

# 淬火介质的选择和控制对工程用钢零件淬火变形的影响

好富顿英国公司 R. T. Van Bergen 著

好富顿(深圳)有限公司 金宝华 译

**摘要** 本文首先对热处理中可能产生的变形进行了定义。随后对影响工程用钢零件淬火变形的诸因素进行了综合阐述。对以下因素对变形的影响进行了深入考察:淬火液种类(淬火油或聚合物淬火液)、淬火冷却特性、工作温度、搅拌方法的强度、淬火系统设计等。文中通过实例,对通过有效的选择、控制淬火介质以控制变形的的方法作了讨论。

**关键词** 淬火介质 淬火变形

## 0 概述

变形可能是热处理中最大的问题之一,有关变形已发表的文献相对较少。本文试图为热处理方面的实际工作者提供有用的指南,以帮助他们分析变形产生的原因和可以采取的可能补救方法。

变形可定义为淬火中工件的形状或尺寸产生永久性的、一般不易预见的变化。为校正变形,或进行校直、或增加磨量,都不可避免地要增加成本。变形也可能增加装配困难,或造成已加工好的较贵的零件报废。热处理部门往往要受到处理变形的责备,因变形往往要在后序磨削或装配时才反映出来。但在研究热处理变形以前,可能该首先简要地提一下,热处理前各工序对变形可能的影响。

## 1 热处理前的变形

热处理前可能造成变形的原因有:

- 1)内应力释放。加工过程中产生的内应力的释放,可能造成工件的变形。特别是采用冷作制造的,或是采用冷拔钢制造的工作件;
- 2)夹头夹紧压力太大。加工时工件因夹紧力大,产生弹性变形。夹头松开后,工件反弹。用冷缩管加工的薄壁轴承圈,可产生这种变形;
- 3)机床间隙,不能满足图纸要求极限。零件送热处理前,尺寸可能已超差;
- 4)制造方法影响。有些加工方法,如焊接、或产生塑性变形的冷冲、冷挤、可使工件产生应力而造成变形。

## 2 热处理中的变形

可分为两种变形。分清这两种变形很重要。1)尺寸变形或位移;2)形状变形或翘曲。

### 2.1 尺寸变形

众所周知,工件的体积在热处理时会因钢的结构改变而改变,这受钢的结构、奥氏体化温度、淬入时间、冷却速度和回火处理等的影响。

淬火状况的改变会影响钢的微观结构,最终影响工件的尺寸。例如,冷却速度低于临界冷却速度,就会形成非马氏体结构。又如采用热油淬轴承圈,改变油温,会改变残留奥氏体的比例。这两种情况都会改变工件的总体尺寸。

然而,对某一特定的钢种,和特定的热处理状况,这种尺寸变化一般是可以预计的,可以使之在切削或磨削的余量范围内。

### 2.2 形状变形

这种变形不能预计,是属麻烦的变形形式。形状变形可有很多形式:不圆、锥形、不平、碟形、弯曲、弓形、翘曲、孔缩小等。形状变形可产生于奥氏体化过程中,也产生于淬火过程中。

### 2.3 奥氏体化过程中的形状变形

1)内应力释放 金属成形加工或机械加工中残留的应力,在奥氏体化过程中会释放,进行热处理前可能需进行回火或校直;

2)下垂或蠕变 这可能是由于工件在炉中,支承不够,应很好注意夹具状况、炉膛、工件托盘、工件在炉中放置方法;

3)在炉子热区的机械损伤 工件受热膨胀,可能在炉膛内被卡住,连续炉的自动振动给料机构,可能将零件强行送入加热区,使零件变形,因为此时零件已有相当高的温度;

4)炉子内的温度梯度 由于喷嘴堵塞、加热元件有毛病、或炉内气体循环不好,可能使炉内温度不均,使工件加热不均匀,产生内应力。这对大的易产生变形的工件特别重要,应将工件放在加热区温度最均匀区的中间位置;

5) 工件断面尺寸变化 工件断面尺寸变化, 可造成加热不均, 产生内应力。对断面尺寸变化大的零件, 在可能时, 应降低加热速度, 以减小或避免不均匀加热。

#### 2.4 淬火时的形状变形

淬火时的形状变形一般均发生在内应力不平衡时, 这种内应力的不平衡太大时, 可使工件淬裂、微裂或整体淬裂。

影响淬火时形状变形的因素, 包括有(可单独或联合影响变形): 钢的化学成份和可淬硬性、工件几何形状和尺寸、机械搬运、淬火介质种类、淬火液温度、淬火液状况和淬火液的循环。

##### 2.4.1 钢的化学成份和可淬硬性

钢的化学成份和可淬硬性决定了为得到特定的结构和机械性能需要的临界冷速, 也影响着淬火时产生的体积变化(从而残余应力)(图1)。

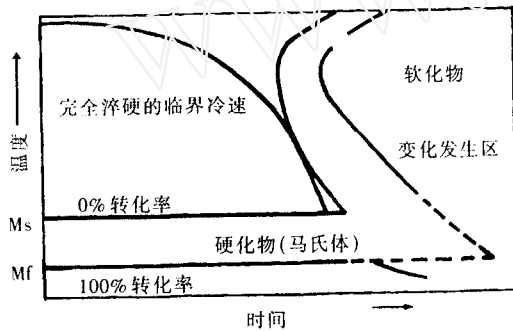


图1 完全转化为马氏体的临界冷却速度

为了减小变形, 应选择一种淬火液, 它的冷速刚超过钢的临界冷速, 并在  $M_s \sim M_f$  马氏体转变温度区内有较低的冷速。然而, 在实际生产中, 为了能处理较宽范围的有不同淬硬性的钢种, 要折衷地选择一个合适的冷速。

##### 2.4.2 工件的几何形状和尺寸

工件的断面厚度会影响得到完全淬硬所需的临界冷速。从而决定淬火液的选择, 一个断面尺寸变化的零件会产生不同的冷却速度, 产生不同程度的残余应力和变形。

应根据最大的断面, 使用尽可能低的冷速的淬火液, 或考虑采用热油淬火的可能。

##### 2.4.3 机械搬运

在奥氏体状态下, 钢的强度约只有室温时的十分之一。如图2所示。

因此, 在高温时, 工件极易受机械搬运损伤。要避免易受损工件掉至淬火槽底。要特别注意连续热处理炉卸料导向槽的设计。即使导向槽是倾斜的, 内壁零件也可能因撞击在输送链的板条上而受损(图3)。

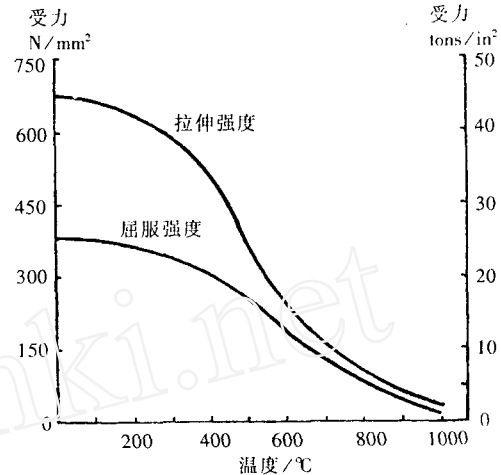


图2 温度对高碳铬钢强度的影响

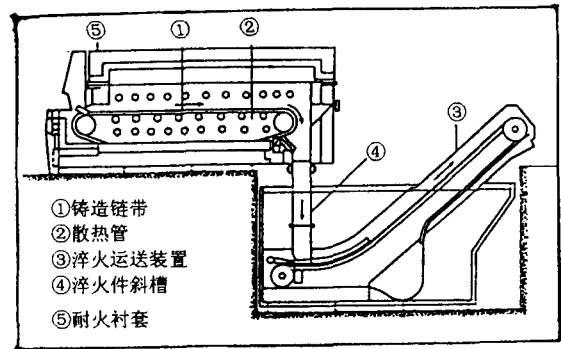


图3 连续炉淬火系统布置示意图

一家汽车水泵轴的制造商, 碰到的这类变形是一个很有趣的例子。阶梯轴在连续炉中加热后通过导向槽掉至约3M深的输送带上。很多轴发生了弯曲, 起初认为这是因为尺寸变化引起了残余应力。但经仔细研究发现在某些轴端, 和弯曲相对的方向有打扁的现象, 这就肯定了轴的弯曲是由于机械撞击。重新设计了淬火导向槽, 避免了机械撞击, 就解决了轴的弯曲问题。

##### 2.4.4 淬火液的种类

淬火时冷却的三个阶段, 即蒸汽膜冷却阶段、沸腾冷却阶段及液体对流冷却阶段已有很多介绍, 并为大家所熟知。但不同的淬火液, 三个阶段的相对长度及每

个阶段的冷速,可能有很大的差别,从而对变形有显著的影响。

理想的状态是在每一个冷却阶段,工件能均匀的冷却、均匀的转变,产生的残余应力最小,但因下列原因,一般是不均匀的:工件断面厚度变化;表面光洁度(蒸汽膜在光滑的加工表面或抛光表面比较稳定。在尖角、孔边或粗糙表面较易转为沸腾)。

#### 1) 蒸汽膜阶段特性

虽然对流阶段的冷速,一般认为是最关键的参数,因对流阶段发生在  $M_s \sim M_f$  的温度范围内,此时要发生马氏体转变。但蒸汽膜阶段的特性也很重要。这可由齿轮淬火时的情况,很好地说明。

精密的汽车传动齿轮,往往其齿形在装配前(热后)不再有精加工。为了减轻重量,齿轮的重量及齿的尺寸在逐步减小,这会起增加变形的可能。油淬时,齿根部的蒸汽膜易于保持,齿根侧面则易转为沸腾,这可能使小断面尺寸的齿产生不希望有的变形。这可采用快速淬火油来处理以减小变形。快速油中使用了特殊添加剂以减小蒸汽膜的稳定性,促进沸腾,从而使冷却更均匀。

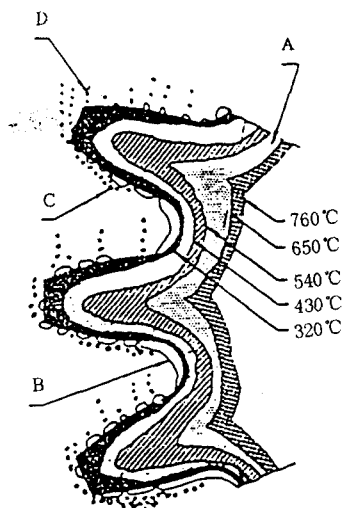


图4 油淬时,蒸汽膜滞留在齿根部

#### 2) 对流阶段特性

对流阶段的淬火特性,可以很好地用冷速曲线表示,300℃时的冷速对变形来说普遍认为是关键的数值,因它正好在大多数工程用钢的  $M_s \sim M_f$  的温度范围内。

常用淬火介质的 300℃冷速的典型数值如下:

淬火介质	300℃冷速(℃/sec)
一般淬火油	5—15
快速淬火油	10—15
聚合物 PAG	30—80
ACR	10—25
PVP	10—25
PEO	10—30

由上表可见,PAG 淬火液比淬火油在对流阶段有较高的冷却速率,因此工件较易于产生变形。

在使用 PAG 淬火液时,应很好地注意钢的可淬硬性,工件的断面尺寸和表面光洁度。一般来说 PAG 淬火液也是有用的,广泛用于处理碳钢,低合金或渗碳钢,或大断面尺寸的含合金元素较多的钢。

近来发展的聚合物淬火液,如 ACR、PVP、PEO, 300℃的冷速低得多,和油相仿。这扩大了水基淬火液用于处理 PAG 所不能处理的合金钢零件。

#### 2.4.5 淬火液的温度

按现代的淬火油的配方,使用温度对冷速没有明显的影响(图5)。

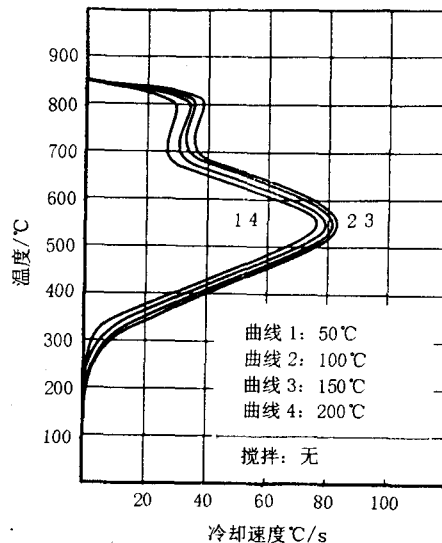


图5 油温对冷却速度的影响

然而,油温对变形有很大影响,所以发展了适用于等温淬火的,使用温度高的淬火油。热油一般用于处理高精度的工程零件,如薄断面的轴承圈,或汽车传动齿轮或必须精确控制淬火尺寸变化的轴等。这主要是通过改进均匀转变以减少淬火时的残余应力。

在对流冷却阶段,工件的表面或工件中断面小的部份比工件心部或断面大的部分冷却得快。这也就是

当工件的某些部份已冷却到  $M_s$ , 并开始转变, 而其他部份的结构还是软的奥氏体组织(图 6), 当其他部份开始转变, 体积发生变化时, 它要受起初已转变的硬的、脆的马氏体层的限制, 从而产生表面张力, 或产生应力的不平衡。这可造成变形或淬裂。

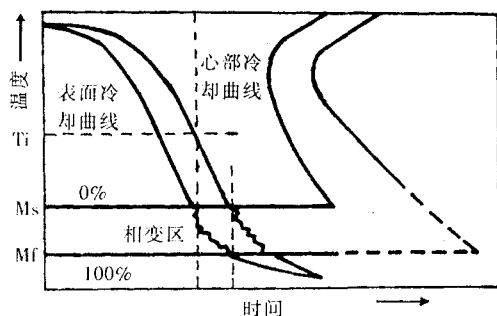


图 6 常规淬火时应力和变形的形成

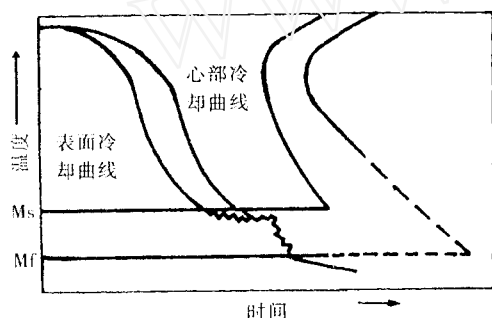


图 7 用热油淬火技术来减小变形

在采用热油淬火时, 工件淬入特殊配方的淬火油中。油温可以按工件的复杂情况和变形的趋向, 保持在  $120 \sim 200^\circ\text{C}$  之间。工件在热油中保持足够长的时间, 以使工件断面不同部位的温度均衡。随后, 工件由油中提出, 在炉冷中慢慢冷却, 使整个断面转变均匀(图 7), 从而减少了内应力和变形。

典型工程用钢的  $M_s$  温度, 约为  $250 \sim 350^\circ\text{C}$ , 但经验表明淬入  $150 \sim 200^\circ\text{C}$  的热油中, 可能显著的减小复杂精密工程零件的变形(图 7)。

#### 2.4.6 淬火液的状况

淬火液的淬火特性, 在使用过程中会因各种原因而改变。最多见的改变是增加冷速, 特别是对流阶段的冷速, 从而会增加变形和淬裂的危险性。造成冷速改变可能的原因包括:

1) 淬火油受水的污染 淬火油中只要有  $0.05\%$

的水, 即可能对淬火性能有明显的影响, 增加最大冷速, 增加对流阶段冷速(图 8)。

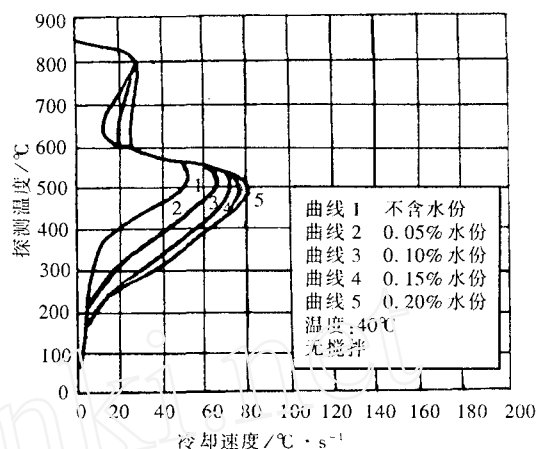


图 8 水污染对淬火油的影响

2) 淬火油的氧化 矿物油氧化后会减小蒸汽膜阶段的稳定性, 增加最大冷速(图 9)。

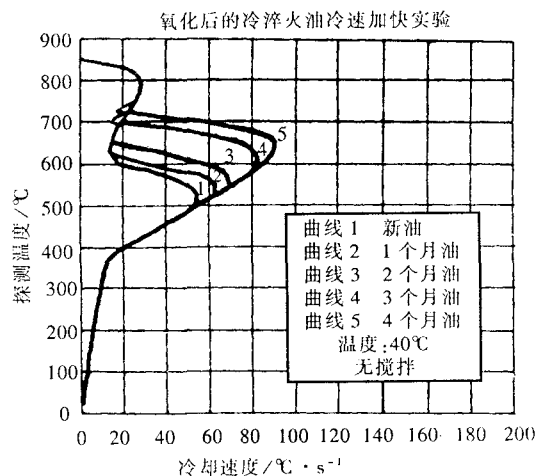


图 9 油氧化对于淬火特性的影响

3) 聚合物淬火液的污染或裂解 聚合物淬火液的 热裂解一般会导致对流阶段冷速的提高。这部份可用 提高浓度来补偿(图 10)。

所以在必须控制变形的使用场合, 需要定期地监 控淬火液。对淬火油, 需测酸度、水含量。对聚合物淬 火液至少测浓度。在实际生产中, 如能定期测淬火特 性, 则最好。

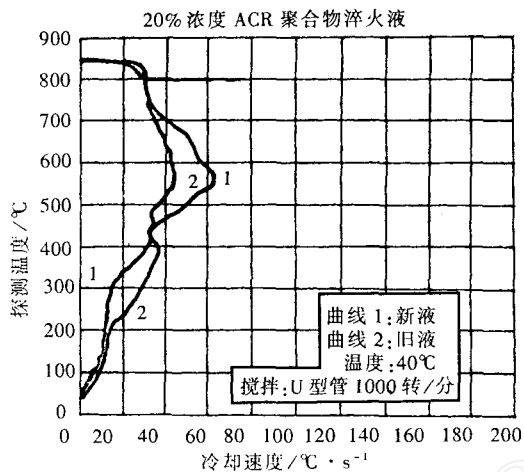


图 10 聚合物降解对于淬火特性的影响

#### 2.4.7 淬火液的循环

淬火液的循环,无论使用泵循环或使用螺旋桨搅拌,对保持液温均匀,和破除淬火过程中的蒸汽膜很重要。搅拌的强度对淬火油和聚合物淬火液的冷速都有明显的影响,但对变形的影响,两者不同。

1) 淬火油 搅拌强度增加,蒸汽膜冷却阶段缩短,最大冷速增加,而且更重要的是对流冷却阶段的冷速也增加(图 11)。对流阶段冷速增加可增加变形和淬裂的危险性,因此不应使用过强的搅拌。

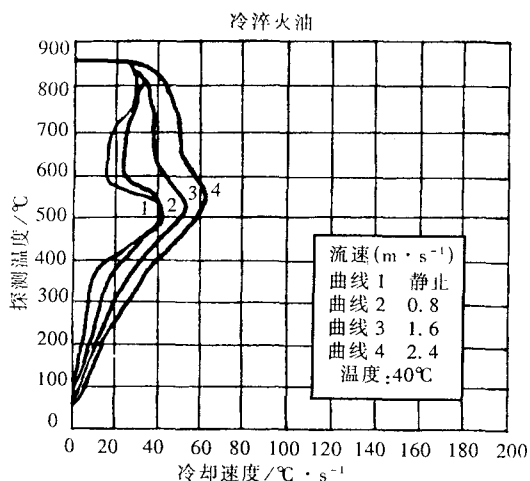


图 11 搅拌对淬火油的影响

2) 聚合物淬火液 对聚合物淬火液,增加搅拌,对

蒸汽膜阶段和最大冷速均有显著的影响,但对对流阶段的冷速影响很小(图 12)。为得到均匀的淬火特性,常建议使用强烈的搅拌,这也不会增加淬裂的危险性。

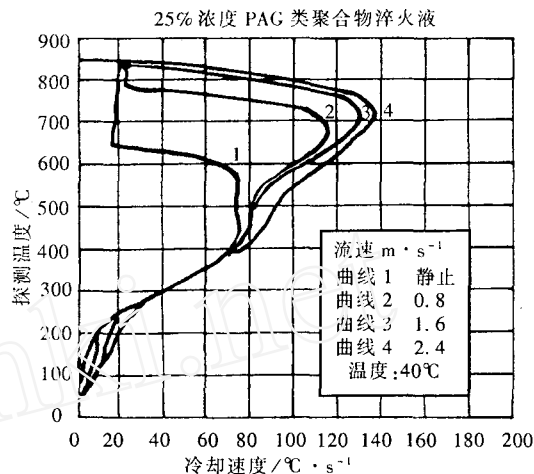


图 12 搅拌对聚合物淬火液的影响

淬火液循环时,相对于工件表面的流向,对变形也有影响。这可用轴承行业最近的实例说明,淬火液相对于工件表面的单向流动可产生的问题(图 13)。

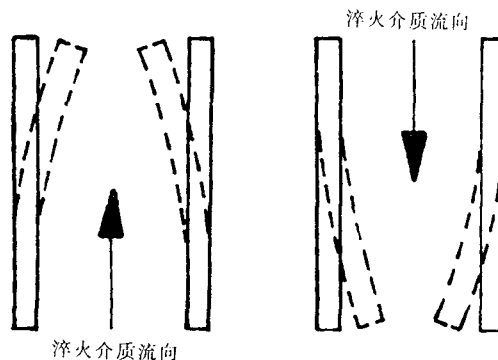


图 13 淬火介质流向对变形的影响

圆柱形轴承外圈,在多用炉中进行油淬。主要是向上流动淬火油,使外圈上部的直径缩小,以致后序磨削时,外圆不能磨光。

将淬火液的流向倒过来,则产生相反的现象。将淬火液流速减小到液体流经冷却器时需要的最低流速,并增加了上下运动的搅拌,解决了这个问题,孔得到了均匀的收缩,如理论估计的那样。

(下转第 2 页)

迫使淬火油发生改变:一、合金元素的短缺;二、对具有高物理性能部件的需求,如更高的冲击强度等。为克服这些障碍,淬火油必须“更快”。

多年来,热处理工作者有一个做法,在水淬火槽中加进盐类,使水淬得更快或至少更均匀,相同的原理也能用于淬火油。淬火介质的研究者在那时期开始试验各种有机金属和树脂,将这些材料加入到基础油中,得到肯定的结果,“现代”快速淬火油的时期开始了。

这些材料或添加剂往往被称为“润湿剂”。关于它们对淬火介质冷却性能的影响理论也产生了。树脂或有机金属溶于油中,当工件浸入时,即和热的工件接触,同时开始了蒸汽膜阶段,但树脂或有机金属的晶粒仍存在于表面,这些晶粒随着带有分子大小的油滴,这些油过热剧烈爆炸,破坏了蒸汽膜阶段,并加速了沸腾阶段的到来。润湿剂的添加也使得淬火作用更均匀,再结合蒸汽膜阶段的缩短,工件淬不硬、局部软点和变形等问题能得以解决或减少。

自现代淬火时期开始以来,对更专用淬火液的需求一直继续着。要求介质用以硬化钢和铸铁、铝合金固溶处理——无变形并得到最高的机械性能。40年代后期,等温淬火油用于取代盐浴,今天等温淬火油的使用在增加,工业界从接近最终成形尺寸的处理和减少机械加工中节省成本而得到好处。结合世界范围内对提高质量的驱使,促使工业界和淬火介质研究人员研究和发展改进产品和工艺。

现代淬火时期的另一发展是水基聚合物淬火液。最先在50年代引入,这些产品填补了不断增长的表面感应淬火硬化、火焰加热硬化的工艺需要。聚合物提供的淬火性能填补了水和最高速淬火油淬火性能之间的空间。在60年代,这项技术随着乙二醇基淬火液的引入,用于替代淬火油而得到了改进。70年代初期,几个因素肯定影响了聚合物淬火液的使用和发展;对工厂

和自然环境日益增长的关注,以及对工人安全的关心,迫使很多工业采用聚合物淬火液。在1973年和1974年石油短缺,和随之而来的淬火油价格的上升,给了工业界必要的推动,开始使用聚合物淬火液。

今天有很多不同种类的聚合物淬火液用于金属的热处理,其中很多是针对满足特定工业需要的专门产品。聚合物淬火介质的研究者可由几种化学品家族中选用原料来试验和发展聚合物淬火液。对这些材料的理解和知识发展到这样的境地——聚合物的分子能加工成提供特定的性能:淬火性能及其它,以满足特定使用的要求。

展望未来,淬火介质的前景如何?答案存在于政府的规定、可得到的资源、环境、工业需要和很多其它领域。对于水溶性聚合物、无水聚合物、植物油、经特殊处理的石油产品、以及目前使用的标准产品性能的改进研究正在进行。无论淬火液和硬化工艺如何发展,目标仍然和HOUGHTON'S STEEL AND ITS TREATMENT (1914)(好富顿——钢及其热处理)中说明的一样——“要成功的淬硬,需要研究各种淬火工件,及其设计和要求的硬度”,有了上面所说的淬火介质,假如淬火液槽同时改造以适应所需用途,就可以得到很宽范围的硬度并满足各种条件。

#### 参考文献

- 1 E. F. Houghton & Co. Steel and Its Treatment. Philadelphia, 1914.
- 2 E. F. Houghton & Co. Practical Metallurgy for Engineers. Philadelphia, 1923 and 1952.
- 3 Dicken, T. W. Treatment of Methods, 1986, 1: 6~8.
- 4 Bates, C. E. and Totten, G. E. Heat Treatment of Metals, 1992, 2: 45~48.
- 5 Bodin, J and Segerberg, S. Heat Treatment '84, London, England, May, 1984.

(上接第7页)

#### 3 结束语

总之,淬火时的变形是一个复杂的问题,受很多因素的影响。包括钢的成份和淬硬性、工件的几何形状、尺寸和表面光洁度、机械搬运、淬火系统设计、淬火液种类、淬火液温度、淬火液状况和循环强度。

变形对工件可能产生的影响,决定于工件的类型和对后序加工的要求。如:对一个大的棒料或锻件,几毫米的弯曲,可能没有什么关系,或可以采用简单的方法校直。但对一个精密的齿轮或轴承件,后序只有很小的加工,几微米的位移可能使该件完全不合格。

可以通过仔细的、系统的考察各种可能的原因,来减小变形。希望本文能帮助实际的热处理工作者,在分析产生变形的原因和建议采取的措施方面能有所帮助。

#### 参考文献

- 1 Quenching Principles and Practice, Houghton Vaughan plc, UK.
- 2 G. E. Hollox and R. T. Von Bergen, Heat Treatment of Metals, 1978, 2.
- 3 MEL Course 6, Heat Processing Technology, ASM, 1977.
- 4 R. T. Von Bergen, Heat Treatment of Metals, 1991, 2.