

[苏] Д. С. 齐克利斯 著

# 高压和超高压物理-化学 研究技术

科学出版社

## 内 容 简 介

本书是高压和超高压研究中的实践性参考书。书中论述了在高压、超高压和高温下，选择材料、设计装置及零部件的问题；介绍了建立高压、测量高压以及实现高压搅拌与循环的方法；叙述了研究相平衡、可压缩性及表面张力等技术。

本书可供从事高压、超高压理化研究工作的科研和工程技术人员参考。

Д. С. Циклис

Техника физико-химических  
исследований при высоких  
и сверхвысоких давлениях

Издание четвертое, переработанное и дополненное

## 高压和超高压物理-化学研究技术

〔苏〕Д. С. 齐克利斯 著

王殿儒 罗明晖 译

熊大章 校

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1983年11月第一版 开本：787×1092 1/32

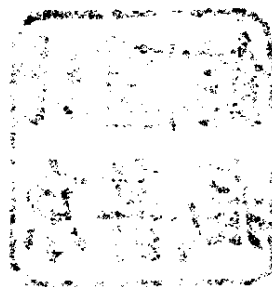
1983年11月第一次印刷 印张：16 1/4

印数：0001—3,250 字数：357,000

统一书号：15031·533

本社书号：3313·15—3

定价：2.50元



## 前 言

本书初版问世至今已有二十余年。从那时起，这门研究压力对物质状态影响的、比较狭窄而又专门的分支学科，已经扩大，并在很多方面有所发展。

现在，制造各种建立压力的装置和测量压力的仪器，甚至制造专用的研究装置和仪器，均已不再是研究人员垄断的工作（这些工作往往是很繁重的），而已成为工业生产的对象。

目前，高压研究的规模很大，仅有关的文献目录就有好几卷书之多。早在 1965 年本书第三版中，其内容就已经不能再追求完整无缺。显然，现在还欲在一本科学专著中论述现代高压技术设备和方法的全部内容，则更是不可能的事了。

在本版中，作者保留了本书的原有结构，删去了过时的资料，力图从所获得的全部素材中选取最新而又最有价值的资料加以补充。但是，即使是最新资料也未能全部加以论述。仍和从前一样，只是选用了一些经过作者和同事们以及其他团体的同事们实践检验过的资料。有几章进行了改写，例如研究相平衡和可压缩性的章节。其余各章也增加了新的内容。对文献目录作了较大的修改，五十年代以前的文献几乎全部删去（对那些文献感兴趣的读者可以参阅本书旧版），增加了 1965—1975 年的文献。

作者感谢 И. Р. Кричевский 提出的一些有益的建议，

感谢 Л. Ф. Верещагин 帮助作者熟悉苏联科学院高压物理研究所的工作，感谢 Ю. С. Коняев、Ф. Ф. Воронов、А. И. Лихтер、С. М. Стишов、Е. В. Золотов 等同行们将自己著述的单行本盛情地寄给了作者。

作者欢迎读者对本书提出批评与建议。

Д. С. 齐克利斯

# 目 录

前言	vii
第一章 高压和超高压下使用的材料	1
钢和合金	1
成分和性质	1
热机械处理	6
热处理	7
材料试验	8
机械加工	9
钢、金属和合金在实验条件下的性质	10
玻璃、瓷、陶器	17
密封垫材料	22
电绝缘材料	28
传压介质	30
固态传压介质	30
液态传压介质	31
汞和镓	37
参考文献	40
第二章 高压超高压装置的计算与设计	45
装置的计算	45
材料的载荷行为	45
高压厚壁容器中的应力	49
当量应力	51
温差应力的核算	58
压力和温度同时作用	60

装置设计	61
自增强容器	61
多层容器	64
具有可变外机械支撑的容器	67
液压支撑容器	71
压砧	72
别尔特装置	74
压头装置	75
活塞装置	76
楔块容器	77
滑动压砧系统	80
参考文献	83
第三章 常温和高温下的加压方法	86
气体的压缩	86
实验室用压缩机	86
补充压缩级	87
压缩装置	91
压缩气体的其他方法	96
液体和固体的压缩	98
液体泵和压缩机	98
倍压器	104
压头装置	111
楔块容器	114
轮箍(别尔特)装置	119
活塞压缩计	124
小型液压机	125
有剪切力作用的高压方法	126
建立高压的其他方法	127
高压加热方法	129
低温压缩	133

参考文献 .....	136
<b>第四章 高压和超高压测量方法</b> .....	141
压力单位 .....	141
绝对压力计 .....	142
液体压力计 .....	142
活塞压力计 .....	144
相对压力计 .....	176
利用材料弹性的压力计 .....	176
电压力计 .....	181
干涉压力计 .....	198
Рябинин 测压蛋压力计 .....	199
示差压力计 .....	200
超高压测量 .....	205
参考文献 .....	214
<b>第五章 压缩介质流量和温度的测量</b> .....	221
压缩介质流量的测量与调节 .....	221
高压下温度的测量 .....	226
参考文献 .....	230
<b>第六章 高压装置的零部件</b> .....	233
阀门 .....	236
调节阀 .....	236
截止阀 .....	238
实验装置的密封 .....	248
补偿面积密封 .....	248
非补偿面积密封 .....	251
大口径装置的密封 .....	257
液压密封 .....	259
填料盒密封装置 .....	259
自然密封填料盒 .....	260
带填料的填料盒 .....	262

倍压器和压缩机活塞的密封 .....	267
活门 .....	275
连接 .....	277
电绝缘技术 .....	283
观测窗 .....	291
参考文献 .....	296
第七章 高压下的搅拌和循环 .....	302
搅拌 .....	302
机械搅拌器 .....	302
转动和摆动装置 .....	303
电磁搅拌器 .....	303
循环 .....	313
参考文献 .....	317
第八章 高压实验室的通用设备 .....	318
建筑物 .....	318
设备 .....	319
气罐 .....	319
压气机 .....	319
气体的净化 .....	320
设备的安装 .....	320
操作规程 .....	324
参考文献 .....	325
第九章 高压相平衡的研究方法 .....	326
液-气系统 .....	328
分析法 .....	328
合成法 .....	335
微分法 .....	354
固-液系统 .....	356
分析法 .....	356
合成法 .....	360



气-气系统	364
分析法	364
合成法	369
汞液体活塞的应用	371
固-气系统	372
取样方法与分析方法	376
参考文献	382
第十章 气体和液体可压缩性的测定	385
气体的可压缩性	386
用定容压缩计测量	386
用变容压缩计测量	398
用改变物质质量的变容压缩计测量	422
液体的可压缩性	429
用定容压缩计测量	430
用变容压缩计测量	431
用比重瓶测量可压缩性	435
用流体静力秤量法测定可压缩性	437
参考文献	445
第十一章 表面张力与附着性的测量方法	449
液-气界面上表面张力的测量	449
毛细上升法	449
最大气泡压力法	450
悬挂液滴法	454
液滴重量(体积)法	456
高压边界角(附着角)的测量	456
气-气界面上表面张力的测量	460
参考文献	462
第十二章 光学、X光和电测量	463
光学测量	463
组合色散光谱观测	463

吸收光谱观测 .....	463
X 光测量 .....	468
电测量 .....	474
参考文献 .....	480
附录 .....	482
I. 耐热金属的性质 .....	482
I. 布氏硬度和洛氏硬度对强度极限的换算 .....	483
II-1. 压力单位换算表 .....	486
II-2. 巴与帕斯卡的关系 .....	487
IV. 制造高压仪器用钢的化学成分 .....	487
V. 几种钢的机械和物理性质 .....	488
补充参考文献 .....	489
汉俄名词索引 .....	492

# 第一章 高压和超高压下使用的材料

实验研究的第一步，是设计、制造和组装进行必要实验时所需的装置、仪器和设备<sup>1)</sup>。装置的结构，在很大程度上，取决于研究人员在制造装置时有什么样的材料。

进行实验研究时的压力和温度范围，一年年在扩大。为了建立高达数百万巴的压力和达到数千度的高温，实验工作者需要具有优异性能的特殊材料。

本章讨论在高压和超高压下进行工作时采用的一系列材料（钢和合金，密封垫料、填料和绝缘材料，传递压力的固体和液体物质）的性质。

## 钢 和 合 金

### 成分和性质

钢的强度越大，设计师的担子就越轻，并且当装置的容积相同时，其尺寸也就会越小。钢的一个性能指标是抗拉强度极限。目前，有些钢的这个指标（在常温下）已超过 35000 公斤/厘米<sup>2</sup>。钢的另一性能指标是韧性。相对延伸率低的、韧性不大的钢，不适于制造普通结构的高压装置。

在附录 IV 和 V 中，列出了长期以来我们所使用的一些钢

---

1) 这里是指工业中不生产的那些装备。

和合金的牌号、成分及热处理规范<sup>1)</sup>。

所有这些钢的强度极限，都在 20000 公斤/厘米<sup>2</sup> 以下。温度在 200—300°C 时，压力不超过 15—18 千巴，可以采用这些钢。近年来出现了一些合金，能够在温度 700°C 以下、压力 10—12 千巴情况下进行工作。文献〔1〕中介绍了一些新的马氏体时效钢，其强度大于 20000 公斤/厘米<sup>2</sup>。下面将要指出，甚至当钢的强度极限低于 20000 公斤/厘米<sup>2</sup> 时，有些方法也能够显著提高工作压力。

当压力不超过 0.05 千巴时，目前均使用 CT5 号钢。这种钢容易进行机械加工，不需热处理。一般在没有必要使用高强度钢时，就使用这种钢。可以用来制造承受压力的接嘴、阀门、阀体和其他零件。

当压力高于 1 千巴时，应用 25XHBA、18XHBA、30XMA、0XH3M、30XГСА、40X、45XHMΦA 等号钢。这些钢的成分不同，但机械性质却无显著差别。如果用这些钢制造超过 10 千巴压力的装置（特别是当钢达到其屈服点时），就要从结构上寻找特殊的解决办法。

有些人<sup>〔2〕</sup>还建议采用 ЭИ643、ЭИ958、15X2ГН2ТРА 号钢，制造高压容器。而在大壁厚（超过 100 毫米）的情况下，则建议采用 33XH3MA、40XHMA 和 23X2HΦBA 号钢来制造。

当压力在 1 千巴以下、温度为 500—600°C 时，应用 1X18H9T 和 1X18H9 钢；对于小尺寸的装置，当压力在 5000 巴以下时（温度同上），则应用 2X13 钢。1X18H9T 和(T)

---

1) 在附录 VI 所列文章和书中，可以找到用于制造高压装置的钢和合金的机械性质与化学成分数据。

钢在高温下的蠕变系数比 2X13 钢小，但是 2X13 钢的强度却大得多。ЭИ437Б 钢 (X20H77T2ЮР 合金) 的强度更高，适于制造压力低于 10 千巴，温度低于 400°C、在腐蚀性介质中工作的装置。

用 ЭП202 或 ЭИ445Р (XH67BMTЮ) 钢制造的装置，当外部加热到 900°C 时，能承受 3—4 千巴以下的压力。

现在，国外也生产一些类似的钢。如 Udimet 钢 (C—0.15%；Al—3.76%；Ti—2.75%；Mo—4.4%；Cr—13—17%；Co—14—20%；Fe<sub>Макс</sub>—4%；B—0.01—0.05%；其余为镍)<sup>(3)</sup>，在 800°C 时，能承受 6 千巴以下的压力。

苏联生产的 УНС 钢<sup>(4)</sup>，含有大量的镍和附加的合金元素钼、钨、钒。这种钢在各种回火时都具有下列性能指标： $\sigma_{0.2}$  低于 17000 公斤/厘米<sup>2</sup>； $\sigma_b$ —(250—260) × 10<sup>2</sup> 公斤/厘米<sup>2</sup>； $\delta$ —(10—12)%； $\varphi$ —(30—40)%。

可以用 ИИХ12 和 ИИХ15 钢制造承受很高压应力的零件。这两种钢很硬，但发脆。可以用来制造活塞、压紧环及其他有类似功能的零件。也可以采用钨钢 ХВГ 来制造上述零件。这种钨钢具有非常可贵的性质：在热处理时既不变形也不改变体积。适于用它制造不留加工余量的零件。这种零件可在热处理和轻抛光后直接使用。可以认为，这些钢的耐压上限为 15—17 千巴。

为了制造在几十和几百千巴压力下工作的装置的零件，可以采用具有很高硬度的金属碳化物。例如，利用渗钴的碳化钨（国外文献中称做“卡尔包洛依”硬质合金）制造的装置，能承受 500 千巴以下的压缩压力。苏联工业为此目的而生产的硬质合金的性质，列于表 1.1。

可以采用与合金 BK3 成分相近的合金，来制造超高压

表1.1 硬质合金的性质<sup>1)</sup>

硬质合金 种类	牌 号	合金的成分%			密 度 克/厘米 <sup>3</sup>	洛氏 硬度 A 刻度	抗弯强 度极限 公斤/ 厘米 <sup>2</sup>	抗压强 度极限 公斤/ 厘米 <sup>2</sup>
		碳化 钨	钻	碳化 钛				
钨类硬质 合金	BK2	98	2	—	15.0—15.4	90.0	10000	—
	BK3	97	3	—	14.9—15.3	89.0	11000	51500
	BK6	94	6	—	14.6—15.0	88.0	12000	43000
	BK8	92	8	—	14.4—14.8	87.5	13000	—
	BK15	85	15	—	13.9—14.1	86.0	16000	—
钛钨类硬质 合金	T5K10	85	10	5	12.3—19.2	88.5	11500	—
	T15K6	79	6	15	11.0—11.7	90.0	11000	42500
	T30K4	66	4	30	9.5—9.8	92.0	9000	—

1) 合金开始失去强度的温度为1000℃。

装置的活塞。

硬质合金 (WC-10) 的抗压强度极限和抗压屈服点与其含钴量 (含钴量从 6% 往上) 的关系, 近似地满足方程<sup>(6)</sup>

$$\sigma_{c.z} = (a/\sqrt{V}) + b \quad (1.1)$$

式中  $V$  —— 钴的体积含量;  $a$ 、 $b$  —— 常数。

业已证实, 这些合金的强度和塑性取决于碳化物晶粒大小。但是, 在 400 千巴的压力下, 硬质合金的塑性变得很大, 以致继续给装置加载也不会显著提高装置中的压力<sup>(6)</sup> (还可参阅文献〔7, 8〕)。

某些钛合金具有良好的机械性质和耐腐蚀性 (表 1.2)。

从本节所述看出, 当前强度最大的材料是硬质合金。但是它们的强度也显著低于按理论计算时金属所应具有 的强度<sup>(9)</sup>。可以认为

$$\sigma_{r.o.p} = \sqrt{E\gamma/\alpha} \quad (1.2)$$

表1.2 钛合金的机械性质<sup>1)</sup>

合金牌号	抗拉强度 极限 公斤/ 厘米 <sup>2</sup>	屈服点 公斤/厘米 <sup>2</sup>	相对 延伸 率 %	断面 减缩 率 %	杨氏模量 ( $\times 10^{-6}$ ) 公斤/ 厘米 <sup>2</sup>	切变模量 ( $\times 10^{-5}$ ) 公斤/ 厘米 <sup>2</sup>	线膨胀 系数 ( $\times 10^{-6}$ )
(BT-1纯钛)	4500—6000	3800—5000	25	50	1.05—1.10	—	8.3
BT-2	5500—7000	4600—6000	20	45	—	4—5	—
OTЧ-1	6500—7500	4700—6500	20	—	1.05	—	—
OTЧ	7500—9000	5500—6500	15	25	1.10—1.20	4	8.0

1) 含Fe—1.5%；Cr—1.5%；Mo—1.2%；Al—5.5%的钛合金具有很高的强度 ( $\sigma_B = 12600$ 公斤/厘米<sup>2</sup>)。

式中  $\sigma_{\text{теор}}$ ——理论强度极限； $E$ ——杨氏模量； $\gamma$ ——新表面生成能； $\alpha$ ——晶格结构中原子平面间的距离。

估算出  $\sigma_{\text{теор}}$  表达式中各参数的量值后 ( $E = 10^{11}$  达因/厘米<sup>2</sup>； $\gamma = 10^3$  尔格/厘米<sup>2</sup>； $\alpha = 3 \times 10^{-8}$  厘米)，我们就可以得出：

$$\sigma_{\text{теор}} = 10^{11} \text{达因/厘米}^2 \text{ 或}$$

$$\sigma_{\text{теор}} = 10^5 \text{公斤/厘米}^2$$

这就是说，根据理论，金属材料的强度至少应比现有的强度大 10 倍。这样大的差别，可以用金属晶格结构有缺陷(排列顺序被破坏和错位)来解释。果然，在特殊条件下培养某些金属的单晶时，得到了所谓的“胡须”——单晶细丝。这种细丝具有接近于理论值的强度。看来，在高压条件下，将有可能得出无缺陷的单晶。使钢在高压下结晶，能够消除晶格缺陷；在高压下进行热处理(这已得到“热机械处理”的名称)，将限制晶粒变粗；而高压淬火，则可使金属保留韧性。

## 热机械处理

热机械处理可以分为低温热机械处理 (HTMO) 和高温热机械处理 (BTMO)。这两种热机械处理过程的实质是, 使处于稳态 (在BTMO时) 或过冷态 (在HTMO时) 的奥氏体钢塑性变形 (冷作硬化), 然后迅速冷却, 结果就象在一般淬火时一样, 奥氏体转变为马氏体。

高温热机械处理的结果, 可使钢的强度提高15—20%。低温热机械处理则可在保持塑性、甚至稍微提高塑性的条件下, 把强度极限提高到300—320公斤/毫米<sup>2</sup>。这两种处理方法是基于, “有可能把一种相态的高密度错位传递给另一种相态”的假设<sup>[10]</sup>。

通过一个比金属锭直径小的孔, 进行“流体挤压”(即在高达数十千巴的液体或热气体压力下进行金属挤压<sup>[11]</sup>), 也可以显著提高金属强度。这时, 金属被挤入大气或具有数千巴反压的收集器里。经流体挤压法处理的钢, 其强度大于低温热机械处理的钢。

在爆炸波的作用下, 材料的强度会显著增大。例如, 高锰钢Г13Л经爆炸波处理后, 其强度增大0.5—1倍。

利用高压熔炼法, 可以生产出完全新型的合金, 如钛镁合金 (镁的沸点比钛的熔点低)。最后, 在金刚石的石墨化过程停止进行或缓慢进行的那种压力下, 可以得到以金刚石粉末和金属(或合金)的烧结物为基础的新材料。已经有人<sup>[6]</sup>进行了这类工作, 并指出, 压力的作用不仅为减少金刚石的石墨化所必需, 而且也为获得密实的含金刚石的烧结块所必需。所得到材料的结构特征是, 金刚石晶体占优势。材料的杨氏模量是60000公斤/毫米<sup>2</sup> (比优质钢大2倍), 硬度为



HRA = 97。所以这种材料兼有高硬度和较高的弹性。

文献〔7〕也介绍了制造高压容器用的钢。

## 热处理

低温回火可以提高钢的强度（除去少数例外），但其脆性也变大。我们的任务是，在相对延伸率不低于8—10%的条件下，设法得到最大的强度。期望装置承受的压力越高，就越要求严格地进行热处理。为使钢达到设计师所要求的性能，选择热处理规范时，不仅要考虑钢的牌号、零件形状和大小，同时还与设计师自己所要达到的目的有关。

选择钢的牌号时，必须知道钢的淬透性，即马氏体或托氏体·马氏体结构的扩散深度。因为它决定着热处理时钢元的允许最大直径。热处理的质量，在很大程度上，取决于被处理零件形状的复杂性。小直径的孔和盲孔的表面，冷却液不能流畅通过，结果由于冷却得慢，硬度就低。对于某些情况，例如高压阀门、截门的阀杆等密封表面，尤应注意这个现象。这时必须更改结构，使这些部位不要成为一个整体钢件的各个部分，而要采用把它们装配进这个钢件中去的办法。

此外，因为锻造厚钢锭的中心往往会有裂纹，所以要绝对避免在钢锭中心设计有小孔。

零件的最后精加工工序，如研磨到精确尺寸、车螺纹等，最好在热处理之后再行进行。显然，为此就得使用高质量的刀具，并作磨削。这样就能消除零件在热处理时尺寸变化的影响。如果使用高硬度钢，那末在制造零件时就不要留余量，并在保护气氛中对零件进行热处理（使之不形成氧化皮），然后再进行磨削。

在所有情况下，都要尽力使送交热处理的零件无尖角、