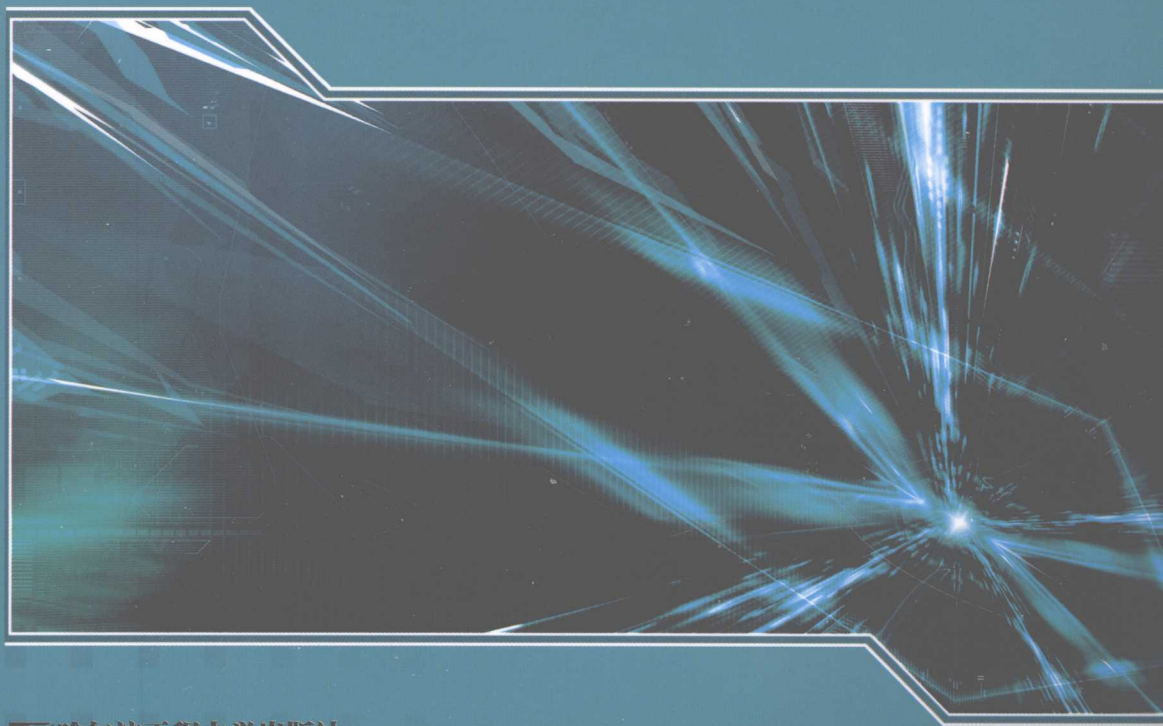




国防特色教材·核科学与技术

压水反应堆水化学

云桂春 成徐州 编著



 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

压水反应堆水化学

云桂春 成徐州 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书基于水化学与反应堆系统各功能部件之间的相互关系,着重介绍了作为传热介质和慢化剂的水的化学、物理特性与核性质,放射性物质的来源,结构材料的腐蚀与腐蚀产物的行为,冷却剂水在辐射场下的辐解行为与注氢保持还原性化学环境,反应性的化学补偿与 pH 控制剂的效应。本书较详细地论述了压水堆电站的水化学管理与水化学和放射化学监测;讨论了降低辐射剂量的去污技术与其他强化措施(优化水化学管理、改进材质、注锌等);介绍了放射性废物的来源及放射性废液处理工艺的基本原理与使废物最小化的发展概况。最后简单介绍了反应堆事故条件下放射性核素的化学行为。

本书可作为核电站设计和运行各专业以及核反应堆工程专业的本科生、研究生教材,也可供从事反应堆设计、研究、运行的技术人员和大学生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

压水反应堆水化学/云桂春,成徐州编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2009.5

ISBN 978-7-81133-430-2

I. 压… II. ①云…②成… III. 压水型堆-水化学
IV. TL421.053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 088890 号

压水反应堆水化学

云桂春 成徐州 编著
责任编辑 石岭

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨工业大学印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:18.5 字数:340千字

2009年7月第1版 2009年7月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-430-2 定价:38.00元

前 言

核能发电对经济发展和保护环境的重要性日益增加。截至 2005 年,全世界商业运行的核电站共有 441 座,发电量为 381 GWe,其中压水堆为 268 座,发电量 249 GWe,加压重水堆 40 座,发电量 22 GWe。迄今为止,对核能发电贡献最大的是以天然水作为中子慢化剂和冷却剂的轻水反应堆(包括压水堆与重水堆),尤以轻水压水堆居多,约占 61%;重水压水堆约为 9%。

电站运行过程中,由中子诱发的重核裂变能量生产电力的同时,在反应堆中积累大量由不同化学元素组成的放射性同位素,由周期表中最轻的元素、中等质量的裂变元素到超铀元素。这些放射性核素对电站工作人员和人类生存环境构成潜在的危险,在不同运行工况下都必须将其限制在安全范围内。为此,需了解压水堆在各种运行工况下可能发生的化学反应和产生的放射性核素的性质与行为。

作为核电站堆运行的重要组成部分,水化学与堆的固态核燃料、液相冷却剂和安全壳自由空间的放射化学反应之间有着不可分割的联系。水化学涉及电站主要设备的可靠性、燃料的完整性、辐射场管理和电站运行的经济持久性等,是整体核安全的重要组成部分。采用系统工程方法对电站水化学进行管理和优化,保持电站的总体经济性,已成为当今核电站水化学管理的重要战略目标。

本书参照美国核动力堆放射化学培训教材、轻水堆核电站放射化学专著、核反应堆系统水化学国际会议和国际水化学会议有关论文、大亚湾核电站的相关技术要求以及编者的授课讲稿,在清华大学核能与新能源技术研究院院长张作义教授的鼓励和多位专家的大力支持下编写而成,可供核电站设计与运行人员、反应堆工程专业学生参考。

错误之处恳请指正。

编 者

2009 年 1 月

目 录

第 1 章 水的结构与特性	1
1.1 水在压水堆中的作用	1
1.1.1 冷却剂	1
1.1.2 慢化剂	2
1.2 水的组成与结构	3
1.3 水的物理、热力学性质与核性质	4
1.4 水的化学性质	8
1.4.1 水的离解与 pH	8
1.4.2 无机物、气体在水中的溶解	9
1.4.3 酸碱容量	12
1.5 水的电性质	12
1.5.1 电导率	12
1.5.2 氧化 - 还原电位	13
1.6 本章小结	13
复习思考题	13
第 2 章 压水堆放射性物质的来源	14
2.1 来自燃料中的裂变产物	14
2.1.1 裂变产物由燃料芯块逸出的途径	15
2.1.2 裂变产物释入燃料间隙中	16
2.1.3 裂变产物由燃料包壳缺陷向冷却剂的释放	17
2.2 来自燃料污染物的裂变产物	18
2.3 裂变产物释放方式的表征	19
2.3.1 活度释放率	20
2.3.2 一回路冷却剂中裂变产物稳态活度浓度	21
2.3.3 估算破损燃料棒数目	23
2.3.4 功率过渡期间裂变产物释放	24
2.4 压水堆的活化产物	28
2.4.1 活化腐蚀产物	28
2.4.2 水和杂质的活化产物	29
2.5 压水堆二回路冷却剂系统中的裂变产物	34

2.6 本章小结	36
复习思考题	36
第3章 压水堆冷却剂的辐射化学	37
3.1 水的辐射分解反应	38
3.1.1 辐解初级产额	41
3.1.2 影响水辐射分解的因素	41
3.1.3 氘化水的辐解	43
3.1.4 水的主要辐解产物	44
3.2 主冷却剂的辐射分解反应	47
3.2.1 纯水在反应堆中的分解与复合	47
3.2.2 硼酸水溶液的辐射分解	48
3.2.3 加氢抑制水的辐射分解	49
3.2.4 一回路冷却剂中氢与氧的行为	52
3.3 临界氢浓度	52
3.3.1 溶解氢浓度较低的优点	53
3.3.2 临界氢浓度的研究结果	54
3.4 辐解从破损燃料产生氢	55
3.5 本章小结	55
复习思考题	56
第4章 结构材料的腐蚀与腐蚀产物的行为	57
4.1 锆合金的腐蚀特点及影响因素	59
4.1.1 影响锆合金腐蚀的因素	60
4.1.2 锆合金的应力腐蚀	64
4.1.3 芯块与包壳的相互作用(PCI)	65
4.2 奥氏体不锈钢的腐蚀特点及影响因素	65
4.2.1 不锈钢的应力腐蚀	66
4.2.2 影响不锈钢应力腐蚀破裂的因素	67
4.2.3 不锈钢的晶间腐蚀	69
4.2.4 点腐蚀与缝隙腐蚀	70
4.2.5 辐射诱发的304型不锈钢的损伤	71
4.2.6 微生物诱发的腐蚀(MIC)	71
4.3 镍基合金的腐蚀特点及影响因素	73
4.3.1 苛性应力腐蚀与耗蚀	73
4.3.2 晶间腐蚀	74
4.4 锆铌合金	75

4.5 蒸汽发生器传热管束的腐蚀	76
4.5.1 凹陷	77
4.5.2 点腐蚀	77
4.5.3 耗蚀	78
4.5.4 晶间腐蚀	78
4.5.5 应力腐蚀	79
4.5.6 疲劳	79
4.5.7 微振磨损	79
4.5.8 侵蚀/腐蚀	79
4.6 腐蚀产物的溶解与沉积	81
4.6.1 压水堆中腐蚀污染物的积累	84
4.6.2 腐蚀产物的释放	87
4.6.3 腐蚀产物在堆芯的表观停留时间	89
4.7 本章小结	90
复习思考题	91
第5章 反应性的化学补偿和 pH 控制剂	92
5.1 引言	92
5.2 可溶性化学毒物的控制	94
5.3 硼酸及其水溶液的主要物理化学性质	96
5.3.1 硼酸及其溶液的组成	97
5.3.2 硼酸在水溶液中的电离	97
5.3.3 硼酸水溶液的物理化学性质	98
5.4 氢氧化锂	104
5.4.1 钠、钾、铷和铯的氢氧化物	104
5.4.2 氢氧化锂	105
5.5 氢氧化铵	110
5.5.1 冷却剂中铵的辐射合成与分解	110
5.5.2 氢氧化铵的物理化学性质	111
5.6 本章小结	112
复习思考题	114
第6章 压水堆核电站的水化学管理	115
6.1 前言	115
6.2 一回路的水化学管理	117
6.2.1 正常运行工况下的水化学管理:一回路冷却剂水质指标与限值	120
6.2.2 非正常化学工况	132

6.2.3	反应堆启动时的水化学管理	133
6.2.4	停堆时的放射化学管理	134
6.3	一回路侧水的化学与放射化学监测	140
6.3.1	取样程序	141
6.3.2	一回路冷却剂取样系统	141
6.3.3	实验室分析(过滤)	143
6.3.4	含有低放射性活度的高纯水在线过滤取样	144
6.3.5	放射性活度浓度测定	144
6.4	二回路的水化学管理	147
6.4.1	正常运行工况下的水化学管理	148
6.4.2	美国压水堆核电站二回路水化学控制进展	157
6.5	CANDU 重水堆的水化学管理	160
6.5.1	主冷却剂回路	160
6.5.2	慢化剂	162
6.5.3	腐蚀	163
6.5.4	二次侧水化学	165
6.6	WWER-1000 压水堆的水化学管理	168
6.6.1	反应堆冷却剂系统	168
6.6.2	二回路系统水化学	171
6.6.3	田湾核电站各系统的水质标准	172
6.6.4	蒸汽发生器给水与排污系统	172
6.6.5	放射性废液处理系统	173
6.6.6	放射性废液排放系统	174
6.7	欧洲压水堆(EPR)简介	174
6.8	AP1000 的水化学管理	176
6.9	本章小结	181
	复习思考题	182
第7章	反应堆去污技术	183
7.1	化学去污技术	184
7.1.1	化学去污的基本概念	184
7.1.2	化学去污需考虑的因素	187
7.1.3	核电站化学去污实例	189
7.2	超声波去污技术	193
7.2.1	先进的超声波燃料净化工艺	194
7.2.2	利用先进的超声波技术净化蒸汽发生器二次侧	194
7.3	电化去污	195

7.4 核定去污经济效益的一般性考虑	196
7.4.1 去污费用的估算	197
7.4.2 人·Sv 费的估算	198
7.5 进一步降低辐射场的措施	199
7.5.1 注锌	199
7.5.2 职业照射剂量率	202
7.6 使用 ¹⁰ B 富集的硼酸减少腐蚀	203
7.7 本章小结	204
复习思考题	205
第 8 章 反应堆排水与放射性废物处理	206
8.1 反应堆排水	206
8.1.1 冷却剂循环净化系统(化学和容积控制系统)	206
8.1.2 硼回收系统	209
8.1.3 可复用的冷却剂	211
8.1.4 反应堆排水的来源	213
8.2 放射性废物处理	214
8.2.1 放射性废液处理系统	218
8.2.2 二回路放射性废水处理	223
8.2.3 反应堆和乏燃料水池冷却水处理系统	223
8.2.4 其他废液	224
8.3 放射性废液处理工艺的基本原理	225
8.3.1 过滤	225
8.3.2 蒸发	226
8.3.3 离子交换	227
8.4 废物小量化促进水处理技术的发展	236
8.4.1 膜技术	237
8.4.2 选择性无机离子交换剂	244
8.5 本章小结	247
复习思考题	249
第 9 章 反应堆事故条件下的放射化学	250
9.1 设计基准事故	250
9.1.1 失水事故	250
9.1.2 裂变产物从破损燃料释入一回路	252
9.1.3 裂变产物在安全壳中的行为	254
9.2 发生严重事故时放射性核素的化学与行为	258
9.2.1 从燃料释放的裂变产物	258
9.2.2 安全壳内放射性核素的化学行为	260

9.2.3 碘	262
9.3 本章小结	277
9.3.1 设计基准事故	277
9.3.2 严重事故	278
复习思考题	280
参考文献	281

第 1 章 水的结构与特性

1.1 水在压水堆中的作用

核能发电为人类开辟了一条重要的能源途径。工业规模应用的核电站有压水堆(Pressurized Water Reactor, 简称 PWR)、沸水堆(Boiling Water Reactor, 简称 BWR)、重水堆(Heavy Water Reactor, 简称 HWR)、高温气冷堆(High Temperature Gas-cooled Reactor, 简称 HTGR)和快中子增殖堆(Fast Breeder Reactor, 简称 FBR)等。商用核电站以压水堆和沸水堆为主。我国的核电发展技术路线在 20 世纪 80 年代确定走压水堆道路。我国正在运行的大亚湾核电站、广东岭澳核电站、秦山一期、二期、三期(PHWR)、田湾核电站,以及根据我国核电发展中长期规划,到 2020 年要建成核电装机容量 4 000 万 kW,加上 1 800 万 kW 的在建电站均为 PWR 型。各种类型反应堆无一例外地与水有着各种不可或缺的密切关系。在压水堆和重水堆中,水用作冷却剂和慢化剂;在换料和燃料储存过程中用作屏蔽材料;在安全注射和安全喷淋系统中确保反应堆事故下的安全以及配成水溶液可对设备进行化学去污等。

1.1.1 冷却剂

反应堆核裂变反应产生的裂变热,通常利用流体循环的方法进行适当冷却。这类流体除作为冷却剂之外,还兼有慢化剂的功能。

在反应堆中,大约有 90% 的堆芯发热量集中于燃料之内,所以冷却的着眼点在燃料上。除了燃料中的核裂变发热之外,其他部分也因吸收 γ 射线和中子慢化等原因而发热。因此,对慢化剂、控制棒、反射层以及热屏蔽等也应当给予适当的冷却。

在选择与评价反应堆所用的冷却剂时,必须把反应堆作为一个整体来考虑。判断冷却剂是否理想,通常以下述几点为基础。

1. 热交换与传热系数大

为了降低燃料和包壳的最高温度,要求冷却剂的热交换与传热系数大。这样燃料表面温度就能控制得较低。传热系数除了取决于冷却剂的导热系数等固有物理性质外,还随着流量、管道的形状及尺寸的不同有很大变化。

2. 在较低压力下获得高温

液体及其饱和蒸汽在系统内的压力和温度的关系受饱和压力曲线所制约,所以除了液态金属那样的高沸点液体外,若想获得高温,就不得不在高压下运行。

3. 化学稳定性好

要求冷却剂在高温下不变质,并且不腐蚀反应堆结构材料。冷却剂和材料的相容性取决于冷却剂纯度的控制情况、工作温度、压力和流速等条件。

4. 辐照稳定性好

冷却剂会因射线的照射而分解,特别是经过辐射分解后能产生氢、过氧化氢、氧和自由基等,所以应当在冷却剂内预先加入少量的氢,以抑制辐射分解。

5. 核性能良好

从中子经济上看,希望冷却剂的中子吸收截面要小。热堆(如轻水堆)要求冷却剂慢化能力要大些,快堆则相反,要求越小越好。慢化能力强,可以简化反应堆的结构。

6. 其他

冷却剂应该价格便宜,能确保供应量,并且操作处理方便。

水除了可以较好地满足上述要求外,还具有比热容大、高流速下压降较小的特点,成本低且易得,因此在反应堆工程中广泛用作传热介质、慢化剂和各类型反应堆的屏障。轻水($^1\text{H}_2\text{O}$)和重水($^2\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$)分别用作压水堆和重水堆的冷却剂和慢化剂。

1.1.2 慢化剂

降低中子速度的过程称为慢化。除前苏联设计的压水堆使用石墨作慢化剂外,其他国家设计的堆均用 H_2O 或重水 D_2O 作慢化剂。俄罗斯设计的压水堆也用水作为慢化剂。

中子与不稳定的铀核碰撞发生裂变,释放的中子一般能量在 1 MeV 左右。中子能量在 1 eV 左右时才接近室温下的热能(周围分子的平均能量),热堆裂变核发生裂变的概率最大使反应堆能有效地运行。为了维持自持式链式裂变反应,必须使裂变释放的中子减速或慢化。减速的中子称为热中子,使用慢化剂产生热中子的堆称为热堆。

水是一种良好的慢化剂,其中子俘获截面为 0.66 b,散射截面为 44.4 b。水分子中的氢原子质量与一个中子的质量十分接近,氢原子作为靶核与中子发生碰撞,将中子的动能传给慢化剂的原子,慢化剂被加热,慢化的中子则继续与铀核反应引起裂变。但是水对中子的吸收相当有效,使用轻水作慢化剂将吸收相当多的中子,只剩下很少的中子同燃料中少量 ^{235}U 反应,使

天然铀不可能达到临界。所以,轻水堆需使用浓缩铀(^{235}U 一般介于3%至5%之间)。

重水堆使用 D_2O 作慢化剂。氘是氢的稳定同位素,氘核中含有一个中子和一个质子,氢只含一个质子。重水与轻水相比在化学性质方面稍有改变,但在核性质上明显不同。例如,重水慢化中子量是轻水的 $1/8$,但宏观吸收截面(即吸收概率)是轻水的 $1/600$,使重水慢化比(散射截面与吸收截面的比值,可有效测量慢化剂的质量)比轻水高 80 倍。重水对中子的吸收截面很小,不易吸收中子,可能使核裂变释放的所有中子被慢化和与 ^{235}U 反应,使用天然铀即可维持临界。

压水堆一回路系统是一个封闭的系统。反应堆在启动运行、稳态运行、停堆过程中,由于裂变产物的释放、结构材料腐蚀产物和作为冷却剂和慢化剂的水本身及其中所含杂质与添加剂(硼酸、氢氧化锂、氢)在堆芯中子场作用下被活化,以及水吸收射线能量后形成的辐射分解链式反应,作为冷却剂的水构成一个十分复杂的既含痕量放射性核素又包含常量元素及其化合物与反应物的动态的化学体系。在此体系中,水的结构特性、物理特性、热力学特性、核特性和化学特性在压水堆一回路系统水化学与材料的兼容性和堆芯外辐射场的降低方面发挥重要的作用。

1.2 水的组成与结构

水的化学式为 H_2O ,水分子的形状大体可用一个四面体(有四个侧面的三角形锥体)表示,氧在中心,氢离子位于两个顶点处。氧和每个氢离子之间占据着一对电子,一个电子由氢提供,另一个由氧提供。由于氧原子的外电子壳层有 6 个电子,按此排布则剩下 4 个未共享电子,占据朝向四面体其他两个顶点的轨道(每个轨道上有两个电子),构成如图 1.1 所示的结构。

虽然形成氢-氧键的电子为两个原子共享,但并非均一的共享(氧对电子比氢更具吸引力)。水分子总体呈电中性(不是离子),但在局部范围内存在有限的电荷,即在靠近每一个氢原子处有一个约 0.24 esu(静电单位,简称 esu)的正电荷,与氢原子相对的氧原子侧有一个约 0.48 esu 的负电荷。由于电荷是分开的,所以水分子具有极性。

正负电荷的不均匀分布称为偶极。氢与相邻水分子中氧的静电吸引作用形成氢键。水分子之间形成的氢键是构成水分子四面体结构的主要原因,如图 1.2 和 1.3 所示。

极性水分子在外电场或离子的作用下会发生定向排列,即荷正电的一端(氢)指向电场的负极或阴离子;荷负电的一端(氧)指向电场正极或阳离子,从而减弱外电场或阴阳离子之间的作用力。

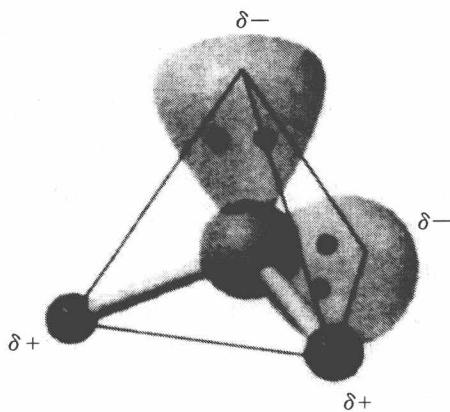


图 1.1 水分子的典型结构和电荷分布

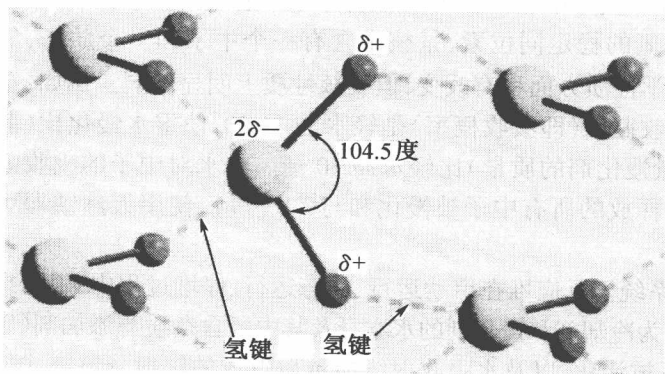


图 1.2 液态和固态水中荷正电的氢原子和荷负电的氧原子之间形成的氢键

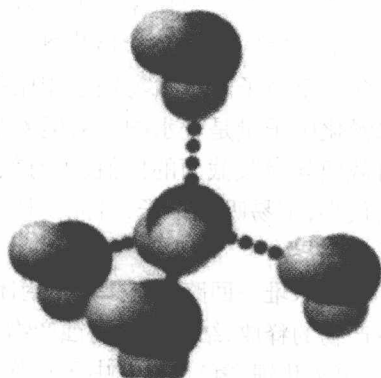


图 1.3 水分子间的氢键

由于极性水分子与其他分子或离子之间相互作用——水合作用,使水溶液中的分子或离子被水分子层层包围,即形成水合分子或水合离子,以aq表示,如离子型氯化钠溶解时,受极性水分子作用 Na^+ 变成水合钠离子 $\text{Na}^+(\text{aq})$, Cl^- 变成水合氯离子 $\text{Cl}^-(\text{aq})$ 。

离子型化合物在水中易以阴、阳离子形式存在;反之,阴阳离子在水中不易结合。所以,水是离子型化合物的良好溶剂。

在反应堆中,轻水主要用作冷却剂、慢化剂和屏蔽材料;重水用作冷却剂和慢化剂。由于水所特有的性质,其在溶解、腐蚀、化学反应以及射线辐射效应等方面将产生各种各样的现象。

1.3 水的物理、热力学性质与核性质

轻水($^1\text{H}_2\text{O}$)在常温常压下为无色、无味的液体; 1 cm^3 纯水在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 下的质量为 1.000 0 g ; 1 g 纯水升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 所需热量为 $4.184\text{ 0 J}(1.000\text{ 0 cal})$ ^①; 水的热稳定性好,生成热为 -285.8 kJ/mol ; 在 2 000 K 的高温下离解百分数仅为 0.588% ; 水的比热容为 $75.3\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; 在一个标准大气压下,水的沸点为 $100\text{ }^\circ\text{C}$,凝固点(冰的熔点)为 $0\text{ }^\circ\text{C}$; 温度变化时水分子发生相变(如液态变成气态),但水分子的结构不变,如图 1.4 所示。在 $1\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,水表现出反膨胀性,且在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时体积最小,密度最大,为 1 g/cm^3 。

水分子中氢和氧原子的质子是由同位素构成的,氢的同位素有 ^1H , $^2\text{H}(\text{D})$ 和 $^3\text{H}(\text{T})$, 氧的同位素包括 ^{16}O , ^{17}O 和 ^{18}O 等。普通水中氢(^1H)的原子质量为 1,而被质量为 2 的氘($^2\text{H}/\text{D}$)取代生成的水称为重水,一般用 $^2\text{H}_2\text{O}$ 或 D_2O (氧化氘)表示,密度为 1.1 g/cm^3 。表 1.1 列出 $^1\text{H}_2\text{O}$ 与 D_2O 的物理性质。

① $1\text{ cal} = 4.186\text{ 8 J}$,下同

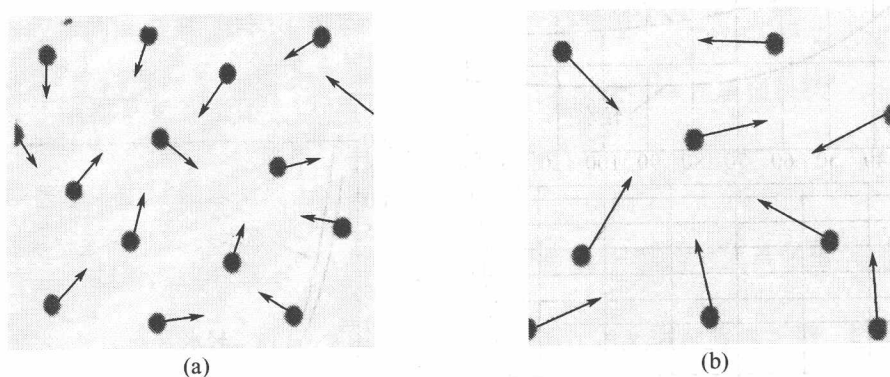


图 1.4 水由液态转化为气态的相变图

(a) 液态颗粒; (b) 气态颗粒

表 1.1 $^1\text{H}_2\text{O}$ 与 D_2O 的物理性质

物理性质	D_2O	H_2O
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	3.82	0.0
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	101.42	100.0
密度/(g/mL), 20 $^{\circ}\text{C}$	1.105 6	0.998 2
最大密度的温度/ $^{\circ}\text{C}$	11.6	4.0
55 $^{\circ}\text{C}$ 黏度/(mPa·s)	1.107	0.890 3
表面张力/(dyn/cm), 25 $^{\circ}\text{C}$	71.93	71.97
熔解热/(J/mol)	6.343	6.012
汽化热/(J/mol)	45.485	44.024
pH, 25 $^{\circ}\text{C}$	7.41	7.0
体积/(cm^3 /mol)	55.3	55.0
临界常数温度/ $^{\circ}\text{C}$	374.1	371.1

由于水分子有很大的极性,同时分子间形成氢键,分子间的吸引力较强,因此水的熔点、沸点高,具有高汽化热和比热容,能吸收大量热能。重水比普通水的密度大 10.6%,同时具有较高的熔点与沸点、较高的黏度及较高的最大密度温度,表明重水比普通水有更独特的化学结构。重水形成氢键的范围更广泛,而且由 ^2H 形成的氢键比由 ^1H 形成的氢键作用力更强。图 1.5 给出了轻水和重水的比热容。

轻水与重水的某些物理特性分别示于图 1.6~图 1.12 中。表 1.2 列出了轻水和重水的核性质。

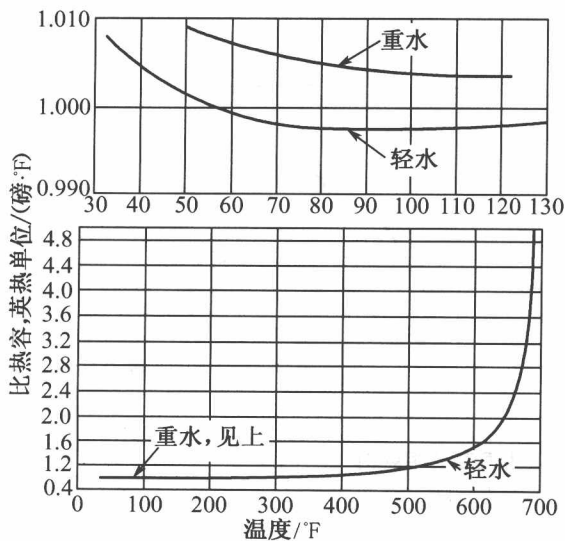
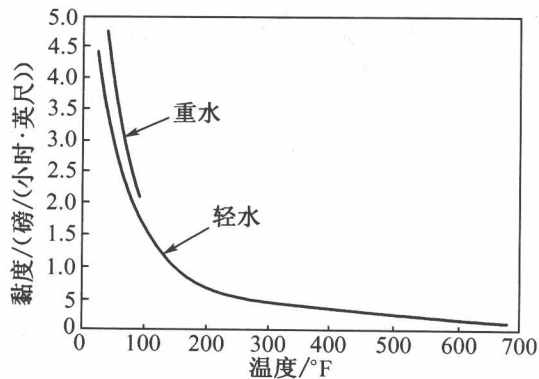
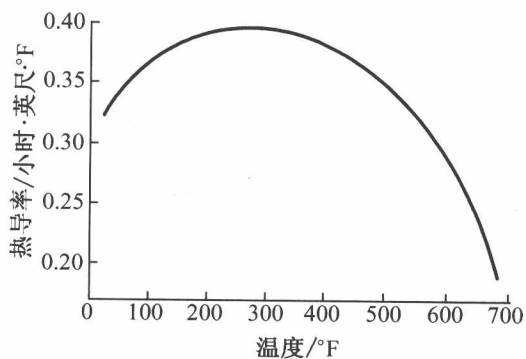
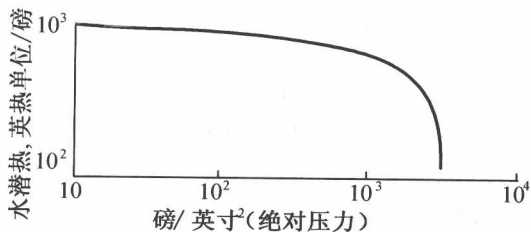
图 1.5 轻水和重水的比热容^①图 1.6 轻水和重水的黏度^②图 1.7 轻水(液体)的热导率^③

图 1.8 轻水的蒸发潜热

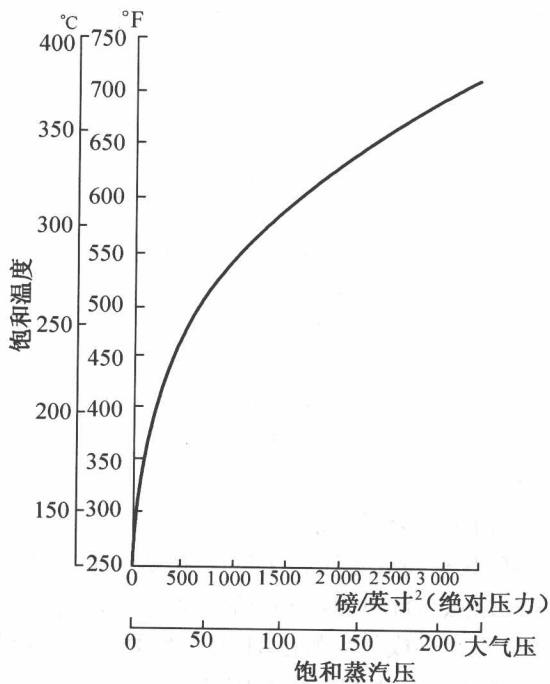


图 1.9 轻水的蒸汽压

① 比热容: 1 英热单位/磅·°F = $2.388 \times 10^{-4} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; °F = 5/9 °C

② 黏度: 1 lb(ft·h) = $4.13379 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

③ 1 英热单位 = 1.06 kJ

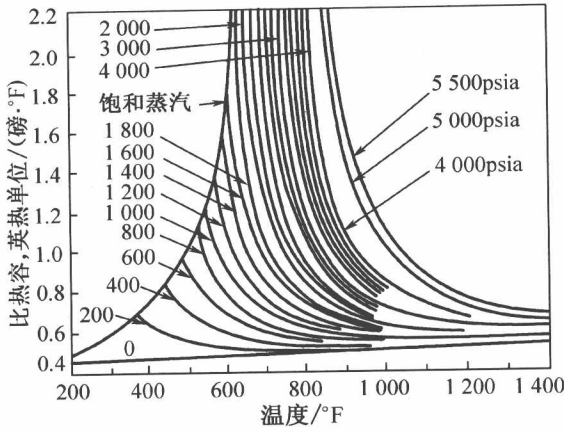


图 1.10 轻水蒸气的比热

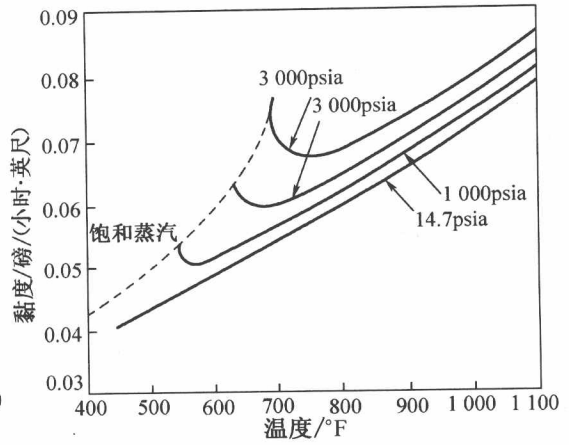


图 1.11 轻水蒸气的动态黏度

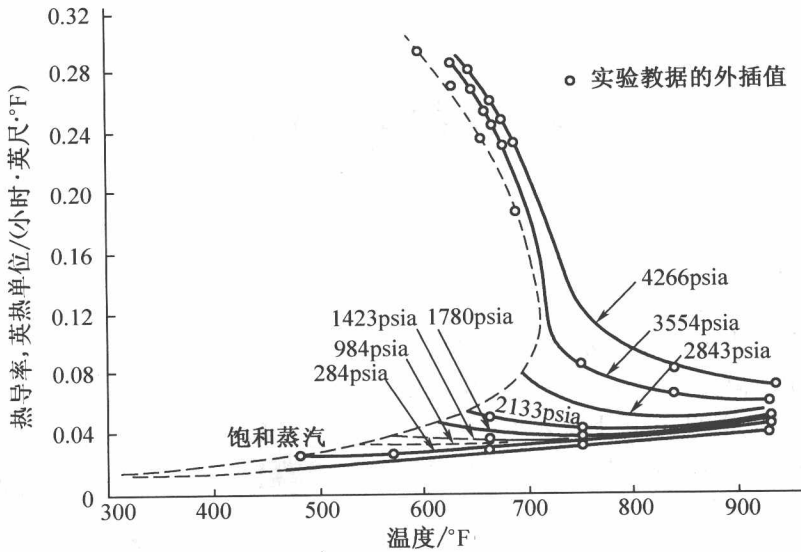


图 1.12 轻水蒸气的热导率

① psia = psi; 1 psi = 0.89 kPa