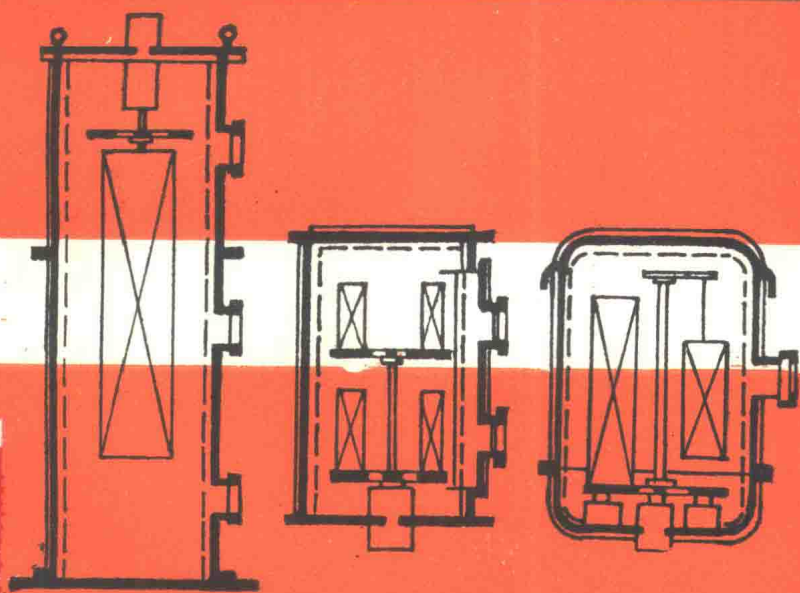


# 真空热处理原理与工艺

马登杰 韩立民 编著



机械工业出版社

# 真空热处理原理与工艺

马登杰 韩立民 编著



机械工业出版社

本书较系统地总结了真空热处理近年来在理论和工艺方面的进展，提出了一些工艺方面的理论观点和工艺中的实际资料，对工艺研究和实践具有一定的参考价值。

本书共分六章，第一章简要地介绍了真空物理与真空技术的基础知识，第二章为真空热处理的工艺原理，第三章为真空热处理工艺，其中介绍了真空退火、淬火及回火，第四章为真空化学热处理，其中介绍了真空渗碳、离子渗氮、离子渗碳、离子碳氮共渗及其他真空化学热处理，第五章简要地介绍了真空热处理炉的设计知识及结构、安装、验收与维修及检漏技术等，第六章简要介绍了真空热处理车间及其设施设计的一些问题。

本书可供从事热处理的科学研究和工作的技术人员阅读，也可供大专院校的有关专业师生参考。

## 真空热处理原理与工艺

马登杰 韩立民 编著

责任编辑：丁文华

封面设计：田淑文

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 12 3/8·字数 273 千字

1988年2月北京第一版·1988年2月北京第一次印刷

印数 0,001—4,500·定价：3.00 元

ISBN 7-111-00356-X/TG·112

## 前 言

近年来，真空热处理有了蓬勃的发展，是热处理发展的一个方面。同其他技术一样，这是整个科学技术飞跃发展的综合结果。真空物理、真空技术及真空材料的发展构成了真空热处理的发展基础；高质量、高效率、节能及无污染的要求是真空热处理发展的动力。在这种背景下，著者们根据自己多年从事生产、科研及教学的实践写成此书，其中的内容主要是以著者在实践中碰到的理论和工艺问题为主线。我们认为，真空热处理虽然是在常规热处理的基础上发展起来的，但本身有许多特点，不了解，不注意这些特点，往往会给实际工作带来麻烦，甚至损失。

本书的主要内容为原理和工艺两大部分，对真空物理和技术的有关部分做了简略介绍，还包括有设备及车间设计的基础知识。在本书中，著者们提出了自己的一些观点和实验及生产方面的资料，目的是提供一些解释真空热处理特点的线索和制订工艺的依据。

著者深切感到，真空热处理的理论研究及实践总结跟不上这方面发展的要求，特别是由于著者们的水平有限，本书的不足、不当及错误之处在所难免，因而衷心希望读者提出批评，给予指正。

本书在写作过程中，得到了吴云书教授的热情鼓励，在此谨向他致谢。

编著者 1986年5月

# 目 录

绪论	1
第一章 真空物理与真空技术的基础知识	6
第一节 真空的基础知识	6
一、真空简介	6
二、低压下的气体	10
第二节 真空的获得与度量	32
一、真空的获得	32
二、真空的度量	45
第三节 真空热处理炉的真空系统及其设计的一般知识	60
一、真空热处理炉的真空系统简介	60
二、真空系统所用材料、真空密封和真空元件	62
三、真空热处理炉真空系统的设计与计算	67
参考文献	73
第二章 真空热处理工艺原理	74
第一节 金属在真空状态下的相变特点及其表面状态	74
一、金属在真空状态下的相变特点	74
二、金属的表面状态	78
第二节 气体与金属及其表面的作用	81
一、物理吸附及化学吸附	81
二、退吸	83
三、金属对气体的收附(或溶解)作用	83
四、气体原子(或质子)在金属中的扩散	84
五、金属的除气	85
第三节 真空状态下金属表面的氧化及氧化物的去除	93
第四节 真空状态下金属的脱碳	96

第五节 金属的蒸发 .....	98
参考文献 .....	103
第三章 真空热处理工艺 .....	105
第一节 真空退火 .....	105
一、在真空条件下金属的加热 .....	105
二、高温、难熔金属的退火 .....	118
三、金属和合金的除气处理 .....	124
四、电工钢及磁合金的退火 .....	126
五、钢铁材料及铜合金的退火 .....	132
第二节 真空淬火及回火 .....	137
一、真空淬火的冷却 .....	137
二、真空淬火的质量效果 .....	153
三、真空淬火的工艺操作与实例 .....	162
四、真空回火 .....	168
参考文献 .....	171
第四章 真空化学热处理 .....	173
第一节 真空渗碳 .....	173
一、真空渗碳原理 .....	174
二、真空渗碳工艺 .....	182
三、真空渗碳实例 .....	195
四、真空渗碳件的故障原因分析 .....	200
五、真空渗碳工艺的优点及存在问题 .....	201
六、真空渗碳工艺的经济性分析 .....	205
第二节 离子渗氮 .....	207
一、离子渗氮的工艺原理 .....	207
二、离子渗氮层的组织结构 .....	210
三、离子渗氮层的性能 .....	211
四、影响离子渗氮效果的工艺因素 .....	215
五、离子渗氮的几个工艺问题 .....	223
六、辉光离子渗氮设备 .....	228

七、离子渗氮的工艺操作与实例 .....	22
八、低温离子碳氮共渗 (离子软氮化) .....	23
<b>第三节 离子渗碳与离子碳氮共渗 .....</b>	<b>24</b>
一、离子渗碳的特点 .....	24
二、离子渗碳工艺原理 .....	24
三、离子渗碳的工艺参数 .....	25
四、工艺操作与实例 .....	25
五、离子渗碳设备 .....	26
六、离子碳氮共渗 .....	26
<b>第四节 其他真空化学热处理 .....</b>	<b>26</b>
一、真空渗氮 .....	26
二、真空碳氮共渗 .....	26
三、真空渗铬 .....	26
四、离子渗硼 .....	26
五、离子渗硅 .....	27
六、离子硫氮共渗、硫碳氮共渗 .....	27
<b>参考文献 .....</b>	<b>27</b>
<b>第五章 真空热处理炉 .....</b>	<b>28</b>
<b>第一节 真空热处理炉的分类及其结构 .....</b>	<b>28</b>
一、真空热处理炉分类 .....	28
二、内热式真空炉的结构分析 .....	28
<b>第二节 真空炉功率的确定和热工计算 .....</b>	<b>31</b>
一、功率的确定 .....	31
二、热平衡计算 .....	31
三、加热器的热工计算 .....	32
<b>第三节 真空热处理炉的安装、验收与维修 .....</b>	<b>32</b>
一、真空炉的安装 .....	32
二、真空热处理炉的验收及试验工作 .....	32
三、真空热处理炉的维护和检修 .....	32
<b>第四节 真空热处理炉的漏气与检漏技术 .....</b>	<b>33</b>

一、真空热处理炉漏气的原因 .....	336
二、真空系统漏气性质的判定 .....	339
三、检漏方法与检漏仪器 .....	340
参考文献 .....	348
第六章 有关真空热处理车间及其 设施设计的一些问题 .....	349
第一节 工艺设计 .....	350
第二节 真空热处理车间初步设计的特点 .....	351
附录 .....	372
一、压强单位换算表 .....	372
二、2X型旋片式真空泵技术性能 .....	373
三、滑阀泵技术性能 .....	375
四、ZJ型罗茨真空泵技术性能 .....	376
五、K型油扩散泵技术性能 .....	377
六、真空系统的常用符号 .....	378
七、本书所引用的国外钢号(部分)化学成分(%) .....	380
八、几家外国电炉厂真空热处理炉产品规格(部分) .....	384



## 绪 论

人们把大大地低于一个大气压的空间称作真空。真空在近代工业中得到了相当广泛的应用。在真空条件下进行的热处理称作真空热处理。目前已经应用的真空热处理工艺有：高熔点活性金属及其合金、电真空材料的退火与除气处理；硅钢、软磁合金、精密合金的退火；合金钢结构件、高速钢工模具的淬火；镍基合金和沉淀硬化不锈钢的固溶与时效处理等。耐热合金、磁合金及其他特殊材料的钎焊、烧结和随后的热处理也已在真空中进行。在近年发展起来的化学热处理领域中，已经实现了真空渗碳、真空碳氮共渗、离子渗氮、离子渗碳等工艺。近十几年有越来越多的优质高效、节能无公害的真空热处理工艺方法已涌现出来。

真空热处理在我国得到了相当迅速的发展。1973年，新光机械厂研制成功了BZCL-1型半连续真空油淬炉。此后，上海市机械制造工艺研究所及其他单位也先后设计制造出了各具特色、不同类型的真空热处理炉。1980年以后，首都机械厂已能批量生产技术先进的ZC-65型真空热处理炉。ZZ-1、ZZ-2型真空淬火油的试制成功，为我国普及真空淬火工艺创造了条件。七十年代后期，真空渗碳在国际上已得到了应用。此时，我国对真空渗碳也进行了一定的研究并将其应用于生产。

真空热处理的一个分支是离子轰击热处理。它是以离子渗氮为先导的。离子渗氮在我国工业中的应用始于1971年。

之后，离子渗碳、离子碳氮共渗、离子渗硼、离子镀渗等工艺先后出现并逐步走向实际应用。

随着科学技术的进步，各工业部门对产品提出了日益严格的质量要求。这些要求往往是常规热处理难以满足的。而真空热处理设备和工艺的发展却为满足这些要求提供了条件。这是因为：

一、真空热处理可以有效地防止金属在处理过程中产生氧化、脱碳、且具有脱脂、除气的特殊效果。良好的表面状态对精密细小的零件、容易与炉气发生反应的活性材料和后续处理有困难的产品是非常适用的。

良好的表面状态可使材料具有高的机械性能，如表面硬度、耐磨性、疲劳强度等。这方面的实例是很多的，如以ZC20-13型炉对Cr12MoV木螺丝搓丝板进行真空淬火(气冷)后，产品的寿命比常规工艺处理者提高达1~3倍。

二、经真空热处理的产品，其机械性能均匀，质量稳定，淬火变形小，变形规律易于掌握。这对形状复杂、几何精度要求高的产品(如工模具等)格外重要。生产实践证明，经真空淬火的产品很少成批报废，工艺效果有良好的再现性。

三、真空化学热处理具有高的生产率。真空渗碳比普通气体渗碳的生产率约高一倍。真空离子化学热处理较真空化学热处理的生产率更高。

四、真空热处理是节能无公害的工艺方法。真空炉完善的密封和高效的隔热系统使加热功率得到了较充分的利用。汉江工具厂在成批生产齿轮刀具时，真空淬火的耗电量仅为盐浴淬火的六分之一，处理费用节约了30%。

真空化学热处理由于大大减少了活性气体的消耗量、生

产率高，因而收到了显著的经济效果，如离子渗碳、真空渗碳和普通气体渗碳的运转成本之比为5：8：10。

此外，真空炉的热能散失小，不产生大量的有害废气、废液，因而不污染环境。

真空热处理虽有上述一系列的优点，但是，目前还存在着炉子造价高、类别与型号不全、工艺用气（高纯氮与丙烷等）的供应不充分及价格较高等问题。因而，一般讲，在目前真空热处理适宜于处理下述产品：刀具、模具和量具；性能要求高的结构件；形状与结构复杂的渗碳件和难以渗碳的特殊材料；必须进行高真空退火和除气的高熔点稀有金属等。对质量要求不高的普通材料结构件、型材毛坯、批量大与加工余量大而价格低的半制成品，真空热处理就不能充分发挥它的优越性，也是不经济的。

在我国普及和发展真空热处理存在的问题与前景可概述如下：

一、普及和发展真空热处理的关键是设备问题。真空热处理炉是结构复杂的精密设备，价格高，所以一次投资费用和运转成本中的折旧费也高。今后应向简化炉子结构、提高载荷容量和利用系数、提高降温冷却能力以及提高生产率的方向发展。

目前我国使用的真空热处理炉主要是周期作业炉。为了能一台炉子处理尽可能多的产品以及对批量小、品种多又经常变化的产品具有大的适应性，应该发展多用途的真空热处理炉。

在产品批量大、品种少且固定的条件下，工业发达国家目前都趋向于选用多室的半连续或连续式炉，或者按产品的工艺要求，依据加热、冷却等阶段的时间节拍设计简化的专

用炉。

二、真空热处理工艺应把重点放在发展淬火上，还应发展、完善现已应用的真空化学热处理工艺并开拓新的工艺领域。

目前，真空淬火存在的问题是冷却介质的冷却能力不甚理想，如现在使用的真空淬火油的临界压力一般在 $10^{-1}$ 大气压以上。这就是说，油液面上必须存在几十托的压力才使油具有一定的冷却能力。为此不得不向冷却室中充入几百托高纯氮气才能进行油淬。尽管如此，油的冷却能力仍不够高。因此，今后应研制性能更好、可适应广泛压强、具有更高冷却能力的淬火油。

在油淬或气淬工艺过程中，真空热处理炉都需消耗大量的中性或惰性气体(几至几十立方米)。这些气体往往供应困难，价格也高，在成本中占有较大比重。解决的办法可以是：使用纯度低的氮气通过高效的净化装置；另一办法是使用贮运方便、安全可靠、可较长时间地无需中断地供气(或供液)的液态氮。这两种方法都可以使处理费用大幅度地降低下来。

将冷却室中的气体压力提高到大气压以上所进行的淬火称作压力淬火。这种工艺已经研究并应用了多年。这种冷却方法大大提高了冷却速度，从而扩大了气体淬火的应用范围。这种方法的缺点是需消耗较多的冷却气体。

直至目前为止，还未能利用水作为真空淬火的冷却介质。很明显，以水作为真空淬火冷却介质的课题如能研究成功并付诸生产，这对真空热处理的发展将会起很大的作用。如能实现此目标，将可以在真空炉中对钛及钛合金进行淬火；对沉淀硬化不锈钢进行固溶处理；还有可能对一般结构

钢产品进行淬火。从而能极大地扩展真空淬火的应用范围。

许多难于用一般的工艺进行渗碳和碳氮共渗的零件与材料却可用真空化学热处理进行处理。一般讲，应尽可能地在高温下进行渗碳等真空化学热处理以发挥其高效率的特点。但从减少变形、提高渗碳质量出发，人们对低温离子渗碳进行了研究，结果表明，采用离子渗碳，处理温度可以降到接近 $A_1$ 点的温度。离子渗碳的介质消耗量仅为普通气体渗碳的百分之一左右，运转费用仅为常规工艺的一半左右。

开展以液体渗剂代替丙烷进行真空渗碳、离子渗碳的研究是有意义的。这可以将真空渗碳等先进工艺推广至丙烷供应有困难的地区。在这方面我国曾进行过许多成功的试验。

三、真空热处理工艺与设备的发展是相当迅速的。最近20年，真空热处理的应用范围不断扩大，给人以日新月异之感。今后，真空热处理必将以更高的速度发展和普及。但目前，真空热处理的原理与工艺还处于不成熟的初级阶段。日益增多的实践知识、数据和资料需要汇集整理、加工，使之更趋完善、合理并形成体系，以适应真空热处理发展的需要。

# 第一章 真空物理与真空技术的基础知识

## 第一节 真空的基础知识

### 一、真空简介

#### (一) 真空的概念

完全不存在气体和蒸汽分子的空间称作绝对真空。工程上所指的真空是存在一定量的气体或蒸汽、低于一个大气压的稀薄气体状态。在标准状态(0°C、760 Torr)下的任何一种一摩尔气体中,都含有 $6.025 \times 10^{23}$ 个气体分子( $2.69 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )。在真空热处理的低气压下(真空度在 $10 \sim 10^{-6}$  Torr范围),单位体积中的气体分子数就少得多了。这可从压强( $P$ )与气体分子数( $n$ )的关系式中导出:

$$P = n k T$$

式中  $k$  ——玻尔兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ );

$T$  ——绝对温度(K)。

1 Torr 时,  $n = 3.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ;  $10^{-3}$  Torr 时,  $n = 3.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ;  $10^{-6}$  Torr 时,  $n = 3.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 。实践证明,在 $10^{-3}$  Torr 下真空炉(冷态)内残存的气体中,空气仅占 0.5% 左右,大部分是水蒸汽和其它物质(如有机物)的蒸发气等。水蒸汽有时可达 25~75% (按体积)<sup>[1-1]</sup>。所以在真空中加热金属时应充分考虑水蒸汽与金属表面可能发生的反应。在真空度为 1 Torr 时,残存气体的分子数相当于大气压

下的0.13%。若按其中70%是水蒸汽考虑,其含量约为0.092%,相当于露点-18℃。不同压强下的残存气体、水蒸汽含量和等价露点列于表1-1。

表1-1 真空度、残存气体相对含量与等价露点

真空度(Torr)	760	100	10	1	10 <sup>-1</sup>
气体分子数(cm <sup>-3</sup> )	2.7×10 <sup>19</sup>	3.5×10 <sup>18</sup>	3.5×10 <sup>17</sup>	3.5×10 <sup>16</sup>	3.5×10 <sup>15</sup>
残存气体(百分比) 相对含量 (百万分比)	100	13	1.3	0.13	0.013
水蒸汽(百分比) 含量(百万分比)			0.92	0.092	0.0092
露点(℃)			+11	-18	-40
真空度(Torr)	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
气体分子数(cm <sup>-3</sup> )	3.5×10 <sup>14</sup>	3.5×10 <sup>13</sup>	3.5×10 <sup>12</sup>	3.5×10 <sup>11</sup>	3.5×10 <sup>10</sup>
残存气体(百分比) 相对含量 (百万分比)	13	1.3	0.13	0.013	0.0013
水蒸汽(百分比) 含量(百万分比)	9.2	0.92	0.092	0.0092	0.00092
露点(℃)	-81	-76	-90	-101	-125

## (二) 真空的度量单位与真空区域的划分

在真空技术中,人们是用抽空容器中残存气体的绝对压力定量地表示真空度的高低的。真空度越高与残存气体压力越低的含意是相同的。度量真空的压力单位有如下几种。1960年第11届国际计量大会所通过的国际单位制(SI)规定,压强的度量单位是N/m<sup>2</sup>,又叫“帕斯卡”(Pascal),简称“帕”(Pa)。根据《中华人民共和国法定计量单位》的规定,我国压力、压强、应力的单位的名称为帕〔斯卡〕,单位符号为“Pa”。

工程上用的单位有托(Torr)、毫米汞柱(mmHg),毫米水柱(mmH<sub>2</sub>O)等。各种压力单位的换算关系列于附录一。

工程上常依据真空的物理特性、用途以及获得与度量真空时使用的真空泵、真空计的不同,把真空划分为4个范围<sup>[1-2]</sup>:

粗真空:	$<760 \sim 1$ (或10)	Torr;
低真空:	$<1$ (或10) $\sim 10^{-3}$	Torr;
高真空:	$<10^{-3} \sim 10^{-7}$ (或 $10^{-8}$ )	Torr;
超高真空:	$<10^{-7}$ (或 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ )	Torr.

### (三) 真空是热处理的一种理想“气氛”

在工业生产中,人们使用了可控气、中性或惰性气体等以置换炉内的空气并防止被加热金属的氧化、脱碳和腐蚀。事实证明,精制的放热式气氛露点只在 $-40^{\circ}\text{C}$ 上下,内中还存在一定量的杂质气体。在高纯氮气中加热金属,由于其中没有一氧化碳和氢等还原性气体,因而微量氧(如超过10ppm)就会造成轻度氧化、脱碳。若将氮气提纯至含杂质质量为1ppm并在使用中维持这个纯度,相当困难且不经济。目前工业中使用的氮、氩的纯度如表1-2所列。

将真空(参见表1-1)与保护气氛相比,不难看出,露点 $-40^{\circ}\text{C}$ 的放热式气氛相当于 $10^{-1}$ Torr。提纯至99.9999%的惰性气体,也只相当于真空度 $10^{-8}$ Torr。现代的真空技术可以在相当大的体积中迅速建立和维持一个真空热处理常用的真空度—— $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Torr。在这样低的气压下,残存气体分子与固体表面的碰撞频度大大下降。这样,即使在高温下加热金属,由微量杂质气体引起的气-固界面上的氧化、还原、脱碳等反应也将进行得极其缓慢。降低气压还可得到除气、去除油脂等效果,饱和蒸汽压高的元素还将产生蒸发。



表1-2 一些高纯度气体的成分

气体名称	含量 (按 体积 %)	杂质气含量(ppm)						生产厂	资料来源
		N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O ppm mg/m <sup>3</sup>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>		
高纯氮	99.999			<3				北京氧气厂	厂产品目录
高氮	99.99		<60	<30				天津 华北氧气厂	厂合格证
高纯氩 (一级品)	99.999	<5	<1	<1	<1	<1	<1	北京氧气厂	厂产品目录
高纯氩 (二级品)	99.996	<4	<5	<8	<2			北京氧气厂	厂产品目录
纯氩	99.99	<100	<15	<30	<5	<1	0(总)	北京氧气厂	厂产品目录

由于气体的导热性、粘滞性随气压下降而降低，因而真空改变了金属的升温、加热和散热的条件。在不太高的真空环境里(1~10Torr)，气体在直流高电压作用下的导电现象为在辉光放电等离子体中进行优质高效的化学热处理创造了条件。总之，由于真空具有这一系列特性，人们在30年代即把它看作是一种理想的热处理气氛了。

#### (四) 在真空热处理炉中残存气体的实际成分

真空热处理的残存气体的实际成分并不是大气成分随气压降低而成比例地变化的结果。它受到温度、漏气率、抽气方法、真空系统污染和结构材料情况等多方面的影响。尤其是在加热活性金属时，了解残存气体各成分分压的变化及其影响因素并采取必要的控制措施是极其重要的。

温度对残存气体成分的影响：在 $10^{-3}$ Torr冷炉中残留气体的70%是水蒸汽。在 $1000^{\circ}\text{C}$ 、 $1\sim 4\times 10^{-5}$ Torr时，水蒸汽与加热元件等反应，其含量可降至1~4%。此时，氧含量低