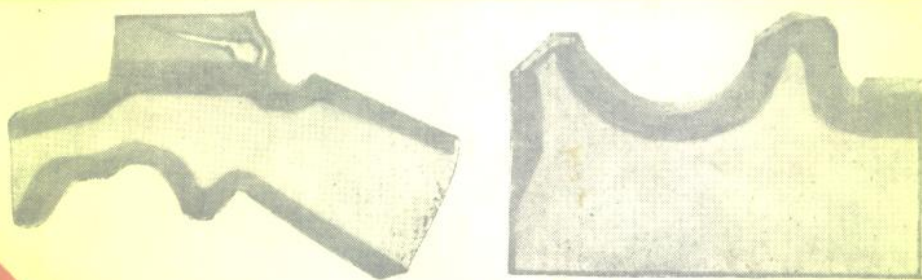


渗碳和碳氮共渗

美国金属学会 编

谢善骅 朱霞云 译

谢善骅 校



国防工业出版社

渗碳和碳氮共渗

美国金属学会 编

谢善骅 朱霞云 译

谢善骅 校

国防工业出版社

内 容 提 要

本书是有关渗碳和碳氮共渗的专著。

书中较系统的介绍了渗碳和碳氮共渗的理论基础、工艺实践、所用的方法和设备以及各种工艺控制方法；全书内容由浅入深，在有些章节中列举了实例，还介绍了目前研究成功的一些新技术方法。

本书可供机器制造业、国防工业和其他部门热处理工作者及设计人员和大专院校中金属学及热处理专业的师生参考。

Carburizing and Carbonitriding
American Society for Metals
By the American Society for Metals
All rights reserved 1977

*

渗碳和碳氮共渗

美国金属学会 编

谢善骥 朱霞云 译

谢善骥 校

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9¹/₂ 239千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数：0,001—4,900册

统一书号：15034·2252 定价：1.20元

前 言

多年以来,在使钢制零件表面获得硬化层的工艺方法中,渗碳和碳氮共渗已成为最重要和广泛应用的一种方法。美国金属学会很早就认识到渗碳和碳氮共渗的重要性,到1961年,出版了单行本的专著《气体渗碳》,并在《金属手册》和《金属进展》杂志上发表了大量文章。

在这许多年中,渗碳和碳氮共渗的基本原理并没有改变,但是金属工艺技术方面的变化已经引起了金属和工艺设备的变化。例如:由于技术的进步和合金元素的不易获得且成本高,近来低合金钢得到较广泛的应用;节约能量已经成为重要的问题,这不仅是由于用作碳源或燃料的天然气和石油产品资源短缺,而且还由于所有形式的能量售价飞涨;现有的技术规范要求零件具有更高的质量和更精密的公差,从而意味着必须严格地控制材料和工艺。诸如此类的变化要求工艺设备也随之变化以适应新的和正在变化的情况。新的设备和控制系统已经得到应用,其中大部分设计都是为了节省能量和对工艺进行更精确的控制。

因此,本书决不仅仅是现有材料的修订版,而是收集了许多渗碳和碳氮共渗工艺技术和设备方面的新成就。例如,在第7章中讨论了峰值修整的作用,亦即在天然气需要量很高时,用贮存的煤气或丙烷-空气混合气体来补充供应有限的天然气。在美国金属学会的出版物中,以前对这个题目从来没有深入讨论过。

本书的主要部分是气体渗碳,因为这种工艺比其他任何渗碳工艺都用得普遍。本书内容分为四大部分:第1章到第6章讨论了渗碳(或碳氮共渗)和硬化的原理,包括对成分和显微组织的一般影响;第7章到第16章详细地阐述了常规气体渗碳,特别是关于渗碳设备和工艺控制;第17章到第21章具体介绍了特殊气体渗碳工艺,碳氮共渗,液体渗碳和固体渗碳;最后,第22章研究了如何测定和控制渗碳和碳氮共渗零件的质量。

美国金属学会技术理事

艾伦·G·格雷

目 录

第1章 渗碳和碳氮共渗原理	1
硬化介质源	1
渗碳机理	3
碳氮共渗机理	4
第2章 碳的吸收和扩散	5
气体渗碳中碳的吸收	5
碳在钢中的扩散	7
渗碳理论的实际应用	10
渗碳实践	13
第3章 平衡数据的应用	16
平衡常数	16
计算和控制渗碳气氛	21
第4章 渗层深度的测量	24
化学法	25
机械法	30
目测法	32
第5章 渗碳后零件的热处理	37
淬火	37
重新加热	39
冷处理	40
回火	41
第6章 宏观组织和显微组织	45
宏观组织	45
渗碳层的显微组织	50
碳氮共渗层的显微组织	61
第7章 气体渗碳的气氛	67
碳源	67

载气	72
安全措施	73
积碳	75
第 8 章 气体渗碳炉和设备	77
周期式炉	77
连续式炉	81
气体渗碳炉的选择准则	86
炉子维护	89
第 9 章 零件的准备和装卸	91
清洗	91
装卸方法	92
第 10 章 主要工艺参数	93
温度的影响	93
时间的影响	94
气氛的控制	97
第 11 章 控制仪器和控制系统	100
分析气氛的取样	100
控制系统	102
红外线分析仪	105
露点分析仪	109
氧探头	113
奥氏 (O_{sat}) 分析仪	115
热丝分析仪	116
火焰温度分析仪	117
气体色谱分析法	118
第 12 章 气体渗碳中的工艺控制	120
控制系统的特点	120
工艺控制	121
第 13 章 碳浓度梯度和表面含碳量	129
碳梯度	129
表面含碳量	134

碳梯度对渗层性能的影响	134
低表面碳量	136
表面碳量的变化	136
第 14 章 尺寸控制	143
减少变形的办法	144
尺寸变化的例子	144
第 15 章 局部渗碳	152
第 16 章 工业用气体渗碳方法	154
载气加碳氢化合物气体	154
处理工艺实例	157
未稀释的碳氢化合物气体或液体	166
第 17 章 气体渗碳的特殊工艺	168
均匀化渗碳	168
高温渗碳	169
真空渗碳	172
第 18 章 碳氮共渗	178
应用	179
渗层成分	182
硬度梯度	185
渗层的淬透性	187
渗层深度	187
炉子	190
气氛成分	190
气氛的控制	191
周期式炉气氛	193
连续式炉气氛	197
安全	198
温度的选择	198
残余奥氏体的控制	202
淬火介质和淬火方法	203
回火	204

VIII

缺点	207
局部碳氮共渗	208
硬度试验	209
粉末冶金零件的碳氮共渗	209
第 19 章 液体渗碳	212
氰化物型盐浴	212
无氰化物的液体渗碳	215
碳梯度	216
硬度梯度	216
渗层深度的控制	221
尺寸变化	223
典型的应用	229
防渗方法和局部渗碳	233
渗碳和钎焊综合处理	235
第 20 章 在液体渗碳中的炉子、设备和工艺控制	236
外热式炉	236
插入式电极浴炉	239
埋入式电极浴炉	241
炉子构件和夹具	242
自动和半自动处理线	245
工艺控制	246
淬火介质	251
盐的清除 (清洗)	253
使用氰化盐时的注意事项	254
氰化盐废液的处理	255
非氰化物渗碳盐的安全和处理	257
第 21 章 固体渗碳	258
渗碳化合物	259
碳势和碳梯度	261
渗碳温度	261
固体渗碳用钢	263
包渗	264

固体渗碳炉	265
渗碳容器	266
局部渗碳	268
第 22 章 检验和质量控制	269
压坑硬度试验	269
锉刀硬度试验	270
显微组织检查	271
连续切屑分析	272
电磁试验	273
渗层深度变化	276
结果的再现性	280
质量控制计划	282
参考表	284

第 1 章

渗碳和碳氮共渗原理

渗碳和碳氮共渗是两种可用来使铁合金产生表面硬化层的工艺方法。这两种方法很相似，它们都向铁合金表面渗入一种或一种以上的硬化介质从而使表面层的成分得到改进。在渗碳或碳氮共渗以后再通过适当的热处理，可以获得表面层（渗层）和内部（心部）的最终性能。

渗碳是这样一种工艺方法：使奥氏体化的铁金属置于具有足够碳势的环境中，从而使碳吸附于金属表面，并且通过扩散，在金属表面和内部之间产生碳浓度梯度。正如上述定义清楚地指出的那样，有两个因素控制着渗碳过程，即不论是金属表面的吸碳反应还是碳向金属内的扩散都可决定渗碳的速度。渗碳通常在 $850\sim 950^{\circ}\text{C}$ 的高温范围内进行，不过在低达 790°C 的低温和高达 1095°C 的高温也进行过渗碳。高于 950°C 时，炉子设备的使用寿命越来越多地受到限制，因此这一因素是使渗碳限制在 1010°C 以下温度范围内进行的主要原因。

碳氮共渗是使奥氏体化的铁金属置于含碳和氮的气氛中，碳、氮元素同时被吸收并扩散到金属中从而形成表面硬化层的一种工艺方法。为了得到耐磨的硬化层，碳氮共渗温度（ $705\sim 900^{\circ}\text{C}$ ）一般比渗碳低，时间比渗碳短，得到的硬化层通常也比渗碳时薄。

硬化介质源

渗碳可以在气体气氛（气体渗碳）、盐浴（液体渗碳）中或在使工件整个表面至少覆盖 13 毫米厚的固体化合物环境（固体渗碳）中进行。碳氮共渗是在改进了的气体渗碳气氛中进行的，这种改进就是在标准气体渗碳气氛中加入氮。

气体渗碳气氛可以是任何一种主要由氮、一氧化碳和氢气组

成的载气，并在其中加入碳氢化合物气体或气化了了的碳氢化合物液体。在渗碳炉内，气态碳氢化合物或“富化气”分解成一氧化碳、二氧化碳、甲烷或水蒸汽。在上述化合物中，一氧化碳和甲烷是碳源；氮和氢使气氛稀释；在（a）一氧化碳和二氧化碳之间和（b）氢和水蒸汽之间的化学平衡控制着混合气体的碳势。

固体渗碳与气体渗碳相似之处在于渗碳构件表面的主要碳源是一氧化碳气体。在气体渗碳和固体渗碳这两种工艺中，钢所吸收的初生碳是通过一氧化碳分解而成的（分解成二氧化碳和碳）。但是，在固体渗碳时，通过分解得到的二氧化碳几乎立即与固体渗碳化合物中存在的含碳物质反应生成新鲜的一氧化碳，而在气体渗碳中，必须从炉外气源向炉子气氛中通入新鲜的富化气。

液体渗碳与液体氰化的关系比气体渗碳和固体渗碳更接近。尽管已经研制了不使用氰化物作为碳源的盐浴，但是液体渗碳的碳源一般仍然是含有熔融氰化物的盐浴。在氰化物型液体渗碳盐浴中的渗碳与液体氰化一样，只是液体渗碳所用的盐浴中氰化物含量的百分比较低。采用气体渗碳和固体渗碳所获得的渗层仅含有作为硬化介质的碳，而在氰化物型渗碳盐浴中进行液体渗碳时，所获得的渗层除含碳外还含有一些氮。可根据所获得渗层的特性和成分将液体渗碳与碳氮共渗和氰化区别开：碳氮共渗和氰化所获得渗层的含氮量比液体渗碳层高，而含碳量则比液体渗碳层低；碳氮共渗和氰化层的深度很少超过 0.25 毫米左右，而液体渗碳层的深度则可达到 6 毫米以上。

对于很薄的渗层来说，在氰化物型盐浴中进行低温液体渗碳有时可用来代替液体氰化。另一方面，采用碳氮共渗通常也能获得相等的渗层，而又避免了由于处理含有有毒氰化物的废液引起的环境污染问题。

液体渗碳也是在不含氰化物的盐浴中进行的，碳是通过与弥散在含大量碳化物盐浴中特定级别的碳粒进行反应得到的。使用无氰化物的液体渗碳盐主要有两个优点：所得到的渗层不含氮；

由于工艺中产生的废液无毒，所以不存在大量的废液处理问题。

渗碳机理

在渗碳过程中，游离碳被吸入到含碳量相当低的金属零件（通常是钢）表面层；这种游离碳是通过与金属表面紧密接触的气相物质或液相物质的化学反应得到的，金属并不直接参与这些化学反应，但金属的存在可以对反应起催化作用。吸收到金属表面的碳建立了一个浓度梯度，然后碳原子通过扩散离开金属表面。

从理论上说，金属的表面层可以得到由周围环境的碳势和渗碳温度所决定、但不超过碳在金属中最大固溶度的含碳量。例如，低碳钢可获得的表面含碳量在 790°C 下约为 0.9%，在 845°C 下约为 1.05%，在 900°C 下约为 1.2%，在 955°C 下约为 1.4%。然而，如果环境中的化学平衡产生 0.8% 的碳势，那么不管渗碳温度如何，含碳量都不会超过这一数值。

在大多数情况下，为了在金属表面获得所要求的含碳量，要对环境中的碳势进行控制。对于渗碳钢来说，采用 815°C 以上高温渗碳的主要好处是提高了吸收和扩散速度，从而减少渗碳时间。碳的扩散和吸收的相对速度是可变的，并与许多因素有关。例如，据估计，在一种气体渗碳气氛中，可同时发生多达 180 种化学反应；而在这些反应中，仅少数几种是重要的，而且归根结底，只有一种反应决定碳渗入到渗碳金属表面的速度。当气氛碳势和表面含碳量之间相差很大时，渗碳最初进行得很快，随着表面层的碳量百分比增大，继续吸收碳的速度就可能降低。

开始时，离开表面向心部扩散的碳量很少，碳浓度梯度也很小，因此，扩散的驱动力也很小。随着表面含碳量的提高，进行扩散的驱动力也增大。除了工艺周期很长的情况外，吸碳反应往往落后于碳在钢中的扩散速率，所以在大多数渗碳工艺中，吸碳的速度是一个控制因素。此外，大多数渗碳都是在非平衡条件下进行的。

几乎只有钢才能进行渗碳，而进行渗碳的主要目的是获得一层覆盖在坚韧心部上的耐磨的硬化层。最终的性能是在碳的吸收和扩散后进行适当的热处理得到的。一般说，热处理包括加热零件并从高温（渗碳温度或略低于渗碳温度但仍高于 A_{cm} 的温度）淬火。有些零件要进行回火，而另一些部件不经回火就可使用。

含碳量极限铁-碳状态图的 A_{cm} 线是碳在奥氏体中的固溶度随碳钢温度变化的曲线。大多数合金化元素都可使平衡图上的 A_{cm} 线向左移。从渗碳试验得到的图 1-1 中可以看到，1020 钢和另外 7 种牌号的渗碳合金钢的表面含碳量近似极限与铁-碳平衡图的一部分是吻合的。

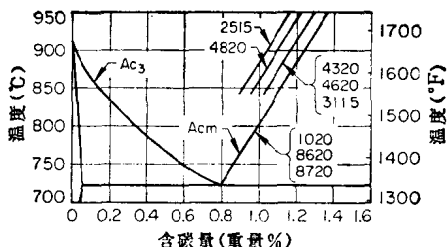


图1-1 在 8 种钢中，碳在奥氏体中固溶度的近似极限与铁-碳图的一部分相吻合

碳氮共渗机理

碳氮共渗时，加到气体渗碳气氛中的氨分解成氢和单原子氮，后者与来自渗碳气体的碳一起吸附在工件的表面上。加氮有三个重要作用：抑制碳的扩散，从而有利于获得薄的渗层；提高淬透性，从而有利于获得容易抛光和耐磨性高的很硬的渗层；形成氮化物，这种硬度很高的氮化物颗粒可导致比仅由最大硬度的基体所造成的耐磨性更高。

和渗碳一样，碳氮共渗层的性能通常是在非平衡条件下获得的。气氛中的氮和富化气浓度部分地决定了金属表面上的碳、氮含量；时间和温度决定最终的表面碳、氮含量，以及决定总的渗层深度。

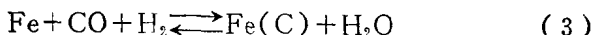
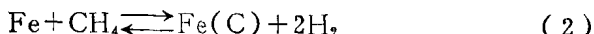
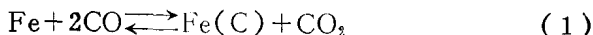
第 2 章

碳的吸收和扩散

从渗碳环境中吸收碳包含着一系列的化学反应，这些反应基本上在渗碳环境中进行，而其结果则是导致碳原子从渗碳环境中转移到金属中，从而使碳原子进入固溶体。就这个问题来说，所有渗碳工艺都是一样的。下面几节将介绍气体渗碳过程中碳的吸收；在液体渗碳和固体渗碳中碳的吸收将分别在第 19 章和 21 章介绍。在进行氰化物液体渗碳和固体渗碳时，下节所列的反应 (1) 是影响碳吸收的主要反应；以下讨论的原理不仅适用于气体渗碳，也适用于液体渗碳和固体渗碳。

气体渗碳中碳的吸收

在气体渗碳时，炉子气氛是渗碳和脱碳介质的混合物，最常出现的气体则是一氧化碳、氢、二氧化碳、水蒸汽、甲烷和氮。有关碳转移到钢上的主要反应如下：



式中 $\text{Fe}(\text{C})$ 代表 γ 铁 (奥氏体) 中固溶的碳。这些反应的速度控制着渗碳的速度。从科林 (Collin)，冈纳森 (Gunnarson) 和苏林 (Thulin) 的数据 (参考文献 1)● 可看到，渗碳反应 (1) 和反应 (2) 对整个渗碳过程显然只起很小的作用。反应 (3) 的反应系数是相当高的，这就意味着渗碳机理是受该反应控制的。(当然该反应仅适用于含有大量氢和一氧化碳的气氛。由纯碳氢化合物气体例如真空渗碳使用的甲烷气氛和用氮稀释的碳氢化合

● 参考文献列在每章的末尾。

物气体所组成的气氛显然是受不同的吸碳反应控制的，并且实质上是以前章讨论的不同反应速度进行反应的)。

反应(1)生成的二氧化碳、反应(3)生成的水都是有效的脱碳介质；这些气体如果不很快除去，渗碳就不会继续进行下去(参考文献2)。不引起脱碳的可允许的二氧化碳和水量可根据平衡数据计算出来，虽然这个问题将在第3章中讨论，但这儿作简短的介绍对于确定各种气体的相对作用是有用的。

图2-1所示为不同温度下在代表饱和奥氏体和50%饱和奥氏体的不同表面含量时二氧化碳和一氧化碳的平衡百分比。对于一氧化碳(反应气体)和二氧化碳(生成气体)的总体积是全部气体体积的20%、总压为一个大气压的稀释气体来说，一氧化

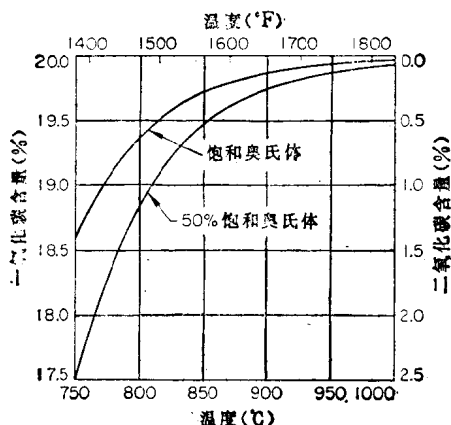
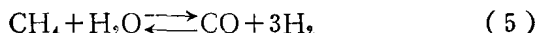
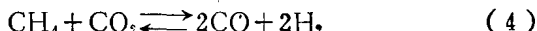


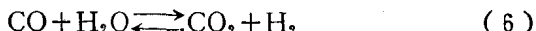
图2-1 一氧化碳和二氧化碳的含量与奥氏体化程度不同的碳钢相平衡的气体渗碳气氛的温度的关系。一氧化碳加二氧化碳等于20%；炉中气体压力为1个大气压。

碳是很稳定的，并且不断增多，这样使稀释度和温度也随之增大。相反，即使是少量的二氧化碳存在，也需要有大量的一氧化碳来平衡脱碳反应。二氧化碳被认为是一种强的脱碳气体，水蒸汽也可引起强烈的脱碳，因此，上述情况也适用于水蒸汽和氢气之间的化学平衡。

为了抵消水蒸汽和二氧化碳的作用，加入了甲烷之类的碳氢化合物气体。甲烷主要在金属表面与二氧化碳和水蒸汽进行如下反应：



上述反应所形成的一氧化碳参与渗碳反应，这样甲烷就成了渗碳的最终碳源，一氧化碳则是将甲烷传递到金属表面的介质，而一氧化碳与二氧化碳之比、氢与水蒸汽之比控制着渗碳的碳势。上述气体之比还受水-煤气反应的影响：



在气体渗碳时，主要是反应（1）到反应（6）进行过程中的化学平衡决定气氛的碳势，而这一碳势又决定工件表面的含碳量，当然这种含碳量不能超过渗碳温度下奥氏体中的固溶度极限。

碳在钢中的扩散

表面层的碳是通过扩散转移到工件内部的。扩散按费克(Fick)第一定律进行：

$$J = -D \partial C / \partial x \quad (\text{式 } 1)$$

式中 J 为流量或在单位时间内通过单位截面积的扩散物质总量， D 为扩散系数， $\partial C / \partial x$ 为扩散物质的浓度梯度。碳在奥氏体中的迁移取决于扩散系数值和浓度梯度的特征，而扩散系数又是温度和碳浓度的函数。碳的扩散是从浓度较高的工件表面向浓度较低的工件内部进行的；当表面和心部的含碳量保持一定时，便可预测出任一恒定温度下的渗层深度，这一深度还可处理时间的简单函数关系来表示：

$$d = \phi \sqrt{t} \quad (\text{式 } 2)$$

式中 d 是总渗层深度； t 是渗碳时间； ϕ 是比例因子，如图 2-2 所示，它是近似地随温度而变化的。

用图 2-2 的 ϕ 值可以预测出采用相同的碳扩散率在恒定的碳

势和温度下渗碳 t 小时可在低碳钢和某些合金钢上获得的总渗层深度。从图 2-2 中可以看到，渗碳温度增加 100°C 几乎可使 ϕ 值增高 1 倍，这就相当于在一定的渗碳时间内所获得的总渗层深度增加 1 倍。同样，渗碳温度增加 55°C ，在约 $1/2$ 的渗碳时间内就可得到同样的渗层深度。

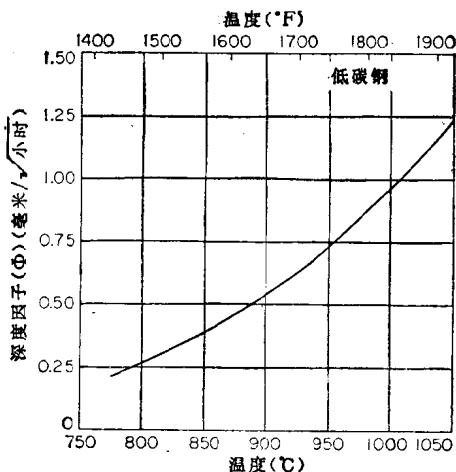


图 2-2 渗层深度因子 (ϕ) 和低碳钢渗碳温度的关系
(式 2) 中使用的因子 ϕ 是用以根据低碳钢和某些合金钢的渗碳时间来计算总渗层深度的。

碳梯度 一般说来，碳梯度仅受从表面到心部之间含碳量的影响。在一定的温度下，扩散速度随含碳量的增加而提高。对于普通的渗碳钢和一般的工艺来说，表面的含碳量在 $0.6\sim 1.1\%$ 的范围内，心部的含碳量一般为 $0.12\sim 0.25\%$ ；在这些表面和心部含碳量范围内，碳梯度可用一条直线近似地表示，而不会有很大的误差。这种称为标准梯度的近似值是通过将表面和心部的含碳量之差（叫做碳量差）除以总渗层深度得到的。

总渗层深度 图 2-3 上的曲线是一种渗碳低碳钢常见的实际碳梯度。曲线开始于标有零深度的表面含碳量。这条曲线是逐渐接近代表渗碳前含碳量的水平线的。渗碳以后，水平线代表心部