

编号: 0107

内 部

科学技术成果报告

控制组织形态发挥材料潜力
提高钢件使用寿命

科学技术文献出版社

科学技术成果报告

控制组织形态发挥材料潜力

提高钢件使用寿命

(内部发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所

出版者: 科学技术文献出版社

印刷者: 中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 $787 \times 1092 \cdot \frac{1}{16}$ 1.25印张 30千字

统一书号: 15176 · 285 定价: 0.20元

1978年7月出版

目 录

一、引言	(1)
二、钢的组织形态	(2)
1. 马氏体形态研究的某些规律	(2)
(1) 板条状马氏体	(2)
(2) 针(片)状马氏体	(2)
2. 贝氏体形态研究的某些规律	(4)
(1) 上贝氏体	(4)
(2) 下贝氏体	(5)
三、钢的组织形态与机械性能	(6)
1. 马氏体的机械性能	(6)
2. 贝氏体的机械性能	(7)
3. 非要求组织对机械性能的影响	(9)
四、控制组织形态发挥钢件强韧潜力	(10)
1. 低碳钢件的强韧化处理	(10)
2. 中碳钢件的强韧化处理	(12)
3. 高碳钢件的强韧化处理	(15)
4. 渗碳钢件的强韧化处理	(16)
五、结论	(17)
参考文献	(18)

控制组织形态发挥材料潜力

提高钢件使用寿命

吉林工业大学*

一、引言

伟大领袖和导师毛主席教导我们：“一切产品，不但求数量多，而且求质量好，耐穿耐用。”有了数量，必须提高质量，只有提高质量才能发挥数量的作用。提高产品质量，也是最大的增产节约。

机械产品的质量是由多方面因素决定的，但在多数情况下，机器零件及工具所具备的机械性能，是保证使用寿命和安全可靠的主要衡量标准。传统的观点认为，强度是保证使用寿命的因素，韧性、塑性是保证安全的因素。为了具有较高的韧性、塑性，而牺牲了一定强度，致使产品粗大笨重，消耗了较多的钢材，降低了机械效率。近来，人们根据零件在使用时的失效情况，适当提高材料的强度而降低一定的韧性和塑性，从而提高了钢件的使用寿命。但是这种方法必须具体情况具体分析，目前还没有达到为机械产品提供韧性、塑性设计计算依据的水平。因为这不仅与零件受力失效情况有关，而且也与材料的成分、组织形态、缺陷情况有关，尚需深入细致的研究。因而材料使用的强度水平，不能无条件提高，否则由于韧、塑性过低，有可能出现脆性断裂而造成事故，前一时期高强度钢件发生的一系列工程技术事故（脆断）就是例证。

如果使钢件在具有高强度的状态下，又具有足够的韧性、塑性，这样既可以提高机械的效率、延长使用寿命、节约钢材，又可以保证安全可靠。这种要求能否达到呢？值得研究。

钢的性能与它所具备的组织类型和形态有着密切的关系，而组织类型和形态，一般都是通过热处理保证的。但是，到目前为止，钢件热处理后可能获得的组织类型和形态有多少种还没有搞清，甚至沿用多年的淬火工艺是否全都获得性能良好的组织，需要认真分析，制订淬火工艺的理论是否全部反映客观规律，值得深入剖析。

本文的目的，在于运用最近研究得到的钢中组织形态及其对机械性能影响的规律，沟通组织形态与强化处理新工艺之间的关系，探讨发挥钢件强韧潜力的途径，也为热处理基本工艺的推陈出新提供线索。

* 吉林工业大学金相热处理教研室刘云旭同志执笔。

二、钢的组织形态

工业用钢热处理后可能获得的组织形态，至今尚无系统报导，各种组织形态的机械性能，更有待探索。我们从过冷奥氏体可能形成的5个基本组成相的观点出发，研究了过冷奥氏体在等温条件下可能获得的组织类型，得出有34种之多⁽¹⁾，如果把各种组织可能获得的不同形态考虑进去，其种类更多。现仅就工业上常用的几种组织的形态讨论于下。

1. 马氏体形态研究的某些规律

光学显微镜的研究表明⁽²⁻⁶⁾，在奥氏体化比较均匀的钢中，淬火马氏体有两种迥然不同的形态。

(1) 板条状马氏体 这种马氏体是以许多尺寸大致相同的细长薄“板条”晶体为单元，组成几乎平行排列的束（群），其金相组织示于图1。每一板条的长度约几微米，厚度一般在0.1~0.2微米之间，相邻板条大都由小角晶界隔开，其电子显微组织示于图2之中。

通常，在一个奥氏体晶粒中可以有几个马氏体群，各马氏体群之间以大角晶界相隔。透射式电子显微镜观察表明，每根板条内部很少发现孪晶，其亚结构主要是由高密度位错缠结组成，其密度为 $0.3 \sim 0.9 \times 10^{12}$ 厘米/厘米³。

板条马氏体形成时，当形成第一根马氏体板条后，依附已形成的板条，一根接一根地形核和长大而成相互平行的马氏体束。或者在一个奥氏体晶粒内，中间隔一定距离平行地产生若干个马氏体板条的核，束的发展是通过这些核在奥氏体中沿平行长大而成。在每一束之内的各个马氏体板条之间不发生撞击现象。

(2) 针（片）状马氏体 这种马氏体由许多厚度较小的片状晶体（有些钢中呈透镜片状，中间厚两端薄）按不同角度分布所组成。由于试样磨面上对每一个马氏体片切割角度不同，所以在金相显微镜下观察到的是片状、竹叶状或针状。由于出现针状和竹叶状的几率较



图1 低碳钢淬火板条状马氏体组织
500×



图2 0.2%C钢淬火马氏体电子透
射显微组织 50000×

大，所以一般叫做“针状马氏体”。相邻针状马氏体片之间互不平行，而是不规则地分布于母相奥氏体中，其金相组织示于图3。

透射电子显微镜研究表明，这种马氏体内部有大量精细孪晶，示于图4之中。在回火时将沿这些精细孪晶析出碳化物。

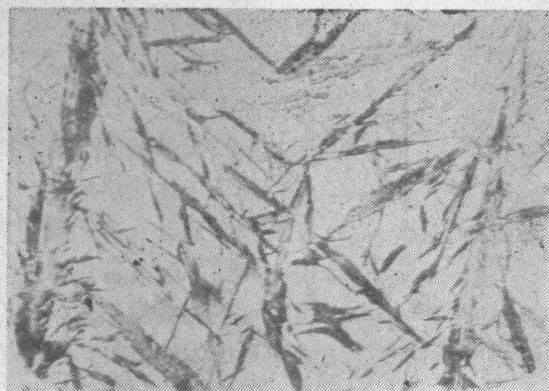


图3 高碳钢完全淬火针状马氏体组织
600×

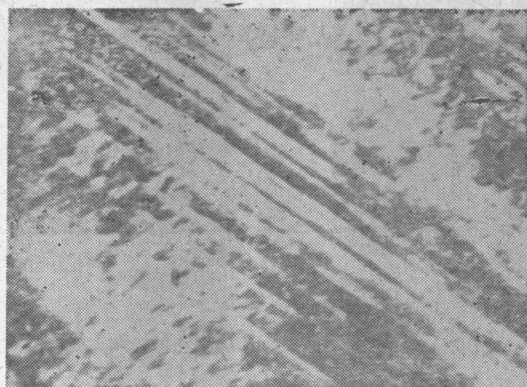


图4 1.0%C钢淬火针状马氏体透射电
子显微组织 50000×

针状马氏体形成时，往往在均匀的奥氏体中先形成一横穿晶粒的马氏体片，后继的马氏体片则在已形成的马氏体和奥氏体晶界之间形成。已形成的马氏体片提供了新马氏体片形成的部位和长大的障碍。因此，在同一奥氏体晶粒内，马氏体按形成先后次序，其尺寸越来越悬殊。相邻马氏体之间，都有较大的交角，形成时彼此有撞击现象。

影响马氏体形态的主要因素是奥氏体的化学成分和马氏体形成温度。

研究表明，如果向钢中加入稳定 γ 相的合金元素，则当元素含量较低时，淬火时易形成板条状马氏体；当元素含量增高时，淬火易形成针状马氏体或 ϵ -马氏体。向钢中加入封闭 γ 区的元素，一般只易于促使形成板条状马氏体。

金相分析表明^{〔7〕}，Fe-C合金中，钢的含碳量对马氏体形态的影响如图5所示。即当钢的含碳量低于0.6%时，形成的是板条马氏体，含碳量高于1.0%时，形成的是针状马氏体，含碳量在0.6~1.0%之间时，形成的是板条状马氏体+针状马氏体。透射电子显微镜分析表明，即使在含碳量很低（0.2%）的钢中，淬火马氏体中也可能有少量孪晶马氏体存在^{〔8〕}。

研究指出^{〔9〕}，由于惯习面的变化，会导致马氏体晶体的不同排列。Fe-C合金中，马氏体形成温度在300℃以上时，惯习面为 $(111)_A$ ，形成温度在300~120℃之间时，惯习面为 $(225)_A$ ，形成温度在120℃以下时，惯习面为 $(259)_A$ 。由于在面心点阵中 $(111)_A$ 晶面数较少，形成马氏体起始位向数减少，有利于在一个奥氏体晶格中马氏体形成平行的束，即板条状马氏体。如果 $(225)_A$ 或 $(259)_A$ 形成马氏体，由于晶面数较多，形成马氏体起始位向数增多，在一个奥氏体晶粒中，增大了形成相邻马氏体互不平行的倾向，即有利于形成针状马氏体。

通常，人们希望淬火后获得隐晶马氏体，具有较高的硬度、强度和韧性，而隐晶马氏体的实质和形成条件并未完全搞清。

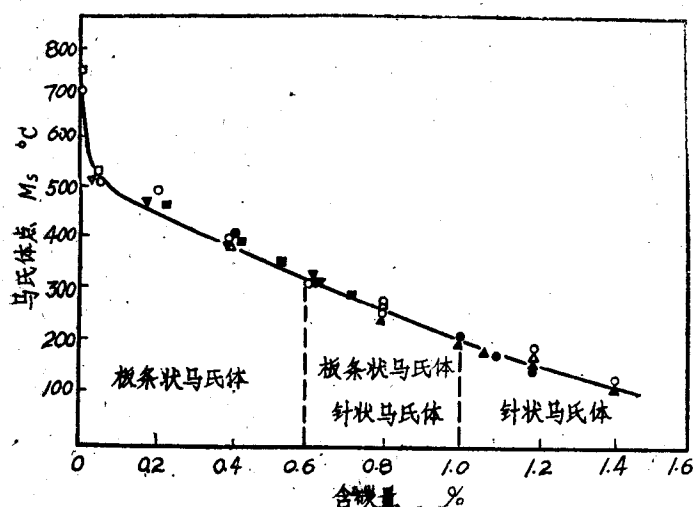


图5 奥氏体的含碳量与马氏体点和马氏体形态的关系

我们的研究认为^[10], 形成隐晶马氏体的原因, 是淬火加热时奥氏体晶粒内成分不均匀(而且其平均含碳量较低)的缘故。由于大量的低碳区(低于形成板条状位错型马氏体的最高含碳量)的马氏体首先形成, 少量的高碳区(高于形成针状孪晶型马氏体的最低含碳量)的马氏体然后形成, 前者限制了后者针形和相互撞击。因此, 隐晶马氏体的实质很可能主要属于板条状位错型马氏体的范畴。

研究表明^[3、7、11、12], 在具有针状马氏体的淬火钢中容易出现显微裂纹, 即使在冷却速度不大的奥氏体晶粒较细的情况下, 产生显微裂纹仍是不可避免的。在具有板条状马氏体+针状马氏体组织的钢中, 显微裂纹仍在针状马氏体中产生。

2. 贝氏体形态研究的某些规律

由于奥氏体成分、均匀度、晶粒大小、贝氏体的形成温度、等温保持时间等对组织形态都有影响, 所以贝氏体的形态是多种多样的, 而且是可变的。但是可以认为, 大多数钢中的贝氏体, 都有两种典型的形态, 上贝氏体和下贝氏体。而其它目前所传说的贝氏体, 则是上贝氏体或下贝氏体的非典型形态或变种。

(1) 上贝氏体 钢中典型的上贝氏体, 是成簇的平行针状(条状)铁素体和针间夹有平行的杆状断续渗碳体, 其金相组织示于图6。这种组织在光学显微镜下呈羽毛状, 所以也称为羽毛状贝氏体。试样双面金相检验表明, 上贝氏体中的铁素体是针状的或条状的。复膜电镜组织分析表明, 上贝氏体是由针状铁素体和沿针体成长方向分布的断续条状渗碳体所组成。透射电镜组织研究表明, 上贝氏体中的铁素体呈板条状, 条中有位错缠结, 而且条间位错密度较大, 示于图7之中^[13]。

在同一种钢中, 随着转变温度的降低, 形成的上贝氏体中针状铁素体减小, 排列更加密集, 碳化物的数量增多, 分散度增大。奥氏体的化学成分, 对上贝氏体的形态影响很小, 只是随着钢中含碳量的增高, 上贝氏体中的碳化物数量相应有所增加。但是在含Si、Al等的钢中, 由于Si、Al有抑制碳化物形成的作用, 上贝氏体中的碳化物很少, 甚至接近无碳化物状态。

在低碳合金钢中, 上贝氏体的形态, 随着形成温度的不同, 有着明显的差异, 可以分为3种^[14]。

B_I这种形态的组织, 是在600~500℃之间形成的, 称为上贝氏体型铁素体, 也就是成簇的针状铁素体;

B_{II}这种形态的组织, 是在500~450℃之间形成的, 这就是普通的上贝氏体;



图6 65Mn钢经430°C等温形成的上贝氏体
400X



图7 60CrNiMo钢495°C形成的
上贝氏体透射电镜组织15000X

B_{III}这种形态的组织，是在450°C~M_s点之间形成的，这是一种碳化物呈粒状分布比较均匀的上贝氏体。

有些低碳合金钢，经正火后，会获得粒状贝氏体组织，在某些中碳合金钢中，也可以部分获得粒状贝氏体。这种形态组织，实质上是针状铁素体（也可能发生了恢复、再结晶）+岛状（块状或短条状）奥氏体或其转变产物。岛状的相及组织组成，主要决定于未转变奥氏体的稳定性和冷却条件。如果，奥氏体的稳定性较小，冷却速度较慢，可以部分甚至全部转

变为铁素体+碳化物的混合物；如果冷却速度较快，奥氏体可以部分转变为马氏体；如果奥氏体比较稳定，也可以全部保留到室温而成为残留奥氏体。粒状贝氏体既可以在连续冷却时获得，也可以在等温保持时形成。低、中碳钢中的上贝氏体经回火（自回火或重行回火）而使碳化物粒状化和针状铁素体恢复，再结晶的组织，一般也容易认为是粒状贝氏体。



图8 5CrNiMo钢在310°C形成的下贝氏体
600X

（2）下贝氏体 钢中典型的下贝氏体，与高碳钢中针状回火马氏体相似，常以单个针出现，针与针之间常呈一定角度的相交，示于图8。由于下贝氏体 α -Fe

中有很多细小碳化物存在，容易浸蚀，所以在光学显微镜下呈黑色针状，也叫针状贝氏体。下贝氏体试样的双面金相试样研究表明，下贝氏体是片状的，立体形态是凸透镜状的。图9是下贝氏体的复膜电镜照片，可以看出，其中的碳化物以小片状与长轴呈55~60°交角。图10是下贝氏体透射电镜照片，可以看出，与针状回火马氏体不同， α -Fe中不存在孪晶，而为位错缠结。

研究表明，钢的化学成分对下贝氏体的组织形态影响很小。由于下贝氏体大量是在奥氏体晶粒内部形成的，所以奥氏体晶粒大小对下贝氏体的形态影响不大。



图9 6CrNiMo钢在340°C形成的下贝氏体复膜电镜组织 10000X



图10 6CrNiMo钢在300°C形成的下贝氏体透射电镜组织 15000X

钢中的上、下贝氏体转变，可以在一个较大的温度范围内重叠进行。目前，由于对影响上、下贝氏体形成动力学的因素和规律尚未搞清，因此还不能在各种钢中确切确定上、下贝氏体的形成温度。大量实验得出，上、下贝氏体的形成温度分界并不十分明显，一般可用350~400°C作为上、下贝氏体形成的分界温度。实际上只能说在350°C以下，以形成下贝氏体为主，而在400°C以上，以形成上贝氏体为主。在350~400°C之间，常常可以明显地得到上贝氏体+下贝氏体的复合组织。下贝氏体的形成温度，明显影响针的长短和粗细，形成温度越低，针越短越细。

三、钢的组织形态与机械性能

1. 马氏体的机械性能

对于Fe-Ni-C合金，用调整含Ni量和含C量的方法，使其具有不同的 M_s 点，一类 $M_s=350^\circ\text{C}$ (0.15~0.33%C, 6.04~2.53%Ni)，另一类 $M_s=-25^\circ\text{C}$ (0.14~0.33%C, 27.00~23.60%Ni)，淬火后前者为板条状马氏体，后者为针状马氏体。从合金元素含镍量来看，后者明显高于前者，但其机械性能（淬火和 -196°C 冷处理后）则前者高于后者，示于图11之中。从图中可以看出，当钢的含碳量相同时， M_s 点为 350°C 的强韧性皆高于 M_s 点为 -25°C 的。

马氏体的含碳量对综合机械性能的影响示于图12之中^[15、16]，渗碳钢表层马氏体的含碳量对机械性能的影响亦示于图12之中^[15、17]，从图中看出，淬火钢在扭转载荷下，随着含碳量的增高，马氏体的抗塑性变形能力增大，抗脆断能力下降，含碳量在0.6%左右时，两者相近而具有最高的强度。如果进行拉伸试验，由于承受的应力状态较扭转为“硬”，当含碳量达到0.4%时，断裂之前将不产生明显的塑性变形，只有当含碳量很低时，马氏体的脆断强度才具有较高的数值。马氏体的含碳量对冲击韧性的影响，表现为含碳量大于0.6%时，一次冲击韧性下降幅度明显增大。为了降低钢的脆性，目前工程上很少使用马氏体状态，而是在淬火回火后使用。

为了正确表征淬火马氏体的形态和含碳量对回火钢性能影响的规律，我们选用了使各种不同含碳量的碳素钢具有较高综合机械性能的淬火回火工艺规程。对于含碳量小于0.3%的钢采用 200°C 回火；对含碳量大于0.5%的钢采用 300°C 回火；对含碳量在0.3~0.5%之间的

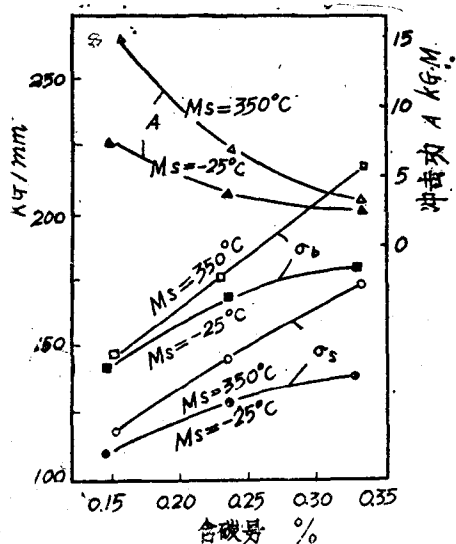


图11 Fe-Ni-C合金获得马氏体的 M_s 点, 含碳量对强度和冲击功的影响

钢用200°C和300°C回火两数^[18], 结果如图13所示。从图中可以看出, 淬火钢的含碳量对回火后机械性能的影响有明显的规律性。当含碳量低于0.6%时, 强度随着含碳量的增高而增大, 而对韧性、塑性的影响较小。而当含碳量大于0.6%时, 随着含碳量的增高, 强度明显下降, 韧性、塑性显著降低。这种机械性能在含碳量接近0.6%左右发生突变, 与淬火马氏体形态有关。当含碳量在0.6%以下时, 淬火马氏体主要是板条状的, 不易脆裂, 回火后随着含碳量的增高, 强度增高, 韧性降低很少。当含碳量大于0.6%时, 淬火组织中有针状马氏体存在, 显微裂纹较多, 低温回火时, 析出的碳化物沿精细孪晶带分布, 使韧性、塑性降低, 容易脆裂, 所以强度、韧性、塑性均明显降低。

2. 贝氏体的机械性能

贝氏体处理后的性能, 主要决定它的形态, 而组织形态主要受形成温度的影响。40Cr钢等温温度对机械性能的影响, 如图14所示。当等温温度低于400°C时, 形成的基本是下贝氏体, 随着等温温度增高, 硬度、强度稍有降低, 但由于上贝氏体量也随之而增多, 因此塑性、韧性增高很少或不增高甚至还稍有降低。当等温温

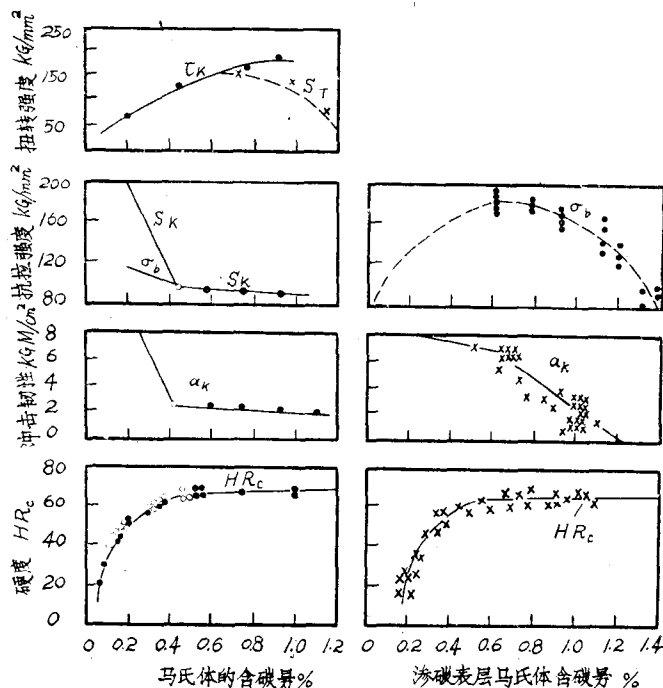


图12 马氏体的含碳量对综合机械性能的影响

度高于400℃时, 由于形成的主要是上贝氏体, 因此随着等温温度的增高, 不仅硬度、强度降低, 而且韧性、塑性也明显降低。但当等温温度高于450℃时, 由于过冷奥氏体转变为贝氏体的稳定性增大, 在随后冷却时有可能部分转变为马氏体和开始有珠光体形成, 因而随着等温温度的增高, 硬度、强度随之有所增高, 塑性、韧性继续降低。

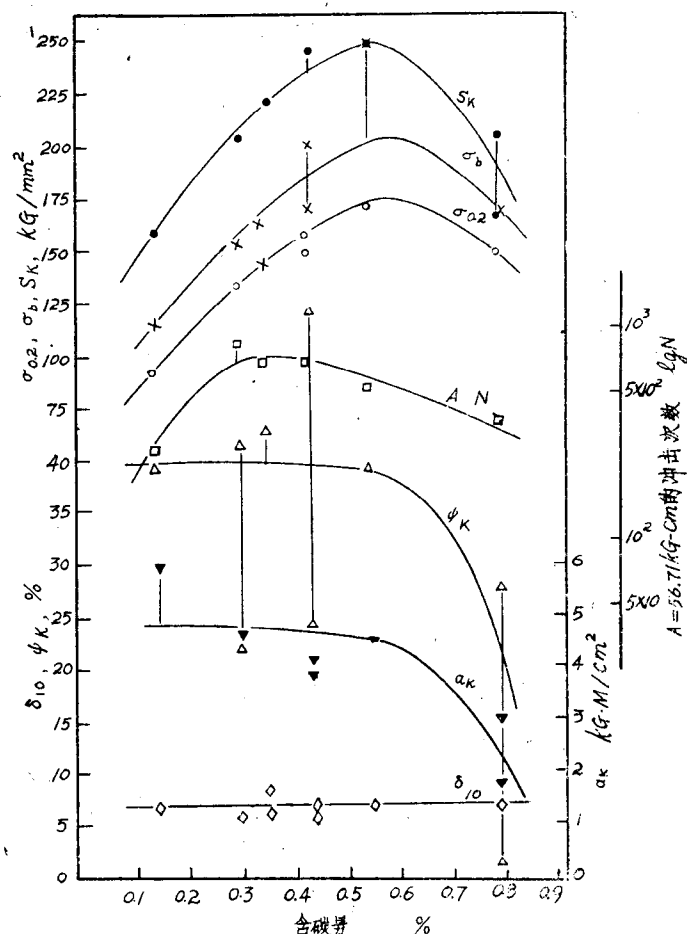


图13 淬火回火状态下钢的含碳量对综合机械性能的影响

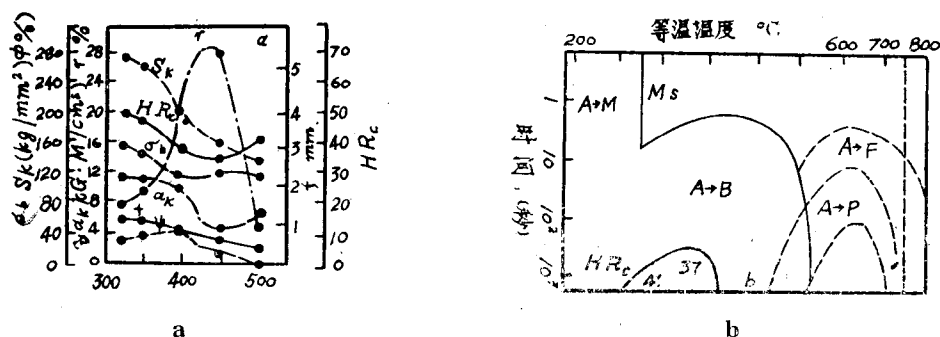


图14 40Cr钢等温处理的等温温度对机械性能的影响

a——等温处理的机械性能; b——等温转变图形。

60Si2钢等温处理的等温温度对机械性能的影响,如图15所示。由于在实验温度范围内,在25~35分钟的情况下,都可以获得贝氏体组织,所以在 M_s 点以上随着等温温度的增高,强度、硬度降低,韧性、塑性增高,但在375°C以上,由于上贝氏体数量增多,使强度、硬度继续降低,塑性稍有增高,韧性明显下降。

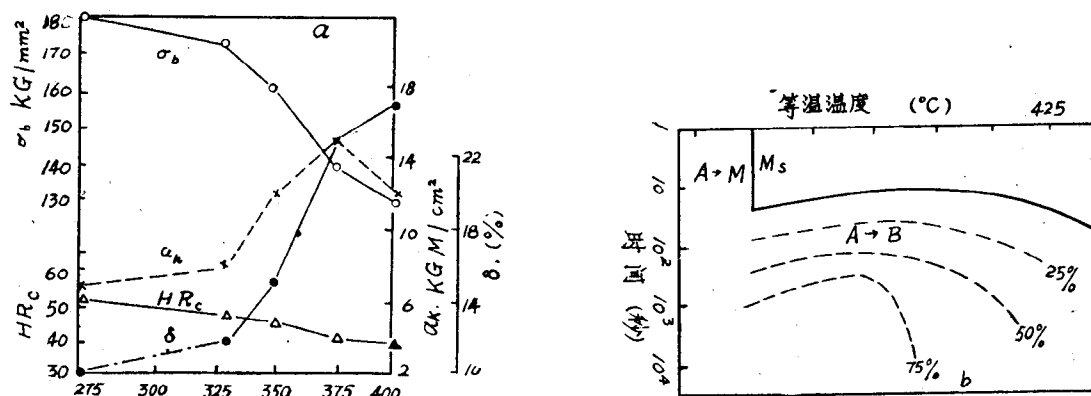


图15 60Si2钢等温处理的等温温度对机械性能的影响

a——等温处理的机械性能;

b——等温转变图形

3Cr3MoV钢经不同温度等温处理后的冲击韧性,示于图16之中^[19],即在 350~400°C以上等温处理,将使钢的冲击韧性急剧降低,这种现象即所谓“贝氏体脆性”。这种现象在其它中碳合金钢如40Cr、30Ni3、30CrMnSi、30CrMnNiSi2Mo等钢中都有反映。贝氏体脆性,主要是由于贝氏体中针状 α -Fe层之间碳化物分布不均匀引起的,在脆性形成温度范围内,宏观硬度的增高表明,这种脆性也与过冷奥氏体在该温度下转变不完全,部分地在随后冷却时转变为马氏体有关系。

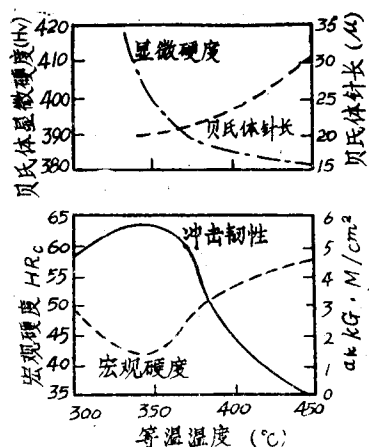


图16 3Cr3MoV 钢贝氏体的冲击韧性

3. 非要求组织对机械性能的影响

钢件淬火(马氏体)或等温淬火(贝氏体)处理后的机械性能,不仅与要求获得的马氏体或贝氏体性能有关,而且还与出现非要求组织的类型、数量、形态和分布有关。

残留奥氏体的影响 与马氏体或贝氏体相比,奥氏体是软相,残留奥氏体的数量和分布,对机械性能都将产生影响,马氏体或贝氏体中有少量奥氏体并均匀分布时,对强度降低较小,而可以提高韧性和塑性。但当奥氏体含量较多时,虽然会提高钢的韧性和塑性,但会大幅度降低钢的强度,特别是会降低屈服强度和疲劳强度。

淬火或等温淬火处理后的残留奥氏体数量,主要与钢的成分和加工工艺有关。淬火时奥氏体含碳、合金元素(Co、Al除外)多时, M_s 点降低,淬冷时在 M_s 点以上或以下等温或缓慢冷却时,产生奥氏体稳定化,都使残留奥氏体数量增多。等温淬火时,等温温度高,由于未转变奥氏体含碳量增多,致使冷却后的残留奥氏体含量增多,当形成温度较低时,由于贝

氏体转变不完全性减小, 残留奥氏体数量减少, 但是当形成温度过低时, 由于在等温保持时产生的奥氏体稳定化, 又会使冷却后的残留奥氏体数量增多。

珠光体转变产物的影响 如果钢件实际淬火或等温淬火的冷却速度小于临界淬火速度, 在马氏体或贝氏体形成之前, 有可能部分地发生珠光体型转变。转变产物如果是铁素体或铁素体+珠光体, 会明显降低钢的硬度、强度 (特别是疲劳强度); 如果是索氏体或屈氏体, 则对钢的强度、硬度降低稍小。当自由铁素体呈网状或大片状不均匀分布时, 还会降低钢的韧性。

针状铁素体及上贝氏体的影响 如果淬火或等温淬火处理, 钢件有部分针状铁素体或上贝氏体形成, 在这种情况下, 都将明显降低钢的硬度、强度, 而且也会降低韧性。针状铁素体或上贝氏体的出现, 主要是由于过冷奥氏体的稳定性较小和钢件实际冷却速度较小引起的。

马氏体 (回火马氏体) 的影响 贝氏体处理时, 未转变的奥氏体在随后冷却过程中, 有可能部分地转变为马氏体。在 M_s 点较高的钢中, 形成的马氏体还可能发生自回火而成回火马氏体。如果, 贝氏体处理等温温度在 M_s 点以下, 则在贝氏体形成之前, 将有部分马氏体形成, 并被回火成回火马氏体。当贝氏体处理后有针状马氏体存在时, 会使钢的硬度增高, 韧性明显降低; 而当有板条状马氏体存在时, 会使钢的硬度、强度增高, 而韧性稍有降低; 对于有回火板条状马氏体存在时, 由于其机械性能基本与下贝氏体相似甚至稍高, 所以对钢的强度和韧性均无不良的影响。但是, 当马氏体是针状 (孪晶型) 的, 回火析出的碳化物沿孪晶界或马氏体晶界分布时, 则会降低钢的冲击韧性。

非要求组织对机械性能的影响程度与其数量也有密切的关系, 通常非要求组织的数量越多, 对性能影响的幅度也越大。

四、控制组织形态发挥钢件强韧潜力

1. 低碳钢件的强韧化处理

机器零件和工具中, 使用低碳钢制造的很多, 一般需经化学热处理强化或在正火状态下使用。前者工艺复杂、成本高、生产周期长, 后者强度使用水平太低 ($\sigma_s = 25 \sim 35$ 公斤/毫米²)。低碳钢的组织类型对强度和脆性转化温度的影响, 示于图17所示。从图中的数据结合上述分析可以得出, 低碳钢的强韧性以具有马氏体和回火马氏体组织的最高。试验研究表明, 低碳钢经过淬火, 在获得低碳马氏体的情况下, 既具有高的强度, 又具有高的韧性和塑性 ($\sigma_b = 110 \sim 160$ 公斤/毫米², $\sigma_s = 90 \sim 130$ 公斤/毫米², $\delta \geq 10\%$, $\psi \geq 20\%$, $\alpha_k \geq 6$ 公斤·米/厘米²), 并且有低的脆性转化温度。这种组织的优异性能, 是由于淬火后获得的是典型的板条状马氏体。

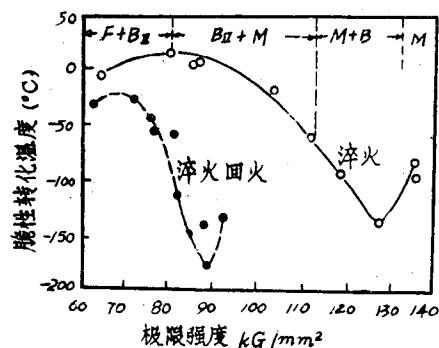


图17 低碳钢的组织形态对强度和脆性转化温度的影响

低碳钢件只有获得均匀的板条马氏体, 才能明显提高钢件的强韧性。由于低碳钢的淬透性较低, 如果用合金化的方法来改善, 其效果往往较中、高

碳钢为低（硼除外），所以在一般情况下，不宜用添加合金元素来获得低碳马氏体。为了在碳素钢或低碳低合金钢中获得低碳马氏体，钢的含碳量、淬火工艺参数对其有明显的影响。兹将运用普通质量低碳钢制造农机具的情况简介于下。

低碳马氏体钢锹 钢锹是农业、工业、建筑、运输业中使用很多的手工工具，目前我国每年生产的机制钢锹已近一亿把。以往钢锹用45钢或道轨钢板经等温淬火处理。为了利废利旧，也用低碳钢边角余料制锹，经渗碳等温淬火处理，由于渗碳时间长，消耗材料多，劳动条件差，成本高，而且质量也难稳定，渗碳过多成为脆锹，渗碳不足成为软锹，用户反映较多。1974年底我们与长春市制锹厂协作，研制成低碳马氏体钢锹。热处理工艺采用920~940℃短时间（3~5分钟）加热，在温度低于35℃15%NaOH水溶液中淬冷。结果锹的性能达到了部颁标准所要求的各项指标，现已鉴定合格投产。新工艺具有生产周期短、成本低、成品率高、劳动条件改善、产品质量稳定，强韧不脆，抗使用耐用的特点，受到用户欢迎。

低碳马氏体钢板 锄是用量很大的小农具之一。传统上锄的强化工艺，南方主要为贴钢淬火，北方主要用擦渗淬火或快速氰化淬火，这些方法或生产工艺复杂或有剧毒，目前也有使用45钢淬火回火处理的，但45钢板来源不太充分，而且成本较高。我们与吉林省怀德县黑林子农具厂协作，用B3钢直接淬火，使其获得板条状马氏体组织，硬度为HRC40~48，产品强韧，刃口不崩不卷，而且容易磨光，使用时摔土抗使。新工艺可以简化生产工艺、减轻劳动强度、降低成本，彻底防止氰化盐中毒和对环境的污染，新工艺已经鉴定投产。

低碳马氏体钢叉 四齿钢叉是我国农村比较广泛使用的小农具之一。使用时要求叉齿既不发生塑性变形，又不折断，并具有足够的抗泥土磨损能力。钢叉一般均用65Mn或60Si2Mn弹簧钢制造，经淬火和中温回火处理。由于弹簧钢供应常常不足而影响生产任务的完成。我们与吉林省延吉县开山屯农具厂协作，用B3钢经直接淬火获得板条状马氏体制成钢叉。这种钢叉硬度、弹性均可满足技术要求，而且克服了弹簧钢叉叉齿尖容易断裂的缺陷，又具有成本低（仅钢料成本就降低39%）、工艺简、生产率高（热处理提高500%，整个生产提高140%）、消耗少（生产五万把钢叉节电15000度，节约焦炭30%）以及原料来源广等优点，已经鉴定投产。

犁壁 机耕五铧犁犁壁，工作时受土壤磨损，要求较高的耐磨性，为了防止脆裂折断，又要求具有一定的韧性。通常采用三层复合钢板（65-B2-65）淬火回火处理或用低碳钢板渗碳淬火回火处理。前者由于原料供应不足而且成本较高，后者工艺烦杂，耗消较大，而且

表1 两种不同热处理犁壁土壤磨损情况

热 处 理 工 艺	硬 度 (HRC)		试样运行30小 时失重 (克)	实际耕作最大磨损深度 (毫米)	
	表 面	心 部		翻水田400亩	翻旱田3500亩
16Mn, 940℃加热5分钟, 在10%NaCl水溶液中冷却	49		2.5769		
	47	45		0.115	
	47				4.970
16Mn, 920℃渗碳25小时, 850℃加热, 水淬, 200℃回火	53		2.8368		
	60	28		0.125	
	55				5.895

产品质量也欠稳定。我们与吉林省延边农具厂协作, 采用16Mn低碳钢板直接淬火(900~940℃、5分、10%NaCl水溶液淬冷), 获得板条状马氏体。与渗碳淬火回火处理的相比, 实验室内土壤磨损和犁壁耕作磨损情况如表1所列。结果表明, 渗碳淬火回火的犁壁不如低碳马氏体犁壁耐磨, 除了前者只是表面强化之外, 也与其微区硬度不均, 组织不良(常见的如网状碳化物、较多的残留奥氏体、表层黑色组织、表面脱碳等)有关。犁壁采用低碳钢直接淬火获得板条状马氏体强化之后, 简化了工艺, 提高了生产率, 降低了成本。延边农具厂采用新工艺之后, 仅消耗材料(燃料、渗碳罐、渗碳剂等)一年即可节约十六万元。

此外, 运用低碳马氏体作为锄齿、耙片、螺栓、拖拉机小轴、链条零件、马牛掌及掌钉等都取得了以铁(低碳钢)代钢、简化工艺、降低成本、提高产品强韧性能等效果。

2. 中碳钢件的强韧化处理

含碳量在0.3~0.55%之间的中碳钢, 在机械工业上应用很多, 通常都是在淬火回火或

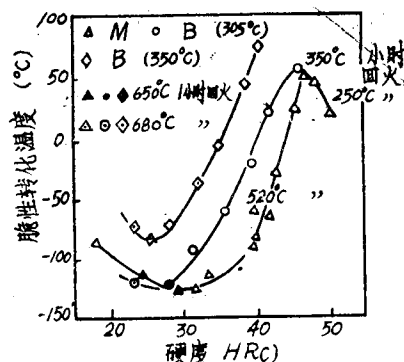


图18 35CrNi2MnMo钢的贝氏体和马氏体及其回火产物的硬度及脆性转化温度

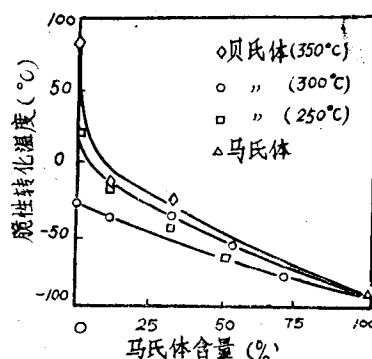


图19 50CrNiMnMo钢不同温度形成的贝氏体及马氏体含量对脆性转化温度的影响(回火至HRC40)

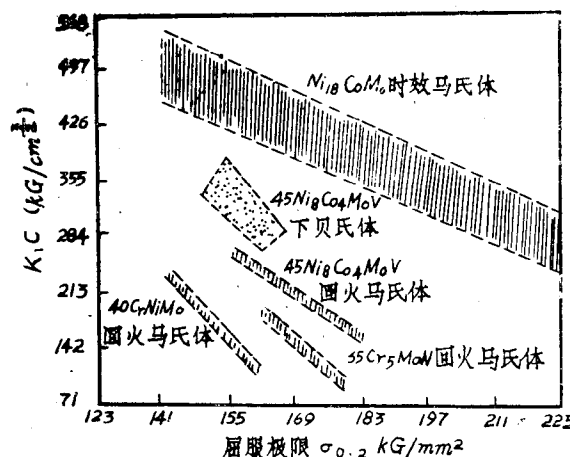


图20 几种高强度钢的组织结构状态的强度和断裂韧性

示于图19之中^[21], 亦即, 贝氏体+马氏体混合组织中马氏体含量越高, 脆性转化温度越

等温淬火状态下使用。因此, 必须研究中碳钢件具有高强韧性的组织形态和热处理工艺。35CrNi2MnMo钢的不同显微组织对硬度和脆性转化温度的影响示于图18之中^[21]。从图中可以看出, 无论是等温处理还是等温处理+回火, 在相同硬度下, 其脆性转化温度皆稍高于淬火回火处理的, 而且等温温度越高, 形成的贝氏体越粗, 其脆性转化温度越高。如果, 控制等温处理后的贝氏体数量, 使其获得下贝氏体+马氏体的混合组织, 再经回火处理, 在相同硬度的情况下, 马氏体的含量对脆性转化温度有明显影响。50CrNiMnMo钢的试验结果

低。几种高强度钢的组织结构状态对强度和断裂韧性的影响示于图20之中〔22〕。从图中可以看出, 45 Ni8Co4MoV 钢的下贝氏体组织, 其断裂韧性比其回火李晶型马氏体组织为高, 也高于40CrNiMo和35Cr5SiMoV钢的回火混合型(针状+板条状)马氏体组织。这些都与显微组织和亚结构状态不同有一定的关系。

综上所述, 如果中碳钢件淬火后获得的是单一板条状马氏体组织, 则在回火后可望获得较高的强韧性能。

40CrNiMo钢, 采用1200℃高温奥氏体化后淬火, 与加热温度为870℃的普通淬火相比, 在静机械性能相近的情况下, 断裂韧性确有明显地增高如表2所列, 金相检验表明, 高温淬火完全获得了板条状马氏体, 而普通淬火获得的是混合型马氏体。从表中还可以看出, 高温奥氏体化(1200℃加热缓冷到870℃淬火)比正常温度(870℃)淬火具有较小的开裂倾向, 这也可能与板条状马氏体的韧性较高产生显微裂纹的倾向较小有关。上述规律, 在许多中碳合金钢(如35CrMo、40Mo2、35Cr4等)中都得到了证实。

表2 热处理工艺、马氏体形态对40CrNiMo钢机械性能的影响

奥氏体化温度 (℃)	淬火介质	夏氏冲击功 (公斤·米)	屈服极限 (公斤/毫米 ²)	断裂韧性K _{1c} (公斤/毫米 ^{3/2})	晶粒度	显微组织
870	油	0.94	162.4	124.25	7~8级	板条状马氏体+ 针状马氏体+极 少量残留奥氏体
	水 10%冰盐水	淬裂				
1200	油	0.77	154.7	178.92	0~1级	板条状马氏体+ 板条间残留奥氏 体薄层
	水 10%冰盐水	淬裂				
1200缓冷 至870	油	0.79	162.4	223.65	0~1级	同 上
	水	—	—	216.91		
	10%冰盐水			221.17		
同上 200℃回火	油	—	161.7	266.25	0~1级	
870 200℃回火	油	—	165.7	218.15	7~8级	

应该指出, 上述实验结果, 均系对精炼去气钢得出的, 但是对工业用钢, 其奥氏体化温度应低于奥氏体对硫、磷等有害杂质溶解度最大的温度和杂质与铁形成的共晶温度, 否则由于杂质或共晶沿奥氏体晶界析出或形成, 将显著降低钢的强韧性, 特别是韧性和塑性。因此在能够获得板条状马氏体的前提下, 奥氏体晶粒越细, 钢的强韧性越高。

5CrNiMo、5CrMnMo型锻模钢, 属于含碳较高的中碳合金钢范围, 也是经淬火和高温回火后使用。目前淬火温度在850~870℃之间。当前国内锻模使用寿命普遍不高, 一般锻打3000件左右, 其主要失效形式是开裂、塑性变形和热疲劳。如果改变热锻模工艺, 使其在淬火后获得板条状马氏体或下贝氏体, 经回火后可望获得高的强韧性而提高其使用寿命。东北

齿轮厂5CrNiMo钢锻模（尺寸为480×450×295毫米），原经860℃加热油淬，带温在500℃回火，硬度为HRC41~42，锻打齿轮毛坯2500件后模腔发生塑性变形，现改用900~930℃加热，油淬带温在300℃等温保持3小时，再升温至500℃回火，硬度为HRC42~43，锻打同样齿轮毛坯，已达8100件仍能使用。试样经860℃和930℃淬火后的金相组织检验表明，两种马氏体形态不同，前者有明显针状马氏体存在，后者板条状马氏体显著增多；锻模实际检验表明，按原工艺处理，心部有屈氏体、上贝氏体、马氏体存在，按新工艺处理，心部为回火下贝氏体。当然新工艺溶解的合金元素较多也是提高其使用寿命的原因。

延吉汽车配件厂生产的45钢汽车轮胎螺钉，原工艺路线为：锻造（气冷）、正火、淬火、回火、切削加工；现改为：锻造（立即水淬）、回火、切削加工。原工艺由于采用的是重新加热淬火，加热温度不高，奥氏体中碳浓度不均匀，淬火组织是针状马氏体+板条状马氏体，有时还会出现屈氏体，这些组织经高温回火后，组织也不均匀。新工艺由于锻造加热温度很高，约为1150~1250℃，奥氏体非常均匀，锻造过程并不改变奥氏体均匀性，但可细化晶粒，停锻后（880~950℃）立即淬冷，所得到的组织是板条状马氏体，这种组织经高温回火后形成的回火索氏体也非常均匀。因此，新工艺不仅提高了生产效率，而且处理的产品具有硬度均匀强韧性较高的特点。博山锻压厂对45钢柴油机连杆，采用辊锻余热进行淬火，获得了板条状马氏体组织，也取得了工艺简化、强韧性提高的效果。

随车（机）工具呆搬子，常用45钢锻制而成，其热加工工艺为：锻造，正火、淬火、回火。为了节约热能（电力或燃料），缩短生产周期，利用锻造高温加热，奥氏体晶粒较大，成分均匀而造成过冷奥氏体比较稳定的特点，研究了利用锻造余热直接进行等温淬火。这样其热加工工艺为：锻造（等温冷却）。钢料用油炉加热到1200~1250℃，取出在1吨蒸汽锤上进行模锻，停锻温度为1000~1100℃，立即置于熔融盐浴中等温保持10~20分钟，空冷。等温处理后的机械性能，示于图21之中。为了便于比较，将锻造后空冷、正火、淬火、回火处理后的机械性能，亦示于图中。

从图中可以看出，利用锻造余热，在280~320℃等温处理（ $M_s \approx 350^\circ\text{C}$ ），钢的强度、韧性最高，高于普通淬火回火的，更高于产品技术要求经450℃回火处理的。只有在 M_s 点稍下等温，形成细小下贝氏体+回火板条状马氏体，钢件才具有高的强韧性能。

吉林省敦化县通用机器厂生产的2V—0.3/7型微型空气压缩机吸气和排弹簧片，用60Si2Mn钢制成，厚度为0.18毫米和0.3毫米。实践表明，采用普通淬火回火，获得回火屈氏体，使用时常常发生早期破裂或塑性变形，寿命较低，弹簧片为供应状态（铁素体基体上分布着细粒状碳化物，使用寿命稍有提高，但排气量达不到设计要求。为了降低弹簧片的脆性，提高抗疲劳能力，热处理后

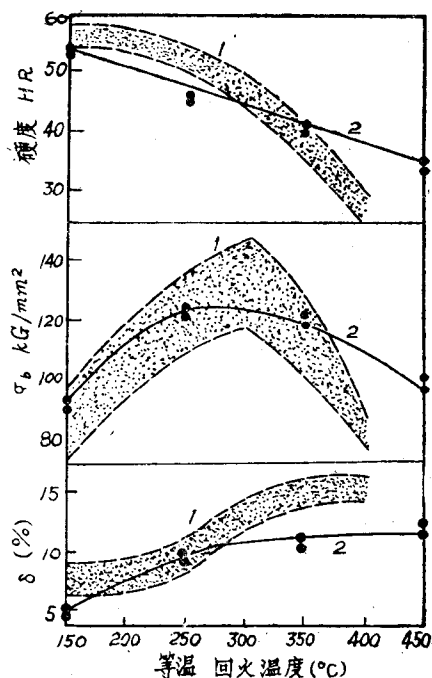


图21 45钢经不同工艺处理后的机械性能

1——锻热等温淬火；2——锻造、正火、淬火、回火