

GANGDESHENTAN

钢的渗碳

王 万 智 编著
唐 弄 卿

机械工业出版社

钢 的 渗 碳

王 万 智
唐 弄 娣 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以钢的气体渗碳为主，较为详细地介绍了渗碳的基本原理和渗碳的工艺参数、渗碳用钢、渗层深度与心部强度以及渗层碳浓度等的选择和运用，并通过生产实例详细地阐述了炉气的控制及其检测手段、生产过程和生产中常见的故障及其排除方法。同时，对渗碳后的热处理、金相检验及常见缺陷也作了详细分析。

本书可作为热处理工人自学读物，也可供工程技术人员参考。

钢 的 渗 碳

王万智 唐弄娣 编著

*

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)

重庆印制一厂印刷

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 5 · 字数 108 千字

1985年9月重庆第一版·1985年9月重庆第一次印刷

印数：0.001—6.600 定价：1.00 元

*

统一书号：15033·5876

目 录

概述

第一章 渗碳的基础理论

一 渗碳的基本过程	4
1 分解	4
2 界面反应	4
3 碳原子的定向移动——扩散过程	6
二 渗碳工艺参数的确定	7
1 渗碳温度	8
2 渗碳保温时间	10
3 炉内压力	11
三 炉气碳势	12
1 炉内气氛各个组分的行为	12
2 影响炉内气氛各个组分的因素	15
3 碳势及其控制原理	19
4 碳势测定方法简介	21
5 炉气分析的取样	23
四 渗碳用钢	25
1 渗碳用钢的性能要求	25
2 钢的原始成分对心部性能的影响	26
3 钢的原始成分对渗碳层性能的影响	28
4 合金元素对渗碳工艺过程的影响	31
5 常用的渗碳钢	33
五 渗层深度的合理选择	36
1 总应力分布与疲劳强度的关系	37
2 残余应力对总应力的影响	38

3 渗层深度对残余应力分布的影响	38
4 渗层深度的合理选择	39
六 表层碳浓度的合理选择	41
1 表层碳浓度对组织的影响	42
2 残余奥氏体对性能的影响	44
3 碳化物对性能的影响	48
4 马氏体对性能的影响	52
5 表层碳浓度的合理选择	52

第二章 渗碳工艺

一 渗碳的工艺过程	54
1 渗碳前的热处理	54
2 渗碳前的准备	56
3 渗碳过程的工艺操作	61
二 滴注式可控气氛渗碳简介	68
1 卡博—玛格法	69
2 工业甲醇—煤油为滴剂的可控气氛渗碳	71
3 滴注式渗碳设备	72
4 滴注式可控气氛渗碳工艺举例	82
三 吸热式可控气氛渗碳及其它气体渗碳工艺简介	84
1 吸热式气氛	84
2 炉气的分区控制	84
3 各区加热温度和供气制度	85
4 实例	86
5 氮基可控气氛渗碳简介	87
6 真空渗碳	89
7 高频加热渗碳	91
8 离子渗碳	92
四 固体渗碳和液体渗碳	92
1 固体渗碳	92
2 固体、气体渗碳实例的比较	94

3 液体渗碳	95
4 无毒液体渗碳的发展	98
5 膏剂渗碳	98
五 渗碳后的热处理	99
1 渗碳后的热处理目的及途径	99
2 直接淬火法	101
3 一次淬火法	103
4 两次淬火法	105
5 淬火后的热处理	106
六 渗碳后的机械加工	111
1 磨削加工	111
2 喷丸处理	112
3 滚压抛光	115
第三章 渗碳件的缺陷及其防止措施	
一 渗碳件的质量检查	118
1 渗层深度的测定	118
2 淬火回火后的金相组织评定	120
3 表面及心部硬度	122
二 渗碳件的缺陷及其防止措施	124
1 渗层厚度不合要求	124
2 渗层组织不符合要求	127
3 硬度超差	135
4 晶粒粗大	137
5 变形过量	140
6 渗碳件的裂纹	143

概 述

高碳钢具有高的硬度和良好的耐磨性能,但脆性大,冲击韧性低;而低碳钢具有优良的塑性、韧性,但硬度不高、耐磨性能低。如通过淬火和低温回火,这两种钢在性能上的差别就更明显。

大部分的机器零件,如齿轮、轴、活塞销、凸轮等,它们有一个共同的特点:即表层受力大,要求硬度高、耐磨,而心部受力小。为了提高构件的安全性和可靠性,既要求有一定的强度、硬度,又对塑性和韧性要求要好。

如果一个工件表层有高的含碳量,而心部是低碳钢或低合金钢,再通过淬火加低温回火,就可以获得表面具有硬而耐磨,心部又有强而韧的性能。使它可以适应承受复杂应力的服役条件。

假若使零件表层的含碳量控制在1.0%左右,心部的含碳量保证在0.15%左右,保证有一个平缓的过渡层,并有好的淬透性,这样,再经过淬火和低温回火,就可以从表至里依次获得高碳、中碳和低碳的回火马氏体组织。

钢的渗碳处理,就是指将低碳钢或低合金钢零件放在增碳的活性介质中加热、一般在 $920\sim 950^{\circ}\text{C}$ 保温,使活性碳原子渗入钢件表面,以获得较高的碳浓度梯度,加速碳原子不断向内部扩散,而形成具有一定碳浓度和梯度的渗层厚度,随后再经淬火和低温回火的整个操作过程。

按采用的活性介质不同,渗碳可分为固体、液体和气体渗碳三种方法。其中固体渗碳最为古老。我国战国时代即有

广泛的传播和应用，并且有相当高的工艺生产水平。明末杰出的科学家宋应星，在他的科学巨著《天工开物》一书中，就有渗碳的专门论述。

今天，渗碳工艺的发展趋势是：应用可控气氛进行气体渗碳，使渗碳工艺在高度机械化、自动化中进行炉气、炉温精确的自动控制。并利用微处理机，以达到更科学、更合理地调整各个工艺参数，使产品质量更稳定，生产力更高，劳动条件更好，生产成本更低廉。另一个趋势是，使用真空设备，实现高温真空渗碳、离子渗碳。这样，可以获得更好的渗层组织和表面质量，更厚的渗层，更平缓的碳浓度梯度，更快的渗速，从而大大缩短生产周期和提高劳动生产率。

同时，在周期性的气体渗碳炉中，广泛推广小滴量气体渗碳工艺和炉气、炉温的自控手段。使渗碳置于更科学更文明、产品质量更稳定的生产方式中，摆脱了以前单纯依靠工人的经验来生产的局面。这些工艺方法的推广和运用，对改造我国目前成千上万的气体井式渗碳的渗碳工艺，具有极大的指导作用。

在固体渗碳工艺中，广泛采用活性强、密度大、含碳量高、颗粒均匀的固体渗碳剂；在液体渗碳工艺中，广泛采用无毒液体渗碳剂。这样，使这两种较古老的渗碳工艺获得了新生。

今天，渗碳工艺已经成为钢件表面强化工艺最主要的方式之一，而且用得越来越广泛和普遍。这是由于：

渗碳与高频淬火比较：渗碳件具有更高的表面硬度和耐磨性能，心部也具有更好的强、韧性能，而且不受批量、大小和形状复杂程度的限制。

渗碳与氮化比较，渗碳的表层硬度低。然而，它的渗层

厚、渗速快、对材料要求不象氮化那么严格，并且心部的强度稍高于氮化，硬度梯度也较平缓。所以，渗碳件能承受更高的挤压应力，具有更高的接触疲劳强度和更大的承载能力、生产率高、成本低廉等特点。

渗碳与碳氮共渗的比较：渗碳件的表层硬度稍低，但碳氮共渗一般只适于层深较薄（一般不大于0.8毫米）的渗层。要求层深较厚时，一般就要提高共渗处理的炉温。当温度高于500℃时，渗氮的能力极微，实际上只能渗碳。所以，我们说渗碳件由于渗层厚，它能比碳氮共渗承受更大的载荷和更大的挤压应力。

其它化学热处理所能获得的渗层深度比碳氮共渗更薄，因而承受重载的能力就更差。正由于这样，渗碳工艺对承受重载、耐磨、冲击、复杂应力的构件，仍然是最有效的方法之一。

第一章 渗碳的基础理论

一 渗碳的基本过程

正如前面所述，渗碳按化学介质的不同，有气体、液体和固体三大类。不管是哪种类型的渗碳方法，在渗碳过程中，总是包括分解、吸收和扩散三个基本过程。现以井式渗碳炉内滴入煤油进行气体渗碳为例来加以说明：

1 分解 煤油是一个多碳的碳氢化合物。它是含有烷烃 (C_nH_{2n+2}) 约60~65%，环烷烃 (C_nH_{2n}) 约20~30%和芳香烃 (C_nH_{2n-6}) 约7~10%的混合物。分子式中含有9~15个碳原子，其分子式大致为 $C_9H_{20} \sim C_{15}H_{32}$ 。在较低的温度下，不能完全分解，并易发生聚合反应而出现结焦现象。在渗碳温度920~940℃时，将煤油滴入炉内后，就会分解成甲烷 (CH_4)、一氧化碳、氢和少量碳氢化合物(烷烃、环烷烃和芳香烃)。渗碳温度越高，滴入的量越少，分解得就越充分。其中一氧化碳是弱的渗碳气体，甲烷是强渗碳气体。高温下它们在钢的表面进一步分解生成活性强、渗入能力很大的活性碳原子(用[C]来表示)。所谓活性碳原子，是指那些在一定的化学反应中刚生成的、以原子状态存在的碳。活性是说它的性质活泼，能为零件表面所吸收或与零件表面的某种元素化合。碳是否具有活性，取决于它是否呈原子状态。呈分子状态的碳，它的活性很小，不能为钢的表面所吸收，而沉积在钢件表面，形成碳黑。

2 界面反应 在渗碳过程中，界面上发生的反应可按下列步骤进行：

首先,渗碳气体(CO 、 CH_4)通过热扩散达到钢件表面。在钢件表面发生吸附作用,吸附在表面上。被吸附的分子在钢件表面进行分解,形成活性碳原子,进而在表面形成固溶体或化合物。这就是我们常说的吸收过程的全过程。图1是气体渗碳时界面反应的示意图。

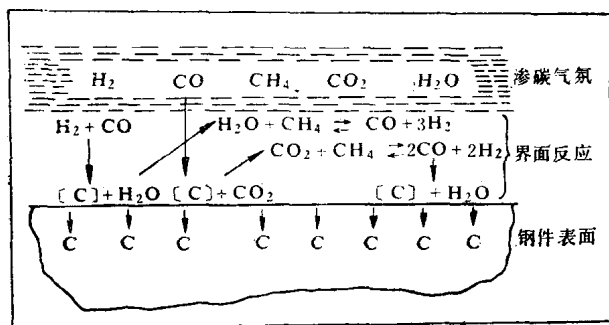


图1 气体渗碳时界面反应的示意图

由图可知,气体渗碳时的界面反应是在气-固两相界面处进行。通常,它的反应速度比在气体中慢,但比在固体中快。因此,在一般情况下,将碳原子在钢中的扩散视为整个渗碳的控制环节。然而,在某些特殊情况下,或者在渗碳处理的某一特定阶段中,界面反应也能成为渗碳处理的控制环节。因为,这个过程总是发生在扩散过程的前头,而且它与很多因素有关。因此,在这一环节中的任意一个过程,发生故障,将会影响整个渗碳过程的正常进行,而且使整个过程处于停止状态。例如:当钢件表面不清洁,以致吸附困难,此时,界面反应缓慢,即成为控制环节;又如滴煤油渗碳时,一旦操作不当,就容易析碳以致成焦,此时,界面反应也难进行,而成为控制环节。所以,研究渗碳中的界面反

应，目的是为了地更好地控制它。使它在整个渗碳过程中能充分协调一致，从而，达到强化整个过程、提高渗速、改善渗层质量等效果。

渗碳时的界面反应是一个复杂的多变的过程。它包括化学吸附、分解、吸收和解吸几个步骤。由于这些过程，促进了界面上一系列的化学反应的进行。渗碳过程，其渗碳反应为：



渗碳反应时产生的 CO_2 和 H_2O 与碳氢化合物反应，重新生成 CO 和 H_2 ，其反应为：



这四个方程总括起来得到渗碳时的总反应：



形成的活性碳原子为钢件表面所吸收。钢件表面吸收1摩尔碳(=12克)，就产生2摩尔氢(44.8标准升)。这就是说，存在着基本气体被渗碳时产生的氢稀释的倾向。正由于这样，在渗碳的整个过程中，要不断地向渗碳炉中供给渗碳气氛，保证炉气成分稳定，以促进渗碳过程连续不断地进行。

在渗碳的整个过程中，渗碳的实质就是碳原子定向移动的结果。无论在气体中，或在气体与钢件的界面上，还是在钢件表层内部，碳原子的定向移动都是靠热扩散来完成的。

3 碳原子的定向移动——扩散过程 所谓扩散，是指原子(分子或离子)在气体、液体或固体介质中，由于热振动而引起的迁移。在均一的物质中，热振动引起的迁移在各

个方向是均等的。只有当物质存在浓度差时，即形成浓度梯度时，在一定的温度条件下，才会引起定向的原子迁移。定向的迁移使浓度趋向均匀，只有不断地保持这种浓度梯度时，才能保证定向迁移的速度不变。

扩散过程，在气体中进行得非常迅速，在液体中进行得就较为缓慢，而在固体中进行得更为缓慢。所以，在渗碳过程中，要研究的扩散过程，主要是指被吸收了的碳原子向钢件深处渗入的过程。这个过程进行，符合扩散的一般规律。钢的表面吸收了活性碳原子后，含碳量增高，而里层含碳量相对较低。于是，表面和里层就存在着浓度的差别。这样，碳原子就从表面的高浓度区向里层的低浓度区扩散。扩散的速度主要取决于温度。以渗碳为例，为了得到1.5毫米的渗层，在930℃时需要6.5小时；970℃时需要5小时；1000℃时需要3小时；1100℃时仅需要1小时。这充分说明，温度对扩散速度的影响之大。其次是浓度梯度，渗碳时的碳浓度梯度就好比在日常生活中常见到小孩滑滑梯一样，当滑梯高而陡时，小孩向下滑动的速度也越大，所用时间也越短；滑梯越平缓，向下滑动的速度也越小，所用时间也越长。所以，渗碳时，在渗碳的前期，要尽可能地提高炉气的碳势，使在尽可能短的时间里在渗层表面上形成较大的浓度梯度；而在渗碳的后期，又要适当地降低炉气碳势，以确保渗碳层的碳浓度变得平缓。扩散速度还与固溶体的晶体结构、成分、应力、变形等因素有关。

二 渗碳工艺参数的确定

从上面的讨论可知，渗碳过程中的分解、界面反应（包括吸附、分解、吸收和解吸等复杂过程）和扩散进行的速度

应当协调一致,才能使渗碳过程正常进行。而这些过程总是有机地联系在一起。在吸碳阶段,要提供足够多的活性碳原子,让钢件表面吸收。如果渗碳剂分解出来的活性碳原子太少,不够表面吸收,就会使钢件表面的含碳量不够高,渗速慢,渗碳时间长;如果分解出来的活性碳原子过多,多余的碳原子就会重新结合成分子状态的碳,沉积在工件表面,形成炭黑,阻止钢件渗碳,若附在炉罐壁上,则将其导热性降低,若附在电热体上,就会引起短路,因而影响设备的使用寿命。在整个渗碳过程中,分解和吸收的活性碳原子数量应与往深处扩散的碳原子数量相适应。生产实践表明,在分解、吸收和扩散这三个基本过程中,以扩散为最慢,因此,扩散过程就决定了整个渗碳过程。欲想提高渗碳速度,应主要从扩散着眼。

1 渗碳温度 渗碳温度是渗碳工艺中最重要的工艺参数之一。其原因是:

(1) 温度是影响扩散系数最突出的一个因素,增加温度,可以急剧地提高扩散系数。其关系可用阿累尼斯经验公式表示:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_D}{RT}}$$

式中 T ——绝对温度(K);

R ——气体常数($R=1.987$ 卡/℃·摩尔);

D_0 ——频率因子(厘米²/秒);

E_D ——扩散激活能(卡/摩尔)。

D_0 、 E_D 、 R 在渗碳过程中可视为常量,所以,扩散系数(D)是温度(T)的指数函数。当渗碳温度从920℃提高到1000℃时,碳的扩散系数可以提高7倍以上。所以,提高渗

碳温度能显著缩短渗碳时间，提高生产率。

(2) 温度也是显著影响钢的溶碳能力和渗层浓度梯度的重要因素。图2中的a)表明渗碳温度越高，碳原子在奥氏体中的溶解能力增加。如渗层厚度相同时，渗层中的浓度梯度就增大，从而提高了渗速，缩短渗碳时间。图2中的b)的曲线 t_1 、 t_2 和 t_3 就清楚地表明了不同渗碳温度对溶碳能力和浓度梯度的影响。

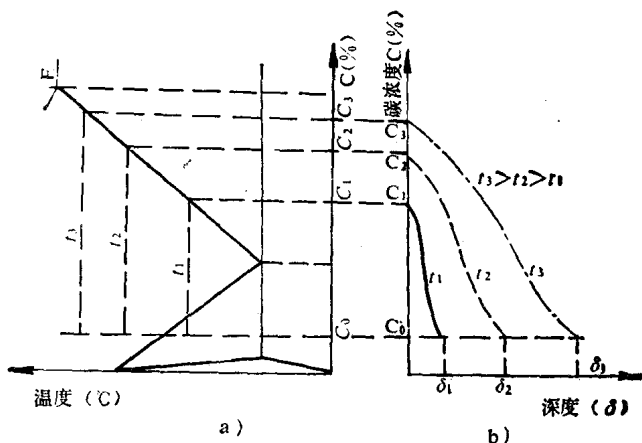


图2 渗碳温度对表层溶碳能力和浓度梯度的影响
a) Fe-C状态图的一部分 b) 温度对溶碳能力和浓度梯度的影响

(3) 渗碳温度还大大影响合金碳化物的稳定程度。当碳以化合物的形态存在于渗层组织中时，碳化物在奥氏体中扩散远少于碳在奥氏体中的扩散。在渗碳温度下，要想使碳化物象自由的碳那样扩散，几乎是不可能的。所以，当奥氏体中存在大量的碳化物时，实际上就是使奥氏体中的碳浓度下降，也就减少了能在奥氏体中进行扩散的碳浓度。提高渗碳温度，碳化物的稳定性下降，碳化物溶入奥氏体中，增加

了碳在奥氏体中的碳浓度，从而提高了渗速。

生产实践表明：当渗碳时间、气氛碳势相同时，渗碳温度越高，渗层越厚，沿渗层的浓度梯度变化趋于平缓，使渗层与心部结合更加牢固。图3所示，即为温度对渗层碳浓度梯度变化的影响。从图中可知，925℃时的碳浓度梯度最陡，1000℃较为平缓，1065℃时更为平缓。

然而，随着渗碳温度的提高，设备的使用寿命缩短。此外，温度越高，零件的变形度也越大，奥氏体晶粒也易粗大。因此，目前常规渗碳工艺多采用930℃左右。超过950℃温度渗碳，尚未获得广泛应用。

2 渗碳保温时间 在渗碳的正常情况下，随着渗碳时间的增长，使渗层浓度梯度变小，渗速减小。因而，渗碳时间与渗层厚度的关系可用简单的公式来表示：

$$\delta = K\sqrt{\tau}$$

式中 δ ——渗层厚度(毫米)；

τ ——渗碳时间(小时)；

K——常数(与温度、钢材成分、炉内气氛、炉子类

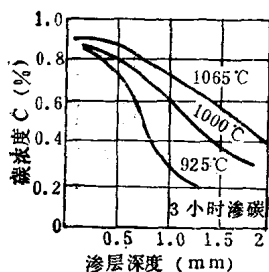


图3 温度对渗层厚度及浓度梯度的影响

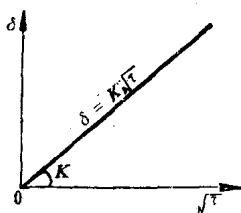


图4 δ 与 $\sqrt{\tau}$ 的关系曲线

型及状态、装炉量等因素有关)。

这就是说, 渗碳层厚度与扩散系数 k 和时间的平方根的乘积成正比关系。图 4 表示 δ 与 $\sqrt{\tau}$ 的关系, K 表示直线的斜率, 渗碳温度越高, 其斜率亦越大。

从上可知, 渗碳保温时间主要取决于要求获得的渗层厚度。当温度一定时, 渗碳层厚度与保温时间存在着一定的关系。当要求的渗层厚度越大时, 则渗碳保温时间也应越长。图 5 表明了渗碳时间, 在不同的渗碳温度下, 如何影响渗层厚度。

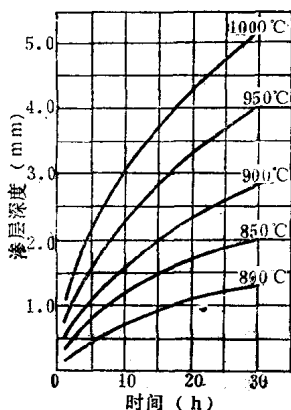


图5 在不同的渗碳温度下, 渗碳时间对渗层厚度的影响

在实际生产中, 常根据渗碳平均速度来计算保温时间。例如, 据资料介绍, 用周期作业的井式气体渗碳炉, 渗碳温度为 920°C , 渗碳滴剂为煤油, 对 20CrMnTi 钢渗碳其保温时间, 可按渗碳平均速度为 0.25 毫米/小时来计算。这样计算, 对浅层渗碳, 一般是比较适合的; 但对于要求较深的渗层时, 如大于 1.5 毫米时, 采用按上式的平均值计算的渗碳时间, 就往往渗层不足。因此, 这种平均速度计算方法是较为粗略的, 只能作为参考。为了比较准确地确定渗碳保温时间, 并决定渗碳件的出炉时间, 在生产中, 通常采用在渗碳过程中抽样检查的方法。根据试样检验结果, 对照工件所需的渗层厚度, 然后估计延续时间和出炉时间。

3 炉内压力 炉内压力的大小, 明显地影响炉子的气