

国外热处理技术

黎樵榮 编译

本书系根据美国金属学会期刊出版部编辑的《热处理资料集》(Source Book on Heat Treating)一书中部分文章选编译成。内容包括有钢铁、有色金属合金和粉末冶金等材料的热处理新工艺、新技术和新设备。在选择上较偏重于实际生产中的工艺和技术问题。

国外热处理技术

黎樵榮 编译

*

冶金工业出版社出版

(北京市灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 9 1/8 字数 239 千字

1981年2月第一版 1981年2月第一次印刷

印数00,001~10,000册

统一书号: 15062·3637 定价0.93元

前 言

在我国社会主义现代化建设中，工农业生产、国防和科学技术的发展，对金属材料的性能和各种金属构件的质量提出了愈来愈高的要求。因此，作为提高金属材料性能的重要手段的热处理技术，有着不可忽视的作用。

近年来，国内外在有关热处理的理论、工艺和设备等方面都有了很大的发展，并取得了许多新的成就。为适应当前生产发展和技术改造的需要，译者编译了本书，以概略地介绍近十余年国外在热处理生产技术上的一些较新的进展。

本书根据美国金属学会期刊出版部编辑的《热处理资料集》(Source Book on Heat Treating, ASM Metals Park, Ohio, 1975)中的特写文章和研究报告选编译成。原书包括从六十年代中后期至七十年代前期美国在热处理领域中一些最新的资料，主要取自美国金属学会出版的《金属进展》、《金属工程季刊》、《金属进展资料手册》和《ASM金属手册》(第八版)等期刊和参考书。资料所涉及的范围较广，包括有钢铁、有色金属合金和粉末冶金等材料的热处理新工艺、新技术和新设备。在内容上本书对有关热处理的理论探讨不多，而较偏重于实际生产中的工艺和技术问题。我们预期这些资料对热处理工作者在选材和解决有关生产问题中将有一定的参考价值。

限于素材范围，本书并未完整地包括近年热处理技术发展的全貌，例如，对于目前颇引人注目的钢的强韧化处理，以及形变热处理等均未涉及。而且，考虑到篇幅所限，对现在正迅速发展的可控气氛热处理和真空热处理也未能有较多的反映。

由于原资料中插图均用英制单位表示，故本书正文前列入了“某些英制单位换算数据表”，以供读者在需要换算成公制单位时查阅。

目 录

前 言

某些英制单位换算数据表

热处理零件用钢的选择.....	1
可控气氛和真空热处理炉的发展.....	32
根据成分计算钢的淬透性.....	45
淬透性曲线的计算.....	59
长棒材热处理的自动系统.....	65
钢管焊缝的动态退火.....	69
不锈钢管的光亮退火.....	73
碳钢的热处理.....	76
重型设备用的碳-锰-硼钢零件的热处理.....	84
超高强度钢D6AC的奥氏体湾淬火.....	90
淬火参数对D6AC钢航空构件断裂韧性的影响.....	99
中碳钢的等温淬火.....	109
工具钢的感应淬火.....	114
真空炉中气体淬火的参数.....	122
钢中的残留奥氏体及其测定方法.....	127
高温渗碳和真空渗碳.....	139
凿岩钻头部件的连续渗碳.....	152
孔卡读数器控制的齿轮碳氮共渗.....	158
氮化与感应加热复合处理.....	163
辉光放电离子氮化、烧结和钎焊.....	167
应用工业激光进行表面硬化和合金化处理.....	177
粉末冶金制品的热处理.....	193
热致密化粉末合金的热处理.....	205
铝合金热处理的工艺和设备.....	222

〔附录〕 铝业联合会 (Aluminum Assn) 规定的可热处理合金的	
时效回火状态代号.....	233
铜和铜合金的热处理.....	236
退火对工业铜性能的影响.....	245
铜合金带材的连续退火.....	253
钛及其合金的热处理.....	257
〔附录〕 热处理对Ti-6Al-4V显微组织的影响	267
Inconel X-750的新热处理工艺	271
沉淀硬化超合金的最佳热处理.....	275

热处理零件用钢的选择

据R.F.克恩 (Kern) 等编译

由于材料工程师进入研究与设计之间的技术领域，六十年代在工业组织机构中出现了引人注目的变化。材料工程师的一个重要作用就是为所设计的部件选择适宜的材料。

选择热处理零件用钢的主要目标是在总成本最低的条件下选取能满足规定的技术要求的成分。总成本包括原钢材的价格，锻造、铸造或焊接等加工费，以及用于机加工和热处理的费用等。此外，废品、返修品和保证备件等耗费虽然较难确定，但也必须考虑。零件的技术要求则是由设计人员提出的，提出的根据是通过估计、计算或试验而求得的零件的工作状况，特别是所受应力的状况。设计者通常只能计算比较简单的零件的应力。复杂的零件往往是靠估计来设计的，而零件试验则可为最终设计要求提供有价值的信息，它可表示出先前估计和计算的应力的方向、频率和方向的有效性。技术要求应尽可能完整而精确地规定，以使材料工程师能有效地工作。

在选择用于受热处理的零件的钢的成分时，在一般的情况下，材料工程师应向设计人员提供如下性能：强度和硬度，耐热性和耐蚀性。对于主要是要求力学性能的零件，应根据设计提出的强度要求而确定零件在热处理后所应具有的硬度，从而求出钢的含碳量及选定钢号，同时确定为达到此硬度而对所选钢号采取的热处理方式。此外，还必须从设计的角度说明工业上的限制条件，并考虑到成本和采购问题。

本文主要就强度和硬度方面叙述热处理零件用钢的选择过程和方法，并着重对纯拉伸、疲劳和冲击条件下工作的淬火一回火钢及渗碳和表面淬火用钢的选材应考虑的因素作些介绍。

一、选择直接淬硬类钢的一般方法

(一) 硬度与含碳量的函数关系

当使用要求包括有承受剪切或拉伸、弯曲或扭转、疲劳或磨损等载荷时，在工件的某些有意义的部位必须保证有一定的硬度。

硬度是钢的化学成分和淬火急冷度的函数。为提供一定强度所必需的硬度和最低含碳量可由图1确定。例如，选定的屈服点200000磅/英寸²①相当于最终硬度（回火后）HRC48②。可取的淬火状态硬度至少应高5单位或HRC53③。故可采用的最低含碳量是0.40%④。

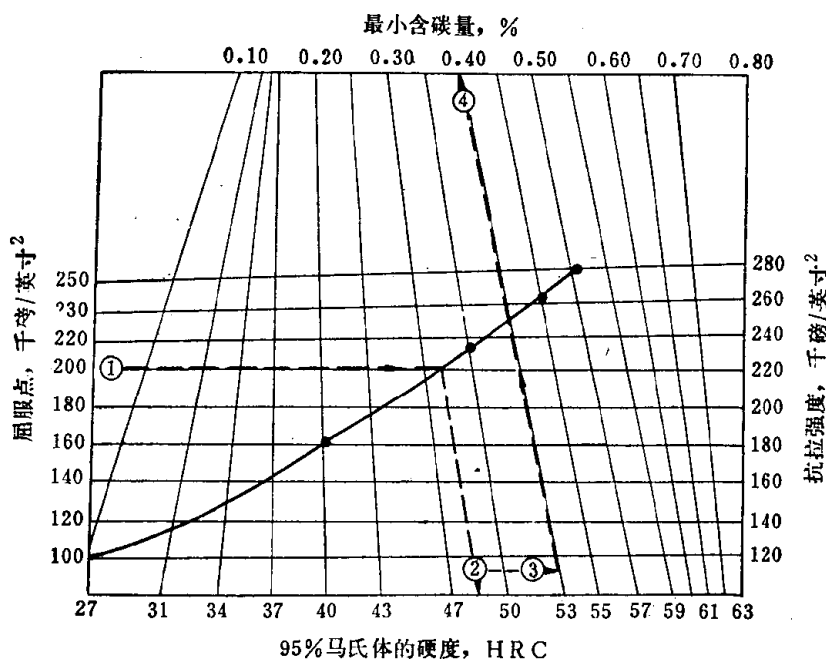


图1 当所要求的屈服点或抗拉强度已知时，可由此图确定最低含碳量和所需的硬度

图1所示的关系曲线是以95%回火马氏体为基础的。这样的百分数可达到实际上最佳的综合机械性能。应注意图中所示的含碳量是可采用的实际最低值。在具体规定含碳量时，还应考虑到

采购和原料供应情况，力求使钢件的库存最少。

无论选取图 1 中最低值以上的何种含碳量，它对应的最少 95% 马氏体的硬度就将是淬火状态工件所要求的硬度。

(二) 淬火方式的选择

一旦所要求的硬度确定以后，就必须决定如何获得这个硬度。这里主要是考虑淬火方式（淬火介质）问题，因为要根据所采用的淬火方式决定必需的合金元素含量。

淬火介质的选择须符合如下条件：

- (1) 避免过大的或不能预料的变形；
- (2) 避免淬火裂纹；
- (3) 获得合适的显微组织；
- (4) 产生适当的残余应力分布；
- (5) 淬火设备的有效利用。

选择什么淬火方式才能保证零件淬硬而又不致开裂或超过容许范围的变形，往往是凭经验判断，但也有一些普遍有用的准则可循。

假使零件的断面变化很大（1：4 以上），通常是不能用水淬火的。如果零件的形状需要有孔、槽或尖角，一般也不应用水淬。这种类型的零件要用油或熔盐淬火以避免开裂。

在选择淬火介质中要考虑的另一个十分重要的因素是可允许的变形程度。齿轮通常是用油淬火以尽可能减少变形和各炉次的钢之间的差别。如果工件在热处理以后不能有效地矫正，而且容许公差很小，就还是选用油、热油或盐浴淬火为好。

有时，淬火介质要由对显微组织的特殊要求来决定。一个典型的例子就是在一些高合金钢中为获得良好的韧性而要产生贝氏体组织。此时，就常用热油或熔盐。

为产生特定的残余应力分布，常常要求水淬。因为其他淬火剂的冷却速度较慢，得到的表面残余应力较低。

淬火介质的选择有时要视生产厂中有什么设备而定。这就往往会导致钢的成本增高或产品质量恶化。例如，现在通行的是附

有成套油淬设备的炉子,在这种情况下便有可能不得不选择比水淬要求更高的合金钢。如果水淬火的搅拌作用很弱或不均匀,也要优先选用可油淬的高淬透性的合金钢,以减少开裂和变形。

(三) 钢号的选择

每一种淬火方式都对应着一定的冷却速度,故为确定适合于一定淬火方式的合金类型,必须把主要断面内或主要表面上的冷却速度测定(至少是估计)出来。

冷却速度可用末端淬火试棒上的距离1/16英寸单位表示。其测定方法如下:

(1) 由相同炉号的钢取出至少两个试样和尽可能接近于所提出的生产方法制成的试件。把这些试件机加工至淬火前的状况,并镀铜或用其他方法以防止试件渗碳或脱碳。然后对试件进行与生产零件相似的全部热处理操作过程。

(2) 试件No.1以尽可能与生产相近的方式淬火(不回火)。然后把淬火断面切开、磨平和抛光,以便在图2所示部位测出硬度读数:

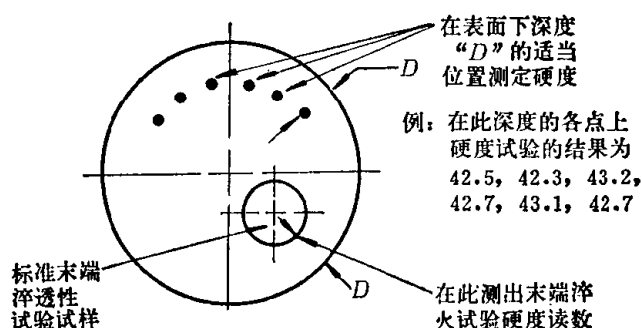


图2 测量硬度的取样部位

(3) 从试件No.2加工出末端淬透性试验试样, 取样位置应在淬透性试样上的试验部位相当于表面下深度“D”(D为待测的参考点到表面的距离),如图2所示。把末端淬火试棒从与No.1试件相同的温度淬火,并测定硬度。上例试验结果如下:

离淬火端距离, 1/16英寸	1	2	3	4	5	6	8
硬度, HRC	56	55	55	54	52	48	43

(4) 把第二步的参考位置上所测得的硬度(HRC 42.7) 与末端淬火结果(第三步)相比较, 就可以看出此硬度是在末端淬火曲线上的8/16英寸处。于是, 在参考点上的淬火冷却速度就约等于末端淬火试验的8/16英寸。

(5) 进一步确定随后在很多不同炉次的生产零件上的冷却速度, 并使材料或热处理或两者都适应于更精确地达到技术要求。

淬火冷却速度的这种测定方法是比较费事的。对于简单的断面, 冷却速度可以根据有关资料(如《金属手册》第二卷、《SAE手册》或《USS Carilloy Steels》等)中的曲线估算出来。

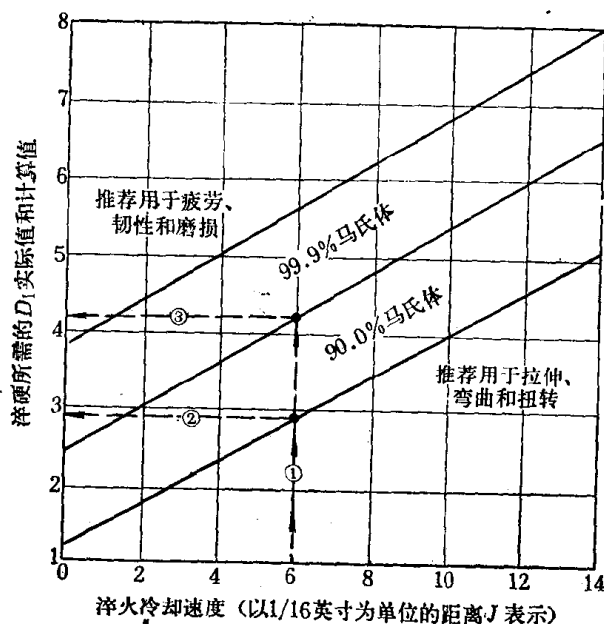


图 3 当淬火冷却速度已知以离末端淬火试棒端点距离(J/16英寸)表示时, 可根据此图确定为得到两种马氏体含量范围所需要的淬透性实际值或计算值

注: 图中 D_I 实际值根据 Hodge和Orehoski, U.S. Steel Corp., AIME Tech. Pub. No. 1994.

计算采用“USS Carilloy Steels”, 1948所规定的方法

表 1 典型结构钢的最低 D_1 值和价格 (根据1968年7月10日的资料)

钢 号	最小 D_1	价 格 ^①	钢 号	最小 D_1	价 格 ^①	钢 号	最小 D_1	价 格 ^①	钢 号	最小 D_1	价 格 ^①
1018 ^②	0.47	15.37	1141 ^②	1.27	6.44	4621H	1.75	6.70	8625H	1.85	5.42
1022 ^②	0.57	12.67	1144 ^②	1.14	7.39	4718H	2.12	5.84	8627H	2.12	4.68
1524 ^③	1.02	7.91	4027H	1.35	6.65	4720H	1.37	8.08	8630H	2.20	4.51
1035 ^②	0.66	10.95	4028H	1.35	6.83	4815H	2.12	6.78	8640H	3.07	3.23
1536 ^②	1.06	7.48	4032H	1.37	6.55	4817H	2.30	6.25	8645H	3.32	2.99
1038H	0.80	9.03	4042H	1.75	5.13	4820H	2.58	5.51	86B45H	5.00	2.04
1040 ^②	0.71	10.18	4118H	1.16	7.78	5046H	1.47	5.70	8650H	3.64	2.73
1541H	1.75	4.53	4130H	2.12	4.40	5120H	1.16	7.69	8660H	6.20	1.60
1045H	1.00	7.23	4140H	4.00	2.38	5130H	2.29	3.88	8720H	1.75	5.81
1050 ^②	0.81	8.92	4150H	5.10	1.87	5140H	2.45	3.54	8822H	1.93	5.51
1552 ^②	1.34	5.91	4161H	5.40	1.79	51B60H	3.64	2.45	9260H	2.12	4.19
1060 ^③	0.87	8.30	4320H	2.12	5.63	6118H	1.37	7.03	9310H ^③	5.00	3.53
1080 ^②	1.01	7.15	4340H	>7.00	<1.73	8617H	1.37	7.32	94B15H	2.58	4.00
1117 ^②	0.61	13.24	4419H	1.16	8.51	8620H	1.57	6.39	94B17H	2.58	4.00
1118 ^②	0.77	10.68	4620H	1.16	10.02	8622H	1.75	5.73	94B30H	3.64	2.71

① 价格以每单位最小 D_1 的美元/百磅计 (热轧棒材, 碱性平炉钢)。

② 计算值, 其余为已发表的成分和热轧带材中测得的实际值。

③ 电炉优质钢。

当冷却速度、碳含量和所要求的硬度都已知道，则所需钢种的近似 D_1 值（理想临界直径）就可以根据图3确定，同时从表1可决定所选钢号。例如，设在零件的某一特殊部位上冷却速度已知等于 J_6 ，则根据图2，为得到90%马氏体组织，材料就至少须有约2.90的实际或计算的 D_1 值（①→②）。而要得到99.9%，则需要最小 D_1 值为4.20（①→③）。根据此 D_1 值，可在表1中选择出适当的钢号。

二、各种特定技术要求的钢材选择

从力学性能方面考虑，通常遇到的是材料在下述工作条件下的性能：纯拉伸或剪切、弯曲和扭转、疲劳、冲击和磨损。对于在这些条件下工作的零件，各有其选材的考虑因素。

（一）纯拉伸和剪切载荷

在比较简单的结构零件中，这是最容易满足的技术要求。螺栓就是很好的例子，其主要要求是比例极限。这种类型的零件通常是在纵向受力——同时有或没有剪切。

硬度范围和所需要的最低含碳量可应用图1确定。为得到最好的拉力或剪切性能（或两者均有），显微组织最好是在整个横断面上最少有90%的回火马氏体。一俟最低限度的硬度值和含碳量确定以后，就可应用图2和表1选择纯拉伸和剪切载荷用钢。

为尽量降低淬裂的可能性而仍可得到所希望的淬火状态组织，应选择尽可能低的碳含量。各种碳含量范围的钢的主要用途是：

- （1）0.20%C范围普遍用于需要焊接和最大韧性的用途。
- （2）0.30%级适合于要求硬度（耐磨损）和韧性的综合性能。
- （3）0.40%级用于一般要求高强度的用途。
- （4）0.50%级对要求高强度和耐磨性的用途是最好的。
- （5）0.60%级普遍用作热处理的弹簧。
- （6）含碳量级别在0.60%以上的钢是用于象工具和轴承座

圈等技术要求高的用途的。

在选择用于纯拉伸和剪切载荷的钢时，还要考虑另外几个重要的因素：

(1) 如果绝对地不容许屈服，则比例极限就是重要的力学性能。它等于屈服点的75~90%。在可允许少量屈服而无损于工件使用的场合，则采用常用的以0.2%永久变形量的方法测定的屈服点通常是可以满意的。

(2) 对承受拉伸载荷的带有凹槽或沟的工件，缺口抗拉强度是很重要的。含有有效硼量^①的钢，其缺口抗拉性能较无硼钢为高（含硼的低碳钢号可进行冷镦而不用退火，若用其他合金元素以达到相同淬透性的钢则要退火）。含硼钢是极好的紧固件材料。

(3) 回火马氏体的力学性能基本上是碳含量的函数。在普通等级的结构钢中，合金元素百分数很小时对这些性能的影响甚微。当显微组织相同时，合金钢的韧性通常较普通钢要好一些。这在低周疲劳（将在后面讨论）中可能是很重要的。对受纯拉伸或剪切载荷（或两者均有）的全硬钢，可根据淬透性来使用。

(4) 淬火介质冲击到炽热钢件上的型架淬火常常是最优先选用的，因为它有如下优点：对一定成分的钢来说可得到最大的淬硬深度（使钢的成本降低）；甚至当零件由8645这样的深淬合金钢制成时，其表面常常还可产生残余压应力（见图5）；能冷却均匀的最佳显微组织使开裂和变形大为减少。（特别是象4150和4340等高淬透性的合金钢，淬火裂纹往往是由于淬火的不均匀性，而不是由于急冷度而引起的。）不过，这种淬火方法除非有十分精心设计的淬火装置而能保证各不同厚度的断面上可控的散热速度，否则就只限于象圆棒那样的简单断面。

① “有效硼量”的意义为：炼钢加入的硼能使淬透性提高约等于 $1 + 2.57(0.74 - \%C)$ 的Grossmann因子。

(5) 选用作承受纯拉伸载荷零件的钢应该有一定的韧性，以适应机器或结构装配时发生的偏心和垂直度。碳含量应尽可能低，而且超过心部碳量的任何表面渗碳都必须严格避免。大多数用于这种载荷状态的钢含碳可在0.15~0.44%之间。

(6) 承受拉伸载荷的螺栓和螺杆，应该用变形最小的方法进行热处理。这就不必在热处理以后对工件矫直或机加工了。任何弯曲的存在都势必会在零件的某些地方产生过大的应力集中。

(二) 疲劳载荷

资料表明，大多数零件的早期破坏都是由于疲劳而引起的。当已知疲劳是主要因素时，材料的选择便十分重要。承受静态载荷的零件，在应力超过屈服点以前都是不会断裂的。在经过恰当的淬火和回火的钢中，这是强度极限的75~90%。

然而，在动态载荷或周期性载荷下的零件，在低周疲劳(1~100000次)中应力低至强度极限的70%就会断裂，而在高周疲劳(超过100000次)中则低至强度极限的40%就会断裂。

应力等级、循环周数要求和应力集中系数等设计数据，对钢的选择都是有用的。同时必须知道材料的强度、韧性和疲劳极限。最好的办法是对零件在模拟的或真实的工作条件下进行试验。象曲轴、焊接组合件和机架等复杂零件要进行高度精确的应力分析以确定疲劳参数。

只要作用应力、载荷周次和应力集中面积一经确定，选择材料和热处理方式就很容易了。如果遇到异常高的应力，设计师通常可靠改变结构形状的方法而制造出适用的零件，比材料工程师靠选材和热处理来解决要更适宜。例如，较大的轴肩或较厚的断面所降低的应力就比改变组织要有效得多。

当体积、重量或形状被限时，材料工程师有五种可单独或一起用来改善疲劳特性的手段：

(1) 采用强韧钢于抗低周疲劳。图4中的数据是在全交变同轴载荷的疲劳试样上测得的，试验时应变维持在可控制的范围

内。图中的 $\Delta\epsilon_T$ 表示总应变幅度，而 N_f 则是断裂前循环次数。此数据说明，采用兼备韧性和静力强度两者综合特性的硬度范围的材料，可得到最高的疲劳寿命。

(2) 拟定材料、热处理或诸如喷丸或轧制等表面处理手段，以在受力较大的区域内

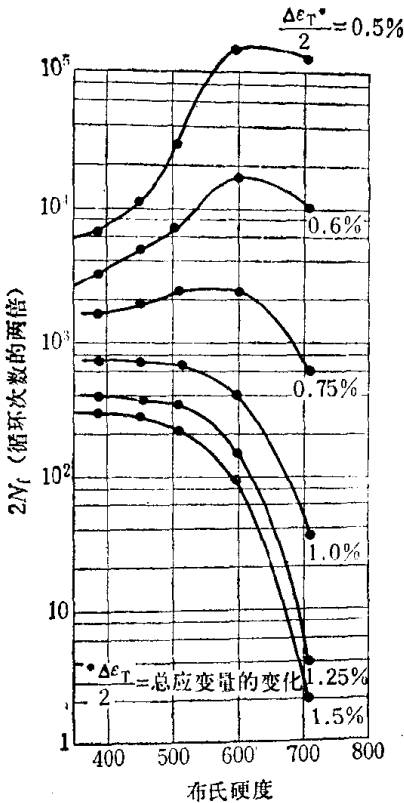


图 4 淬火和回火的1045钢的硬度和应变量百分数对低周疲劳寿命的影响

的磨蚀和腐蚀疲劳而引起的破坏。

为在零件表面及表面略下的区域得到高的压应力状态而进行的热处理称为“薄壳淬火”(Shell hardening)。这种处理工艺的最早应用是福特牌汽车丁型轴。象1035、1045等浅淬硬钢，以及甚至如1080那样的高碳钢都可以应用。其成功取决于所采用的浅淬硬钢。

段，以在受力较大的区域内产生高的表面压应力。这将改善抗高周疲劳特性（通常只有当循环次数接近于100000次时，压应力才变得能改善低周疲劳特性）。

材料工程师还必须保证：热处理后的加工（例如研磨）可以精确地控制以防止损坏工件表面。在零件表面上和靠近表面处，材料的屈服强度加上压缩应力，将超过工作应力最少一倍。

(3) 采用特别洁净的或表面质量特别优良的钢。

(4) 通过精磨或抛光以提高最大应力区域的表面光洁度。

(5) 应用镀层或耐磨蚀覆盖层以抵抗由某些类型的

为了在工件表面得到一个均匀的完全马氏体壳层，低淬透性的钢要用水、盐水或5%苛性钠等十分急剧的冷却。通常要求两侧的淬硬深度不大于直径或壁厚的10%左右。从90%马氏体的硬度降落到 HRC 20~30的心部硬度的过渡区域必须不超过约3/32英寸。

全淬硬层深度和表面硬度还必须提供必要的扭转强度。这是由增大或减小末端淬透性来控制的。

为了得到最好的结果，还是以透热为好，因为所引起的压缩应力的20~50%是随着热而未淬硬的心部从硬化表面向内收缩而产生的。此百分数取决于钢的成分。此外，还应小心掌握成分和淬透性避免开裂；炉气必须控制以防脱碳。

图5示出用0.80C、0.40Mn的工具钢制混凝土搅拌桨尖的处理情况：柄部为提高抗疲劳性而进行壳层淬火，全淬硬层约0.12英寸，表面硬度达 HRC 56~62，心部则为 HRC 25~35。尖端和碰击面则回火软化至 HRC 40~48以防碎裂。

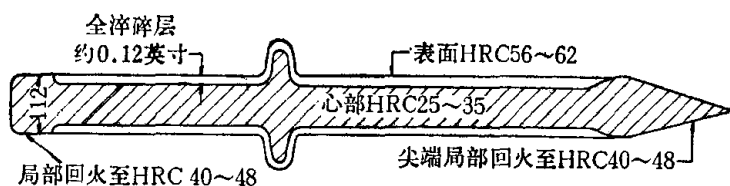


图 5 混凝土搅拌桨尖的处理结果示意图

为产生表面压应力以改善高周次范围的抗疲劳性，除壳层淬火以外，还广为应用喷丸硬化、表面滚压及其他处理方法。但是，如果这些处理做得不适当，则坏处可能比好处还多。为取得最好的结果，钢丸要比零件硬些，因为硬度不足的喷丸会降低表面压应力。不适当的表面滚压会引起表面剥落而使零件开始损坏。图6示出各种钢的弯曲疲劳极限受淬透性级别和表面处理影响的情况。

在选择最佳疲劳特性的钢时，洁净度的影响往往是容易受忽

视的。这在使用高强度级时特别重要。许多轴承公司早就公认钢的洁净度在保证它们的产品寿命中的重要性；航空器部件的制造厂也意识到了夹杂物对疲劳损坏的影响。

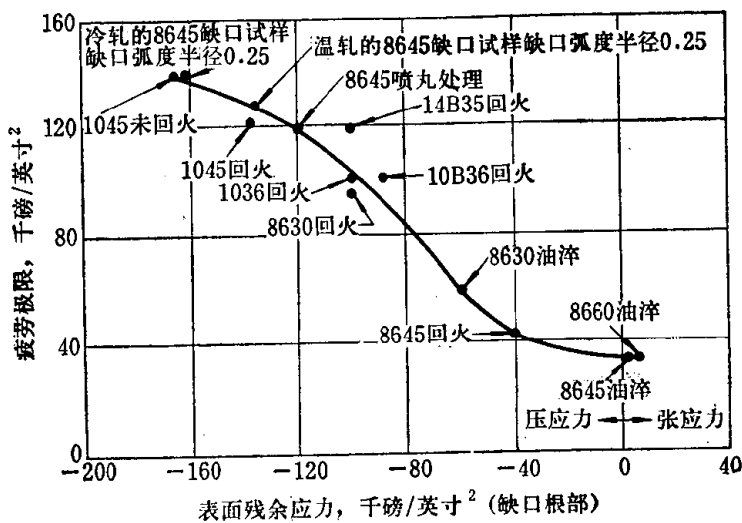


图 6 淬透性级别和表面处理对各种钢弯曲疲劳极限的影响（除注明者外，其余的钢均用水淬）

现在炼钢厂提出许多种保证提高洁净程度的处理方法。按照质量提高的顺序，这些方法列举如下：

- (1) 真空脱气；
- (2) 碳脱氧，真空除气；
- (3) 碳脱氧，真空除气，电磁搅拌；
- (4) 真空感应熔炼；
- (5) 真空电弧重熔（因成本高，主要限于用在航空和航天设备）。

这些处理方法本身可能并非必然得出洁净的钢。在炼钢过程中的每一个工序都必须正确控制。仅仅规定“真空脱气”这种对很多工厂的合金钢都无代价地适用的方法，可能什么也不会达到。

在拟订特殊洁净度的钢的技术条件时，最重要的事项是拟订具体的洁净度要求。在确定这些要求时，应记住一定要说明最后