

An Introduction to Millikelvin Technology

---

# 极低温( $\text{mK}$ )技术概论

---

[英]D.S. 贝茨 著

金铎 冉启泽 曹烈兆 译

中国科学技术大学出版社

# 极低温(mK)技术概论

[英] D. S. 贝茨 著  
金铎 冉启泽 曹烈兆 译

中国科学技术大学出版社

1995·合肥

© Cambridge University Press 1989

业经授权,中国科学技术大学出版社享有本书在中国大陆中文简体字版专有出版权

### 图书在版编目(CIP)数据

**极低温(mK)技术概论**/[英] D.S. 贝茨 著;金铎 冉启泽  
曹烈兆 译. —合肥:中国科学技术大学出版社,1995年12月  
ISBN7-312-00742-2

I 极低温(mK)技术概论

II [英] D.S. 贝茨 著;金铎 冉启泽 曹烈兆 译

III ①极低温(mK) ② 技术概论

IV O

凡购买中国科大版图书,如有白页、缺页、倒页,由本社出版科负责调换

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:850×1168/32 印张:4 字数:101千

1995年12月第一版 1995年12月第一次印刷

印数:1—1500册

ISBN 7-312-00742-2/O·169 定价:8.00元

## 内 容 提 要

本书是一本译著,全面介绍了 1K 以下温度如何获得和测量的原理和方法.其中包括  $^3\text{He}$  恒温器、 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀释致冷机、Pomeranchuk 致冷机、绝热核去磁方法和测量 1K 以下温度的各种常用温度计.全书共分六章,内容简明扼要、图文并茂,插图及其文字说明约占全书的一半,对初次涉及极低温范围的读者特别合适.

本书适合于物理类和制冷专业类的大学生和研究生阅读,对从事这方面研究工作的人员也是一本很好的参考书。

## 译者前言

本书作者 D. S. Betts 在英国 Sussex 大学长期从事极低温技术和液氮的研究工作,著有多本著作.这本简明扼要、图文并茂的书是作者从学习班的讲演稿演变而来.望读者在阅读正文以前读一下作者本人的序言,对阅读本书将大有裨益.

本书可作为低温物理专业学生的参考书,并适合于物理系和其它对极低温技术有兴趣的大学生和研究生阅读.对想做极低温下工作的研究人员先阅读一下本书以了解全貌也极有好处,但要深入了解还需阅读专门书籍和文献,在此书的参考文献中也已列出.

本书的翻译是在得到作者同意,并由中国科学技术大学出版社和英国 Cambridge 大学出版社签订版权协议情况下进行的.根据协议,不能增减原书内容.所以我们在翻译时采取了直译方式,逐句翻译.对已过时的“国际实用温标”一节也未加更动或注释.请读者参阅 1990 年国际温标的有关文献(如:ITS-90, NPL Special Report QU S45, November 1989).

在翻译过程中得到作者的大力相助,并提供了书中的照片.中国科学技术大学出版社和英国 Cambridge 大学出版社也给予我们很多帮助和支持,在此表示衷心地感谢.

本书的第一、二、三章由金铎翻译,第四、五、六章由冉启泽翻译,图表和说明由曹烈兆翻译,最后由曹烈兆校阅和整理.

曹烈兆

1994 年 10 月

## 作者序言

本书起源于1985年9月,我受布拉格的查尔斯大学和俄罗斯的杜布纳联合核研究所的 Marek Finger 博士之邀,在捷克斯洛伐克乡村的 Bechyně 城堡举办的关于极化核的超精细相互作用和物理的国际暑期学习班上作的四次低温方法的报告.对暑期班的主题我知之甚少,但低温物理是我的专长,尤其鉴于我早已是《1K 以下的致冷和测温》(Sussex 大学出版社,1976)一书的作者,因此坦率地说,准备这四次报告并非难事.为使报告色彩丰富,我决定尽量少用文字叙述,配上大量取自各种来源的图表做成透明片.凭着我对题目素材的知识,没有用讲稿,而是边放透明片边报告.我用了四天时间思考报告内容并准备资料.所有的四个报告都是在1985年9月3日做的.组委会最初没有打算出版报告文集,但是许多与会者表示想要得到文字形式的讲稿.要将一大堆透明片转变成叙述清晰可付印的手稿,我不太有信心,但我答应试一试.这就像将电影改写成中篇小说.我干干停停,错过了一再推迟的截止期,直到文集编者最终放弃了我,因而文集中没有收入我的报告.这时我觉得应该将自己已经起了头的事做完,同时“关于低温方法的四次讲演”作为一种个人版本,在 Sussex 大学的研究生可以得到,然而外界并不知晓.当时(1986年8月)我寄了一本给 CUP 的 Simon Capelin 博士,他和我早先就另一个题目通过信,我答应愿将内容作进一步的有限的扩充至本书的样子.我担心这个提议会遭拒绝,可实际上 Peter McClintock 博士却提出了一些非常有益的建议,鼓励我干下去.至此,我才稳步地处理录入“word -processor”磁盘中的文字资料、改编以及扩充内容,直到1987年6月将底稿寄出.整个这一过程的工作总量大大超过我会同意作为一揽

子计划而干的工作量,但是因这件事分成了三个不同的阶段,所以看起来其工作量总是可以对付.

我之所以提到所有上述的情况,是因为这册书的最终形式在很大程度上被上述经历决定了. 因此,这本书简短,图/文比例高. 书中的插图并非仅是正文的附属物,而是期望读者花些时间搞清其意义,然后再往下读. 同样重要的是,这本小册子无论如何不能代替我的《1 K 以下的致冷和测温》(1976)或 O. V. Lounasmaa 的《1 K 以下的实验原理和方法》(1974),这两本书作为更高级的经典仍然可以得到.

这本小册子的意图是作为低温和极低温物理研究实验专业技术的一个入门. 首先,它对于那些刚开始这方面研究工作的研究生,或者从别的专业转过来的短期研究人员看来是最适合的,其次对要选择低温物理专业的大学最后一年级的学生也最为合用. 要仔细琢磨书中的插图以助理解,一旦有所领悟请读者去参阅专门文献.

DAVID S. BETTS

# 目 录

|                                            |        |
|--------------------------------------------|--------|
| 译者前言 .....                                 | ( I )  |
| 作者序言 .....                                 | ( II ) |
| 第一章 致冷和测温导论 .....                          | ( 1 )  |
| 1.1 引言 .....                               | ( 1 )  |
| 1.2 致冷 .....                               | ( 10 ) |
| 1.2.1 流体的自由膨胀 .....                        | ( 1 )  |
| 1.2.2 流体的等熵膨胀或压缩 .....                     | ( 2 )  |
| 1.2.3 流体的等焓膨胀 .....                        | ( 4 )  |
| 1.2.4 顺磁体的绝热(等熵)去磁 .....                   | ( 7 )  |
| 1.3 温度测量 .....                             | ( 10 ) |
| 1.3.1 开尔文(Kelvin)温标 .....                  | ( 11 ) |
| 1.3.2 国际实用温标 .....                         | ( 12 ) |
| 第二章 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合液的性质 ..... | ( 14 ) |
| 2.1 引言 .....                               | ( 14 ) |
| 2.2 相图 .....                               | ( 14 ) |
| 2.3 稀释混合液 .....                            | ( 17 ) |
| 2.4 氦-3 溶质的费米简并 .....                      | ( 18 ) |
| 2.5 混合液和二流体模型 .....                        | ( 19 ) |
| 2.6 渗透压 .....                              | ( 20 ) |
| 2.7 蒸汽压 .....                              | ( 21 ) |
| 2.8 输运性质 .....                             | ( 22 ) |
| 第三章 稀释致冷 .....                             | ( 25 ) |

|            |                        |             |
|------------|------------------------|-------------|
| 3.1        | 引言                     | (25)        |
| 3.2        | 蒸发冷却                   | (25)        |
| 3.3        | 稀释致冷机部件设计              | (28)        |
| 3.4        | 起动                     | (32)        |
| 3.5        | 混合物的用量和浓度              | (33)        |
| 3.6        | 蒸馏器                    | (33)        |
| 3.7        | 如何获得最低温度               | (36)        |
| 3.8        | 热交换器                   | (36)        |
| 3.9        | 漏热                     | (43)        |
| 3.10       | 热交换器结构                 | (45)        |
| 3.11       | 不用热交换器的其它方法            | (46)        |
| <b>第四章</b> | <b>Pomeranchuk 致冷机</b> | <b>(48)</b> |
| 4.1        | 引言                     | (48)        |
| 4.2        | 熔化氦-3 的性质              | (48)        |
| 4.3        | 固化致冷                   | (49)        |
| 4.4        | 压缩过程                   | (53)        |
| 4.5        | 设计实例                   | (56)        |
| 4.6        | 几种近期的设计                | (61)        |
| 4.7        | 结论                     | (63)        |
| <b>第五章</b> | <b>绝热核去磁</b>           | <b>(64)</b> |
| 5.1        | 引言                     | (64)        |
| 5.2        | 基本原理                   | (65)        |
| 5.3        | 熵数据                    | (66)        |
| 5.4        | 理想的核顺磁体                | (66)        |
| 5.5        | 非理想情形                  | (69)        |
| 5.6        | 自旋-晶格弛豫                | (70)        |
| 5.7        | 超精细增强的 Van-Vleck 顺磁体   | (74)        |

|             |                            |              |
|-------------|----------------------------|--------------|
| 5.8         | 致冷物质的几何形状:板型、线型或粉末型? ..... | (75)         |
| 5.9         | 装置 .....                   | (78)         |
| <b>第六章</b>  | <b>温度测量</b> .....          | <b>(86)</b>  |
| 6.1         | 引言 .....                   | (86)         |
| 6.2         | NBS 超导固定点器件 .....          | (88)         |
| 6.3         | 氮-3 蒸汽压 .....              | (89)         |
| 6.4         | 氮-3 熔化压 .....              | (90)         |
| 6.5         | 碳电阻或锗电阻 .....              | (92)         |
| 6.6         | 电容温度计 .....                | (95)         |
| 6.7         | 硝酸铯镁( CMN 和 CLMN ) .....   | (95)         |
| 6.8         | NMR 测温法 .....              | (96)         |
| 6.9         | $\gamma$ 射线各向异性测温 .....    | (98)         |
| 6.10        | 噪声温度计 .....                | (99)         |
| 6.11        | 结论 .....                   | (100)        |
| <b>参考文献</b> | .....                      | <b>(102)</b> |
| <b>索引</b>   | .....                      | <b>(108)</b> |

# 第一章 致冷和测温导论

## 1.1 引言

在学习低温物理专业技术时,先讲述一些与致冷和测温有关的某些热力学概念是有帮助的.这些概念不难被综合在一起,这就是本章的目的.

## 1.2 致冷

在低温研究中通常用作致冷物质的物理体系有流体(特别是 $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  以及 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液)、具有电子顺磁性的固体(如硝酸铈镁(CMN))、具有核顺磁性的固体(如铜)、超精细增强的核顺磁性固体(如 $\text{PrNi}_5$ )以及在熔化压时的固/液 $^3\text{He}$ . 然而本章为了说明问题,我们仅利用单原子范德瓦尔斯流体和理想的顺磁体来阐明致冷的热力学原理.

### 1.2.1 流体的自由膨胀

如果流体膨胀进入一个预先抽空的空间,并假定容器壁完全绝热且绝对刚性,那么很容易证明内能 $U$ 保持常数.这一过程是不可逆的(熵增加了),在单相状态,温度改变可以方便地用下式表示:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U = -\frac{1}{C_V} \left[ T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p \right]. \quad (1.1)$$

一般说来上式不为零(理想气体除外),但它可用流体的状态方程(如

果已知的话)来表示. 图 1.1 给出范德瓦尔斯流体的计算结果, 包括单相状态和两相状态两种情况. 自由膨胀从不用来作为实际的致冷手段, 这儿就不作进一步讨论了.

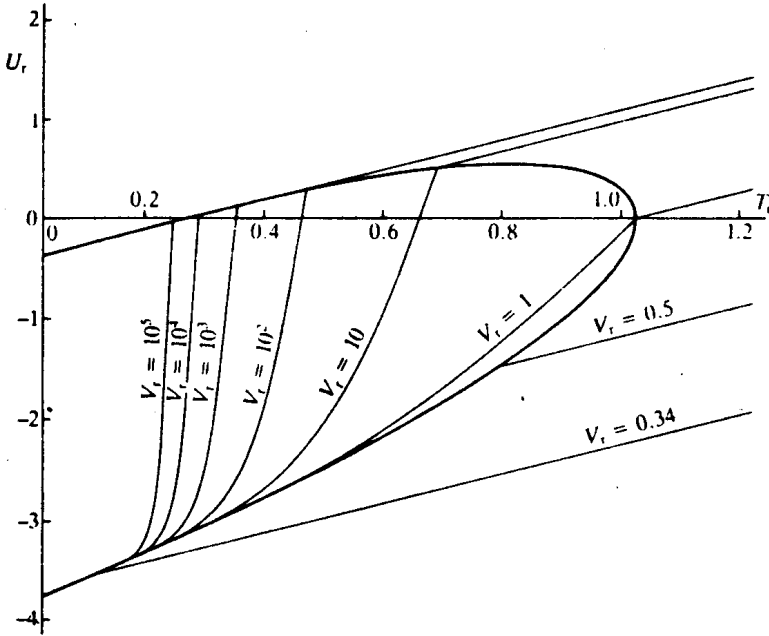


图 1.1 作为说明的一个例子, 范德瓦尔斯流体在几个固定的约化体积  $V_r = V/V_c$ , 内能  $U_r$  与约化温度  $T_r = T/T_c$  的关系 (这里下标 c 表示临界点的值). 约化内能在临界点标为零值; 在蒸汽压下, 当  $T_r \rightarrow 0$ ,  $U_r(\text{液体}) \rightarrow \left( 2 \frac{1}{2} T_r - 3 \frac{3}{4} \right)$ , 而  $U_r(\text{蒸汽}) \rightarrow \left( 1 \frac{1}{2} T_r - \frac{3}{8} \right)$ . 温度变化可以沿通过相应的初态点的水平线至左边而得到. 作者感谢 Erik Westerberg 提供做此图的程序.

### 1.2.2 流体的等熵膨胀或压缩

使流体以可逆和绝热方式膨胀, 在此过程中做外功. 可以设想此流体被约束在一个绝热的圆筒容器中, 容器的一端是一个无摩擦的

活塞,它克服外压强运动,保持非常低的速度,尽可能避免不可逆性。

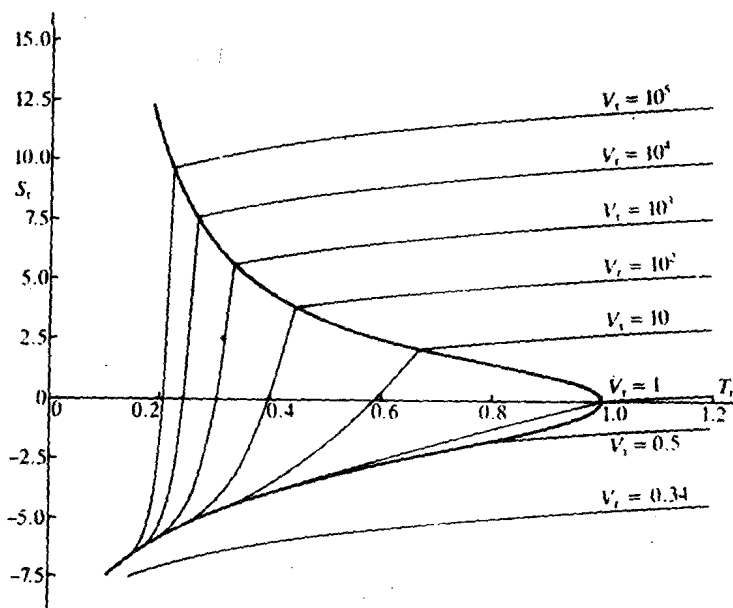


图 1.2 作为说明的一个例子, 范德瓦尔斯流体在几个固定的约化体积  $V_r = V/V_c$ , 熵  $S_r$  与约化温度  $T_r = T/T_c$  的关系(这里下标 c 表示临界点的值), 约化熵在临界点标作零值(范德瓦尔斯流体不遵守热力学第三定律); 在蒸汽压下, 当  $T_r \rightarrow 0$ ,  $S_r$  (液体) 以  $\left[ 2 \frac{1}{2} \ln T_r - \ln \left( 6 \frac{3}{4} \right) \right]$  向负无穷大方向发散, 而  $S_r$  (蒸汽) 以  $\left[ 2 \frac{1}{2} \ln T_r - \ln \left( 6 \frac{3}{4} \right) + 3 \frac{3}{8} / T_r \right]$  向正无穷大方向发散, 温度变化可以沿通过相应的初态点的水平线而得到。作者感谢 Erik Westerberg 提供此图的程序。

这个过程是准静态的, 在单相状态, 温度改变可以很方便地用下式表示:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_s = - \frac{T}{C_v} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v. \quad (1.2)$$

这可以用流体的状态方程(如果已知的话)表示出来, 对于单原子理

想气体,上式可简化成熟悉的形式:

$$T_i = T_i (V_i/V_i)^{2/3}. \quad (1.3)$$

图 1.2 给出了范德瓦尔斯流体的计算结果,包括单相状态和两相状态.这种方法或者说它的一种实际的近似方法被用于低温致冷机,最明显的例子是简单的 $^3\text{He}$ 和 $^4\text{He}$ “减压液池”.

由于蒸汽的体积太大,使用一个运动的活塞是不实际的,但可用真空泵使液体蒸发,其作用与活塞类似. Pomeranchuk 致冷机的基本原理也可认为与上面相同,但此时两相是液体和固体,而不是蒸汽和液体;此外,还应用了可运动的活塞,通常是用波纹管.见第四章.

### 1.2.3 流体的等焓膨胀

流体的等焓膨胀可以理想地发生在经典的热力学教科书所示的装置中及图 1.3(a)和 1.3(b)中. 流体从一个保持在压强  $p_1$  (适当地控制无摩擦活塞的运动)的容器通过小孔流向第二个压强保持在  $p_2$  (适当地控制另一个无摩擦活塞的运动)的容器. 所有器壁都是绝热的,而且  $p_1 \geq p_2$ . 很容易证明焓  $H$  保持常数. 这过程是不可逆的,熵增加了. 在单相状态时,温度的改变可以方便地表达为下式:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = + \frac{1}{C_p} \left[ T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V \right]. \quad (1.4)$$

一般说来其值不等于零(理想气体除外),它可以是正值或负值,取决于压强和初始温度. 在低温致冷应用中,通常是工作在流体的反转曲线以内,因而能产生冷却. 图 1.4 和图 1.5 分别给出反转曲线和对范德瓦尔斯流体(包括单相和两相状态)的计算结果. 在图 1.4 中画出了  $T_r = T/T_c$  对  $p_r = p/p_c$  的关系,其中脚标  $c$  表示临界点的参量. 当  $T_r = 1$  和  $p_r = 1$  时的临界点在图中用  $C$  标出. 连接  $C$  点和坐标原点 ( $T_r = 0, p_r = 0$ ) 的曲线是蒸汽压曲线. 除去位于蒸汽压曲线上的点以外,图 1.4 中所有的点都是指单相状态的. 在曲线包围的区域之内的所有的点上,方程(1.4)中确定的量都取正值,也就是说,在流体从

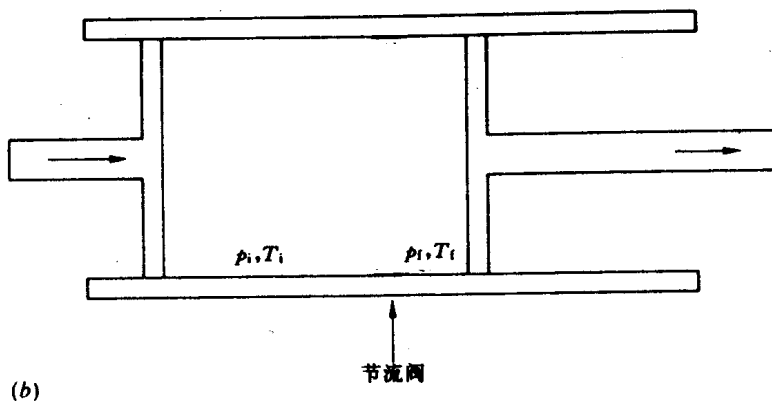
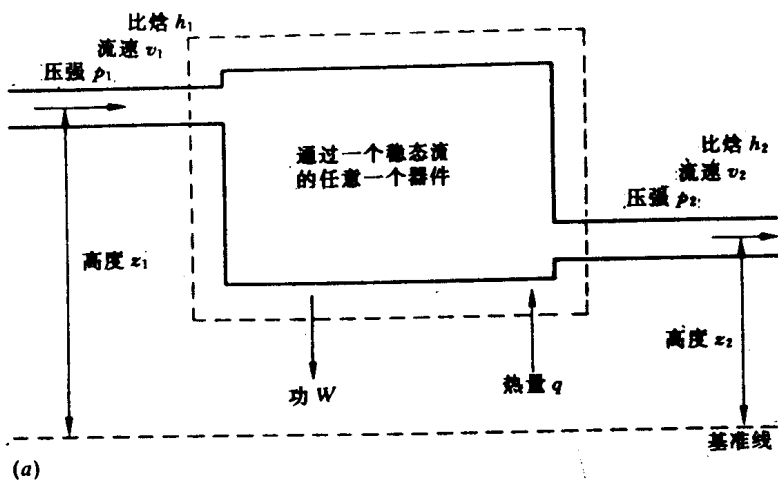


图 1.3 (a)有一个流体通过的器件. 对应于各个量之间的方程是:

$$(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + g(z_2 - z_1) = q - W$$

这里  $h_2$ ,  $h_1$ ,  $q$  和  $W$  均对应于单位质量流. (a)的一个特殊情况表示在(b)中. 在(b)中器件是一个节流阀,它的作用是使  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $(z_2 - z_1)$  可忽略,且  $q$  和  $W$  为零. 在此条件下,  $(h_2 - h_1) = 0$ , 过程是等焓的.

高压流向低压的一个等焓过程中可以致冷. 对于范德瓦尔斯流体来说, 最高的反转温度  $T_r = 6 \frac{3}{4}$ , 而反转曲线的尖端在  $T_r = 3$  和  $p_r = 9$  处.

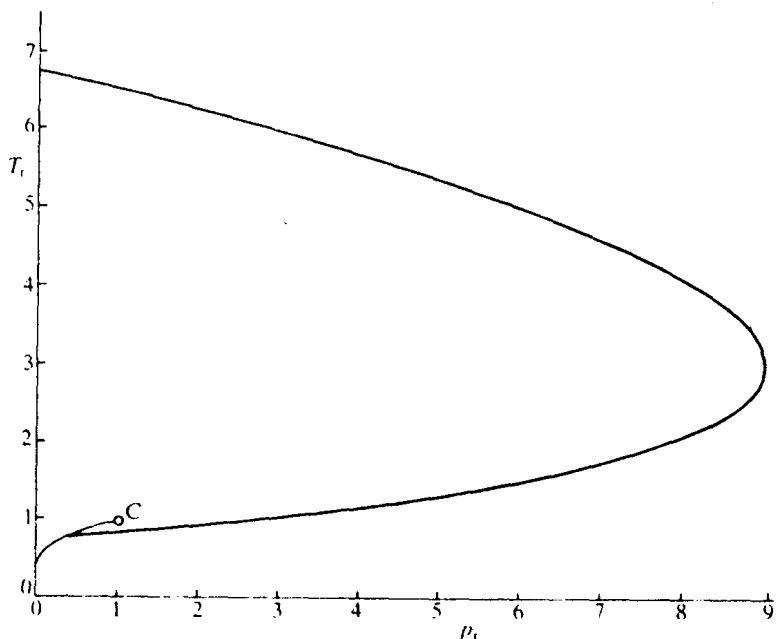


图 1.4 作为说明的一个例子, 范德瓦尔斯流体的反转曲线.

在图 1.5 中画出了在若干固定的约化压强时, 焓对约化温度的关系. 约化焓值的量度是在临界点取值为零; 在蒸汽压下, 当  $T_r \rightarrow 0$  时,  $H_r(\text{液体}) \rightarrow \left( 2 \frac{1}{2} T_r - 4 \frac{1}{8} \right)$ ,  $H_r(\text{蒸汽}) \rightarrow \left( 2 \frac{1}{2} T_r - \frac{3}{4} \right)$ . 温度的改变可从代表初始状态点的左边那段水平线的距离求出.

这种等焓方式, 或者近似于它的一种实际方式, 被应用于低温致冷机中, 流体受迫通过多孔塞进入一个低压容器从而产生冷却和液化. 教科书中的理想情况是忽略多孔塞两边的势能和动能的变化的;

把它们加到公式中去并不难,但对本书的目的而言,忽略它们也不会有问题. 在简单的蒸发“液池”情况下,液体/蒸汽界面两边的压差为零,两边的化学势也相等,可以等价地将此过程(蒸发或凝聚)看成是等熵过程或是等焓过程. 最后,实际的低温致冷机几乎从不用活塞(前面提到的 Pomeranchuk 致冷机除外),而是用真空泵来达到同样的效果.

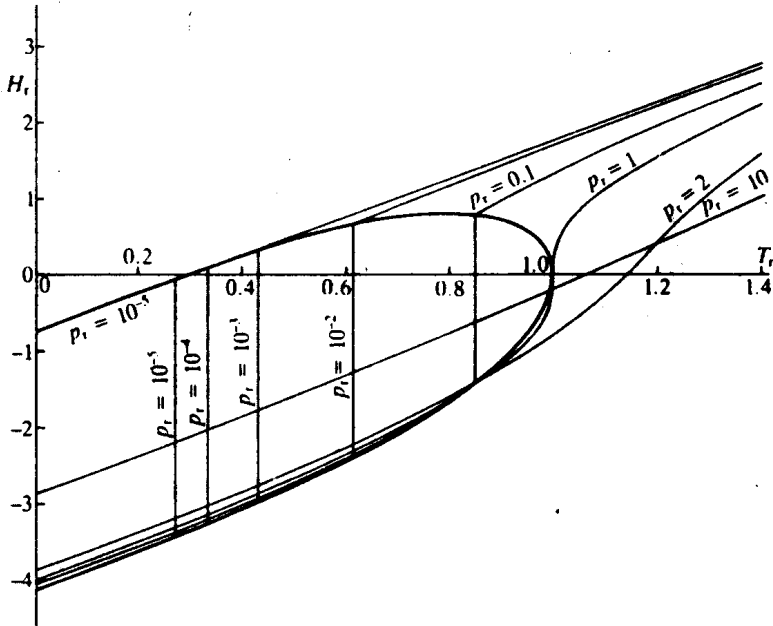


图 1.5 作为一个例子加以说明,一个范德瓦尔斯流体在几个固定的约化压强  $p_r = p/p_c$  下,约化焓与约化温度  $T_r = T/T_c$  的关系(此处下标 c 表示在临界点处的值). 作者感谢 Erik Westerberg 提供做此图的程序.

### 1. 2. 4 顺磁体的绝热(等熵)去磁

在顺磁体绝热去磁致冷中用到的是具有原子磁矩或核磁矩系集的固体,不一定是有序的晶体. 最常用的材料包括 CMN(硝酸铈镁,