

阀门钢材热处理基本知识和材料选用

改善钢的性能，有两个主要途径：一是调整钢的化学成分，加入合金元素，即合金化的办法；另一是对钢实施热处理。这两者之间有着极为密切，相辅相成的关系，这里只介绍“钢的热处理”。

一、 钢的热处理的一般概念

热处理是一种重要的金属加工工艺，在机械制造工业中已被广泛应用。钢经过正确的热处理，可提高使用性能，改善工艺性能，达到充分发挥材料性能潜力，提高产品质量，延长使用寿命，提高经济效益的目的。据初步统计，在机床制造中，约 60%~70% 零件要经过热处理；在汽车、拖拉机制造中需要热处理的零件多达 70%~80%；至于减速器齿轮箱的齿轮和工模具及滚动轴承，则要 100% 进行热处理。总之，重要的零件都必须进行适当的热处理才能使用。

所谓钢的热处理是指将钢在固态下

进行加热、保温和冷却三个基本过程，温度
以改变钢的内部组织结构，从而获得硬度 ②
所需性能的一种加工工艺。为简明表示 ③
明表示热处理的基本工艺过程，通常 ①
用温度-时间坐标绘出热处理工艺曲线，
如图 1 所示，曲线①表示钢件在加热 时间
升温阶段，曲线②表示钢件加热到规定
温度后处于保温阶段，曲线③表示钢件保温结束后进行淬火冷却。

图 1 热处理工艺曲线示意图

钢热处理的最基本类型可根据加热和冷却方法不同，大致分类如下：

- 退火
- 正火
- 普通热处理- 淬火
- 回火
- 火焰加热
- 表面热处理- 表面淬火- 感应加热
- 表面热处理-- 渗碳
- 化学热处理- - 渗氮
- 碳氮共渗
- 控制气氛热处理
- 其他热处理-- 真空热处理
- 形变热处理

热处理可以是机械零件加工制造工艺中的一个中间工序，如改善锻、轧、铸毛坯组织的退火或正火，齿轮箱体消除焊接应力退火和降低工件硬度改善切削加工性能的退火等。也可以是使机械零件性能达到规定技术指标的最终工序，如经淬火加高温回火，使机械零件获得极为良好综合力学性能，例如渗碳齿轮的整个加工工序是：锻造-退火-粗加工-探伤-正火-精加工-渗碳、淬火、回火-喷丸-(磨齿)。由此可见，热处理同其他工艺过程密切，在机械零件加工制造过程中具有十分重要的地位和作用。

二、 普通热处理

1、钢的退火和正火

1.1 钢的退火和正火的定义和目的

退火一般是将钢件加热到临界温度以上适当温度，保温适当时间后缓慢冷却，以获得接近

平衡的珠光体组织的热处理工艺。图 2 为 GCr15 钢等温球化退火典型工艺。

温 780~810℃
度 炉冷 710~720℃
℃ 3~6 4~6 炉冷
600℃ 出炉空冷
时间 (h)

图 2 GCr15 钢等温球化退火典型工艺

正火也是将钢件加热到临界温度以上适当温度，保温适当时间后以较快冷却速度冷却（通常为空气中冷却），以获得珠光体类型组织的热处理工艺。图 3 为 20CrMnTi 正火工艺。

温 920~950℃
度
℃ 650℃ 2~3 空冷
1.5
时间 (h)

图 3 20CrMnTi 正火工艺

由退火和正火的热处理工艺可知，正火的冷却速度比退火快，所以相同钢材正火比退火（主要指完全退火）后获得的珠光体组织较细，钢的强度与韧性、硬度也较高。

退火和正火是应用非常广泛的热处理，在机器零件或工模具等工件的加工制造过程中，退火和正火经常作为预先热处理工序。

机器零件的毛坯一般是轧材、锻件、铸件或焊接件等，毛坯料内部常出现各种组织缺陷，如组织不均匀性、晶粒粗大、成分偏析、带状组织等，这些缺陷不仅影响以后各种冷热加工的进行，还会降低零件的最终性能。所以退火和正火用于毛坯的预先热处理，可以达到以下目的：

- 1.1.1 消除或改善毛坯料的各种组织缺陷。
- 1.1.2 获得最有利于切削加工的组织与硬度。
- 1.1.3 改善组织中相的形态与分布,细化晶粒,为最终热处理(淬火回火)作好组织上准备。
- 1.1.4 消除或降低内应力，以防后继工序加工后变形或开裂倾向。

退火和正火经常作为预先热处理工序外，在一些普通铸钢件、焊接件、以及某些不重要的热加工工件上，还作为最终热处理工序，以改善组织，稳定尺寸。

1.2 退火和正火的正确选用

在生产上对退火和正火工艺的选用，应根据钢种、前后连接的冷、热加工工艺、以及最终零件使用条件等来进行。根据钢中含碳量不同，一般按如下原则选用：

1.2.1 低碳钢 ($\leq 0.25\%C$) 这类钢主要应解决塑性过高造成粘刀而不易切削加工的问题，故采用正火为宜。通过正火使组织均匀，硬度适当提高而易于切削。例如对渗碳钢，用正火消除锻造缺陷及提高切削加工性能。

1.2.2 中碳钢 ($0.25\% \sim 0.55\%C$) 这类钢一般采用正火，其中含碳量 $0.25\% \sim 0.35\%$ 的钢，正火后其硬度接近于最佳切削加工硬度。对含碳量较高的钢，硬度虽稍高（200HBS），但由于正火生产率高，成本低，操作简便，仍采用正火，只有对合金元素含量较高的钢，因正火后硬度过高，使切削加工困难，才采用完全退火。

1.2.3 高碳钢 ($> 0.55\%C$) 这类钢一般采用退火最为适宜，因为含碳量较高，正火后硬度太高，不利于切削加工，而退火后的硬度正好适宜于切削加工。此外，这类钢多在淬火、回火状态下使用，因此一般工序安排是以退火降低硬度，然后进行切削加工，最终进行淬火、回火。

当钢中含有较多合金元素时，上述原则就不适用（由于合金元素强烈地改变了过冷奥氏体连

续冷却转变曲线），例如低碳合金钢 18Cr2Ni4WA 没有珠光体转变，即使在极缓慢的冷却速度下退火，也不可能得到珠光体类型组织。一般需用高温回火来降低硬度，以便切削加工。

2、钢的淬火

钢的淬火与回火是热处理工艺中最重要，也是用途最广泛的工序。淬火可以显著提高钢的强度和硬度。为了消除淬火钢的残余应力，得到不同强度，硬度和韧性配合的性能，需要配以不同温度的回火。所以淬火和回火又是不可分割的、紧密衔接在一起的两种热处理工艺。淬火、回火作为各种机器零件及工、模具的最终热处理是赋予钢件最终性能的关键工序，也是钢件热处理强化的重要手段之一。

2.1 淬火的定义和目的

把钢加热到奥氏体化温度，保温一定时间，然后以大于临界冷却速度进行冷却，这种热处理操作称为淬火。钢件淬火后获得马氏体或下贝氏体组织。图 4 为渗碳齿轮 20CrNi2Mo 材料淬火、回火工艺。



图 4 渗碳齿轮 20CrNi2Mo 材料淬火、回火工

艺

淬火的目的一般有：

2.1.1 提高工具、渗碳工件和其他高强度耐磨机器零件等的强度、硬度和耐磨性。例如高速工具钢通过淬火回火后，硬度可达 63HRC，且具有良好的红硬性。渗碳工件通过淬火回火后，硬度可达 58~63HRC。

2.1.2 结构钢通过淬火和高温回火（又称调质）之后获得良好综合力学性能。例如汽车半轴经淬火和高温回火（280~320HB）及外圆中频淬火后，不仅提高了花键耐磨性，而且使汽车半轴承受扭转、弯曲和冲击载荷能力（尤其是疲劳强度和韧性）大为提高。

淬火时，最常用的冷却介质是水、盐水、碱水和油等。通常碳素钢用水冷却，水价廉易得，合金钢用油来冷却，但对要求高硬度的轧辊采用盐水或碱水冷却，辊面经淬火后硬度高而均匀，但对操作要求非常严格，否则容易产生开裂。

2.2 钢的淬透性

2.2.1 淬透性的基本概念

所谓钢材的淬透性是指钢在淬火时获得淬硬层深度大小的能力（即钢材淬透能力），其大小用钢在一定条件下（顶端淬火法）淬火获得的有效淬硬层深度来表示，淬透性是每种钢材所固有的属性，淬硬层愈深，就表明钢的淬透性愈好，例如 45、40Cr、42CrMo 钢三种试样，按相同条件淬火后（油冷却），经检测 45 钢能被淬透的最大直径（称临界直径） $\phi 10\text{mm}$ ；40Cr 钢能被淬透的最大直径 $\phi 22\text{mm}$ ；42CrMo 钢能被淬透的最大直径 $\phi 40\text{mm}$ 。

实际工件的有效淬硬深度与钢的淬透性、工件尺寸及淬火介质的冷却能力等许多因素有关，例如，同一钢种在相同介质中淬火，小件比大件的淬硬层深；同一钢种相同尺寸时，水淬比油淬的淬硬层深。

同一种钢，其成分和冶炼质量必然在一定范围内波动，因而有关手册上所提供的某钢号的淬透性曲线往往不是一条线，而是一个范围，称淬透性带。图 1 为 40Cr 钢的淬透性带。

图 1 40Cr 钢的淬透性带

从上所述，钢材的淬透性包含两方面内容，一是钢材的淬透能力，它主要是保证不同大小齿轮的心部硬度，以满足接触疲劳强度和弯曲疲劳强度的要求；二是淬透性带宽度，要求尽可能小的淬透性带宽度波动，以有利于齿轮热处理变形的控制。德国大众、日本小松、美国休斯通用等国外几大公司对齿轮钢材的淬透性带宽 $\leq 8\text{HRC}$ ，我国的 GB/T5216 标准规定的钢材的淬透性带宽为 12HRC ，2002 年在“中国齿轮行业钢材采购通则（试行）”中要求齿轮钢材的淬透性带宽为 7HRC 。

2.2.2、淬透性的表示方法

钢的淬透性值可用 $J(\text{HRC}/d)$ 表示，其中 J 表示末端淬透性， d 表示至水冷端的距离， HRC 为该处测得的硬度值。例如淬透性值 $J(42/5)$ 表示距水冷端 5mm 处试样硬度值为 42HRC ；淬透性值 $J(30\sim 35/10)$ 表示距水冷端 10mm 处试样硬度值为 $30\sim 35\text{HRC}$ 。对淬透性值有具体要求的钢应根据 GB/T5216-2004《保证淬透性结构钢》标准的规定订货，其钢号最后用 H 表示，例如 42CrMoH 。

3、钢的回火

3.1 回火的定义和目的

钢淬火后必须经过回火，回火是指将淬火钢加热到 Ac_1 （钢件加热时的临界点）以下的某一温度，经过保温，然后以一定的冷却方法冷至室温的热处理工艺，见图 4。回火的目的：

3.1.1 降低脆性，减少或消除内应力，防止工件变形或开裂。

3.1.2 获得工艺所要求的力学性能。淬火工件的硬度高且脆性大，通过适当回火可调整硬度，获得所需要的塑性、韧性。

3.1.3 稳定工件尺寸。淬火马氏体和残余奥氏体都是非平衡组织，它们会自发地向稳定的平衡组织转变，而引起工件尺寸和形状的改变，通过回火可使淬火马氏体和残余奥氏体转变为较稳定组织，以保证工件在使用过程中不发生尺寸和形状的变化。

3.1.4 对于某些高淬透性的合金钢，空冷便可淬成马氏体，如采用退火软化，则周期很长。此时可采用高温回火，降低硬度，以利切削加工。

淬火钢不经回火一般不能直接使用，为了避免工件在放置过程中发生变形和开裂，淬火后应及时回火。

3.2、回火的种类

淬火钢回火后组织性能决定于回火温度，根据回火温度范围，可将回火分为三类：

3.2.1 低温回火 低温回火的温度为 $150\sim 250^\circ\text{C}$ ，回火后组织为回火马氏体，低温回火主要降低钢的淬火内应力和脆性，同时保持钢在淬火后的高硬度（一般为 $58\sim 64\text{HRC}$ ）和耐磨性，常用于处理各种工具、模具、轴承、渗碳件及经表面淬火工件。

3.2.2 中温回火 中温回火的温度为 $350\sim 500^\circ\text{C}$ ，回火后不仅保持较高硬度（一般为 $35\sim 45\text{HRC}$ ）和强度，而且具有高的弹性极限和足够的韧性。中温回火主要用于各种弹簧的处理，还用于某些塑料模、热锻模以及要求较高强度的轴、轴套等。

3.2.3 高温回火 高温回火的温度为 $500\sim 650^\circ\text{C}$ 。高温回火后的组织为回火索氏体，这种组织具有良好的综合力学性能。

4、钢的调质

习惯上将淬火加高温回火（ $500\sim 650^\circ\text{C}$ ）相结合的热处理工艺称作“调质处理”，简称“调质”。根据工件不同性能要求，通过调整回火温度，调质硬度可控制在于 $200\sim 350\text{HB}$ 。

4.1、调质热处理的目的

高温回火后的组织为回火索氏体，这种组织具有良好的综合力学性能，即在保持较高强度的同时，具有良好的塑性和韧性。调质处理广泛应用于重要结构零件，特别是在交变载荷下工作的零件，如汽车、拖拉机、机床上的连杆、连杆螺钉、齿轮和轴类零件等。调质还可作为表面强化零件（高、中频淬火和氮化等）以及某些要求较高的精密零件（如丝杆、量具、模

具等)和轧辊的预先热处理。

4.2、调质齿轮保证钢材淬透性的措施

齿轮调质的目的是要保证齿轮的齿部(特别是齿根部)达到设计要求的硬度,以满足接触疲劳强度和弯曲疲劳强度的要求,在我国齿轮制造中,对大中模数齿轮的调质其齿根处往往达不到要求的硬度,这与钢材选择和淬火冷却有关,其核心是钢材淬透性。为了使齿根处也达到要求硬度,通常采用二种措施:

4.2.1、一是以钢材的淬透性选材,常用调质齿轮钢材按其淬透性高低分为五类(I~V),表1为调质及调质后表淬齿轮用钢。表2为各类调质钢推荐应用范围。

表1 调质及表面淬火齿轮用钢

齿轮种类	类别	钢号
一般载荷不大、截面尺寸也不大、要求不太高齿轮	I	35 45 55
	II	40Mn 40Cr 35SiMn 42SiMn 50Mn2
截面尺寸较大、承受较大载荷、要求比较高齿轮	III	35CrMo 42CrMo 40CrMnMo 35CrMnSi 40CrNi 40CrNiMo 45CrNiMoV
截面尺寸很大、承受载荷大、并要求有足够韧性齿轮	IV	35CrNi2Mo 40CrNi2Mo
	V	34CrNi3Mo 37SiMn2MoV 30CrNi3

注: I~V按钢的淬透性及强度高低递增

齿轮尺寸(mm) 抗拉强度 σ_b (Mpa)

	600~800	800~1000	>1000	
圆棒直径	≈40	I II	III III	
40~80	II III	III III	IV	
80~120	II III	III III	IV	
120~180	II III	III III	IV V	
180~250	II III	IV IV	V V	
>250	III IV	V V		
齿圈厚度	≈20	I II	III IV	V
20~40	I II	III IV	IV V	
40~60	I II III	IV IV	V	
60~90	II III	IV VI	IV V	
90~120	III IV	IV V	V	
>120	III IV	IV V	V	
盘齿坯宽度	≈12.5	I II	II III	III IV
12.5~25	I II	II III	III IV	
25~50	I II III	III IV	IV	
100~200	II III	IV V		
>200	II III	IV V		

表2 各类调质钢推荐应用范围

必须指出:在选用材料时,在设计中不可根据从手册里查到的小尺寸试样性能数据用于大尺寸工件的强度计算,而必须考虑材料实际淬透层深度,大件齿轮因重量和体积均较大,截面积厚,内部热容量大,致使实际淬透层浅,这种现象叫做“钢材尺寸效应”。

在选用材料时,必须将淬透性和淬硬性区别开来,钢的淬硬性是指钢在正常淬火条件下可能达到的最高硬度,它主要取决于钢的含碳量,钢中含碳量越高,淬火后的硬度越高。至于合金元素对淬硬性影响不大,但对钢的淬透性却有重大影响。所以淬火硬度高的钢不一定就淬透性高,而硬度低的钢,也可能具有高的淬透性。

4.2.2、二是大模数齿轮采用齿部开槽调质,大模数齿轮采用整体毛坯调质,由于受到钢材淬透性限制,往往在齿根部达不到要求调质硬度,一般大模数齿轮的体积和重量较大,因此按第一种方法选用高合金含量的钢显然是不经济的,所以齿轮模数较大时,如碳钢齿轮模数大于 12 时应采用先开槽后调质,再精滚齿的工艺,由于开槽调质改善了齿部冷却条件,所以可以采用淬透性较低的合金元素较小的钢材,从而降低了成本。

图 5 大模数齿轮开槽调质后各部位硬度分布

图 5 所示为 42CrMo 钢, $M=22$, $Z=20$ 的大模数齿轮采用开槽调质后齿轮各部位的硬度分布,由图可见,齿根部硬度明显得到提高。

三、钢的表面加热淬火

钢的表面加热淬火是将工件快速加热到淬火温度,然后迅速冷却,仅使工件表层获得淬火马氏体组织的热处理方法。表面加热淬火既强化了零件表面层,又保持了心部原有的良好的综合机械性能,从而达到这种表硬心韧的性能要求。

1、感应加热表面淬火

1.1 感应加热原理

感应加热表面淬火是利用电磁感应原理,在工件表面产生密度很高的感应电流,并使工件表面迅速加热至奥氏体状态,然后快速冷却获得马氏体组织的淬火方法。图 6 为感应加热表面淬火示意图。当感应圈中通过一定频率交流电时,在其内外将产生与电流变化频率相同的交变磁场。感应圈内工件在交变磁场作用下,工件内就会产生与感应圈频率相同而方向相反的感应电流。由于感应电流沿工件表面形成封闭回路,通常称为涡流。此涡流将电能变为热能,使工件加热。涡流在被加热工件中的分布由表面至心部呈现指数规律衰减。因此,涡流主要分布于工件表面,工件内部几乎没有电流通过。这种现象叫集肤效应。感应加热就是利用集肤效应,依靠电流热效应把工件表面迅速加热到淬火温度的。感应圈用纯铜管制做,内通

图 6 感应加热表面淬火示意图

冷却水。当工件表面在感应圈内加热到相变温度时，立即喷水或浸水冷却，实现表面淬火工艺。

感应加热电流透入工件表面的深度与感应电流的频率有关，如下式所示：

式中 δ ——感应电流透入深度 (mm)

f ——电流频率 (Hz)

可以看出，电流频率愈高，感应电流透入工件表面的深度愈浅。

1.2 感应加热分类

根据零件尺寸及硬化层深度的要求选择不同的电流频率，感应加热可分为四类，见表 3 说明。

表 3 感应加热分类

分 类	工作电流频率 (KHz)	特性及应用范围
高频加热	200~300	一般有效淬硬层 0.8~1.5mm，主要用于中小模数 ($m = 1.5\sim 8$) 及中小尺寸的轴类零件表面加热淬火
超音频加热	30~60	一般有效淬硬层 1.0~2.0mm，主要用于中小模数 ($m = 3\sim 6$) 齿轮、花键轴表面轮廓淬火和曲轴、凸轮轴等表面淬火
中频加热	1~8	一般有效淬硬层 2.0~8.0mm，主要用于较大尺寸的轴和大中模数齿轮等表面淬火
工频加热	50(Hz)	一般有效淬硬层 10~15mm，主要用于较大直径零件的穿透加热及大直径零件如轧辊、车轮等表面淬火

感应加热表面淬火通常采用喷射冷却法，冷却速度可通过调节液体压力、温度及喷射时间控制。采用冷却介质有水、聚乙烯醇合成淬火剂及油等。工件表面淬火后应进行低温回火 (150~200℃)，以降低残余应力和脆性，并保持表面高硬度和高耐磨性。对于大模数重载齿轮经感应加热表面淬火后，希望得到沿齿廓分布硬化层，如图 7 所示，硬化层分布在齿面、齿根及齿底，这样大大提高了齿部的接触疲劳强度、弯曲疲劳强度和冲击韧性。

图 7 齿廓型硬化层

为了保证工件表面淬火后的表面硬度和心部强度及韧性，一般选用中碳钢及中碳合金钢，其表面淬火前的原始组织应为调质或正火态。

根据工件表面加热热源的不同，钢的表面淬火有很多种，除了感应加热表面淬火外，还有火焰表面加热淬火、电接触表面加热淬火及激光表面加热淬火等。这里只介绍感应加热表面淬火。

2、表面淬火齿轮用钢的选用见表 1、表 2。

四、化学热处理

工件放在一定的化学介质中加热到一定温度，使其表面与介质相互作用，吸收其中某些化学元素的原子 (或离子)，并自表面向内部扩散的过程称为化学热处理。化学热处理包括渗碳、

渗氮、碳氮共渗等。化学热处理的结果是改变了金属表面的化学成分和性能。例如低碳钢经过表面渗碳淬火后，该钢种的工件表面就具有了普通高碳钢淬火后的高硬度、高耐磨的性能特征，而心部仍保留低碳钢淬火后良好的塑性、韧性的特征。显然这是单一的低碳钢或高碳钢所不能达到的。

1、钢的渗碳

1.1 钢的渗碳基本原理和气体渗碳工艺

1.1.1 钢的渗碳基本原理

在渗碳温度下(920℃)渗碳过程包括三个基本过程：
一是由介质（甲醇、煤油、异丙醇）分解出活性原子。如分解产生的一氧化碳和甲烷分解出活性碳原子：



二是活性碳原子被工件表面吸收。

三是被吸收碳原子向工件内部扩散。

渗碳过程由分解、吸收、扩散三过程组成，三个过程又是同时发生的，全部过程存在着复杂物理化学反应。

1.1.2 气体渗碳工艺

气体渗碳法是将工件放入密封的渗碳炉内，图 8 为气体渗碳法示意图，使工件在 920℃ 高温的渗碳气氛中进行渗碳。通入的有机物液体（甲醇、煤油、异丙醇）在高温下分解，产生活性碳原子，并被加热到奥氏体状态的工件表面吸收，而后向钢内部扩散。渗碳时最主要的工艺参数是加热温度和保温时间。加热温度愈高，渗碳速度就愈快，且扩散层的厚度也愈深。

图 8 气体渗碳法示意图

图 9 气体渗碳典型工艺

图 9 为气体渗碳典型工艺，从工艺中明显可见渗碳剂分解（含排气）、强渗（吸收）、扩散和炉冷到 850℃ 直接油冷淬火的全过程。

1.2 渗碳件质量要求

对渗碳件质量要求在国标 GB/T8539-2000 中已有明确规定，这里对几个主要方面再说明一下。

1.2.1 表面硬度和心部硬度

齿表面硬度是指成品齿轮工作齿高中间部位齿面硬度，对锥齿轮指齿顶部表面硬度。

轮齿的心部硬度是指齿宽中部齿根

30 σ 切线的法向上，深度为5倍硬化层深，但不少于1倍模数。这是一个推荐测量部位，为了便于可操作性，可按技术条件或供需双方协议的

图 10 齿心部硬度示意图 检查方法进行检

查。一般检测齿宽中部法截面上，在轮齿的中心线与齿根圆相交处的硬度，见图 10 示意图。表面硬度和心部硬度是工件耐磨性能的重要指标，也是材料抗接触疲劳和弯曲疲劳的一个特性。经渗碳淬火后表面硬度应达到 58~64HRC（大截面齿轮和齿轮轴一般 56~62HRC），心部硬度根据不同质量要求按规定控制，一般在 25~42HRC，MQ 级齿轮要求 25HRC 以上，ME 级齿轮要求 35HRC 以上。硬度一般采用里氏硬度计或洛氏硬度计作为检测工具。

1.2.2 渗碳层表面碳浓度和碳浓度梯度

渗碳零件表面碳浓度要求控制在 0.75~0.95%为宜，过低会使耐磨性下降，过高时脆性增大，强度不能满足要求。

碳浓度梯度反映了碳浓度沿渗层下降的指标，它间接地反映了渗层的硬度梯度。碳浓度下降得越平稳越好，以保证渗层与基体牢固结合，避免在使用过程中产生剥落现象。图 11 为相同渗碳层总深度（3 mm）三种碳浓度梯度状况。

图 11 相同渗碳层总深度（3 mm）三种碳浓度梯度

a) 好 b) 不好 c) 不好

1.2.3 有效硬化层深度（渗碳层深度）

有效硬化层深度取决于零件的工作条件和心部强度，是确定零件承载能力的重要参数。目前对有效硬化层深度我厂设计工艺处推荐采用 JB/T7516-94 的标准。有效硬化层深度是指零件渗碳淬火后，从零件表面到维氏硬度值为 550HV1 处的垂直距离。测定硬度所采用的试验力为 9.807N（1 kgf）。

1.3、零件渗碳后的热处理

工件渗碳的目的在于使表面获得高的硬度和耐磨性，因此渗碳后的工件，必须通过热处理使表面获得马氏体组织，渗碳后的热处理方法有三种：

1.3.1 直接淬火法 直接淬火法是将工件自渗碳温度炉冷到淬火温度后立即淬火，然后在 160~190℃进行低温回火。这种方法不需要重新加热淬火，因而减小了热处理变形，节省了时间和降低成本，但由于渗碳温度高，渗碳加热时间长，因而奥氏体晶粒粗大，淬火后残余奥氏体量较多，使工件性能下降，所以直接淬火法只适用于本质细晶粒钢或性能要求较低的工件。这是一般工厂经常采用工艺。

1.3.2 一次淬火法 一次淬火法是将工件自渗碳后以适当方式冷至室温，然后再重新加热淬火并低温回火。对于要求心部有较高强度和较好韧性的零件，可以细化晶粒。这是大型齿轮、齿轮轴等经常采用方法。

1.3.3 两次淬火法 两次淬火法是将工件自渗碳后冷至室温后再进行两次淬火。第一次淬火目的是细化心部晶粒，淬火温度较高，第二次淬火目的是细化表层晶粒，淬火温度较低，这种方法适宜用使用性能要求很高的工件，缺点是工艺复杂，生产周期长，工件容易变形，工厂应用较少。

对于零件有不允许渗碳硬化部位应在设计图样上标明，该部位可采用防渗涂料进行保护。

近几年来,我厂为适应宝钢进口设备齿轮箱的国产化要求,对热处理进行了相应技术改造,添置具有国内外先进水平的计算机过程控制的大型渗碳炉,由工业计算机、进口智能控温仪、进口智能碳控仪、氧探头等组成,炉温控制精度 $\leq\pm 3^{\circ}\text{C}$,炉温采用炉内主控,炉外辅控;碳浓度控制精度 $\leq\pm 0.05\%$;渗碳层深度偏差 $\leq 10\%$;渗碳硬化层深度范围 1~6mm。从而对炉内碳浓度、炉温、渗碳硬化层深度等实现精确控制,保证了产品渗碳质量。为减少盘形齿轮变形,从俄罗斯进口了淬火压床。目前我厂有 $\phi 3000\times 2000\text{mm}$ 、 $\phi 2000\times 2500\text{mm}$ 、 $\phi 1700\times 2000\text{mm}$ 、 $\phi 1200\times 2000\text{mm}$ 、 $\phi 900\times 1200\text{mm}$ 井式气体渗碳炉五台。

1.4、渗碳齿轮钢材的选用

1.4.1、渗碳齿轮钢材对淬透性的要求

如前所述,钢材的淬透性主要是保证不同大小齿轮的心部硬度,以满足接触疲劳强度和弯曲疲劳强度的要求;同时要求尽可能小的淬透性带宽度波动,以有利于齿轮热处理变形的控制。对低速重载齿轮来说应保证足够心部硬度,也就是保证心部强度,ME级齿轮要求心部硬度在 35HRC 以上。因此,对淬透性要求高的大尺寸工件,只有从选择钢材上找出路,即选用淬透性好的高、中合金渗碳钢来制造。例如:20CrMnTi 材料直径 $\phi 60\text{mm}$ 园棒,经淬火、回火后表面硬度 $\geq 30\text{HRC}$,中心部分硬度为 25HRC 左右。 $\phi 18\text{mm}$ 园棒经淬火、回火后,中心的硬度达 37HRC,因此 20CrMnTi 材料适用于制造模数不大于 12 的齿轮。

20CrNi2Mo 材料直径 $\phi 60\text{mm}$ 园棒,经淬火、回火后表面硬度 $\geq 35\text{HRC}$,1/2R 处 $\geq 30\text{HRC}$,中心部分硬度为 27HRC 左右。直径 $\phi 25\text{mm}$ 园棒经淬火、回火后表面硬度 $\geq 39\text{HRC}$,1/2R 处 $\geq 37\text{HRC}$,中心部分硬度为 36HRC 左右。

因此对要求高速(低速)重载和安全可靠运行的齿轮就选用 20CrNi2Mo 材料,对低速重载、大截面的齿轮,可选用淬透性更好的材料,如 17CrNiMo6(国产 17Cr2Ni2Mo)、18Cr2Ni4WA、18CrMnNiMoA、20Cr2Ni4A 等。

1.4.2、渗碳齿轮用钢

渗碳结果是改变了金属表面的化学成分和性能,使该钢种的工件表面就具有了普通高碳钢淬火后的高硬度、高耐磨的性能特征,而心部仍保留低碳钢淬火后良好的塑性、韧性的特征。因此渗碳齿轮用钢多选用低碳钢和低碳合金钢。表 4 为渗碳齿轮用钢。

表 4 渗碳齿轮用钢

齿轮种类 性能要求 钢号

起重,运输,冶金,采矿,化工等设备模数 12 以下普通减速机齿轮。 耐磨,承载能力较高。 20CrMo 20CrMnTi 20CrMnMo

冶金,化工,电站设备,船舶等的汽轮发动机,工业汽轮机,高度鼓风机,透平压缩机等齿轮。 运行速度高,周期长,安全可靠性高。 12CrNi3 20CrNi3 12Cr2Ni4 20CrNi2Mo

大型轧钢机减速器齿轮,大型皮带运输机传动轴齿轮,人字齿轮,大型锥齿轮,井下采煤机传动箱齿轮。 传递功率大,齿轮表面载荷高,耐冲击,齿轮尺寸大。 17CrNiMo6 20Cr2Ni4 18Cr2Ni4W 18CrMnNiMoA 20CrNi2Mo

2、钢的渗氮

渗氮是向钢的表面渗入氮原子的过程。其目的是提高表面硬度和耐磨性,并提高疲劳强度和耐蚀性。

2.1 渗氮原理及工艺

目前工业中应用最广泛的是气体渗氮法,它是利用氨气在加热时分解出活性氮原子,被钢吸收后在其表面形成渗氮层,同时向心部扩散。氨的分解反应如下:



渗氮在专用的气体渗氮炉或井式渗碳炉中进行,我厂气体渗氮炉尺寸为 $\phi 800\times 2500\text{mm}$ 和

φ1500×2000mm。渗氮前须将工件除油净化。入炉后先用氨气排除炉内空气。气体渗氮温度一般在 490~560℃ 范围内进行。

渗氮工件的加工工艺路线如下：

锻造-退火-粗加工-调质-半精加工-除应力回火-精加工-渗氮

2.2 渗氮处理特点

2.2.1 渗氮往往是工件加工工艺路线中最后一道工序，渗氮后的工件至多再进行精磨或研磨。为了保证渗氮工件心部具有良好的综合力学性能，在渗氮前有必要将工件进行调质处理。

2.2.2 钢在渗氮后，无需进行淬火便具有很高的表层硬度（≥550HV~900HV）及耐磨性，这是因为渗氮层形成了一层坚硬的氮化物所致。且渗氮层具有高的热硬性（即在 600~650℃ 仍有较高硬度）。但是渗氮层较浅（0.25~0.6 mm），渗氮处理后一般不再加工，若需精磨则余量在直径方向上不应超过 0.10~0.15mm。否则会磨掉渗氮层而使硬度大大下降。

2.2.3 渗氮后，显著提高钢的疲劳强度。这是因为渗氮层内具有较大的残余压应力，它能部分地抵消在疲劳载荷下产生的拉应力，延缓了疲劳破坏过程。

2.2.4 渗氮后钢具有很高的耐蚀能力，这是由于渗氮层表面是由连续分布的、致密的氮化物所组成缘故。

2.2.5 渗氮处理温度低，故工件变形很小。为了减小工件在渗氮处理中的变形，在切削加工后，一般须进行消除应力高温回火，

渗氮最大缺点是周期长，生产率低。气体渗氮时，要达到 0.5mm 的渗氮层，渗氮速度约为每小时 10μm，如采用离子渗氮，其速度比气体渗氮速度快近三分之一，液体渗氮时，速度又更快些。

综上所述，因此渗氮广泛应用于各种高速传动精密齿轮、高精度机床主轴（如镗杆、磨床主轴），以及要求变形很小，具有一定抗热、抗蚀能力的耐磨零件。

2.3、渗氮齿轮钢材的选用

2.3.1、渗氮齿轮钢材对淬透性的要求

对氮化用钢的材料选用含 0.15~0.45% C 普通合金结构钢，一般不宜选用碳钢，因为碳是不利于渗氮元素，它降低氮的扩散系数，使渗氮速度减慢。例如 45 钢，氮化后硬度不高（≥300HV1），但氮化后可大大提高抗腐蚀性。大锻件渗氮一般常采用 40Cr，35CrMo，42CrMo 等钢种。对于在循环弯曲载荷或接触应力较大的大锻件，可采用 18Cr2Ni4WA、18CrMnNiMoA、20Cr2Ni4A 等钢种。38CrMoAl 钢是典型的渗氮钢，渗氮速度快，渗氮后表面硬度高，耐磨性及抗胶合性好。但是基体的强韧性不好，φ60mm 钢件淬火后，表面与心部的硬度差 60HB 左右，所以不宜用于大锻件的渗氮；同样，在生产中发现，渗氮钢 38CrMoAl 作为制造大直径的渗氮齿轮用钢并不理想，因该钢材只有在直径小于 50mm 时才能完全淬透，钢中含有较多的铝会造成柱状断口，非金属夹杂物多，在轧材中产生细微裂纹和发裂，在锻件中针状小气孔增多。在热加工时，容易过热引起脆性断裂，强度下降。在热处理时易脱碳，并且对化学成分波动十分敏感，往往造成淬硬性和淬透性不够，水淬时易产生裂纹，渗氮中易产生脆性等缺点。因此 38CrMoAl 钢不大适用于制造较大直径的齿轮。只能根据工况条件适当选用。

氮化齿轮的心部硬度直接影响渗氮层的支承能力。试验表明，当心部硬度由 240~260HB 提高到 310~330HB 时，接触疲劳强度可提高 30%。不仅如此，心部硬度的高低还通过影响渗层的表面硬度来影响齿轮的承载能力，因此，美国的有关技术文件规定，为了获得足够的表面硬度，要求心部硬度不能低于 300HB。根据目前渗氮工艺所能达到的最大深度范围和工业实践经验，渗氮工艺适用于以下参数齿轮：对渗氮齿轮应用的模数范围，比较公认的模数在 2~10mm；载荷系数 $K \leq 3.0$ (KN/mm²)；线速度 $V \leq 120$ m/s；精度 6 级以下。

同时要指出的是根据目前的应用统计表明，渗碳齿轮精度下降 2~3 级，而渗氮齿轮精度下

降 1~2 级。

2.3.2、渗氮齿轮用钢

渗氮齿轮用钢见表 5

式		表 5 渗氮齿轮用钢	
齿轮用途	性能要求	推荐钢号	
一般用途	表面耐磨	20Cr 40Cr	20CrMnTi
在冲击载荷下工作	表面耐磨，心部韧性好	30CrNi3 18CrNiWA	35CrMo 18Cr2Ni4WA
在重载荷下工作	表面耐磨，心部强度高	30CrMnSi	35CrMoV 42CrMo 25Cr2MoV
在重载荷及冲击下工作	表面耐磨，心部强韧性高	40CrNiMoA	30CrNiMoA 30CrNi2Mo
精密传动	表面耐磨，变形小	38CrMoAlA	30CrMoAl

2.3.3、齿轮钢材渗氮层硬度参考范围

钢材 原始状态 渗氮表面硬度 (HV5)

预备热处理	硬度 (HBS)	
45 正火	250~400	
20CrMnTi 正火	180~200	650~800
调质	200~220	600~800
40CrMo 调质	29~32HRC	550~700
40CrNiMo 调质	26~27HRC	450~650
40CrMnMo 调质	200~250	550~700
40Cr 正火	200~220	500~700
调质	210~240	500~650
37SiMn2MoV 调质	250~290	48~52HRC (超声测定)
25Cr2MoV 调质	270~290	700~850
20Cr2Ni4A 调质	25~32HRC	550~650
18Cr2Ni4WA 调质	27HRC	600~800
35CrMoV 调质	250~320	550~700
30CrMoAl 正火	207~217	850~1050
调质	217~223	800~900
38CrMoAlA 调质	260	950~1200

我国热处理在工艺水平和处理的产品质量及寿命方面与国际上的先进国家相比，差距比较悬殊。最主要的原因在于热处理设备较落后，检测手段简陋，工艺管理薄弱。因此在逐步进行技术改造和改进设备的同时，加快技术引进消化工作和依靠各种技术上的创新，使我国热处理质量水平有明显提高。

五、热处理技术展望

当前,可控气氛热处理、真空热处理、感应热处理和表面改性等少无氧化技术成为发展主流;清洁、节能和环保型热处理技术成为可持续发展的热点;计算机和 IT 技术使传统热处理技术现代化;新材料研究开发为热处理技术提供了更加广阔发展空间;先进的热处理制造技术正在走向定量化、智能化和精确控制的新水平。