

回顾:

工程构件用钢

碳素工程构件用钢---Q195 Q275

低合金高强度结构钢--Q295 Q460 16Mn (Q345)

微合金化钢-- $< 0.1\%C$, 钛、铌、钒, 控制轧制和
控制冷却--细化晶粒强化和沉淀强化
450-525Mpa

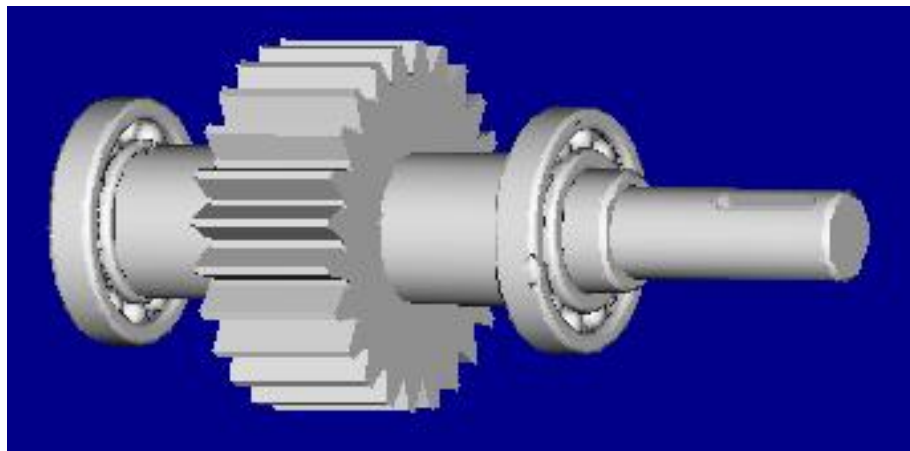
低碳贝氏体型钢--降低钢的含碳量、
控制轧制和控制冷却、相变强化,
Mo、B 490-780MPa

针状铁素体型钢-- $< 0.06\% C$ 、Mn-Mo-Nb 470MPa
连续的应力--应变曲线

铁素体--马氏体双相钢-- $0.04\%-0.10\%C$,
Mn、Si、Mo、Cr

第3章 机器零件用结构钢

第一部分



教学要求

■ 基本要求：

了解机器零件用钢的强韧化机制；

渗碳钢、调质零件、弹簧、滚动轴承、低碳马氏体钢的服役条件及对钢的基本性能要求，化学成分特点和热处理特点；

常用渗碳钢、调质钢、弹簧钢及滚动轴承钢钢种。

■ 重点与难点：机器零件用钢的强韧化机制及各类钢的化学成分和热处理特点。

主要内容

➤ 渗碳钢

➤ 调质钢

➤ 弹簧钢

➤ 滚动轴承钢

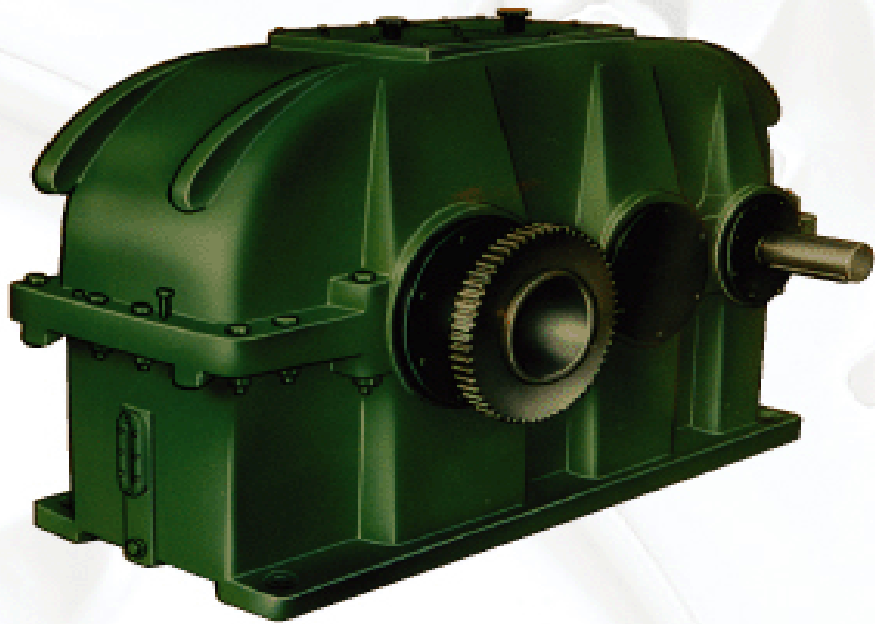
➤ 马氏体型结构钢

➤ 特殊用途钢

3.0 引言

一、机器零件用钢的主要用途:

- 机器零件用钢也称机械制造结构用钢，机器零件用结构钢有：优质碳素结构钢和合金结构钢。是指用于制造各种机械零件所用的钢种，故此得名。
- 如各种齿轮零件、轴（杆）类零件、弹簧、轴承及高强度结构件等。广泛应用在汽车、拖拉机、机床、工程机械、电站设备、飞机及火箭等装置上。



变速箱



后桥



前桥



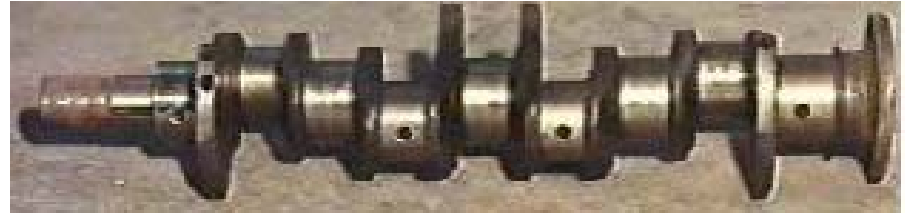
变速齿轮



拨叉



齿轮



曲轴



汽车万向节



连杆



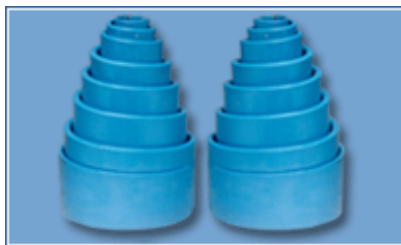
弹簧



拉力弹簧



离合器弹簧



板弹簧



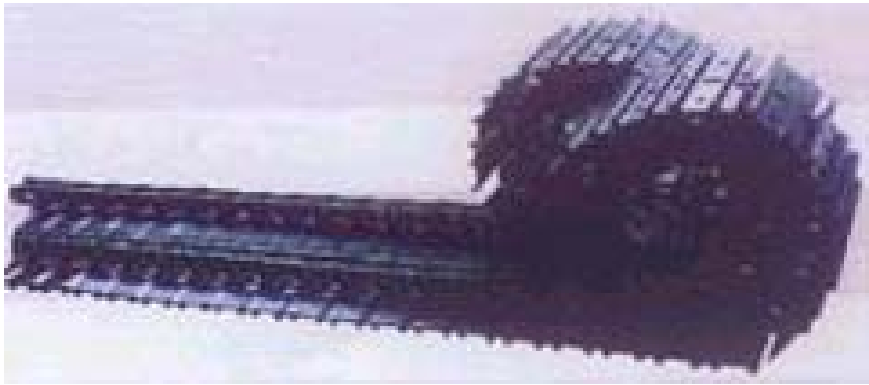
蝶形弹簧



滚珠



滚珠轴承



履带



铁轨分道叉



破碎机颚板



挖掘机斗齿

二、机器零件用钢的服役条件

- 主要是承受拉伸、压缩、扭转、剪切、弯曲、冲击、疲劳、摩擦等力的作用，或者是它们中的多种载荷的交互作用。服役环境是大气、水和润滑油，温度在 -50°C - 100°C 范围之内。
- 机器零件要求结构紧凑、运转快速准确以及零件间有合适的公差配合等。由此便决定机器零件用钢在性能上要求与工程构件用钢有所不同。

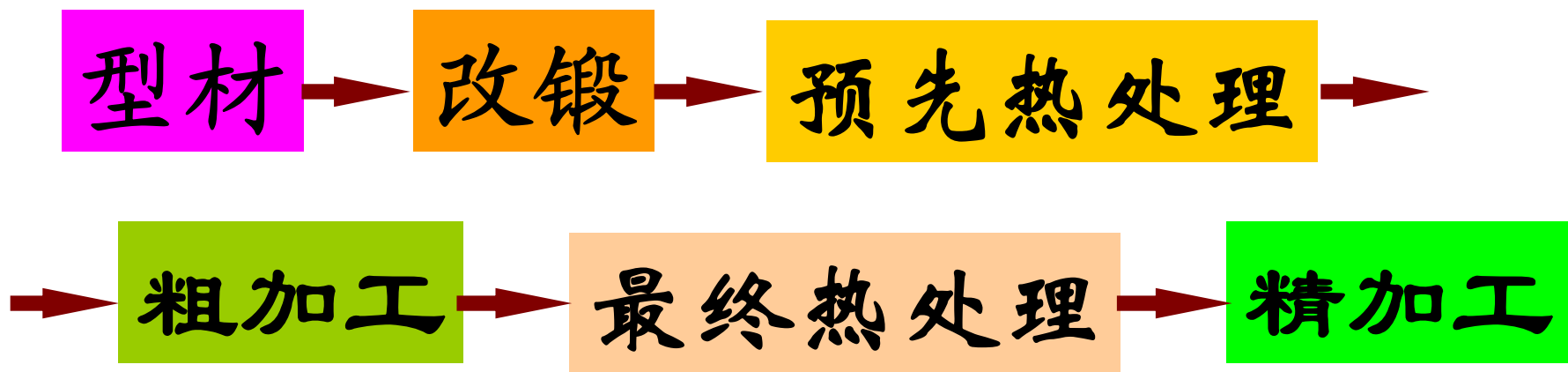
三、机器零件用钢对力学性能要求：

- 要求强度和韧性以保证机器零件体积小、结构紧凑及安全性好，
- 要求有良好的疲劳性能与耐磨性等。

因此，对机器零件用钢必须进行**热处理**强化以充分发挥钢材的性能潜力，所以机器零件用钢的使用状态通常为**淬火加回火态**，即强化态。

四、机器零件对工艺性能的要求：

- 主要是便于制造加工。通常机器零件的制造工艺流程为：



- 其中以切削加工性能和热处理工艺性能为机器零件用钢的主要工艺性能。

-
- 对钢材的其它工艺性能（如冶炼性能、浇注性能、可锻性能等）也有要求，但一般问题不大。

五、性能要求：

机器零件用钢通常以力学性能为主，工艺性能为辅。

3.1 渗碳钢

一、渗碳钢的服役条件

- 渗碳钢零件，通常只要求表面强化，心部具有一定的强韧性配合即可。表面高硬度、高耐磨性的获得通常采用渗碳处理，再经淬火和低温回火，因此称这类钢为渗碳钢，包括碳素渗碳钢、合金渗碳钢。
- 碳素渗碳钢的缺点：淬透性较低，强度较低，渗碳过程中晶粒粗化严重等缺陷，已不能满足高速旋转的机械零件，如汽车、拖拉机上的变速齿轮，内燃机上的变速齿轮、活塞销等对力学性能的要求。通过加入合金元素而发展合金渗碳钢，具有更高的性能。

二、渗碳钢的化学成分特点

- 低碳，一般在0.12%-0.25%。主要目的是为了**保证心部有良好的韧性**。
- 加入合金元素Cr、Mn、Ni、Si、B等以提高**淬透性**。

一方面提高钢材的**淬透性**，提高机件的**强度和韧性**；

另一方面利用Cr在渗碳后于表层形成**碳化物**，提高**硬度和耐磨性**。Ni对渗碳层和心部的**韧性**非常有利。

□ 加入少量阻碍奥氏体晶粒长大的合金元素。由于通常的渗碳温度高达930℃左右，对于用Mn、Si脱氧的钢，奥氏体晶粒会发生急剧长大。

为了防止奥氏体晶粒的长大，常加入少量强碳化物形成元素V、Ti、Mo、W等阻止奥氏体的晶粒长大；

同时还可增加渗碳层硬度，进一步提高耐磨性。

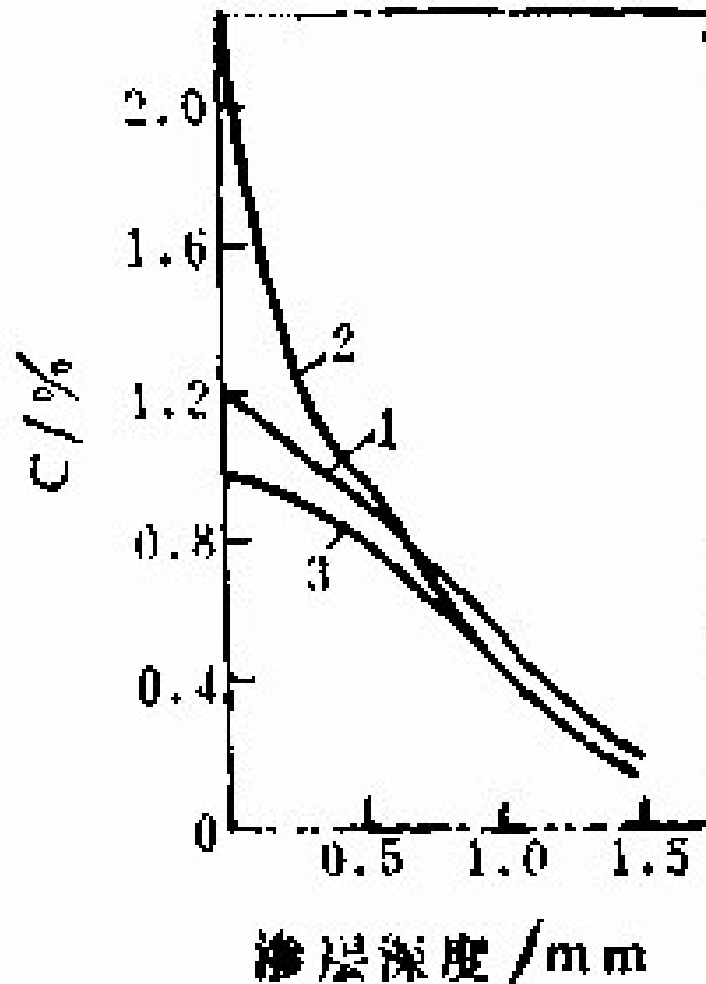


图3-1 沿钢的渗碳层深度，碳的浓度分布

1-碳钢 2-以碳化物元素合金化的钢 3-以非碳化物元素合金化的钢

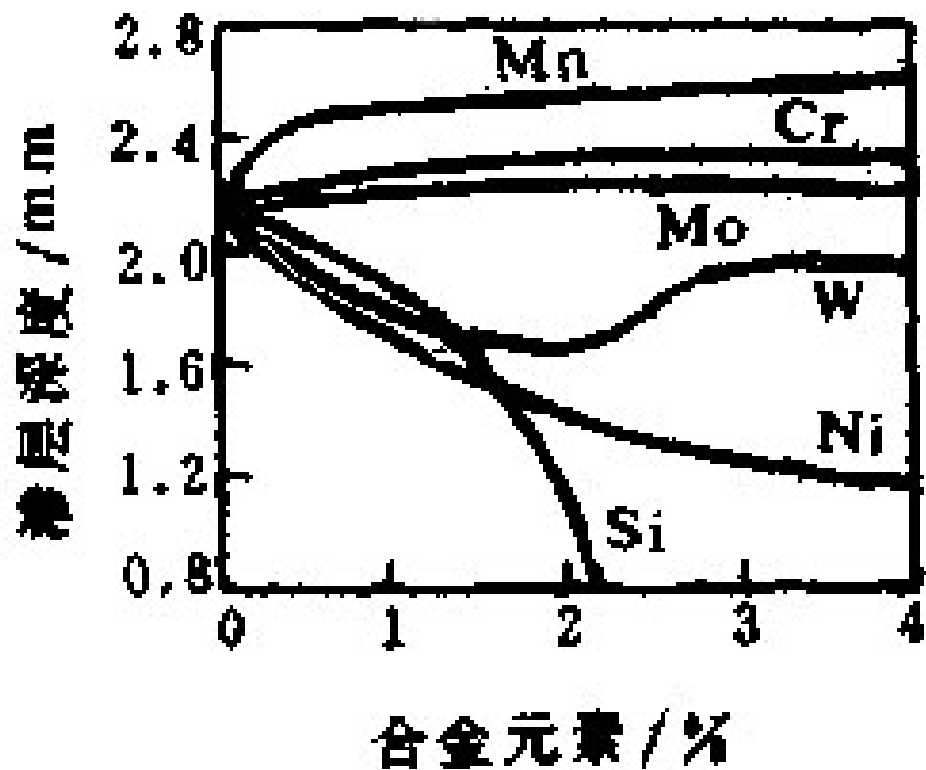


图3-2 925°C渗碳时，合金元素对渗碳层深度的影响

三、渗碳钢的热处理特点

- 1. 预先热处理：渗碳钢零件，在机械加工前的预先热处理通常分两步进行。

第一步：正火

第二步：

退火（对P型钢）

高温回火（对M型钢）

正火的目的是细化晶粒，减少组织中的带状程度并调整硬度，便于机械加工。经过正火后的钢材具有等轴状晶粒。

珠光体型钢通常用 800°C 左右的一次退火代替正火，可得到相同的效果，既细化晶粒又改善切削加工性能；

马氏体型钢，则必须在正火之后，再在 $\text{Ac}1$ 以下温度进行高温回火，以获得回火索氏体组织，这样可使马氏体型钢的硬度由 $380\text{--}550\text{HB}$ 降低到 $207\text{--}240\text{HB}$ ，以便顺利地进行切削加工。

□ 2. 渗碳：在机械加工到只留有磨削余量时，进行渗碳处理。

900~930℃保温十几个小时。

□ 3. 最终热处理：淬火和低温回火。

□ 组织：

零件的渗碳表面：高碳回火马氏体加细小的碳化物，硬度（60-62HRC），耐磨性高。

零件的非渗碳表面和基体部分（心部）：

低碳回火马氏体—淬透性高的钢种；

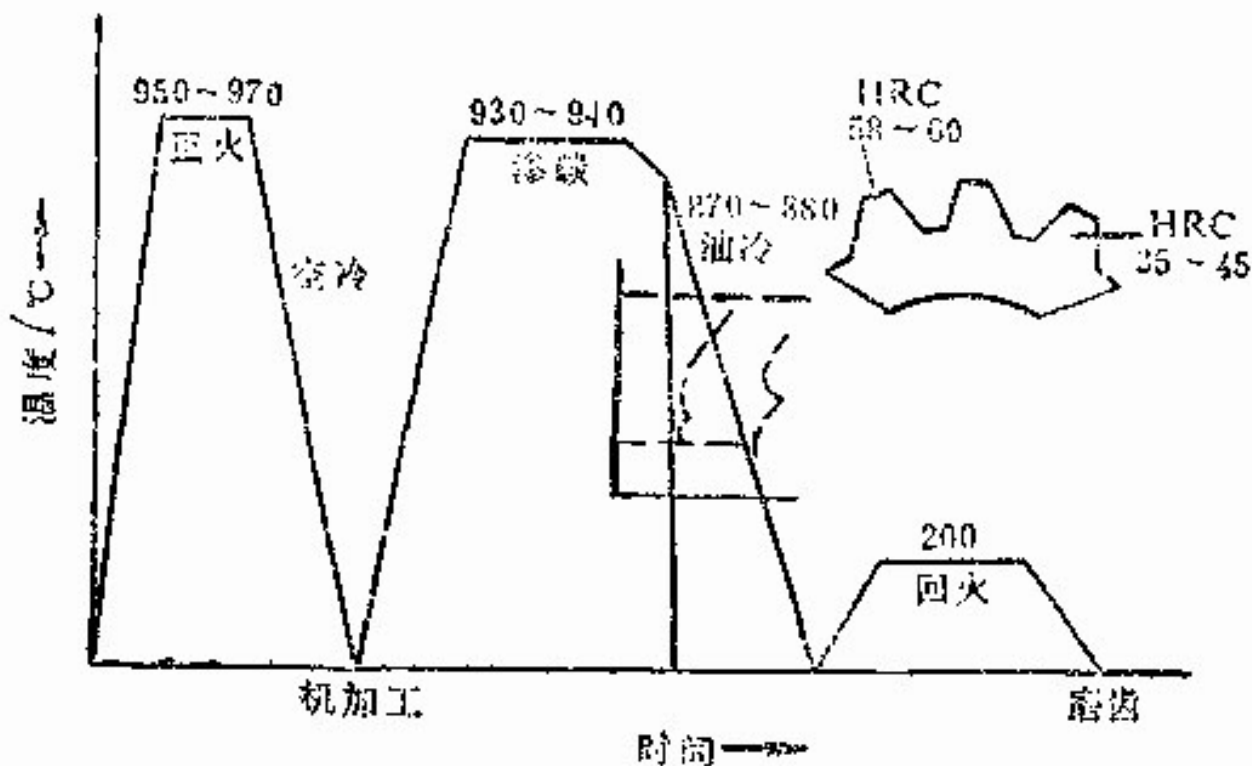
低碳回火马氏体+贝氏体（40-48HRC）—淬透性中等的钢种；

低碳回火屈氏体（25-40HRC）—淬透性小的钢种。

这些组织使基体具有更好的强硬度与韧塑性的配合，心部的冲击韧性一般都高于 700kJ/m^2 。

渗碳钢渗碳后的热处理工艺（最终热处理）

1) 渗碳后直接淬火，再低温回火。



采用这种工艺的零件通常只要求表面高硬度和耐磨性，而对基体性能要求不高。主要用于渗碳后不容易过热的钢种。

图3-3 20CrMnTi钢齿轮的热处理规范

2) 渗碳后先进行空冷（即正火处理）使组织细化，而后再按渗碳后的表面成分进行淬火并低温回火。当要求表面高硬度、高耐磨性，同时对基体性能有较高要求时，可采用这种工艺。主要用于渗碳后容易过热的钢种，如15、20、20Cr、20Mn2等。

3) 渗碳空冷后，进行两次淬火。当对零件表面和基体性能的要求都很严格时，可用这种工艺。

第一次按钢的基体成分加热淬火，加热温度较高（870℃左右），目的是细化心部组织并消除表面渗碳层中的网状渗碳体；

第二次按高碳钢的成分（表面）进行淬火，目的是使表面获得细小的马氏体加粒状碳化物组织，以满足表面高性能的要求；

最后进行低温回火起消除应力、稳定组织和稳定尺寸的作用。

这类热处理工艺主要用于航空发动机齿轮的热处理。



航空发动机齿轮(可达GB10095-88 4级)

四、典型渗碳钢及其应用

□ 渗碳钢按淬透性的高低可分为

(1) 低淬透性渗碳钢:

15、20、20Cr、20Mn2等

(2) 中淬透性渗碳钢:

20CrMnTi、20Mn2TiB、20MnVB等。

(3) 高淬透性渗碳钢:

12Cr2Ni4A、15CrMn2SiMo、
18Cr2Ni4WA、20Cr2Ni4A等。

+Mn

+MnV

+CrMnTi

渗碳后800℃
200℃回火后
性能 σ_b - σ_s - δ
 α_k

20Mn-500-300-15
淬水及淬油临界直径
20Mn2-800-600-10
淬油临界直径20mm
特点：晶粒易长大

+CrMn

+CrMo

20MnV-1000-850-10-45-70
淬油临界直径25~30mm
20CrMnTi-1000-850-10-45-70
淬油临界直径25~30mm

30Cr + CrMnMo 300-9-45-80

碳素钢

+Cr

15CrMo、20CrMo
1000 800 12-15-50-80

+CrNi

20CrMnMo-1100-900-15-50-80
淬油临界直径25~30mm
+CrNiMo
+CrNiW

15-500-300-15
淬水临界直径50mm

20Cr-850-550-10-45-80
淬油临界直径15~20mm

20-550-800-600-10-45-80
淬水临界直径15~20mm
特点：淬透性大，切削性能

20CrNi-800-600-10-45-80
20CrNi2-800-600-10-45-80
20CrNi3-950-750-10-45-80
20Cr2Ni4A-1200-1100-10-45-100

18Cr2Ni4WA-1200-850-10-45-100
淬油临界直径90~100mm
特点：淬透性高，可以空冷淬火，渗碳层残余奥氏体多，无回火脆性

特点：有回火脆性，表层残余奥氏体多

□ 低淬透性渗碳钢

抗拉强度通常为 $\sigma_b=800-1000\text{MN/m}^2$ 。

典型钢种是15、20、20Cr、20Mn2等。

这类钢的淬透性低，通常只用于制造受冲击载荷较小的，且对于心部要求不高的小型渗碳件，如小齿轮、活塞销、套筒、链条等。

□ 中淬透性渗碳钢

抗拉强度通常为 $\sigma_b=1000-1200\text{MN/m}^2$ 。

典型钢种是20CrMnTi、20Mn2TiB、20MnVB等。

20CrMnTi钢有良好的机械性能和工艺性能。淬透性较高，由于含有Ti，其过热敏感性小。

20CrMnTi钢齿轮可在渗碳后预冷到875℃直接淬火。是为了减少淬火变形；同时在预冷过程中渗碳层中析出一些二次渗碳体（合金渗碳体），使得淬火后的渗碳层中的残余奥氏体的数量减少。

大量用于制造承受高速、中载并要求抗冲击和耐磨损的零件，特别是汽车、拖拉机上的重要齿轮及离合器轴等。



离合器片淬火

20Mn2TiB、20MnVB是为节约Cr而发展的代用钢，它们的缺点是淬透性不够稳定，热处理变形稍大且缺乏规律。

□ 高淬透性渗碳钢

抗拉强度通常为 $\sigma_b > 1200\text{MN/m}^2$ 。

典型钢种是12Cr2Ni4A、15CrMn2SiMo、18Cr2Ni4WA、20Cr2Ni4A等。

这类钢由于含有较多的Cr和Ni等合金元素，渗碳层后表层的C含量又很高，这样就导致了马氏体转变温度的大幅度下降。若渗碳后直接淬火，渗碳层中将保留大量的残余奥氏体，使表面硬度下降，因此必须设法减少残余奥氏体的数量。

由于这类钢含有较多的Ni，使得钢具有很好的韧性，特别是低温冲击韧性，因此，主要用于制造大截面、高载荷的重要齿轮和耐磨件，如飞机、坦克中的重要齿轮及曲轴等。

为了减少残余奥氏体的数量，通常可以采用下面的三种方法：

第一种方法：是淬火后进行冷处理

($-60 \sim -100^{\circ}\text{C}$)，使残余奥氏体继续转变为马氏体。

第二种方法

渗碳及正火后进行**一次高温回火**（600-620℃），使碳化物从马氏体和残余奥氏体中进一步析出（高淬透性钢在正火时就可淬火形成马氏体）；

随后再**加热到较低温度**（ $A_{c1}+30-50^{\circ}\text{C}$ ），**淬火**时，这些碳化物不再溶入奥氏体中，故减少了奥氏体中碳及合金元素含量，使马氏体转变温度有所升高，淬火后残余奥氏体数量就自然减少了。

最后再进行**低温回火**，以消除内应力并提高渗层的强度和韧性。若将上述两种减少奥氏体的方法同时采用，效果更好。

在渗碳后进行喷丸强化，也可以有效地使渗层中的残余奥氏体转变为马氏体。

□ 渗碳钢还可以用来制造轴承。



本溪钢铁集团1500热轧线主减速机一轴和二轴用
轴承套圈和滚子选取了渗碳钢G20Cr2Ni4A

3.2 调质钢

一、调质钢的工作条件及对性能的要求

- 经过调质处理使用的结构钢称为调质钢。机床主轴；汽车、拖拉机的后桥、半轮；柴油发动机舱轴、连杆；高强度螺栓等。在多种应力负荷下工作的，受力情况比较复杂。

要求具有比较全面的机械性能——很高的强度，良好的塑性和韧性，即良好的综合机械性能。

调质钢经调质处理后具有较高的 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_{-1} 、 ψ 、 α_k 、 K_{ic} 等，脆性转折温度也很低，满足使用性能的要求。

原因：调质处理后的组织为回火索氏体，这种组织状态有以下几个特点：

-
- (1) 在铁素体基体上均匀分布的粒状碳化物起弥散强化作用，溶于铁素体中的合金元素起固溶强化作用，从而保证钢有较高的屈服强度和疲劳强度。
 - (2) 组织均匀性好，减少了裂纹在局部薄弱地区形成的可能性，可以保证有良好的塑性和韧性。
 - (3) 作为基体组织的铁素体是从淬火马氏体转变而成的，晶粒细小，使钢的冷脆倾向性大大减小。

调质钢的组织

- 淬火和高温回火后的金相组织是回火索氏体。

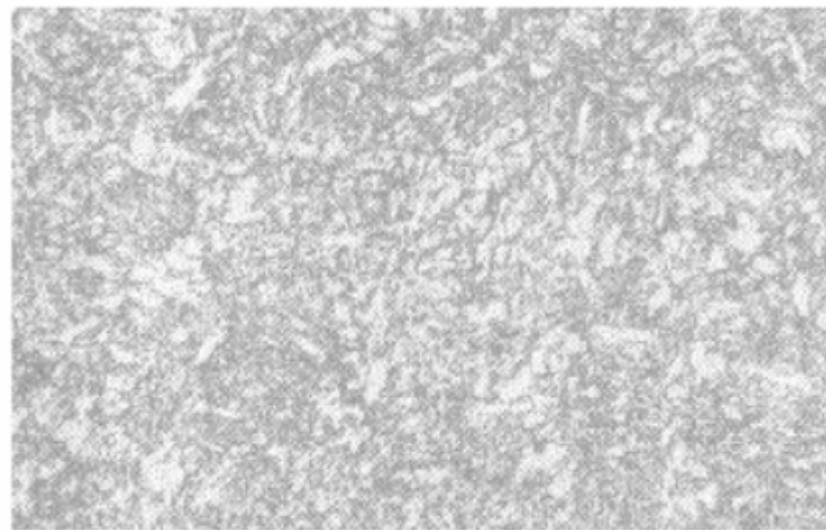
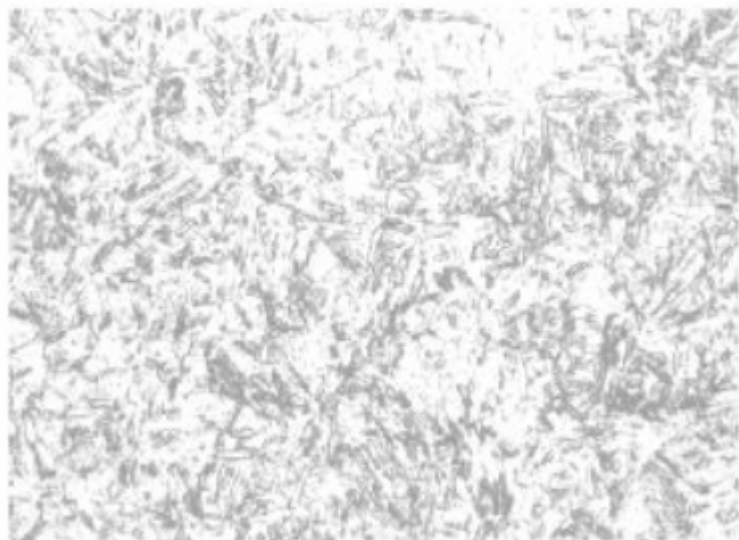


图3-4 45钢淬火马氏体组织

图3-5 45钢调质回火索氏体组织

二、调质钢的化学成分特点

- ①. **中碳**，碳含量一般在**0.3%-0.5%**，属于中碳。钢中的碳可保证有足够大的碳化物体积分数以获得高的强度。**碳含量过低时，淬硬性不够；碳含量过高则韧性下降。**
- ② **主加合金元素：提高淬透性。**

合金元素	Si	Mn	Cr	Ni
含量范围 (wt%)	0.6-1.4	0.8-1.8	0.8-1.7	1.0-4.5

□ ③辅加合金元素:

合金元素	Mo	V	W	Ti	Al	B
Min. (wt%)	0.1	0.05	0.6	0.05	0.5	<0.004
Max.	0.5	0.2	1.2	0.1	1.2	

阻碍碳化物在高温回火时的聚集长大，保持钢的**高硬度**；同时还阻碍 α 相的再结晶，保持**细小**的晶块结构，也能保持足够高的强度。

□碳素调质钢的缺点：

对于要求高水平的综合机械性能的零件，如连杆、高强螺栓、飞机发动机轴等，要求整个截面都有较高的强韧性；

碳素调质钢淬透性低，热处理变形大等缺点限制了它在这些重要机件上的应用。

加入合金元素可以提高淬透性，但也带来了一些问题，如高强钢的冲击韧性问题，高温回火脆性问题等。合金调质钢是在碳素调质钢的基础上发展起来的。



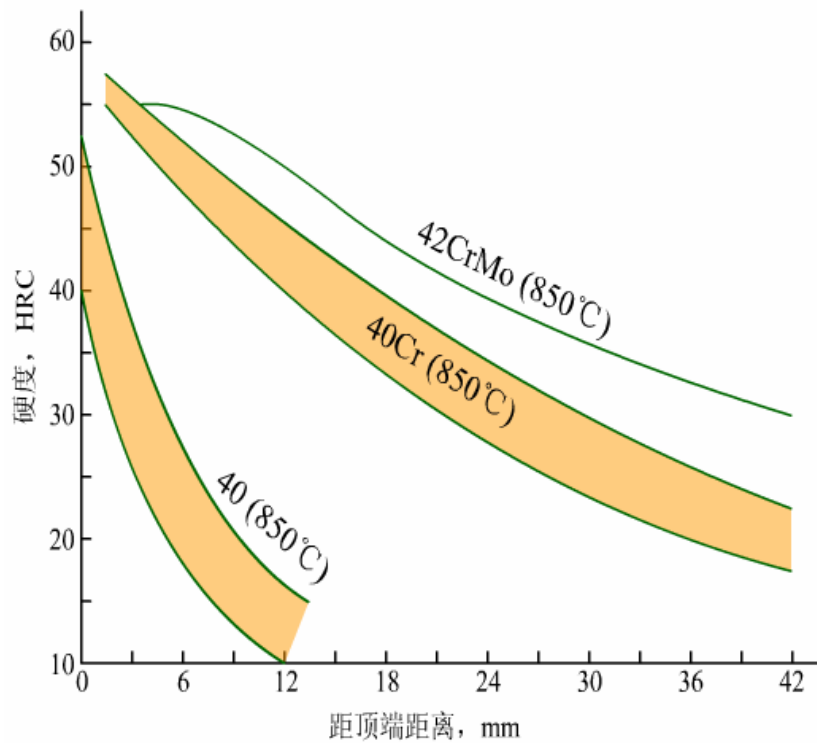


图3-6 典型的钢种40、40Cr、42CrMo的淬透性曲线
(括号内是淬火加热温度)

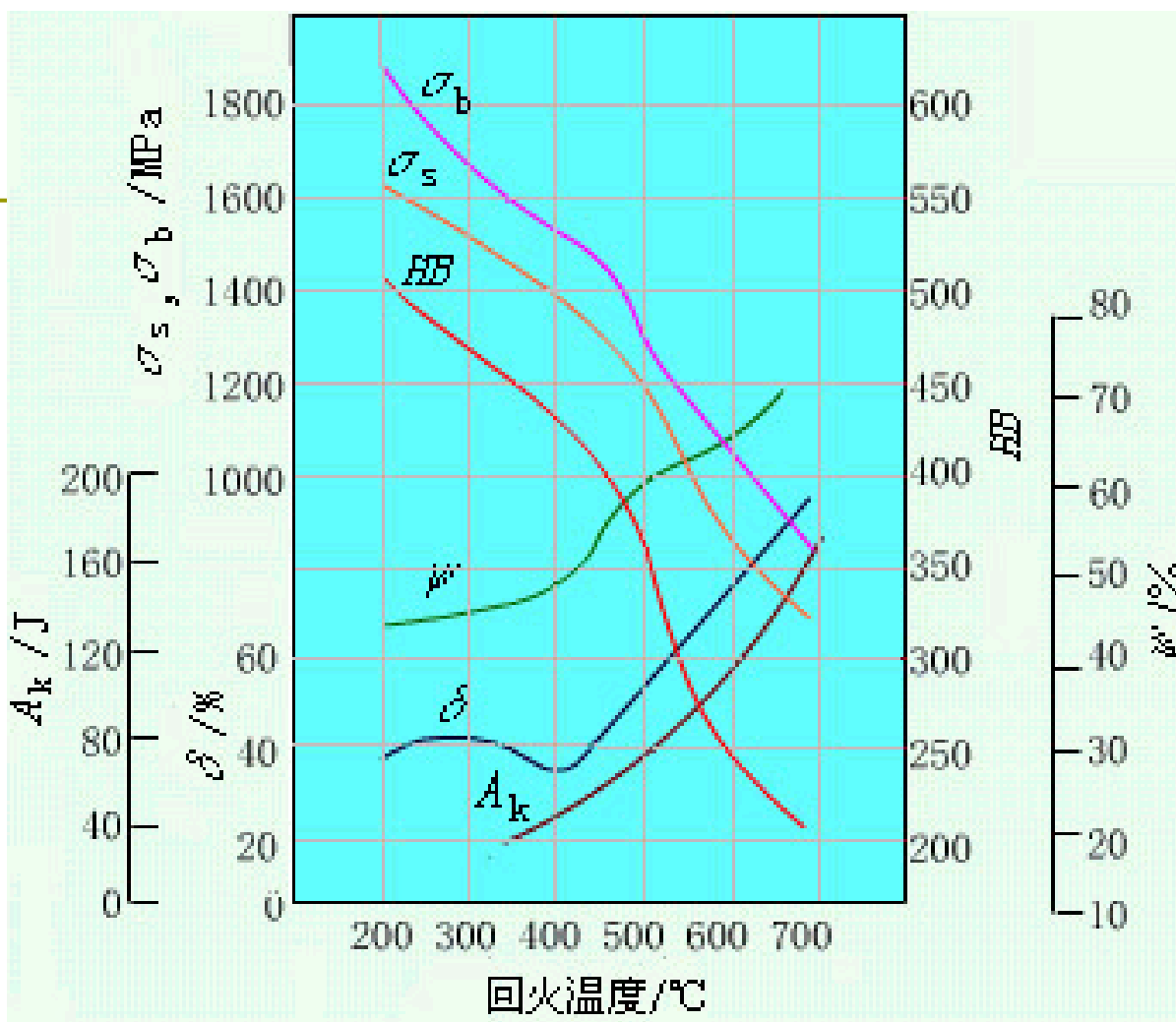
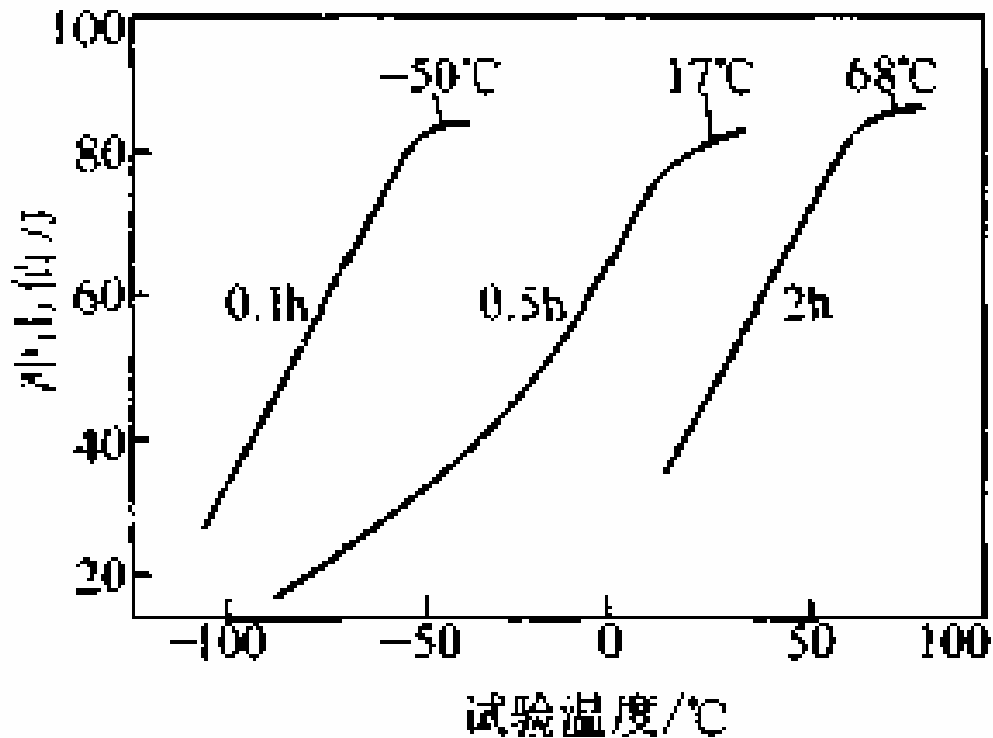


图3-7 40Cr钢经不同温度回火后的机械性能
(直径D = 12mm, 油淬)

④加入合金元素防止第二类回火脆性

第二类回火脆性：在 350°C - 600°C 范围等温回火保持时间愈长，不管回火后冷却快慢，其在室温的冲击韧性愈恶化，韧-脆转化温度愈高。

若将已经回火脆化的钢再在 650°C 保温后快冷，则钢的脆化倾向就可消除，故这类回火脆性又称为**可逆回火脆性**。



$w(\text{C})=0.33\%$ 、 $w(\text{Mn})=0.56\%$ 、
 $w(\text{Ni})=2.92\%$ 、 $w(\text{Cr})=0.87\%$

图3-8 33CrNi3钢经850°C淬火650°C回火1h水冷，然后在500°C保温不同时间的系列冲击曲线。

原因：钢中的杂质元素磷、锡、锑、砷等，在450-550℃范围缓慢冷却或保温时间过长，沿原奥氏体晶界的平衡偏聚引起晶界脆化，是产生高温回火脆性的直接原因。它们的含量超过十万分之几，就可能使钢产生高温回火脆化倾向。特别是在450-550℃范围回火的钢，对此尤为敏感。

合金元素的作用：

铬、锰、镍、硅等是强烈促进钢的高温回火脆化倾向的，碳素结构钢对高温回火脆性是不敏感的。

合金元素钼、钨、钛可减轻合金调质钢对高温回火脆性的敏感性，稀土元素能和杂质元素形成稳定的化合物，如LaP、LaSn、CeP、CeSb等金属间化合物，也可大大降低甚至消除钢的高温回火脆性。

碳素钢 550°C 回火
力学性能 σ_b - σ_s - δ - ψ

碳素钢

35-700-500-18-60
淬水临界直径 8-10mm

40-800-600-20-50
淬水临界直径 10-12mm

45-900-700-20-45
淬水临界直径 10-12mm

40Cr-1000-800-10-45-11
淬油临界直径 30mm, $T_C = -60^\circ\text{C}$

30CrNi3Mo-1300-1100-20-60-120
淬油临界直径 100mm, $T_C = -140^\circ\text{C}$

+Mn

40Mn-900-750-20-50
淬水临界直径 12-15mm
特点: 晶粒易于长大, 无回火脆性

40Mn2-800-600-10-47-60
淬油临界直径 20mm
特点: 晶粒易长大, 无回火脆性

+Cr

40Cr-1000-800-10-45-11
淬油临界直径 30mm, $T_C = -60^\circ\text{C}$

40CrMo-1100-950-10-45-11
淬油临界直径 35mm, $T_C = -60^\circ\text{C}$

40CrNi-1000-800-10-45-11
淬油临界直径 30mm, $T_C = -60^\circ\text{C}$

+MnSi

35SiMn、42SiMn-900-750-10-47-60
淬水临界直径 12-15mm

+CrMn

35CrMn-1000-850-10-45-11
淬油临界直径 30mm, $T_C = -60^\circ\text{C}$

+CrMo

35CrMo-1000-850-10-45-11
淬油临界直径 30mm, $T_C = -100^\circ\text{C}$

+CrNi

40CrNiMo-1000-900-20-60-120
淬油临界直径 70mm, $T_C = -120^\circ\text{C}$

+CrMnSi

30CrMnSi-1200-1000-20-50-100
淬油临界直径 30mm, $T_C = -60^\circ\text{C}$

+CrMnMo

40CrMnMo-1000-800-10-45-11
淬油临界直径 60mm, $T_C = -100^\circ\text{C}$

+CrNiMo
+CrNiW

30CrNi3Mo-1300-1100-20-60-120
淬油临界直径 100mm, $T_C = -140^\circ\text{C}$

特点: 属于马氏体类钢, 淬透性高, 无回火脆性, 但价格较高

特点: 淬透性高, 综合力学性能好

三、调质钢的热处理特点

- 调质钢零件，在机械加工前的**预先热处理**和渗碳钢类似。
- 在机械加工后的**最终热处理**，为调质处理，即**淬火+高温回火**，以获得所需的组织（回火索氏体）和性能（最佳的综合性能）。
- 调质钢调质后的屈服强度约为 $800\text{MN}/\text{m}^2$ ，冲击韧性在 $80\text{J}/\text{cm}^2$ 以上。

调质钢零件，除要求高的强、韧、塑性配合外，往往还要求某些部位（如轴类零件的轴颈或花键部分）有良好的耐磨性。为此，调质处理后，一般还要在局部部位进行高频感应表面淬火。



□ 氮化钢

对于要求耐磨性良好的零件，通常选用含有Cr、Mo、Al的调质钢，在调质处理后，如进行氮化处理，可使工件表面形成Cr、Mo、Al的氮化物，使硬度、耐磨性都显著提高，故这类钢又称氮化钢。氮化是用氮饱和钢的表面的工艺过程。氮化工艺一般在600℃以下进行。

结构钢氮化的**目的**在于提高其硬度、耐磨性、热稳定性和耐蚀性。氮化前，零件应经过**淬火+高温回火**。

氮化钢的硬度和耐磨性主要取决于合金氮化物（ MoN 、 AlN ）的数量、大小、种类和分布。但是由于钢中含有一定量的C，因而，氮化时，事实上总是形成**碳氮化合物相**。

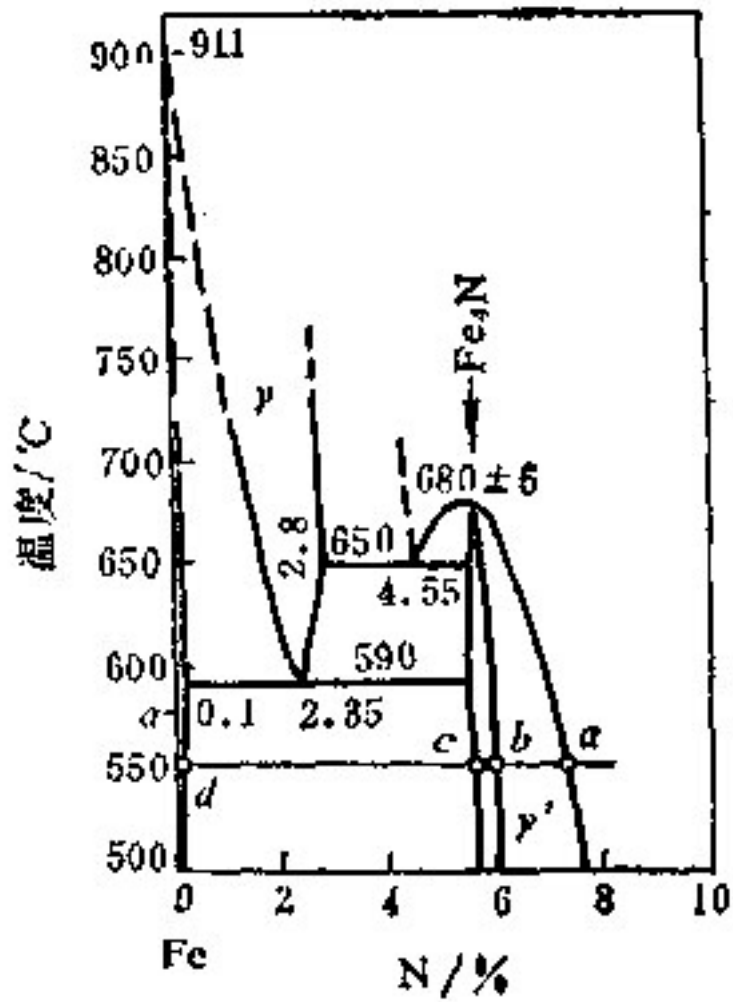
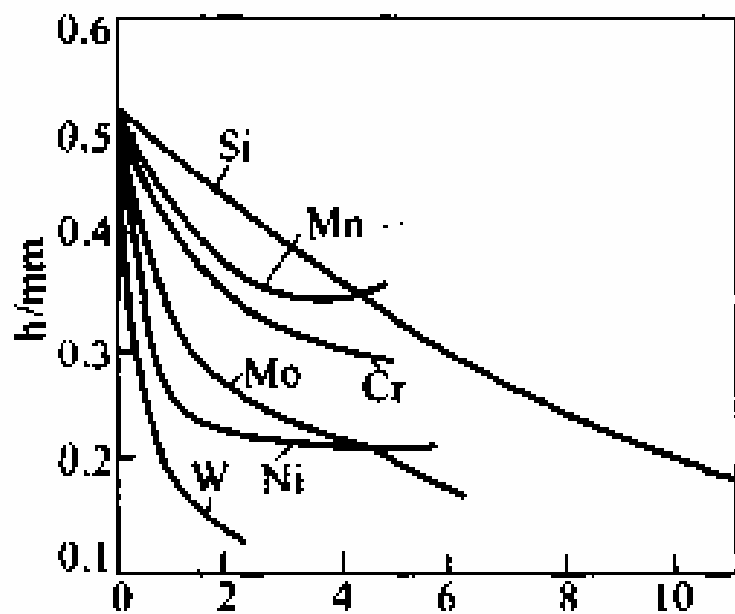
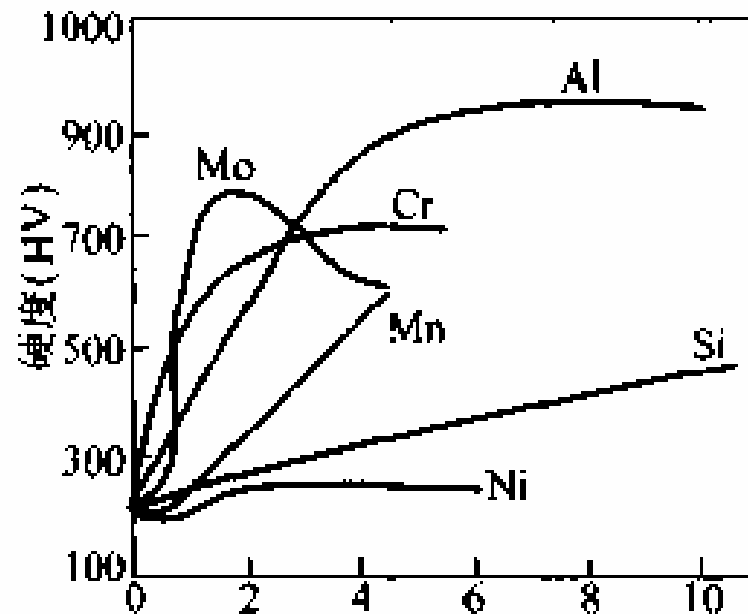


图 3-9 Fe-N相图



(a)

元素质量分数/%



(b)

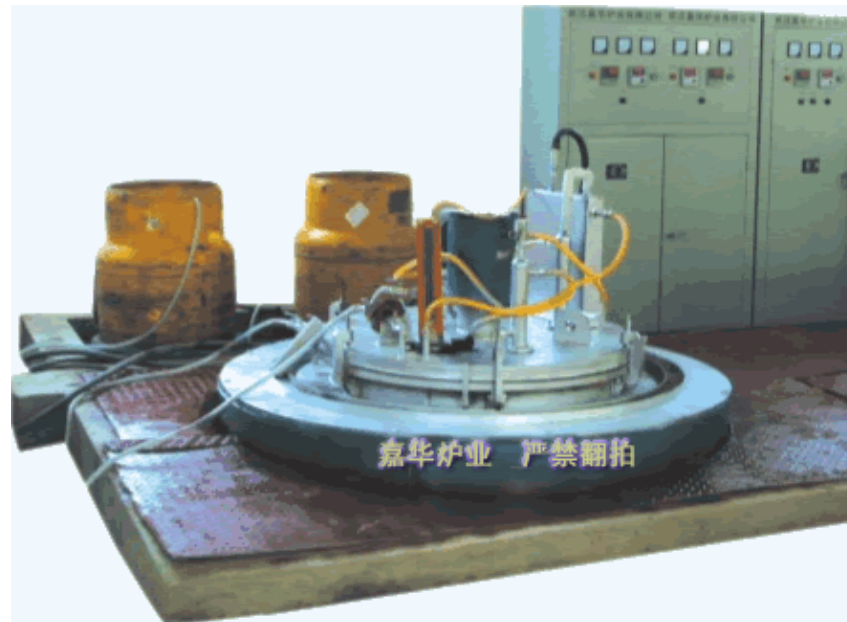
图3-10 合金元素对氮化层深度和表面硬度存在重要的影响

广泛应用的氮化钢主要是38CrMoA1A、38Cr2WVA1A等。在500-600℃温度范围内氮化物扩散层的深度不大，因而，表面薄层所达到的高机械性能从表层迅速下降。

要求高耐磨性的零件要有高硬度的表面氮化层，一般采用含强氮化物形成元素铝的钢种，如38CrMoA1。

经调质和表面氮化处理，38CrMoA1钢表面可获得最高氮化层硬度，达到900-1000HV。仅要求高疲劳强度的零件，可采用不含铝的Cr-Mo型氮化钢，如35CrMo、40CrV等，其氮化层的硬度控制在500-800HV。

RN2-25-6氮化炉



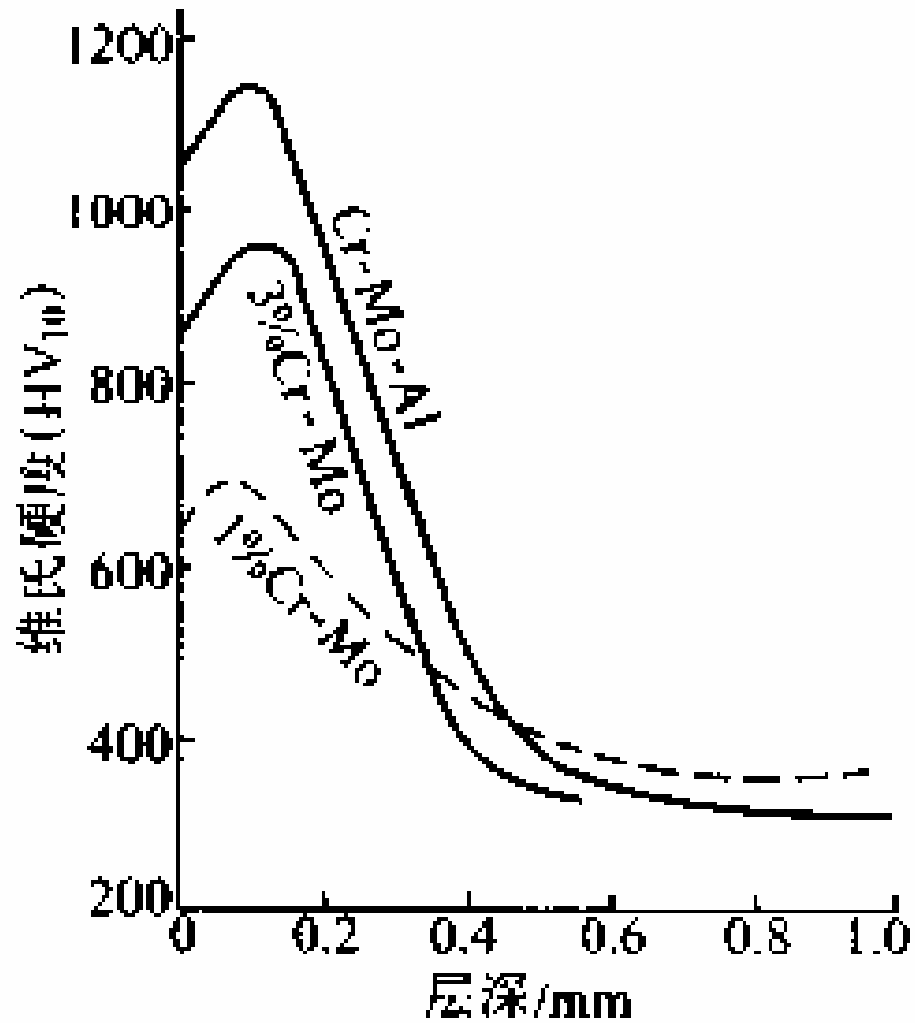


图3-11 不同氮化钢的氮化层深度与硬度的关系

四、典型调质钢及其应用：

合金调质钢的钢种很多，按淬透性的高低可分为低、中、高淬透性三类，表3-2。

- **低淬透性调质钢**：其油淬临界直径最大为30mm-40mm。典型钢种是45、40、40Cr、40CrV、40MnB、40MnV、38CrSi、40MnVB等。
- 这类钢的淬透性较低，通常只用于制造一般尺寸的重要零件。40MnB、40MnVB是为节约Cr而发展的代用钢，40MnB的淬透性较差，切削加工性能也差一些。



连 杆



轴

□ **中淬透性调质钢**：其油淬临界直径最大为40mm-60mm。

典型钢种：35CrMo、40CrMn、40CrNi、30CrMnSi等。这类钢含有较多的合金元素，加入Mo不仅使淬透性显著提高，而且可防止回火脆性。

主要用于制造截面较大的零件，例如，曲轴、连杆等。35CrMo、40CrMn等钢可用于500℃以下的较高温下服役的零件如**汽轮机转子、叶轮**等。



汽轮机转子

汽轮机转子
(AETC公司)



叶轮、转子



□ 高淬透性合金调质钢：其油淬临界直径最大为60mm-100mm。

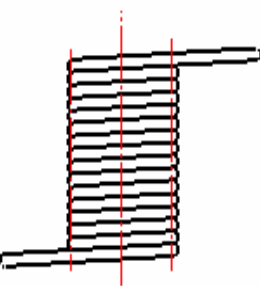
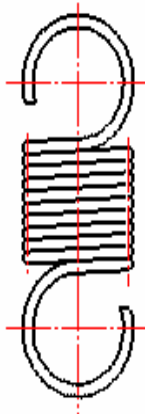
典型钢种：37CrNi3A、40CrMnMo、40CrNiMoA、25Cr2Ni4WA等。这类钢多半是铬镍钢，Cr和Ni的适当配合可大大提高钢的淬透性，并获得优良的机械性能。加Mo还可消除回火脆性。

40CrNiMoA钢主要用于制造大截面、重载荷的重要零件，如航空发动机轴、汽轮机主轴、叶轮等。

3.3 弹簧钢

一、弹簧钢的工作条件及性能要求

- 弹簧的主要作用是吸收冲击能量，缓和机器的振动和冲击作用，或储存能量使机件完成事先规定的动作，保证机器和仪表的正常工作。因此，弹簧必须具有高的屈服强度和较高的疲劳强度，以免产生塑性变形并防止过早的疲劳破断。
- 弹簧大体上可以分为热成形弹簧与冷成形弹簧两大类。



冷成形弹簧是通过冷变形或热处理，使钢材具备一定性能之后，再用冷成形方法制成一定形状的弹簧。如先作冷变形的高强度钢丝（钢琴丝）、硬钢丝、不锈钢丝等。

冷成形的弹簧在冷成形之后要进行 200°C - 400°C 的低温回火。由于冷成形弹簧在成形之前，钢丝已具备了一定的性能，即已处于硬化状态，所以通常只能制造小型弹簧。

热成形弹簧一般用于制造**大型弹簧或形状复杂的弹簧**。钢材在热成形之前并不具备弹簧所要求的性能，在**热成形之后，进行淬火及中温回火**，以获得所要求的性能。

由于**碳素弹簧钢的淬透性低**，一般只能用于制造**截面直径小于12-15mm的小弹簧**。为了满足大型弹簧对弹簧钢的淬透性和力学性能的高要求，在碳素弹簧钢的基础上发展了合金弹簧钢。

此外，在成形及热处理过程中，要特别注意防止表面产生氧化脱碳及伤痕。**这里我们只讨论热成形弹簧钢的合金化及性能特点。**

二、弹簧钢的化学成分特点

1. **碳含量**。弹簧钢的碳含量**较高**，以保证高的弹性极限与疲劳极限。

碳素弹簧钢的碳含量一般为**0.62%-0.90%**，

合金弹簧钢的碳含量为**0.45%-0.7%**。

碳含量**过低**，达不到高屈服强度的要求；
碳含量**过高**，钢的脆性很大。

2. 加入Si、Mn

Si和Mn是弹簧钢中经常采用的合金元素，目的是提高淬透性、Si、Mn固溶强化铁素体、提高钢的回火稳定性，使其在相同的回火温度下具有高的硬度和强度。

其中Si的作用最大，但Si含量高时增大C石墨化的倾向，且在加热时易于脱碳；Mn则易于使钢过热。

3. 加入Cr、Mo、V，Nb克服硅锰弹簧钢的不足。因为Cr、W、V、Nb为碳化物形成元素，它们可以防止过热（细化晶粒）和脱碳，从而保证重要用途弹簧具有高的弹性极限和屈服极限。

4. 弹簧钢的纯度对疲劳强度有很大影响，因此，弹簧钢均为优质钢（ $P \leq 0.04\%$ ， $S \leq 0.04\%$ ）或高级优质钢（ $P \leq 0.035\%$ ， $S \leq 0.035\%$ ）。

我国研制成功的55SiMnMoV、55SiMnMoVNb、55SiMnVB和60SiMnBRe是一组在Si-Mn钢基础上，加微量Mo、V、Nb、B和稀土元素的优质弹簧钢。

合金化的目的是为了降低脱碳敏感性，故减少了钢中Si含量，在中截面弹簧钢中加入微量B；在大截面弹簧钢中加入了少量Mo。此外，钢中加入少量V、Nb，细化晶粒，提高强韧性。

+Mn

+SiMn

+SiMn
MoVNb

0.62/0.70C-0.5/0.8
840°C油淬+480°C回火
 σ_b - σ_s - δ_{10} - ψ

碳素弹簧钢

1000-800-9-35
特点：价格便宜，淬透性差，截面大于12~15mm，油淬时不易淬透，水淬易变形或开裂，仅适宜于尺寸小的弹簧

65Mn-0.62/0.70C-0.5/0.8Si
830°C油淬+480°C回火
特点：由于淬透性差，截面严格，用于小尺寸弹簧

60Si2Mn-0.57/0.65C-0.60/0.70Si-0.17/0.37Mn
860°C油淬+420°C回火1800-1600-10-45
特点：SiMn合金，淬透性高，铬便宜

2.00Si

55SiMnMoVNb-0.52/0.60C-1.00/1.30Mn-0.40/0.70Si-0.08/0.15V-0.30/0.40Mo-0.01/0.03Nb
880°C油淬+530°C回火1400-1300-7-35
特点：该钢种为我国近年来研制成功的无铬弹簧钢，淬透性和疲劳强度均高，且脱碳敏感性低，可作50CrVA代用钢种，用作大截面弹簧

+CrV

50CrV-0.46/0.54C-0.50/0.60Mn-0.17/0.37Si-0.80/1.10Cr-0.12/0.20V
850°C油淬+520°C回火1300-1100-10-45
特点：淬透性高，晶粒细，并在高温下具有较高弹性极限和屈服极限，用于制作350~400°C工作的重负荷及要求高疲劳强度的大形弹簧

三、弹簧钢的热处理特点

热成形弹簧钢的热处理工艺是在热成形之后于 830°C - 870°C 进行油冷淬火，然后再于 420°C - 520°C 左右进行中温回火；

获得回火屈氏体，渗碳体以细小的颗粒分布在 α 相的基体上的组织。由于马氏体分解产生的 α 相已发生回复，高碳马氏体的孪晶结构已经消失，相变引起的内应力已经大幅度下降。

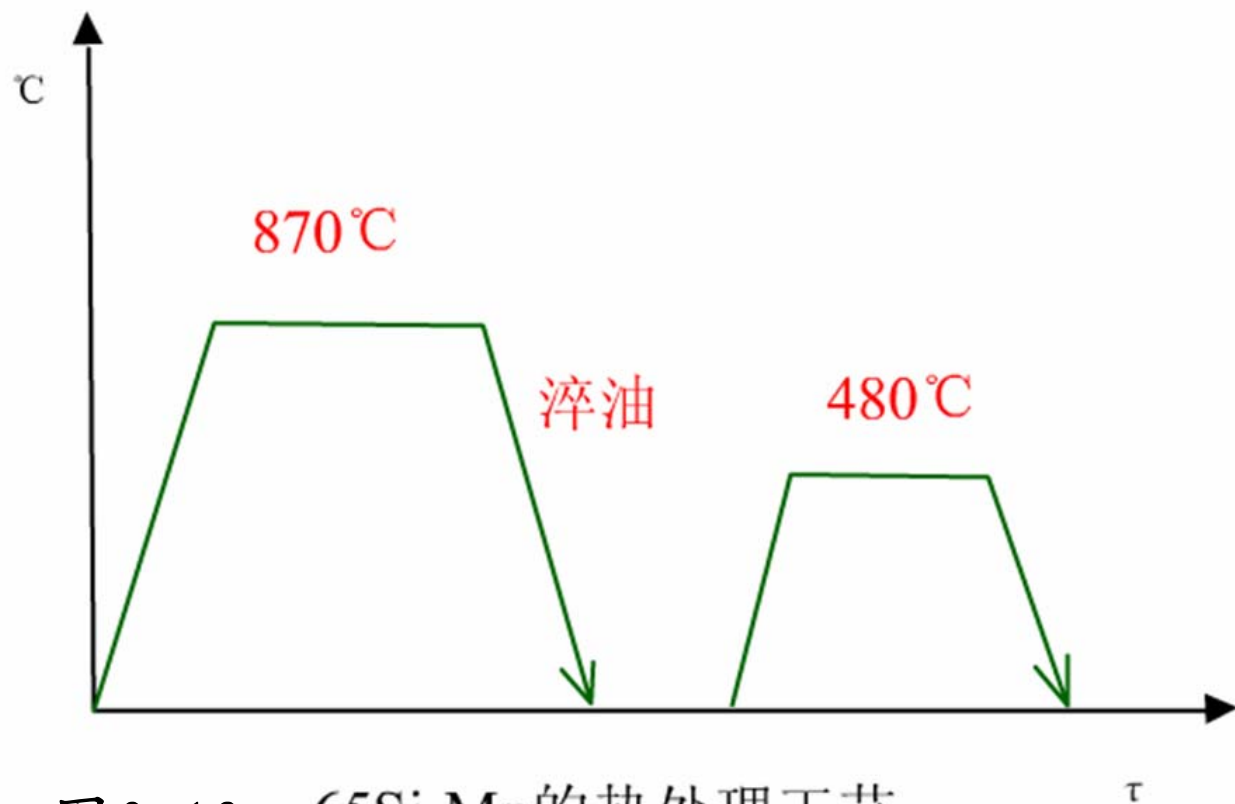


图 3-12 65Si₂Mn 的热处理工艺

由于弹簧服役时的应力状态比较复杂，特别是弯曲和扭转应力的作用，对弹簧的**表面状态要求较高**。

热处理加热过程中必须严格控制炉气并尽量缩短加热时间，以防止和尽量**减少表面的氧化与脱碳**。

弹簧在热处理后通常还要进行**喷丸处理**，使表面强化并在**表面产生残余压应力**以提高疲劳强度。

如果簧径太大或簧板太厚,而使**淬火**时发生淬不透时,则其弹性极限将下降,同时疲劳强度也将降低。所以弹簧的**尺寸必须要和选用钢材的淬透性相适应。**

回火时,还应考虑弹性参数和韧性参数的平衡。**若回火温度过低**,虽然弹性参数提高,但韧性太差,偶然的冲击或应力集中,弹簧便会发生断裂;**反之,若回火温度过高**,虽然韧性较高,但弹性太差,偶然的冲击载荷可能引起弹簧的永久变形。

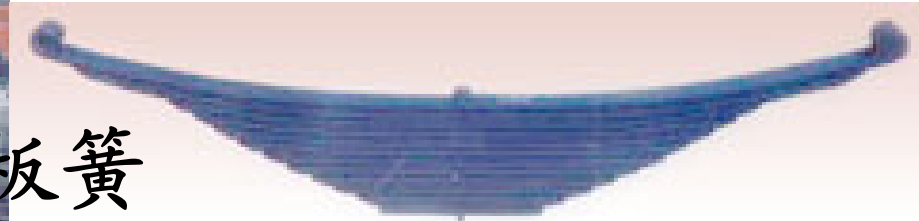
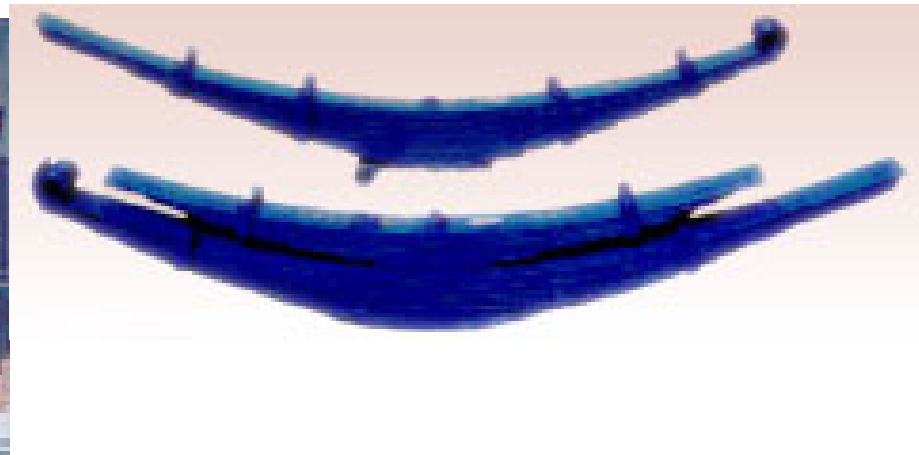
四、弹簧钢的应用实例:

合金弹簧钢按合金元素的种类和多少通常分为两类。

一类是以合金元素Si、Mn合金化的弹簧钢，如65Mn和60Si2Mn等。用于制造截面尺寸较大的弹簧。Si、Mn的复合合金化，其性能又高于单用Mn的好，这类钢主要用于汽车、拖拉机和机车上的板簧和螺旋弹簧等。



各式汽车板簧



各类汽车用变截面钢板弹簧



12/14/16Ton车轴用钢板弹簧

另一类是含Cr、W、V等合金元素的弹簧钢，如50CrVA。Cr和V的复合加入，不仅提高弹簧钢的淬透性，而且有较高的高温强度、韧性和较好的热处理工艺性能。这类钢可用于制造350℃-400℃下承受重载的大型弹簧，如阀门弹簧、高速柴油机的汽门弹簧等。

表3-3 表3-4为常用弹簧钢的化学成分、热处理、力学性能和主要用途。

表3-3 典型弹簧钢的热处理和机械性能

钢号	热处理		机械性能			
	淬火 ℃	回火 ℃	σ_b MPa	σ_s MPa	δ_{10} %	ψ %
65	840油	480	1000	800	9	35
65Mn	830油	480	1000	800	8	30
60Si2Mn	870油	480	1300	1200	5	25
50CrVA	850油	480	1800	1600	5	20

表3-4 典型弹簧钢的成分和用途

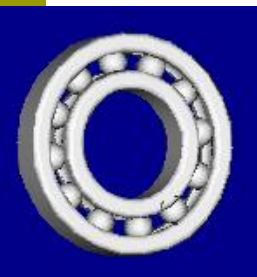
钢号	主要化学成分 (%)					用途
	C	Mn	Si	Cr	V	
65	0.62 0.70	0.50 0.80	0.17 0.37			截面小于12-15mm的小弹簧
65Mn	0.62 0.70	0.90 1.20	0.17 0.37			截面小于25mm的各种螺旋弹簧、板弹簧
60Si2Mn	0.57 0.65	0.60 0.90	1.50 2.00			截面小于25mm的各种螺旋弹簧、板弹簧
50CrVA	0.46 0.54	0.50 0.80	0.17 0.37	0.80 1.10	0.10 0.20	截面小于30mm强度要求较高的弹簧

3.4 滚动轴承钢

一、滚动轴承钢的工作条件及性能要求

滚动轴承的作用是支撑轴。滚动轴承通常由内套、外套、滚动体（如滚珠、滚轮、滚针）和保持架四部分组成。其中除保持架用低碳钢（08钢）薄板冲制而成，其余三个部分均由轴承钢制造。

滚动轴承内外套圈与滚动体之间呈点或线接触，承受很大的压应力（高达1800MPa-5000MPa）和交变载荷。



滚动体与套圈之间不但有滚动摩擦，而且有滑动摩擦，有时在强大的冲击载荷作用下，轴承也可能产生破碎；对在特殊条件下工作的轴承，常与大气、水蒸气及腐蚀介质相接触，进而产生腐蚀。

轴承钢的性能要求：高的弹性极限和高的接触疲劳强度，高的硬度和耐磨性，一定的冲击韧性和抵抗大气、润滑油化学腐蚀的能力。

二、滚动轴承钢的化学成分特点

1. 高碳。

为了保证轴承钢有高的硬度和耐磨性，轴承钢的碳含量很高，一般为0.95%-1.15%，属于过共析钢。

一部分存在于马氏体基体中以强化马氏体；

另一部分形成足够数量的碳化物以获得所要求的耐磨性。

但过高的碳含量会增加碳化物分布的不均匀性，且易生成网状碳化物而降低其性能。

2. 主加合金元素Cr。

Cr的作用是提高钢的淬透性，形成合金渗碳体，提高轴承钢的耐腐蚀性能。

部分铬形成的合金渗碳体 $(Fe, Cr)_3C$ 在淬火加热时溶解较慢，可减少过热倾向，经热处理后可以得到较细的组织，且碳化物能以细小质点均匀分布于钢基体组织中，既可提高钢的回火稳定性，又可提高钢的硬度，进而提高钢的耐磨性和接触疲劳强度。适宜的Cr含量为0.40%-1.65%。

当Cr含量高于1.65%以后，则会使残余奥氏体增加，使钢的硬度和尺寸稳定性降低，同时还会增加碳化物的不均匀性，降低钢的韧性。



3. 加入硅、锰、钒等以进一步提高淬透性

大型轴承用钢中还需加入更多的合金元素以提高淬透性，通常加入Mn、Si提高淬透性，适量的Si（0.40%-0.60%）还能明显地提高钢的强度和弹性极限；

加入V一部分溶于奥氏体，提高淬透性，另一部分形成碳化钒VC，提高钢的耐磨性并防止过热。通常无铬钢中都含有钒。

4. 降低S、P含量，减少氧化物、硅酸盐夹杂物的数量，提高冶金质量

由于轴承钢的接触疲劳性能对钢材的微小缺陷十分敏感，所以要求 $S < 0.02\%$ ， $P \leq 0.027\%$ ，一般采用电渣重熔、电炉冶炼及真空冶炼等技术以减少夹杂物数量。

三、滚动轴承钢的热处理特点

1. 由于轴承钢是过共析钢，并且对碳化物的形状和分布要求较高，因此其预先热处理通常采用球化退火。

球化退火的目的的一方面是降低钢的硬度，退火后硬度一般为207-229HB，这样可改善切削加工性能，更重要的是获得细球状珠光体和均匀分布的细粒状碳化物，为最终热处理作组织准备。

球化退火工艺一般为将钢材加热到790℃-800℃，在710℃-720℃保温3-4h。

GCr15钢制轴承套圈的球化退火工艺如图3-13所示。GCr15钢球化退火组织见3-14。

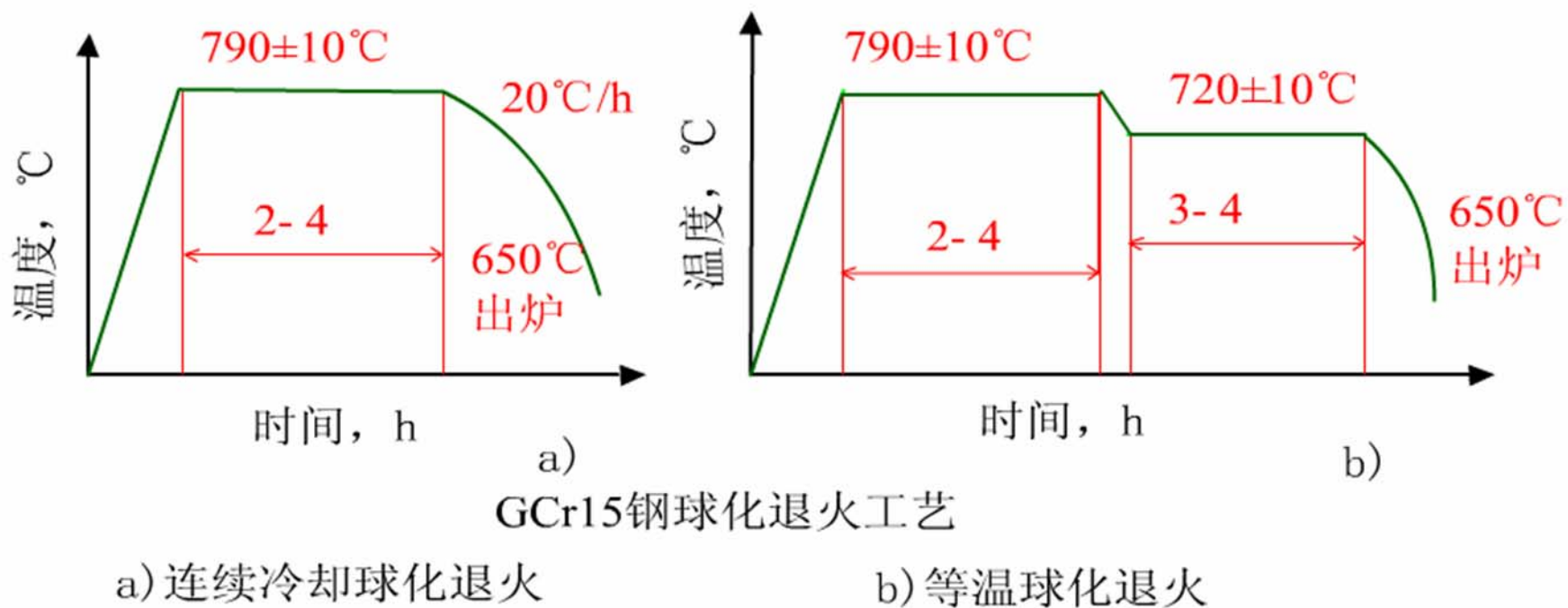
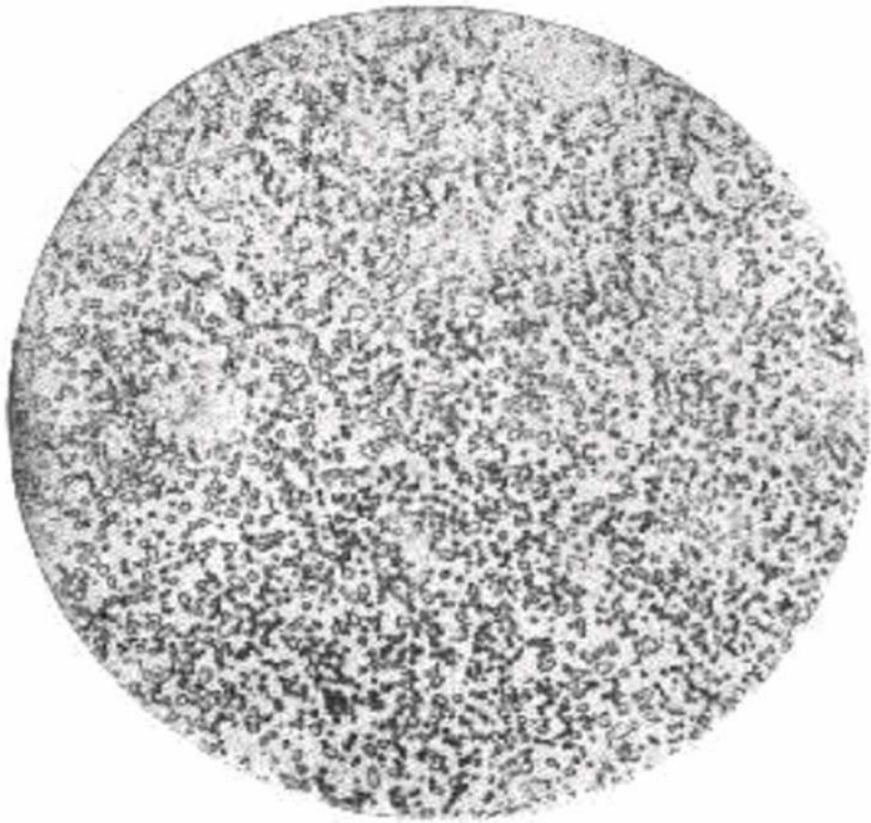


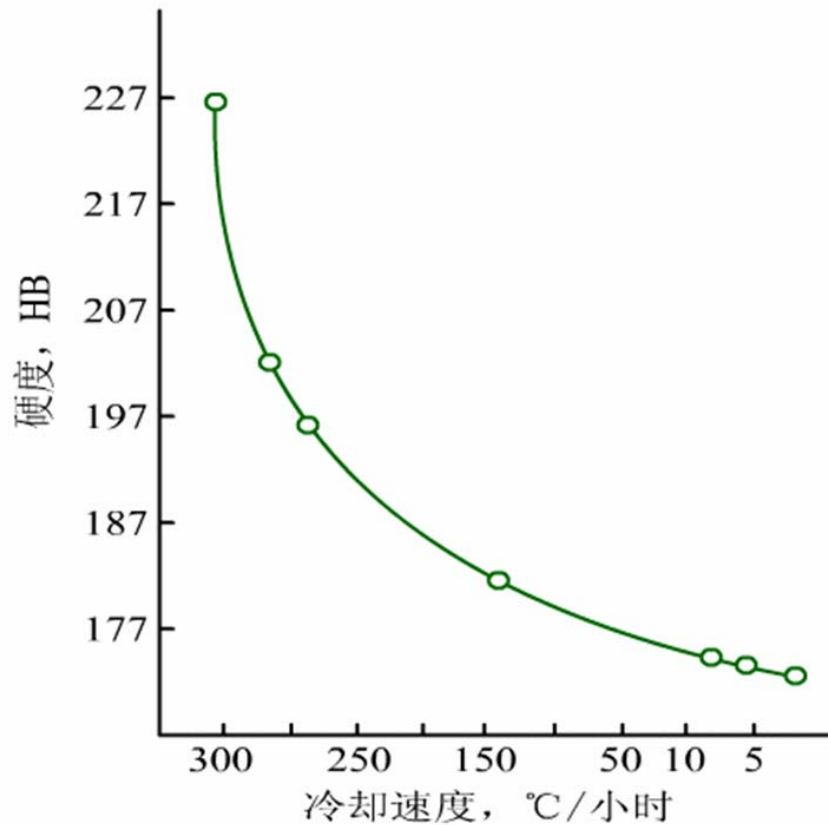
图3-13 GCr15钢轴承套圈的球化退火工艺



图中颗粒状的
为渗碳体和碳
化物。

图3-14 轴承钢的正常球化退火组织

GCr15钢的退火加热温度范围为770~810℃，790℃被认为是最适宜的加热温度。加热**温度过高**，奥氏体中未溶碳化物量过少，奥氏体成分进一步均匀化，冷却后得到的是**粗片层珠光体**，或有**大块聚集碳化物**，这是不合格的过热组织；加热**温度不足**，片状珠光体溶解的不充分，奥氏体成分很不均匀，冷却过程中碳化物沿着**原片层析出**，或呈**细小的链状**特征。碳化物的形状取决于加热温度，而碳化物的弥散度取决于**冷却速度**。



冷却速度越大，
碳化物的弥散度
也越大，其硬度
也越高。

图3-15 GCr15钢球化退火冷却速度与硬度的关系

2. 轴承钢的最终热处理--淬火+低温回火。

淬火温度要求十分严格，对GCr15钢，淬火加热温度为 $820^{\circ}\text{C}-840^{\circ}\text{C}$ 。温度过高会引起过热，晶粒长大，使钢的韧性和疲劳强度下降，且易淬裂和变形；温度过低，则奥氏体中溶解的铬和碳的含量不够，钢淬火后硬度不足。

马氏体中的碳含量在 $0.45\%-0.5\%$ 时，轴承钢既具有高硬度，又有良好的韧性，还具有最高的接触疲劳寿命。

轴承钢的一般热处理工艺--淬火 + 低温回火，
GCr15钢最终热处理工艺见图3-16。

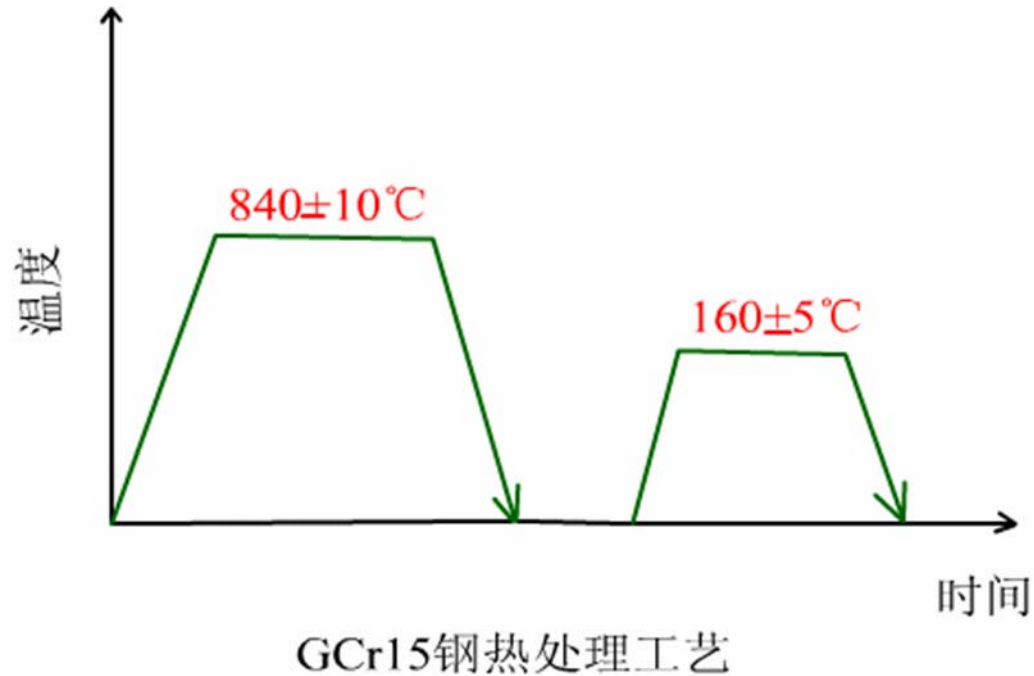
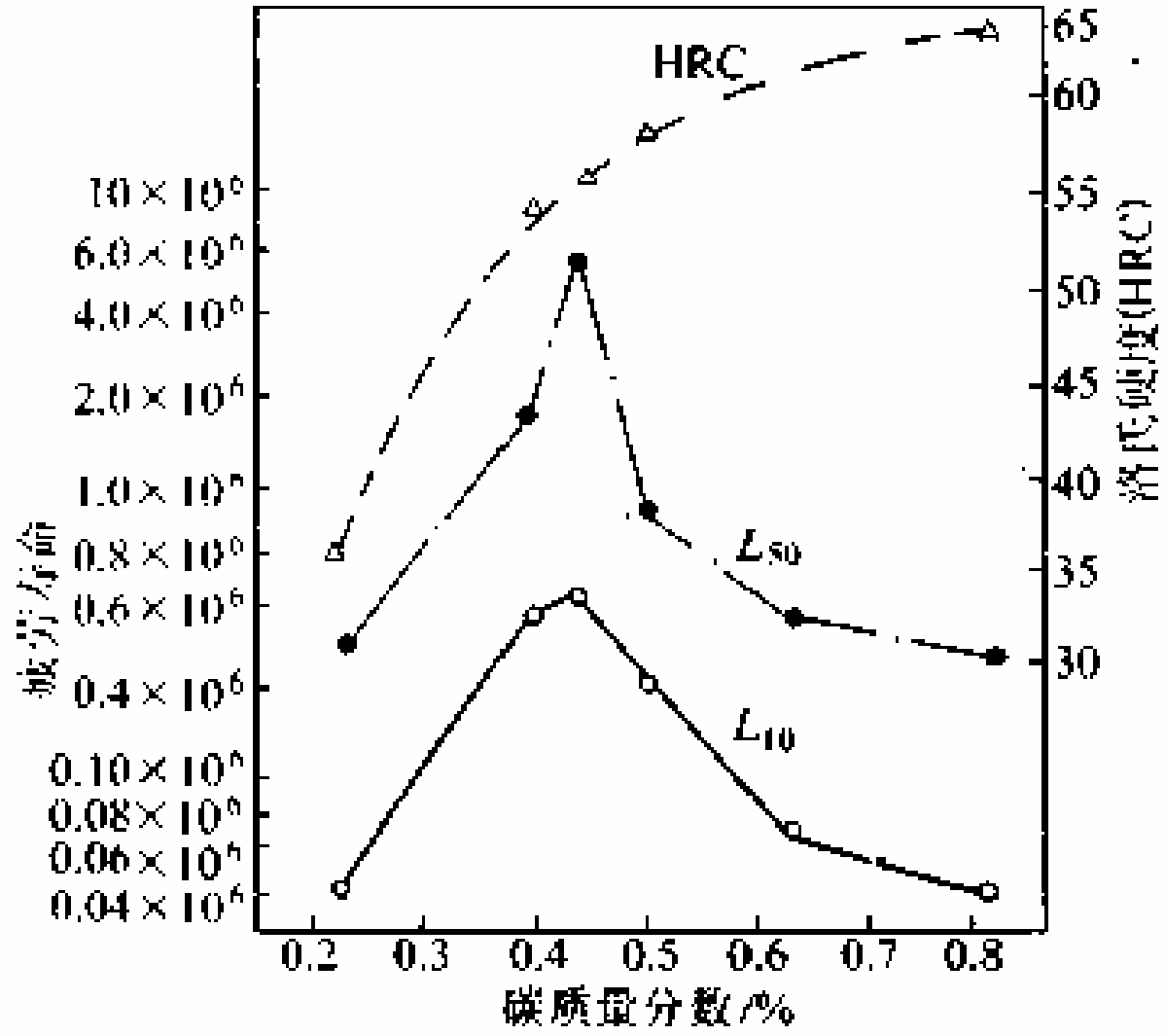


图3-16 GCr15钢最终热处理工艺



常见铬轴承钢的成分、热处理和用途见下表3-6。

表3-6 常见铬轴承钢的成分、热处理和用途

钢号	主要化学成分(%)				热处理规范			mm
	C	Cr	Si	Mn	淬火℃	回火℃	HRC	
GCr9	1.00 1.10	0.90 1.12	0.15 0.35	0.20 0.40	820	160	62 66	20mm以内的各种轴承
GCr15	0.95 1.05	1.30 1.65	0.15 0.35	0.20 0.40	840	160	62 66	壁厚<14mm 轴承套, 25-50mm 钢球
GCr15SiMn	0.95 1.05	1.30 1.65	0.40 0.65	0.90 1.20	840	180	≥ 62	壁厚≥14mm 轴承套, 20-200mm 钢球

-
- 淬火后应立即回火，以消除内应力，提高韧性、稳定组织和尺寸；回火温度一般为 $(150-160)^\circ\text{C}$ ，保温时间为2-4h。为使回火性能均匀一致，回火温度也要严格控制，最好在油中进行。
 - 轴承钢经淬火及回火后的组织为极细的回火马氏体、均匀分布的细粒状碳化物以及少量的残余奥氏体，硬度为62-66HRC。

四、滚动轴承钢的应用实例

- 常用的轴承钢通常根据其合金元素的种类分为两类：

铬轴承钢

添加Mn、Si、Mo、V的轴承钢

铬轴承钢的典型代表是GCr15，使用量占轴承钢的绝大部分。由于淬透性不是很高，因此多用于制造中小型轴承。

添加Mn、Si、Mo、V的轴承钢。

在铬轴承钢中加入Mn、Si可提高淬透性，如GCr15SiMn钢等，主要用于制造大型轴承；

为了节约Cr，可以加入Mo、V，得到不含铬的轴承钢，如GSiMnMoV、GSiMnMoVRE钢等，其性能和用途与GCr15相近。



各类标准轴承



四列圆锥滚子轴承



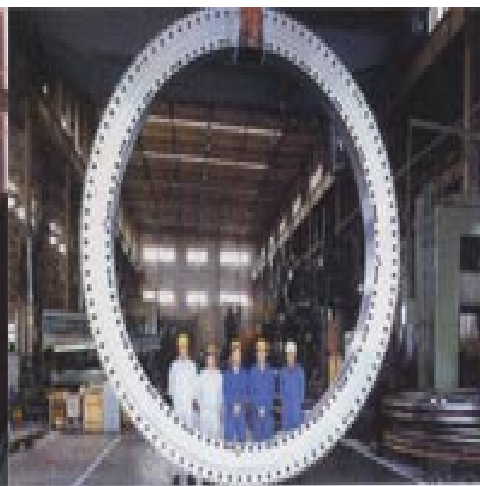
离合器分离轴承



轮毂轴承



大型圆锥滚子轴承

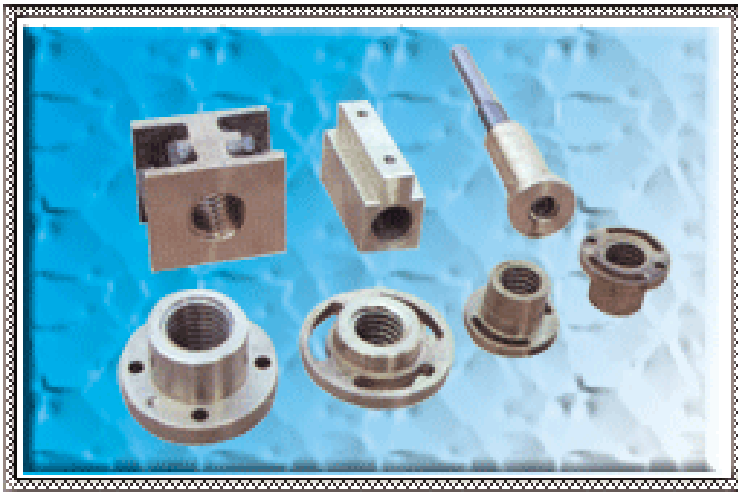


特大型轴承

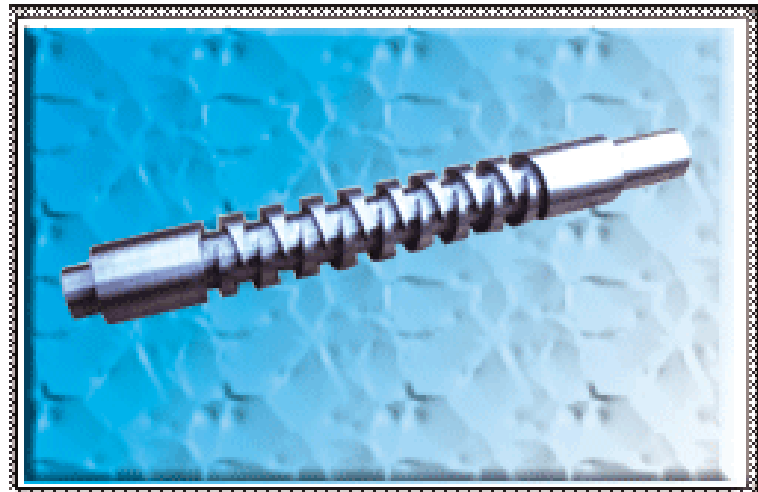




必须指出的是高碳铬轴承钢也可用于制造精密量具、冷冲模、机床丝杠等耐磨件。



滚珠丝杠副



丝杠

□ 其它类型的轴承钢

1) **渗碳轴承钢**：轧钢机械、矿山挖掘机械、建筑机械等一些受**冲击负荷较大**的机械使用的轴承，不仅要求其表面硬度高、耐磨性好，具有较高的接触疲劳强度，还要求心部有一定的韧性、足够的强度和硬度。因而也可以选用渗碳钢制造。

渗碳轴承钢，采用合金结构钢的牌号表示方法，另在牌号头部加符号“G”。例如：“**G20CrNiMo**”。高级优质渗碳轴承钢，在牌号尾部加“A”。例如：“**G20CrNiMoA**”。

2) 高碳铬不锈钢和高温轴承钢，采用不锈钢和耐热钢的牌号表示方法，牌号头部不加符号“G”。例如：高碳铬不锈钢“9Cr18”和高温轴承钢“10Cr14Mo”。

不锈钢轴承钢：对于在酸、碱、盐等腐蚀介质中使用的轴承，要求具有良好的化学稳定性，故而常采用高碳高铬不锈钢制造，如9Cr18等。



水下轴承



外球面轴承

预先热处理：由于这类钢属于莱氏体钢，故在预先热处理，即球化退火前必须进行反复锻打以使粗大的碳化物破碎并均匀分布，退火组织为铁素体加碳化物 Cr_7C_3 。

最终热处理流程如下：

$(850\sim 880)^\circ\text{C}$ 预热 \longrightarrow $(1050\sim 1100)^\circ\text{C}$ 加热淬火

\longrightarrow $(-75\sim -80)^\circ\text{C}$ 冷处理 \longrightarrow $(150\sim 160)^\circ\text{C}$ 低温回火

\longrightarrow $(120\sim 150)^\circ\text{C}$ 附加回火

高温轴承钢：燃汽轮机、航空及航天工业用轴承的工作温度已超过**300℃以上**，因此对所用轴承的材料要求有足够的高温硬度、高温强度、耐磨性、抗氧化性及一定的腐蚀性能、良好的尺寸稳定性和高温下的寿命。

常用的高温轴承钢有**Cr4Mo4V、Cr14Mo4、Cr15Mo4、GCr18Mo、W6Mo5Cr4V2**等。这类钢的成分特点是含有大量的**W、Mo、Cr、V**等碳化物形成元素，淬火后可获得高合金化的高碳马氏体，具有良好的回火稳定性，并在高温回火后产生**二次硬化**现象，能在高温下保持高硬度、高耐磨性和良好的接触疲劳强度。



高温、耐腐蚀、自润滑轴承



超高温轴承

Cr4Mo4V钢是航空发动机上最常用的高温轴承钢。这种钢在热处理和性能上**具有高速钢的特点**，但含合金元素含量略少，故高温硬度不如高速钢，但这种钢的加工性能好于高速钢。

Cr4Mo4V钢的**淬火加热温度**为 1100°C - 1140°C ，在油中淬火。经过 530°C - 560°C 的二次回火（每次2小时）可使残余奥氏体发生分解并使马氏体中析出高度弥散的碳化物（**VC和Mo₂C**）质点，因而具有高的硬度（61-65）HRC。

在 430°C 下工作（此时的最高硬度为54HRC）或在 315°C 下长期工作（此时的最高硬度为57HRC）。

Cr15Mo4钢含有较高的铬，因而具有较高的耐腐蚀性能，是一种不锈高温轴承钢。

Cr15Mo4钢可在1100℃-1130℃范围内淬火，再经-75℃冷处理和500℃-520℃三次回火后，可得到最高的硬度，即(60-64)HRC。这种钢淬火后含有相当数量的残余奥氏体，它有较强的稳定性，必须通过冷处理或多次回火才能消除，否则在使用过程中残余奥氏体将发生向马氏体的转变，影响轴承的尺寸稳定性。

在430℃长时间停留时有良好的尺寸稳定性，同时有良好的抗回火稳定性（高温硬度大于54HRC）。