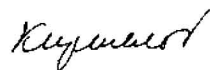
第4章简要研讨了石墨、铍、氧化铍等主要慢化剂类型的特性。

第5章介绍了在控制装置中使用的中子吸收体和各种可燃吸收体(硼、碳化硼、AgInCd合金)的特性。

第6章研讨了常规动力和核动力工程中使用的结构材料的性质,包括各种金属、许多传统合金以及各种钢。

在第一个附录中给出了某些单位的换算因数表。后面三个附录则依据IAEA报告和某些专题报告^[15-19],给出了主要类型反应堆(水冷动力堆、快堆、水冷石墨堆)的技术特性。

在“俄核电”康采恩的资助下,本书得以出版。作者对“俄核电”康采恩副总经理 B. Г. Асмолов 表示真诚感谢。同时,对 ZAO 核电传媒中心协助本书出版一并致谢!



基里洛夫

表格清单

第 1 章 概论

- 表 1.1 物理常数
- 表 1.2 固态纯金属在不同温度下的热导率
- 表 1.3 一些气体和蒸气的热导率
- 表 1.4 一些材料的热物理性质

第 2 章 核燃料

- 表 2.1 三种热中子易裂变同位素的特性
- 表 2.2 一个²³⁵U 核裂变时的能量分布
- 表 2.3 易裂变材料和核燃料的基本性质
- 表 2.4 0.1 MPa 下铀的基本性质
- 表 2.5 铀的几种同素异晶体的特性
- 表 2.6 298 K 时铀的力学性能
- 表 2.7 按关系式(2.2~2.5)确定的固态铀的性质
- 表 2.8 熔点(1 405 K)下液态铀的性质
- 表 2.9 按关系式(2.6, 2.7 和 2.8)算出的在 0.1 MPa 下液态铀的性质
- 表 2.10 几种铀同位素的放射性性质
- 表 2.11 标准状况(0.1 MPa, 298 K)下钚的基本性质
- 表 2.12 钚的晶体结构和相变的特性
- 表 2.13 钚的几个相的性质
- 表 2.14 298 K 时钚的力学性能
- 表 2.15 钚的某些同位素的放射性性质
- 表 2.16 标准状况(0.1 MPa, 298 K)下钍的基本性质
- 表 2.17 钍的两种晶体结构的特性
- 表 2.18 298 K 时钍的力学性能
- 表 2.19 钍的一些同位素的放射性性质
- 表 2.20 0.1 MPa、298 K 下氧化铀的基本性质
- 表 2.21 根据关系式(2.15~2.17, 2.19, 2.20a, 2.21, 2.23, 2.24, 2.30, 2.31)算出的固态二氧化铀(UO₂)的热物理性质
- 表 2.22 用关系式(2.35)算出的固态二氧化铀上方的蒸气压力
- 表 2.23 液态二氧化铀的热物理性质
- 表 2.24 二氧化铀的临界参数
- 表 2.25 二氧化钚真实线胀系数值

- 表 2.26 MOX 燃料($U_{0.8}Pu_{0.2}$) O_2 在 $p=0.1$ MPa 下的基本性质
- 表 2.27 化学当量成分的 MOX 燃料——固态($U_{0.8}Pu_{0.2}$) O_2 的热物理性质
- 表 2.28 化学当量组成的 MOX 燃料的线胀系数
- 表 2.29 0.1 MPa、298 K 时一氮化铀的基本性质
- 表 2.30 UN 上方氮蒸气分压、铀蒸气分压和全压
- 表 2.31 考虑孔隙率后的 UN 热导率 $\lambda(W/(m \cdot K))$
- 表 2.32 用关系式(2.70~2.73,2.75)算得的一氮化铀的热物理性质
- 表 2.33 理论密度 UN 的电阻率 ρ_e
- 表 2.34 在 %理论密度下一氮化铀的力学性能
- 表 2.35 在 0.1 MPa 和 298 K 时碳化铀的基本性质
- 表 2.36 固态 UC 的热物理性质
- 表 2.37 固态 UC 上方的蒸气压力 p
- 表 2.38 超过熔点的 UC 上方的蒸气压力
- 表 2.39 碳化铀的临界参数

第 3 章 冷却剂

- 表 3.1 $p=0.101$ MPa 时干空气的热物理性质
- 表 3.2 氮的热力学性能和热物理性质
- 表 3.3 饱和状态下水的热物理性质
- 表 3.4 饱和状态下蒸气的热物理性质
- 表 3.5 水和蒸气的比定压热容
- 表 3.6 水和蒸气的动力黏度
- 表 3.7 水和蒸气的热导率
- 表 3.8 水和蒸气的普朗特数
- 表 3.9 饱和状态下重水(D_2O)的热物理性质
- 表 3.10 Li, Na, K, Cs 的基本热物理性质
- 表 3.11 Hg, Pb, Bi, Ga, In 的基本热物理性质
- 表 3.12 NaK, NaKCs, PbBi, PbLi 合金的基本热物理性质
- 表 3.13 根据方程(3.1~3.7)得到的锂的性质
- 表 3.14 根据方程(3.8~3.14)得到的钠的性质
- 表 3.15 根据方程(3.15~3.21)得到的钾的性质
- 表 3.16 根据方程(3.22~3.28)得到的铯的性质
- 表 3.17 根据方程(3.29~3.37)得到的饱和线上汞的性质
- 表 3.18 根据方程(3.38~3.43)得到的镓的性质
- 表 3.19 根据方程(3.44~3.49)得到的铅的性质
- 表 3.20 根据方程(3.50~3.55)得到的 $22Na-78K$ (质量分数)合金的性质
- 表 3.21 根据方程(3.56~3.62)得到的 $4.2Na-22.2K-73.6Cs$ (质量分数)合金的性质
- 表 3.22 根据方程(3.63~3.66)得到的 $44.5Pb-55.5Bi$ (质量分数)合金的性质
- 表 3.23 根据方程(3.67~3.78)得到的 $99.32Pb-0.68Li$ (质量分数)合金的性质
- 表 3.24 锂蒸气的性质

表 3.25 钠蒸气的性质

表 3.26 钾蒸气的性质

表 3.27 铯蒸气的性质

第 4 章 慢化剂

表 4.1 各种慢化剂的基本中子物理性质

表 4.2 各种慢化剂的基本热物理性质(在标准状况下)

表 4.3 反应堆用 ГР-280 石墨在原始状态下的基本物理特性

表 4.4 根据方程(4.2,4.3,4.4)算得的比定压热容

表 4.5 石墨比热容数据的误差

表 4.6 原始状态下反应堆石墨的密度

表 4.7 原始状态下反应堆石墨的热导率和线胀系数

表 4.8 电极石墨的电阻率 $\rho_e \times 10^5 \Omega \cdot m$

表 4.9 石墨的发射率

表 4.10 500~550 °C 下,辐照对石墨热物理性质的影响

表 4.11 根据方程(4.7,4.8,4.9)算出的固态铍的基本热物理性质

表 4.12 随结构和制造方法变化的铍的热导率

表 4.13 铍的积分发射率 ϵ_T (从文献[30]的数据外推)

表 4.14 铍的平均线胀系数 $\bar{\alpha}$

表 4.15 铍的线胀系数的各向异性

表 4.16 铍上方的蒸气压力

表 4.17 密度为 2 870 kg/m³ 的氧化铍的基本热物理性质

表 4.18 BeO 线胀系数值的比较

表 4.19 随密度和温度变化的氧化铍的热导率

表 4.20 氧化铍的电阻率

表 4.21 氧化铍的发射率

表 4.22 按方程(4.19,4.20)算出的氧化铍上方的蒸气压力

第 5 章 吸收材料

表 5.1 中子吸收截面大的化学元素的物理性质和核性质

表 5.2 吸收材料的热物理性质

表 5.3 几种控制棒材料特性的比较

第 6 章 结构材料

表 6.1 钢的符号

表 6.2 某些结构材料在标准状况下的基本物理性质

表 6.3 某些结构材料在熔点下的基本物理性质

表 6.4 几种牌号杜拉铝的成分(%)

表 6.5 锆及其合金的氧化动力学参数

表 6.6 固态锆的性质

表 6.7 液态锆的性质

表 6.8 Zr+1%Nb 合金的性质

- 表 6.9 Zr+2.5%Nb 合金的性质
- 表 6.10 主要钢种的性质
- 表 6.11 在核动力装置热交换设施中用到的钢和合金的热导率
- 表 6.12 某些珠光体钢的化学组成
- 表 6.13 某些珠光体钢的性质
- 表 6.14 多元合金铬不锈钢的化学组成
- 表 6.15 某些马氏体-珠光体铬钢的性质
- 表 6.16 某些铬镍不锈钢的成分
- 表 6.17 08X18H10T 奥氏体钢的性质
- 表 6.18 12X18H9T 和 12X18H10T 奥氏体钢的性质
- 表 6.19 12X18H9 奥氏体钢的性质
- 表 6.20 固态 316 奥氏体不锈钢的性质
- 表 6.21 液态 316 奥氏体不锈钢的性质
- 表 6.22 某些镍基合金的性质
- 表 6.23 镍基合金的成分
- 表 6.24 铌钼合金的成分
- 表 6.25 几种难熔金属的基本物理性质
- 表 6.26 核电厂用的屏蔽混凝土的性质(质量分数%)

附录

- 附录 A 一些量的单位换算表
- 附录 B ВВЭР 反应堆的基本特性
- 附录 C 液态金属冷却剂(除了 ВРЕСТ-ОД-300 反应堆中用铅以外,所有反应堆都用钠)的快中子反应堆的基本特性
- 附录 D РБМК 型反应堆基本特性

符 号

A	原子序数
a	热扩散率, m^2/s
b	透热性, $\text{W}^{1/2}\text{s}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
C_p	质量[定压]热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
g	重力加速度, m^2/s
h	比焓, J/kg
M	原子质量单位, u
p	压力, N/m^2
R	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
r	蒸发热, J/kg
T	温度, K
t	温度, $^{\circ}\text{C}$
v	比容, m^3/kg
α	线胀系数, $1/\text{K}$
β	体胀系数, $1/\text{K}$
ϵ	[积分]发射率
ϵ_{λ}	波长 λ 的光谱发射率
λ	热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 发射波长, nm
μ	动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\nu = \mu/\rho$	运动黏度, m^2/s
$\pi = p/p_c$	折算压力
ρ	密度, kg/m^3
ρ_e	电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$
σ	表面张力, N/m
σ_0	斯忒藩-玻耳兹曼常量
τ	T/T_c ——折算温度, 或者 $T/1\,000$

目 录

表格清单

符号

第 1 章 概论	1
前言和第 1 章的参考文献	8
第 2 章 核燃料	10
2.1 易裂变材料和核燃料的总体特性	10
第 2.1 节的参考文献	13
2.2 金属燃料	14
2.2.1 铀	14
2.2.2 钚	17
2.2.3 钍	20
2.3 陶瓷燃料	23
2.3.1 氧化铀	23
2.3.2 二氧化钚	30
2.3.3 混合燃料(MOX)——(U,Pu)O ₂	32
2.3.4 氮化铀	36
2.3.5 碳化铀	40
第 2.2 节和 2.3 节的参考文献	43
第 3 章 冷却剂	49
3.1 气体	49
3.1.1 空气	49
3.1.2 氦	50
3.2 水(H ₂ O)	52
3.3 重水(D ₂ O)	67
3.4 液态金属	74
3.4.1 基本热物理性质	74
3.4.2 近似关系式和表格的注解	76
3.4.3 热物理性质表	82
3.4.4 金属蒸气的热物理性质 ^[5-6]	111
第 3.1、3.2、3.3 节的参考文献	114
第 3.4 节的参考文献	114

第 4 章 慢化剂	117
4.1 慢化剂的基本性质	117
4.2 石墨(碳)	119
4.3 铍	123
4.3.1 随温度变化的固态铍的性质	124
4.3.2 随温度变化的液态铍的性质	126
4.4 氧化铍	126
第 4 章参考文献	130
第 5 章 吸收材料	132
5.1 调节棒材料	133
5.1.1 (天然)硼,碳化硼	133
5.1.2 AgInCd 合金	134
5.1.3 铪	134
5.2 可燃吸收剂	135
第 5 章参考文献	135
第 6 章 结构材料	136
6.1 概述	136
6.2 金属	139
6.2.1 铝	139
6.2.2 镁	139
6.2.3 锆及其合金	139
6.3 钢	145
6.3.1 高温不锈钢	145
6.3.2 高温不锈钢镍(奥氏体)钢	149
6.4 镍基合金	154
6.5 难熔金属	155
6.6 屏蔽材料	156
第 6 章参考文献	157
第 6.1、6.2 节参考文献	157
第 6.3 节参考文献	158
第 6.4、6.5、6.6 节参考文献	159
附录 A 一些量的单位换算表	161
附录 B ВВЭР 反应堆的基本特性	162
附录 C 液态金属冷却剂(除了 БРЕСТ-ОД-300 反应堆中用铅以外, 所有反应堆都用钠)的快中子反应堆的基本特性	165
附录 D РБМК 型反应堆基本特性	169
后记	171

第 1 章

概 论

表 1.1 物理常数

真空中的光速	$c=2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
万有引力常量	$G=6.674 \ 2 \times 10^{-11} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$
普朗克常量	$h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $h/2\pi=1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
阿伏加德罗常数	$N_A=6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
法拉第常数	$F=96 \ 485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
通用气体常数	$R=8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
玻耳兹曼常数	$k=R/N_A=1.380 \ 7 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
斯忒藩-玻耳兹曼常量	$\sigma_0=5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
第一辐射常量	$C_1=2hc^2=3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$
第二辐射常量	$C_2=hc/k=0.014 \ 39 \text{ m} \cdot \text{K}$
韦恩(Wien)常量	$C_3=\lambda_{\max} \cdot T=2.897 \ 8 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$
太阳常量	$S=1 \ 325 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
重力加速度(标准)	$g_0=9.806 \ 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
质子质量	$m_p=1.503 \ 302 \times 10^{-10} \text{ J}=1.672 \ 622 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中子质量	$m_n=1.505 \ 374 \times 10^{-10} \text{ J}=1.674 \ 927 \times 10^{-27} \text{ kg}$
电子质量	$m_e=8.187 \ 241 \times 10^{-14} \text{ J}=9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
电子电荷	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
比值	$m_p/m_e=1 \ 836.153$
电子伏	$1 \text{ eV}=1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

一些有用的常数

空气的相对分子质量	$M=28.96 \text{ u}$
水的相对分子质量	$M=18.015 \text{ u}$
空气中的声速	在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.1 MPa 下, $a=343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
原子质量单位	$1 \text{ u}=1.660 \times 10^{-27} \text{ kg}$
理想气体的摩尔体积	$22.414 \text{ dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$

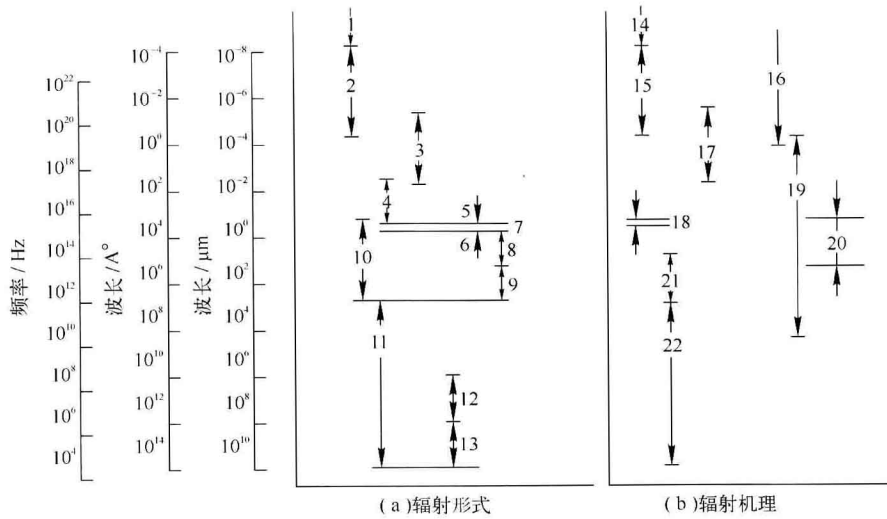


图 1.1 电磁辐射谱^[9]

- 1—宇宙射线;2— γ 射线;3—X射线;4—紫外线;5—紫色;6—红色;7—可见光($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$);
 8—近红外($0.7 \sim 25 \mu\text{m}$);9—远红外($25 \sim 1\,000 \mu\text{m}$);10—热辐射;11—雷达、电视和无线电;
 12—超短无线电波;13—长无线电波;14—物质转化为辐射能;15—转化(辐射分解);16—高能粒子加速;
 17—电子轰击;18—气体中电子跃迁;19—同步(加速)辐射;20—气体中的振动旋转跃迁,固体和液体中的分子振动,
 固体中的定向电子迁移;21—气体中旋转跃迁和固体晶格中的振动;22—电子线路中的受迫振荡

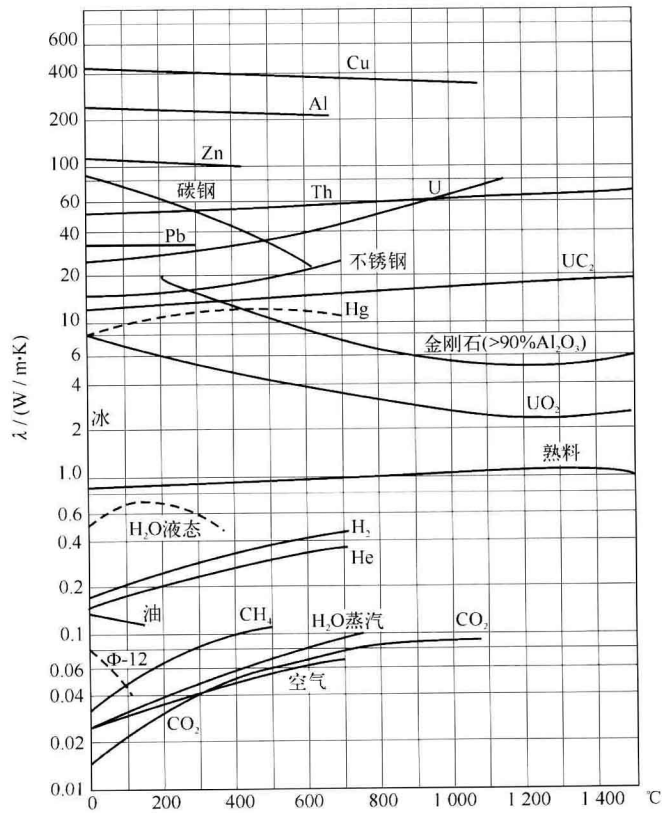


图 1.2 0.1 MPa 下不同材料的热导率