

全苏工具科学研究所

工具热处理裂纹形成

第一机械工业部第二局
金属切削机床研究所

出版者的話

本書系統地介紹了工具熱處理時發生裂紋的原因，詳盡地闡述了各種工藝因素以及鋼的原始組織和工具表面化學成分發生變化對裂紋形成的影響；並列舉了由不同原因所造成的裂紋形式及防止裂紋的方法。此外對銲接工具發生裂紋的情況也作了論述。

本書適於工具製造工藝和熱處理人員之用，亦可作為高等學校教學之參考。

本書根據全蘇工具科學研究院（ВНИИ）技術科學博士Л.П.古里亞耶夫教授主編的“Образование Трещин в инструменте при термообработке（ЦБТИ，1952年版）譯出。

譯者：解景谷

王錫盛

校者：蔣昇江

出版發行者：金屬切削機床研究所

1958年出版

序 言

鋼件在熱處理時的裂紋是常見的廢品形式之一。現在有很多論述本問題的著作，不過它們大都只是闡述生產上的一些個別情況。本書則打聽把有關裂紋形成的條件與原因的文獻和某些工廠的經驗綜合起來。本書可能還不能將此問題完全充分的闡明，不過畢竟對從事於工廠工具熱處理的工作者們是有所裨益的。

本書可供工具熱處理車間的工程師、技術員、工長及其他工作人員參攷。

目

錄

序 言	-----	
第一章 切削工具的裂紋	-----	1
裂紋形成的原因	-----	1
工具上的裂紋分佈	-----	7
第二章 引起裂紋形成的工艺因素	-----	11
在馮氏体轉變溫度範圍內冷卻速度的影响	-----	11
淬火溫度對工具裂紋形成的影响	-----	24
形狀複雜工具的淬火特性	-----	32
淬火加熱的均勻性對工具裂紋形成的影响	-----	36
淬火加熱速度對工具裂紋形成的影响	-----	37
回火對裂紋形成的影响	-----	39
第三章 鋼的原始組織對工具裂紋形成的傾向性的影响	-----	44
鋼的球狀珠光体与片狀珠光体對工具裂紋形成的影响	-----	44
鋼的蔡狀斷口對工具裂紋形成的影响	-----	48
鋼中的網狀碳化物与碳化物偏析對工具裂紋形成的影响	-----	48
第四章 工具表面層化學成份的改變對裂紋形成的影响	-----	50
第五章 焊接工具裂紋形成的特性	-----	60
第六章 內部裂紋	-----	65
結 論	-----	69
参考文献	-----	73

第一章 切削工具的裂紋

裂紋形成的原因

經热处理而有高硬度的切削工具及某些鋼件常具有很容易形成裂紋的傾向。因为裂紋的产生，不是由于外在負荷的影响，所以我们必須从热处理时加热与冷却过程中，而产生内应力的作用来探求裂紋形成的原因。

在鋼中产生的应力通常分为三种：

韋特曼 (ВУТМАН)^[1] 給各种应力下了下列的定义：

“在大的体积范围内（可以和整个試样的尺寸或試样中含有許多晶粒的某一部份的尺寸相比拟的）处于平衡的宏观的残余应力，称为第一种应力。这种应力具有随工件或試样的几何形状而异的方向性。

第二种应力在一个晶粒尺度（即是一个或几个相隣的晶粒）的体积范围内处于平衡，这种应力又称为微观应力。这种应力是没有方向性的。

最后，第三种是超微观应力。在几个晶胞的范围内处于平衡，和第二种应力一样，沒有一定的方向性”。

对第一种应力研究的最多，因为它与热处理工件的宏观裂紋形成有关系。

对第二种和第三种应力研究的很少，它究竟对裂紋形成有什么影响，至今还是无法說明的，但第二种应力却能降低鋼的塑性与冲击韧性，因而在一定的条件下可能影响裂紋的形成；很可能由于这种应力的影响，结果在鋼中产生显微裂紋，其裂紋的大小，通常在一个到几个晶粒范围内变动。

工件在热处理时所产生的应力状态是极其复杂的。工件的各个部位都会处在均匀和不均匀的三向胀压应力的作用下。除

此外，也可能产生二向应力甚至一向应力的应力状态。

应力的性质与大小决定于加热、冷却和工具外形的具体条件。以理论计算工件在热处理时所产生的应力，直到现在，还不能达到符合于实际试验所得来的那样可靠的数据。

热处理时所产生的第一种应力，根据其发生的不同原因，分为热应力（或温度应力）和组织应力。

由于工件截面的温度差，金属不同加热层的膨胀或收缩就会不一致，这样所产生的应力属于热应力。例如淬火时，加热到高温的工件，很快地在水中或油中冷却，无疑的，获得了不同冷却带，表面层冷却较心部为快。同时在加热时，工件的表面层又常被加热至较高的温度。

工件的表面层力求改变成为与温度相适应的体积，但是加热到另一温度的内层却要阻碍这样的作用，因此在工件的不同区域中产生张应力与压应力。

加热或冷却速度愈快，则加热的金属由表面到心部的温度差愈大，因此热应力也愈大。

在无组织转变的条件下，不管加热或冷却到什么温度，都会产生单纯的温度应力或热应力。

在钢的体积改变时，由于组织转变或由于各组织组成的膨胀系数不同，所产生的应力称为组织应力。钢的组织组成的膨胀系数不同主要是产生显微应力——即是第二种应力。为了说明引起第一种内应力的组织转变，可以引用奥氏体转变为马氏体或奥氏体转变为铁素体——珠光体组织，或与此相反的，铁素体——珠光体转变为奥氏体的过程为例：这些转变伴随着体积的改变，根据体积改变的方向，将扩大或缩小温度应力。工具或其他工件在热处理时形成裂纹最危险的瞬间是在低温时发生与原子结晶格子重新排列和体积急剧改变有关的组织转变的

瞬间。

在工件(工具)截面上产生温度差,而且不同时间进行组织转变时,钢的组织转变引起的应力最大。为使钢中热应力与组织应力减小,要尽可能创造在钢的体积中引起最小温度的加热与冷却条件。

钢的成分不均匀,同样会引起组织应力。钢的化学成分不一致,就会在不同时间内产生组织转变和形成不同比容的组织。钢的成分不一致,是由于在显微体积与宏观体积中的偏析以及工件在化学热处理过程(渗碳、脱碳、渗铬等)中表面成分的改变而形成。由于钢的化学成分不一致产生的组织应力,不决定于工件截面的温度差及工件外形,而决定于钢的化学成分对转变临界温度的影响和对于珠光体转变范围内孕育期长短的影响,以及对膨胀系数的影响。

钢的化学成分不一致所形成的应力,可能是第一种应力和第二种应力,这要取决于化学成分不全的区域的分佈情况。

工件截面温度差形成的热应力与组织应力在工具热处理时有极其重要的意义。

钢在加热或冷却过程中,由于工件截面的温度差,不同区域中产生的应力方向和数值在不断改变着。这种应力为瞬时应力。现有的测定应力的方法,仅可能测定残余应力,即是工件最终冷却到室温后所存在的应力。在不同的热处理阶段而产生的瞬时应力仅能靠推论来判断。

我们以淬透了的钢^[2]在冷却过程中产生内应力的示意图为例来进行讨论。

还在冷却的工件组织开始转变以前就产生了热应力,这种应力是由于在截面温度差的影响下各处体积不同所引起的(图1a)。由于表面层的体积大大的缩小,所以表面层受到心部的

拉伸作用，反过来心部又受到表面层的压缩作用。

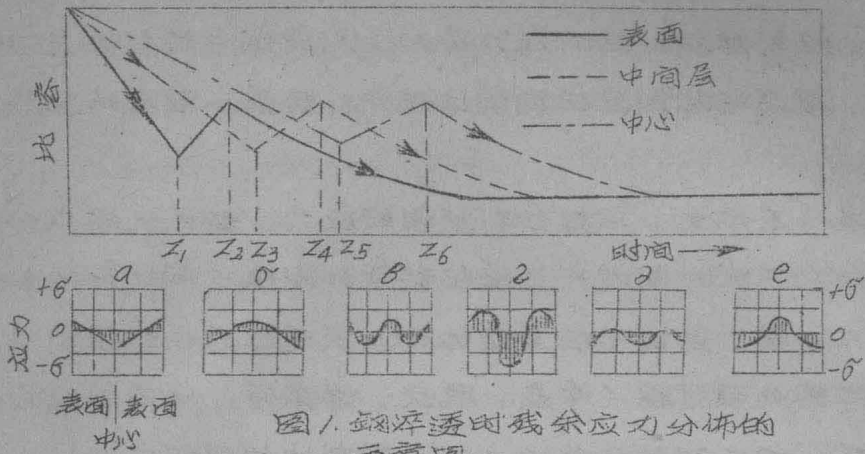


图1. 钢淬透时残余应力分布的示意图。

当被冷却的工件表面层达到马氏体转变温度时（时间 Z_1 ），表面层即停止收缩，而由于马氏体形成且又开始膨胀。因此在表面层，最初发生的张应力减小。然后则在阻止表面层膨胀的心部作用下，表面层又产生了压应力，而在心部则形成张应力（图1b）。

当继续冷却时，最初在中间层（时间 Z_3 ），然后在心部（ Z_6 ）也同样发生马氏体转变，并且相应的增大体积，但是要受到早已形成马氏体的表面层的阻止作用，因此在表面层产生张应力，而在心部产生压应力（图1c）。

冷却到最后时，按照所分析的示意图来看在表面层是压应力，而心部是张应力。因为工件冷却到下临界点以下的温度时所产生的热应力抵消了组织应力。

热处理工件中的应力分布情况，决定于工件的钢号、尺寸及外形和冷却条件。在表面层可能是张应力也可能是压应力。

如果某种淬火工件的应力正像上图所示的那样，则裂纹多半在相当于图1c的情况的时候产生，因为在整个截面上马氏

体转变完毕时，表面层的張应力达到最大值。在实际操作中，工件在淬火槽中冷却时经常可以听见开裂的响声。

但是必須指示，在不少的情况下裂纹是在淬火后的一段时间内在残余的張应力的作用下形成的。在短时间内不足以使金属破坏的負荷当長期作用时，导致自发破坏的可能性已为实验所証明^[3]。

由于热处理的工作截面冷却不一致，在鋼中产生了热应力与組織应力的影响。关于工件（或工具）内应力的变迁，上面，我们已作了概略的介紹。不过在工具热处理还可能影响到残余应力的性質和大小的另外一些因素。

例如，倘若我们以淬透性小的鋼热处理时，則淬硬的表面层会使淬火后的应力分佈情况大大地改变。在这种情况下，淬硬的表面层与未淬硬的心部产生体积差。在淬硬的表面层与心部之间产生了張应力，有时能导致内裂的形成。

在化学热处理时，鋼体积中的总应力应加上表面层产生的組織应力。

測定内部残余应力的方法是极其复杂的，不仅是工厂試驗室就是研究机关也很难作到。一般还是根据工艺因素並且輔以硬度及显微組織分析，来研究裂纹形成的原因。

目前，大家都已知道，把鋼过热，增加冷却速度，加大加热和冷却的不均匀性，以及扩大其他一些与鋼材本身有关的原因，都会使裂纹形成的可能性增大。

产生内应力与形成裂纹决定于鋼的机械性能。任何一种热处理规范对鋼中裂纹形成的影响，均应从所产生的内应力的方向和大小，以及鋼的可塑性和强度的变化来研究。对形成裂纹影响最大的是鋼的塑性。

高塑性的金属如銅、鉄等，淬火时不会有形成裂纹的危险^[4]。

~6~

因为淬火时产生的内应力仅引起塑性变形，不会使金属受到破坏。

对于脆的，非塑性的金属材料就不同了。在这些金属中的应力会增长到很高的范围，以致超过它本身的最高强度。如果我们把具有球状珠光体组织的 γ_{12} 钢与具有马氏体组织的 γ_{12} 钢的性能来进行比较，则其主要区别就是具有马氏体组织的钢塑性很小。因此具有马氏体组织的钢（甚至在沒有组织转变的情况下），加热与冷却都必须缓慢，以便使钢中截面上的温度差所造成的体积差减小。钢的塑性就好像应力吸收者一样。

马氏体转变时，裂纹形成的危险性之所以增大，不仅是由于组织转变时截面上不同步进行组织转变而使体积差增大，而且也是由于金属的塑性变小的缘故。

所以，如果在热处理时钢的塑性降低，则裂纹形成的可能性就要增大。

大多数的工具，特别是切削工具要求很高的硬度，而高硬常是与马氏体的组织相对应的。

工具钢淬火为马氏体组织后即成为很脆的和塑性很小的钢。工具钢淬火后的塑性，决定着工具形成裂纹的倾向大小。

工具钢淬火后的塑性性质在扭转与弯曲试验时表现得很清楚。

决定钢形成裂纹的倾向的第二个机械性质因素是强度。

强度通常有两个，即法线应力的断裂强度（ σ_T ——脆性断裂）与切线应力的断裂强度（韧性断裂 τ_K ）^[5]。由于裂纹的形成，工件的断裂是脆性的，从上面列举的强度特点看来很显然，裂纹形成时起作用的是正向抗裂强度（抗脆断强度）。

淬火工具钢的试样作拉伸试验时是脆性断裂，因此在拉伸时所测得的强度极限（ σ_B ）实际等于真正的断裂强度（ σ_K ），

而 S_K 則又等于正向抗裂强度 (S_T)。淬火后的工具钢，其强度值与脆性强度或正向抗裂强度值相全；淬火后的工具钢其强度（正向抗裂的）愈高，則阻止裂紋形成的能力愈大。

鋼中脆性的与塑性的組織組成对裂紋形成均有很大的影响。脆性的組織組成是碳化物和增加金屬脆性的其他非金屬夹杂物，它們使鋼很容易形成裂紋；塑性的組織組成——奧氏体和鉄素体，使应力减小而降低鋼形成裂紋的傾向。

由此可以得出以下几点結論：

1) 工件在热处理过程中所产生的裂紋是由于内应力作用的结果，其中主要是第一种应力。

2) 热处理时产生的内应力有热应力与組織应力。热应力是由于沿工具（工件）截面形成的温度差而产生的。工件截面上的温度差愈大，則热应力愈大。

組織应力是由于鋼的組織转变时的体积改变所产生的。

3) 热处理时产生的組織应力和热应力的大小决定于金屬的塑性。金屬的塑性愈大，則产生的应力愈小。

4) 当内应力超过鋼的强度（正向抗裂强度）的时候，工具中就产生裂紋。鋼的正向抗裂强度越高，則阻止裂紋形成的能力愈大。总之，鋼阻止裂紋形成的能力决定于鋼的塑性和正向抗裂强度值。

5) 在組織中有高塑性的組成出現，就会减小鋼中的应力和减少裂紋形成的可能性。

工具中裂紋的分佈

工具在热处理时所产生的裂紋，可能是仅波及工具截面的一部分或者穿透整个工具截面的深裂紋。可能是深度小于1公厘的表面裂紋（細的裂紋）。也可能是内部裂紋。

工具于热处理时所产生的深裂纹，一般是纵向。仅在切口部位，在截面过渡处或在钢中含非金属夹杂的地方能形成与切口方向相同的非纵向裂纹（参看图13）。在大多数情况下工件的高度与厚度的比例没有决定作用。

纵向的深裂纹不是偶然的现象，它是和钢的纤维方向相一致的。因为在大多数情况下，工具是用轧制钢材来制造的，所以钢的纤维方向一般的是工件的方向，也就是裂纹的方向。

钢中的应力测量证明，钢中所产生的轴向应力值，大于径向与切线方向的应力值（图2）。这样看来似乎破裂不应是纵向，而是横向——由轴向应力而破裂。然而工件在实际进行热处理时却发生相反地现象——形成的裂纹是纵向的。

显然，裂纹的方向主要地是决定于轧制钢材的纵向与横向的各向异性的性质。

经过淬火与回火的高速钢沿轧制方向与垂直于轧制方向所作的试验证明：在钢的纵向作弯曲冲击、扭转试验时，其强度与塑性较横向者约高35%⁽⁶⁾。

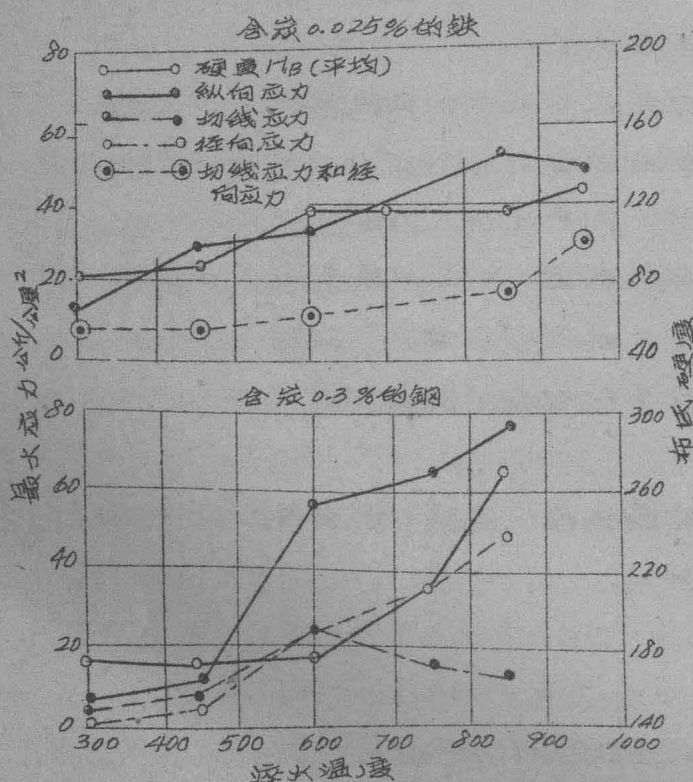


图2. 淬火温度对残余应力大小的影响
(直径50公厘的圆柱最大应力为轴向应力)⁽²⁾

在结构钢的

纵向与横向的光滑试棒作拉伸机械性能试验时，发现二者在性能上的主要差别表现在缩颈上的断面收缩率、真实断裂强度及冲击韧性等试验数据上。这几方面的性能在顺纤维方向均较高。拉伸时的强度极限（ σ_B ——抵抗最大塑性变形的强度）无论在纤维的纵向及横向，实际上是相同的。然而在最近研究中证明〔7〕，30XTC4和18XHMA钢，在纤维的纵向与横向具有不同的正向抗裂强度（ S_t ）。这一种强度在纵向比在横向高二倍。

具有纤维组织的轧制钢材，在横向总是具有低的塑性和低正向抗裂强度。

因而工件在热处理时，由于内应力而破裂常是沿着纤维方向发生。只有在截面的转变处、切口、焊缝处所引起的应力集中，才会使裂纹的方向发生改变。

假如在钢的纵向与横向没有各向异性的话，则破裂应该是由于轴向应力而产生，且形成的裂纹应该是横向的，而不是纵向的。奇日可夫（Ю.М. Чижиков）指出〔8〕，钢锭在轧制前加热时所形成的裂纹，钢锭由于内应力（轴向）的作用而产生的破裂就不是纵向，而是横向；因为钢锭在纵向与横向的性能大致是相同的。

如果工具是由不经锻造和轧制的铸钢作成，则可能形成横向裂纹。可以从莫斯科工具厂的实际中举出下列的例子。

他们制造过一种塔形圆锥铣刀。最粗部分的直径约200公厘，锥端直径——50公厘。铣刀以稍经锻造的铸造高速钢制成。这样的铣刀很容易形成的裂纹是横向裂纹，而不是纵向裂纹。假如这种铣刀以有纤维组织的锻钢或轧钢来制造，可以断定，形成的裂纹将是纵向的。例如：轧制的钢轴在热处理时发生的裂纹总是纵向（沿纤维方向）的。

上面讨论过的那些裂纹，主要是由于工具截面上的温度差

形成的热应力与组织应力所致。

在实际中，除了深的裂纹外，在很多的情况下形成细的表面裂纹。有时这种裂纹也是沿着工件的，但更常见的是这种裂纹的分布并不决定于纤维与切口的方向。这些细的裂纹是多向性的，常常形成网状。观察结果证明，裂纹的深度愈小，则网愈小。网络的大小近似于钢在研磨时产生的裂纹网。这样的裂纹常常在经过化学处理（渗碳、渗铬等）的工具表面，或者在表面层经过急剧加热与冷却而引起具有体积变化的组织转变的工具上看到。

裂纹的深度决定于表面层化学成分改变的深度或由于急剧加热与冷却而引起具有体积变化的组织转变区域的深度。

内部裂纹可能呈显微的细小裂纹分布在截面上，也可能是大的宏观裂纹。它们经常是分布在渗碳层的下面或在淬透性不深的钢的淬硬区域下面。

内部显微裂纹形成的原因是在一个或几个晶粒范围的显微体积内，因化学成分的不同而引起的组织应力。

内部宏观裂纹形成的主要原因是由于表面层和心部的组织组成的比容不同。

在渗碳的钢中，其组织比容不同是由于渗碳层和心部的含碳量不同所造成的，在淬透性小的钢，则是由于淬成马氏体的表面层和未淬硬的心部的比容不同所致。

因此，在工具上产生的裂纹，根据其分布情况分为三种主要类型：

第一种裂纹——深的裂纹，主要是在以淬透性大的钢制成的工具上形成。裂纹的分布决定于钢的异向性和工具的外形。

第二种裂纹——细小的表面裂纹，没有一定方向，且与工件的形状无关。裂纹的深度愈小，形成网状的倾向愈大。

上述类型的裂纹主要是产生在化学成分改变的工具表面层。例如，由于脱碳的表面层也会产生在急剧的加热与冷却时发生剧烈的体积改变的工具表面层上。

第三种裂纹——内部裂纹。内部的显微裂纹是杂乱的分布在工具截面上，而宏观裂纹则是产生在淬硬层的下面。宏观裂纹主要是发生于淬透性小的钢或者经过表面处理的钢，例如高频淬火以及经过化学处理的钢。

第二章 引起裂纹形成的工艺因素

在马氏体转变温度范围内冷却速度的影响

形成裂纹的最危险工序是淬火。

通常以大的冷却速度进行淬火，这样就会使工件截面上产生温度差，並会引起不同时间的组织转变。前面我们已经谈过，这些情况会使之产生巨大的内应力。淬火时，与形成马氏体有关的组织应力有很大的意义。

当马氏体形成时，体积急剧增大，对于含碳 $1.0\sim 1.2\%$ 的钢要较退火后的钢的体积增加近 1% 。如果工具是以具有马氏体组织的低塑性钢制成，工具截面上不在同一时间发生的体积改变就会引起很大的内应力。

即便能够基本上消除工件体积对产生应力的影响，即使用截面温度差很小的薄工具来进行淬火，当马氏体转变时，也不能消除裂纹产生的可能性。

显然，钢中马氏体转变是在连续冷却的温度范围内完成。

马氏体转变开始（ M 点）与終了（ M_k 点）温度的位置，主要是决定于奥氏体开始转变时的成分^[9]，且实际上与冷却速度无关。

已经确定下来的，各方面的压力⁽¹⁰⁾、予先的塑性变形⁽¹¹⁾、以及高金奥氏体在低温区域为的过冷倾向等与马氏体开始转变的温度之间的关係，对现行的工具热处理工艺並沒有实际意义。

最广泛採用的工具钢的马氏体转变开始与終了温度都已经为人們所熟知。

合金工具钢的M与M_K点的位置决定于加热温度。其原因是由于随着加热温度的提高，因溶体中的碳与合金元素的含量增加，因而相应地降低了马氏体转变的温度范围。

图3和图12的曲线表示P18与X12钢马氏体转变温度范围的位置与加热温度的关係。图4表明马氏体转变温度范围的位置与钢中含碳量的关係，这里所說的鋼中含碳量係指奥氏体中的含碳量，因为在制成此图时，是将鋼加热至高于上临界点的温度。

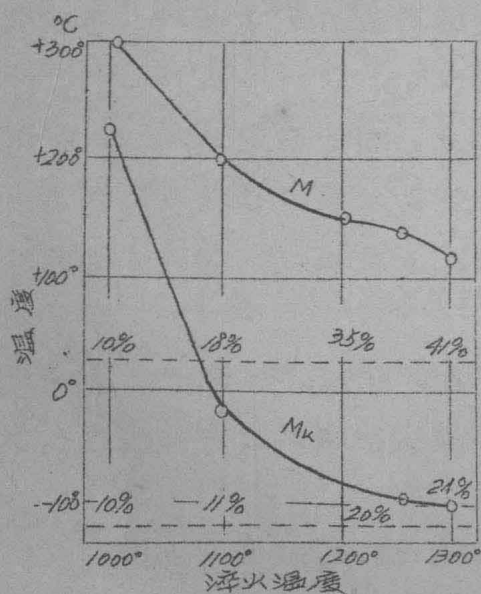


图3. 马氏体转变开始与終了温度及在液体氧中冷却前后残余奥氏体量和淬火温度的关係。
钢——P18 [13]

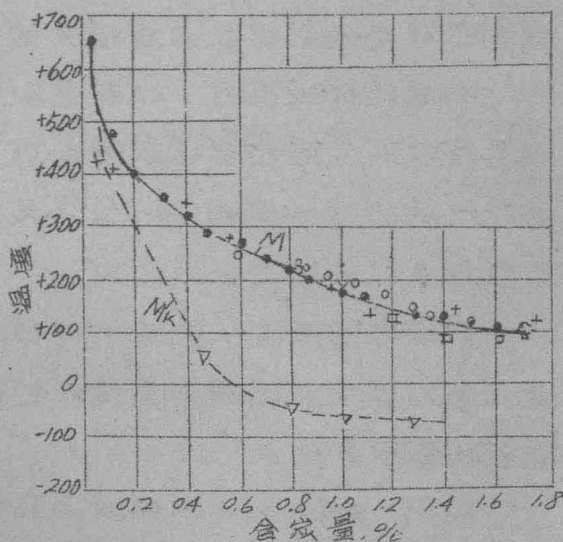


图4. 马氏体转变开始与終了的温度和含碳量的关係 [9]

表1引有某些牌号的工具钢的M点与Mk点的位置的数据
該数据是由沃洛布也夫得出的⁽¹⁴⁾，他将鋼加热到高于上临界点，
以获得相应于鋼成分的均匀固溶体而测定出馬氏体各点的位置。

表1. 鋼加热到能保証得到均匀的奥氏体温度时，馬
氏体转变开始与終了的温度⁽¹⁴⁾

鋼号	馬氏体转变的温度范围℃		淬火后残余奥氏体量，%	
	M	Mk	在+20°	冷却到M _s 点
Y7	300—255	—55	40—5	1
Y8	255—230	—55	3—8	1—6
Y9	230—210	—55	5—12	3—10
Y10	210—175	—60	6—13	4—12
Y12	175—160	—70	10—25	5—14
X05	150—140	—95	15—30	2—14
X09	175—150	—85	10—27	5—14
7X	280—230	—55	3—10	1—8
9X	220—180	—70	6—18	4—13
X	175—145	—90	10—28	5—14
7X3	240—185	—60	4—17	2—12
9XC	210—185	—60	6—17	4—12
14X15	180—145	—90	9—28	4—14
XBГ	155—120	—110	13—45	2—17
XГ	120—100	—120	22—60	40—20

註：M数值規定在一定数值范围内，这是为了适合于化学
成分不符合于技术条件的情况。

一般属于过共析鋼型的合金工具鋼在生产条件下不能加热
到这样高的温度。

現今常用的工具鋼在淬火加热的一般情况下，推荐採用的
最后冷却温度列于表2。

但如果超过了淬火規定的加热温度，則馬氏体转变終了点
将移向較低的温度，因而冷却到推荐的温度时，在组织中將保
存有残余的奥氏体。