

氚及防氚渗透材料

TRITIUM & MATERIALS FOR PROTECTION OF TRITIUM PERMEATION

山常起 吕延晓 编著



原子能出版社

氡及防氡渗透材料

山常起 吕延晓 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

氚及防氚渗透材料/山常起,吕延晓编著. - 北京:原子能出版社,2005. 1
ISBN 7-5022-3348-2

I. 氚… II. ①山… ②吕… III. 工程材料-氚-渗透作用-研究
IV. TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 002001 号

内 容 简 介

本书是论述氢元素惟一的放射性同位素(同时也是最重同位素)——氚,以及防氚渗透材料的一本专业性参考书。本书内容包括氚的基本知识和防氚渗透材料的含义、分类、性能、使用要求以及国内外的研究成果。书中的实验方法、实验数据与理论分析对涉足于本领域的科技工作者有重要的参考价值和借鉴作用,对相关专业的大专院校师生也不失为一本有益的读物。

氚及防氚渗透材料

出版发行	原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)
责任编辑	刘 朔
责任校对	徐淑惠
印 刷	中国文联印刷厂
开 本	850 mm × 1168 mm 1/32
字 数	402 千字
印 张	15
版 次	2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5022-3348-2
经 销	全国新华书店
定 价	45.00 元

版权所有 侵权必究 网址:<http://www.aep.com.cn>

序

自然界的氢元素有三种同位素:氢(^1H)、氘(^2H 或D,又称重氢)及氚(^3H 或T,又称超重氢),其中氚的丰度最小($10^{-16}\%$)。天然的氚主要是由于宇宙射线的作用,大气中的氮、氧与中子或高能质子发生核反应而生成的,其数量极其微少。地球上天然氚的总量仅为千克量级,并多以氧化物形式存在。要获得大量的氚,一般采用人工方法,即在生产型的裂变反应堆中放置锂,在中子轰击下通过核反应生产氚。

由于氘-氚反应是最易实现的热核反应,目前它已用于军事核技术及聚变能源研究中,成为一种重要的战略材料;同时它在一般工业、农业、医学等领域中也有重要应用,在科学技术上是重要的材料。未来,如果受控热核反应堆研制成功,它将成为主要的聚变燃料而得到大量应用。因此,本书所论述的内容不仅重要,而且也是当前国内外的研究工作的热点之一。

本书的作者是我国早期研究氚工艺的研究人员,长期在氚的应用研究领域工作,取得了许多成果,获得了不少奖励。本书从氚的基本概念及性能讲起,包括氚的生产、应用、分析方法、在固体材料中的行为等,并全面论述了各类防氚渗透材料(包括金属与合金、非金属材料以及复合材料及组合材料)的性能及试验结果。其中,不仅综述了此领域国内外的主要文献资料,还包括了作者自己多年来所积累的经验、资料和研究成果。相信本书所提供的有关氚的知识、实验方法和研究结果对于相关领域的研究人员有实际的参考价值,对有关的大专学校的师生也将是一本有益的读物。我衷心地祝贺本书的出版。

中国科学院院士

李正和

2004年8月1日

前 言

氢是自然界最轻的元素,而氚是氢惟一的一种放射性同位素(也是最重的同位素)。氚在自然界存储量极微(氢中氚的原子分数为 $10^{-16}\%$),目前已成为核工业中重要的核材料之一,可以大规模生产。

氚的独特物理化学性能为其广泛应用奠定了基础。氚是当代热核聚变反应必不可少的核燃料,也是实现先进核武器小型化和高效率、提高现有核武器爆炸威力的关键装料,而且也是今后可控热核聚变反应堆第一代核燃料。据估计,一座工程规模的聚变堆,耗氚量达公斤量级是丝毫不奇怪的。由此可见,氚作为人类的一种新型能源材料具有重要的现实意义,而且蕴藏着巨大的应用潜力。氚已成为人类一种宝贵的物质资源,特别在军事用途中已成为一种重要的战略物资。氚的一些其他应用,例如用作一类自发光微光源(核子灯)的发光材料,以及用作放射性标记化合物(氚标记化合物)的基础材料,早已在工业、农业、医学、石油、水利和基础研究等方面发挥着不可替代的作用。

氚与氢的两种稳定同位素——氕和氘一样,在固体材料中具有强烈的穿透性。为了防止氚的无谓漏失,同时也为了避免环境的放射性污染,有必要强化对防氚渗透材料的开发。20世纪中期这一问题已被提出,而从70年代开始,随着聚变堆的工程设计和聚变堆材料研究的进展,更加明确了这一问题的迫切性。目前防氚渗透材料的开发已成为国内外的研究热点之一,而且取得了引人注目的成果。

本书的两位作者——山常起和吕延晓,均系我国早期氚研制和材料开发方面的研究人员。特别是山常起在1987—1996年接受国家“863”高科技计划中“核聚变—裂变反应堆材料”研究项目时,出任“聚变—裂变反应堆防氚渗透材料”课题研究的负责人,

这一课题的成果获得了“七五”和“八五”期间两项国家发明专利以及两项国家发明三等奖。该项研究成果还分别于1989年和1991年在日本和美国的第四届和第五届核聚变堆材料国际会议上交流,赢得了同行的好评。

两位作者根据自己多年研究工作所积累的实践经验与国内外的文献资料,再加上个人的心得体会,历时数载编成此书。

书中的内容包括氙的基本概念和基础知识,防氙渗透材料的含义、分类、使用要求和国内外的研究成果。相信书中的实验方法、实验数据和理论分析对涉足于此领域的科技人员有较大的参考价值,对相关专业的专科院校师生也不失为一本有益的读物。

氙行为的研究与防氙渗透材料的开发,仍属于一个比较新的研究领域,而且还在不断地深化。本书作者在归纳现有的成果,并紧跟时代步伐的同时,深感文献资料的匮乏和收集的困难,当然更谈不上取得国外类似专著的参考。因此,本书的出版无异于是一次大胆的尝试,作者不揣浅陋,抛砖引玉。

本书文稿完成后,曾印出若干本样书,分发全国有关专家学者征求意见。在反馈的意见中不乏鼓励之词,也有一些读者指出了书中具体存在的个别错误,在此一并表示感谢。

中国工程院院士宋家树先生长期以来一直关心和支持本书的问世,并亲自为本书作序,作者向宋家树先生表示敬意。

目 录

序

前言

第一章 氟	(1)
1.1 氟的性质	(1)
1.1.1 氟的核辐射特性	(1)
1.1.2 同位素效应	(2)
1.1.3 氟气向氟化水蒸气的转化	(8)
1.1.4 氟的溶解、扩散和渗透	(10)
1.1.5 氟的放射生物学效应	(13)
1.2 氟的来源	(16)
1.2.1 天然来源	(18)
1.2.2 人工来源	(19)
1.3 现役核设施中氟的生成和释放	(19)
1.3.1 反应堆	(19)
1.3.2 核燃料后处理设施	(21)
1.3.3 氟的生产与回收设施	(23)
1.4 热核反应与聚变堆中的氟	(25)
1.4.1 核聚变反应	(25)
1.4.2 实现可控热核聚变的条件	(27)
1.4.3 磁约束聚变堆的构造	(28)
1.4.4 工程聚变堆的燃料循环	(30)
1.4.5 惯性约束聚变	(31)
1.4.6 惯性聚变能发电	(33)
1.5 氟的分析测量	(36)
1.5.1 气体电离探测器测量	(38)
1.5.1.1 电离室	(38)
1.5.1.2 正比计数器	(39)
1.5.1.3 盖革-缪勒计数管	(40)
1.5.2 闪烁探测器测量	(41)
1.5.3 其他放射性测量方法	(44)
1.5.4 质谱分析	(45)

1.5.5	气相色谱分析	(46)
1.5.6	光谱分析	(47)
1.6	氡的用途	(47)
1.6.1	氢弹	(48)
1.6.2	中子弹	(49)
1.6.3	热核燃料	(50)
1.6.4	氡靶和氡放射源	(51)
1.6.5	氡灯和氡发光涂料	(54)
1.6.6	放射性示踪与氡标记化合物	(55)
1.7	氡的安全和防护	(57)
1.7.1	氡的放射学毒性	(58)
1.7.2	氡内照射对人体健康的影响	(61)
1.7.3	氡放射防护的基本原则	(65)
1.7.4	氡安全控制	(69)
第二章	氡在固体材料中的理化行为	(72)
2.1	氡的渗透行为	(73)
2.2	氡在材料表面的吸附-解吸过程	(79)
2.2.1	单分子层吸附	(81)
2.2.2	多分子层吸附	(84)
2.2.3	解吸	(85)
2.3	氡在材料中的溶解过程	(86)
2.3.1	溶解度、溶解热与溶解定律	(87)
2.3.2	氡在金属中的溶解	(92)
2.4	氡的扩散行为与扩散方程	(95)
2.4.1	菲克第一定律和第二定律	(95)
2.4.2	扩散方程式的求解	(98)
2.4.2.1	稳态扩散方程求解	(98)
2.4.2.2	非稳态扩散方程求解	(100)
2.4.2.3	稳态与非稳态扩散方程分析	(101)
2.4.3	扩散过程的影响因素	(106)
2.5	扩散渗透参数的定量评价	(115)
2.5.1	Φ , D 和 S 三者之间的关联	(116)
2.5.2	定量评价方法举例	(119)
2.5.3	氢同位素在某些材料中的扩散渗透参数	(126)
2.6	氡的非常规渗透与渗漏	(129)
2.6.1	表面复合控制步骤的渗透	(130)

2.6.2	等离子体驱动的渗透	(130)
2.6.3	渗漏(或泄漏)	(132)
2.7	扩散渗透测定的实验方法	(135)
2.7.1	压力测量法	(137)
2.7.2	吸附-解吸测量法	(140)
2.7.3	四极质谱仪法	(141)
2.7.4	电离室测量法	(144)
2.7.5	正比计数管测量法	(146)
2.7.6	测量方法评价	(147)
2.8	含氟固体与元素氟化物	(149)
2.8.1	氟与金属的相互作用	(151)
2.8.2	金属钡中的氟	(156)
2.8.3	金属氟化物的储氟作用	(159)
2.8.4	氢脆与氢脆	(164)
2.9	氟在材料中的辐射效应	(170)
第三章	防氟渗透材料的类别与使用要求	(177)
3.1	防氟渗透材料的含义	(178)
3.2	防氟渗透材料的性能要求	(181)
3.3	材料分类	(185)
3.3.1	根据材料发展的成熟程度分类	(185)
3.3.2	根据材质类型和结构特点分类	(188)
3.4	氟的密封与包容	(190)
3.4.1	氟的第一级密封和包容	(191)
3.4.2	氟的第二级包容	(192)
3.4.3	氟的多重包容	(192)
3.5	氟的常规操作系统举例	(194)
3.5.1	产氟操作系统	(194)
3.5.2	贮氟操作系统	(196)
3.5.3	钡合金分离纯化系统	(198)
3.5.4	核燃料元件包壳	(199)
3.5.5	核燃料后处理中氟的回收系统	(202)
3.5.6	重水反应堆中氟的回收系统	(204)
3.5.7	大量氟的处理系统	(205)
3.6	氟废物处理	(207)
3.6.1	气态氟废物	(208)
3.6.1.1	催化氧化脱氟	(209)

3.6.1.2	气态氡废物的直接固定	(210)
3.6.2	液体氡废物	(211)
3.6.2.1	水泥固化	(211)
3.6.2.2	有机氡废液处理	(212)
3.6.3	固体氡废物	(213)
3.6.3.1	高释气率固体氡废物	(213)
3.6.3.2	包装与贮存	(214)
3.6.4	高比活度氡废物	(215)
3.7	个人辐射防护与氡污染控制	(216)
3.7.1	个人防护衣具	(217)
3.7.1.1	防护手套	(218)
3.7.1.2	防护气衣	(220)
3.7.2	氡污染控制	(221)
3.7.2.1	大型核设施的氡污染控制	(221)
3.7.2.2	氡开放性操作的污染控制	(224)
3.7.2.3	材料氡污染的控制	(225)
3.8	工程试验聚变堆	(227)
3.8.1	装置本体结构	(228)
3.8.2	第一壁	(229)
3.8.3	氡循环纯化处理	(231)
3.8.4	多重包容	(232)
3.9	防氡渗透材料的选择与开发	(234)
3.9.1	材料选择与开发的依据	(234)
3.9.2	材料开发关注的焦点	(237)
3.9.3	材料的表征和评价	(240)
第四章	金属与合金	(242)
4.1	不锈钢	(243)
4.1.1	氢同位素在奥氏体不锈钢中的扩散渗透行为	(245)
4.1.2	氡在316L不锈钢中的扩散渗透行为及其同位素效应	(251)
4.1.3	不锈钢贮氡容器的渗透特征	(254)
4.1.4	表面状态对氡扩散渗透行为的影响	(261)
4.2	铝和铝合金	(268)
4.2.1	金属铝及其合金	(268)
4.2.2	铝基金属间化合物(铝化物)涂层	(271)
4.2.3	305 铝合金表面氧化膜	(275)
4.2.4	氡渗透机制探讨及渗透的影响因素	(279)

4.2.5 防氚渗透性能评价	(282)
4.3 其他金属与合金	(286)
4.3.1 金属元素单质及合金	(286)
4.3.2 核燃料元件金属包壳材料的比较	(292)
4.3.3 铀与铀合金同氚的相互作用	(297)
第五章 非金属材料	(302)
5.1 陶瓷材料	(304)
5.1.1 氚扩散实验研究	(305)
5.1.1.1 实验原理和装置	(305)
5.1.1.2 实验结果	(307)
5.1.1.3 几种材料的测量参数	(312)
5.1.2 氚溶解度实验研究	(317)
5.1.2.1 二次离子质谱分析	(318)
5.1.2.2 实验方法	(320)
5.1.2.3 实验结果	(321)
5.1.3 氚渗透示踪实验研究	(326)
5.1.3.1 实验原理和方法	(326)
5.1.3.2 烧结氧化铝样品管的实验结果	(330)
5.1.4 结论	(335)
5.2 碳质材料——石墨	(335)
5.2.1 高温气冷堆包覆颗粒燃料涂层	(339)
5.2.2 氚在热解碳中扩散行为实验研究	(341)
5.2.3 氚在不同石墨样品中的释放行为研究	(345)
5.3 玻璃	(351)
5.3.1 SCB 玻璃	(354)
5.3.2 含硼玻璃与石英玻璃	(354)
5.4 有机高分子材料	(357)
5.4.1 防氚衣具材料的选择	(359)
5.4.2 氚在有机高分子材料中渗透的实验测量	(364)
5.4.3 湿度对材料渗透性的影响	(367)
第六章 复合材料和组合材料	(371)
6.1 复合材料中的基体与功能体	(372)
6.1.1 金属-金属复合材料	(373)
6.1.2 陶瓷材料功能体	(375)
6.2 复合材料的制备	(378)
6.2.1 金属氧化物涂层	(380)

6.2.2	空心阴极离子镀	(384)
6.2.3	离子束辅助沉积	(385)
6.3	氦-氘聚变堆材料的选择	(387)
6.3.1	核聚变点火与等离子体约束条件	(387)
6.3.2	面对等离子体的材料	(389)
6.3.3	第一壁和包层结构材料	(394)
6.3.4	聚变堆材料研究中的问题	(396)
6.4	复合材料中氦渗透数学模型	(400)
6.4.1	氦在两材料层中的渗透模型	(400)
6.4.2	无量纲数学表达	(406)
6.4.3	模型数学求解和结果讨论	(409)
6.4.4	数学模型应用实例	(412)
6.5	碳化钛(TiC)陶瓷膜复合材料实验研究	(414)
6.5.1	概述	(414)
6.5.2	TiC 陶瓷膜复合材料的制备	(417)
6.5.3	TiC 陶瓷膜成分分析与性能评价	(419)
6.5.4	渗透机制的模型解释	(424)
6.5.5	TiC 陶瓷膜高效阻渗机制探讨	(428)
6.6	碳化钛(TiC)陶瓷膜稳定性研究	(431)
6.6.1	等离子体辐照稳定性研究	(431)
6.6.2	中子辐照稳定性研究	(435)
6.6.3	γ 射线和 β 射线辐照稳定性研究	(436)
6.6.4	在反复热冲击下的稳定性研究	(438)
6.7	碳化硅(SiC)陶瓷膜复合材料实验研究	(441)
6.7.1	概述	(441)
6.7.2	不锈钢基体表面 SiC 阻挡层研究	(444)
6.7.3	SiC 陶瓷膜的阻渗机制探讨	(450)
6.8	组合材料	(451)
6.8.1	分类和应用	(452)
6.8.2	因科洛依合金三层组合材料	(455)
	参考文献	(459)

第一章 氚

氚,又称氢-3或超重氢,是化学元素周期表中最轻元素氢的惟一放射性同位素。1933年,即发现氢的另一种稳定同位素氘后的一年,就提出了有可能存在质量数 $A=3$ 的氢同位素。1934年实验证实了氚的存在。1935年国际上将这种质量数为3的氢同位素,正式命名为氚(Tritium),并用符号 ^3H 或T表示。1939年实验证明氚具有放射性。

几十年来,氚及其化合物已作为一类物质纳入现代核材料体系,并在科研和国民经济应用中取得了众多极富前景的成果。与此同时,氚作为一种污染物质向生态环境的排放已越来越引起人们的关注。

1.1 氚的性质

1.1.1 氚的核辐射特性

氚作为氢元素的一种放射性同位素,其原子核是不稳定的,可以放出弱 β 射线而衰变为一种稳定的核素氦-3(^3He)。氚的一些主要核辐射特性列于表1-1。值得注意的是,氚的衰变生成物氦-3,是单原子气体,因此1 mol纯氚气将产生2 mol氦-3气体。

氚衰变发出的 β 射线,通过与周围物质的相互作用而使其分子激发或化学键受到破坏,并形成电子、离子对和自由基,进一步对物质产生辐射效应。

对于平均能量低于2.5 MeV的 β 粒子来说, β 射线在铝中的射程,由下式决定

$$R = 412E^n \quad (1-1)$$

$$n = 1.265 - 0.094 \ln E$$

表 1-1 氡的主要核辐射特性

名称	特性数据
衰变方式	β^- (100%)
半衰期	12.33 a
最大 β 能量	18.5 keV
平均 β 能量	5.7 keV
衰变常数	$1.78 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
比活度	$9.6 \times 10^3 \text{ Ci/g (T}_2\text{)}$ $2.58 \text{ Ci/cm}^3 (\text{T}_2)$ $2.65 \times 10^3 \text{ Ci/g (T}_2\text{O)}$
单位活度衰变热功率	$0.318 \text{ W/g (T}_2\text{)}$ $3.32 \times 10^{-5} \text{ W/Ci (T}_2\text{)}$
氡-3(衰变产物)生成速率 ^a	$1.32 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{g (T}_2\text{)}$ $1.38 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{Ci (T}_2\text{)}$

a 以标准状态下气体体积计,余同。

式中, R 为射程(mg/cm^2); E 为 β 粒子的能量(MeV)。

由此得出, 5.7 keV 的 β 粒子(即氡 β 射线的平均能量)在铝中的射程为 0.049 mg/cm^2 , 或按铝的密度为 2700 mg/cm^3 计, 射程为 $0.18 \mu\text{m}$ 。为了推导出不同物质 M 中 β 粒子的射程, 有必要对单位质量的相对概率进行修正。由于散射的产生源于电子, 因此物质中每单位体积的原子密度越高, 每个原子的电子数越多, 射程就越短。由此

$$R'_M = R'_{\text{Al}} (\rho_{\text{Al}}/\rho_M) (Z_{\text{Al}}/Z_M) (N_M/N_{\text{Al}}) \quad (1-2)$$

式中, Z 是原子(或分子中原子)原子序数; N 是相对原子(或分子)质量; R' 是线性射程。氡 β 射线在不同材料中的射程列于表 1-2 中。

1.1.2 同位素效应

氢元素由于其同位素原子之间在核性质(如质量或自旋)上彼此存在差异而表现出物理性质和化学性质细微的变化, 这种现象称为同位素效应。氢的所有同位素的原子核都拥有一个质子的电荷, 核外电子数为 1。因此氡的主要化学性质与氘或氚基本相似。但氢的三种同位素质量相对差别较大(见表 1-3), 因而

表 1-2 氦 β 射线的射程

材 料	$E(\beta)/\text{keV}$	R'
T ₂ 气体, STP ^a	5.7	0.26 cm
T ₂ 气体, STP	18.5	3.2 cm
空气, STP	5.7	0.036 cm
水, 液体	5.7	0.42 μm
水, 液体	18.5	5.2 μm
不锈钢	5.7	0.06 μm

^a 指标准状态温度、压力下。

表 1-3 氢同位素的相对原子质量与丰度

同位素	相对原子质量	丰度/%
¹ H	1.008 142 $\pm$ 0.000 003	99.985 2
² H(D)	2.014 735 $\pm$ 0.000 006	0.014 8
³ H(T)	3.016 997 $\pm$ 0.000 011	10 ⁻¹⁴ ~ 10 ⁻¹⁵

在构成物质或化合物时物理、化学性质呈规律性的变化。氢的同位素效应可从热力学参数的改变, 化学反应动力学速率的变化, 原子光谱或分子光谱的谱线位移, 甚至生物学效应的差异得到体现。例如氢同位素按照氕、氘、氚的顺序, 其气态密度逐渐增加, 液态沸点和凝固点逐渐升高, 而液态和固态的蒸气压以及气态在固体物质中的溶解度和扩散率则都逐渐减小。三种氢同位素的一些重要的物理性质列于表 1-4。另有文献专门列出了氚气的临界点常数与三相点常数, 见表 1-5。两者之间数据略有差别。

氢分子是由两个原子组成的。氢同位素的不同组合可得到六种不同分子类型: H₂, D₂, T₂, HD, HT, DT。同位素核质量上的差别致使分子之间光谱产生位移, 并观察到物质分子的一些性质, 如密度、熔点和沸点温度、相变潜热、扩散速度、热传导等也存在微小的差别。

在化学平衡中, 不同同位素形式的分子氢参加的反应, 表现出明显的同位素效应。以氢同位素分子解离为例, 其解离常数就表现出相应的差别(见表 1-6)。

表 1-4 三种氢同位素的一些重要物理性质

	氕(H)	氘(D)	氚(T)
原子氢			
原子序数	1	1	1
相对原子质量	1.008 0	2.014 1	3.016 05
电离势/eV	13.595	13.600	13.595
电子亲和势/eV	0.754 2	0.754	
核自旋	1/2	1	1/2
核磁矩/ $JT^{-1} \times 10^{-26}$	1.410 62	0.433 066	1.504 57
核四级矩/ cm^2	0	2.77×10^{-31}	0
电负性	2.1		
半衰期/a	稳定	稳定	12.323
自然界含量/%	99.985 2	0.0156	10^{-16}
氢分子			
键距/ $10^{-8} cm$	0.741 6	0.741 6	
离解能/eV	4.478	4.556	4.591
电离势/eV	15.427	15.457	15.49
固体密度/ $g \cdot cm^{-3}$	0.086 71	0.196 7	
熔点/K	13.98	18.7	21.6
溶化热/ $J \cdot mol^{-1}$	117	197	
液体密度/ $g \cdot cm^{-3}$	0.07099(-252.78 °C)	0.163 0(-249.75 °C)	
沸点/K	20.39	26.67	25.04
蒸发热/ $J \cdot mol^{-1}$	904	1227	
临界温度/K	32.976	38.262	40.44
临界压力/MPa	1.293	1.65	1.85
临界密度/ $g \cdot cm^{-3}$	0.031 0	0.066 8	
三相点温度/K	13.96	18.72	21.65
三相点压力/kPa	7.159	17.07	25.06

氚的氧化物(T_2O , 氚水)的性质非常接近于重水(D_2O)和普通水(H_2O)。但是水同位素形式的物理常数和热力学常数却随同位素水相对分子质量的增加而逐渐变化。从 H_2O , 经过 HDO , D_2O , HTO 和 DTO 过渡到 T_2O 时, 电离度、粒度、离子迁移率、溶解度的变化非常明显。氢各种同位素的氧化物分子(水)的基本振

动见表 1-7, 振动的模式如图 1-1 所示。轻水 (H_2O)、重水 (D_2O) 与氙水 (T_2O) 的一些热力学数据列于表 1-8。氙水 (100% 的 T_2O) 密度与温度的关系可用下式表示

表 1-5 氙气的临界常数与三相点常数

临界温度/K	43.7
临界压力/MPa	2.107
临界体积/(m^3/kmol)	0.053
蒸发热/(J/kmol)	1.321×10^6
摩尔体积/(m^3/kmol)	0.018 6
三相点液体的摩尔体积/(m^3/kmol)	0.021 9
三相点固体的摩尔体积/(m^3/kmol)	0.019 24
三相点压力/kPa	25.12
三相点温度/K	21.65
沸点/K	25.57
转化温度/K	87

表 1-6 不同温度 (K) 下氢同位素分子的解离常数

温度/K 解离常数 氢同位素分子	1 000	1 500	2 000	2 500
H_2	6.45×10^{-18}	3.60×10^{-10}	2.96×10^{-6}	6.92×10^{-4}
HD	2.48×10^{-18}	1.57×10^{-10}	1.36×10^{-6}	3.28×10^{-4}
D_2	3.71×10^{-18}	2.70×10^{-10}	2.49×10^{-6}	6.17×10^{-4}
HT	2.26×10^{-18}	1.49×10^{-10}	1.32×10^{-6}	3.21×10^{-4}
T_2	3.01×10^{-18}	2.44×10^{-10}	2.35×10^{-6}	5.95×10^{-4}

表 1-7 不同氢同位素组成的水分子基本振动

单位: cm^{-1}

分子	ω_3	ω_1	ω_2
H_2O	3 935.39	3 825.32	1 653.91
HDO	3 883.8	2 820.3	1 449.4
D_2O	2 883.79	2 758.06	1 210.25
DTO	2 830.7	2 357.1	1 117.9
T_2O	2 436.12	2 296.63	1 017.89
HTO	3 882.6	2 365.0	1 374.5