

# 金属热处理的高科技新书

## 金属的磁场形变原理 与 钢铁的磁场形变热处理效益

孙忠继 著

2000年元月

# 内 容 简 介

本书着重介绍了奥氏体的磁场形变原理、磁场形变淬火强韧化机理、磁场形变淬火工艺特性及磁场形变淬火强韧化效果。同时又着重介绍了大型适合生产使用的磁场形变淬火槽在生产使用中所创造的知识经济财富。

另外还对磁场形变回火、磁场形变正火、磁场形变氮化工艺做了部分的试验结果介绍，从而显现出磁场形变金属热处理工艺取代现有传统热处理工艺的必然趋势和对全面开展在强磁场形变中的金属热处理工艺的研究与实施所表达的科学价值和知识经济价值。

# 序

地球是个永久的磁体,地球的磁北极在西经 105°北纬 75°加拿大北部的帕里群岛附近,在北极圈的内侧。地球的磁南极在东经 135°南纬 65°的威尔克斯地的近海里,在南极圈的外侧。地球的磁感应强度为  $0.5 \times 10^{-4}$  特斯拉。磁场是地球先天固有的,地球是个永久大磁体。我们的祖先就是利用地球的磁场与永久磁铁的相互作用发明了指南针,开拓了应用磁场造福于人类的典范。物理学家法拉弟经过十多年的实验与研究,于 1831 年发现利用磁场可产生电流的现象。根据这一发现人们后来又发明了电机、变压器等电器设备,进一步开辟了磁和电在生产和生活中的广泛应用。

众所周知,磁存在于一切物质中,并与物质的结构及化学成份紧密联系。因此在人类创造物质财富的同时也伴随着对磁场的开发与应用。早在 1873 年英国的物理学家麦克斯韦在重病期间写成了一部长篇巨著《电磁学通论》中指出:变化的电场会产生变化的磁场,变化的磁场也会产生变化的电场。这种交替变化的电磁场会像水波、声波一样由近而远的传播。这种波就是电磁波。从此以后人类利用电磁波可以通过卫星传播电视节目;通过雷达可以精确的测量洲际导弹、卫星、宇宙飞船、超音飞机、军舰等各种目标的参数;可以观测星球、预报天气。随着科学技术的发展,今天人类的活

动范围已经不再满足于地面、海洋和天空，而已渗透到无边无际的星球空间。人们利用强大的火箭把探测器先后送往火星、金星和土星，并按放仪器在那里拍照，取样进行科学考察。最近英国天文学家发现了宇宙中已知的最远天体，这个类星体辐射源距地球距离达 200 亿光年。可是你知道吗？这么远的信息是靠什么传递？是靠电磁波。磁和电与我们的关系太密切了，无论是日常生活还是生产领域，那儿能离开磁和电呢？磁场几乎在一切电器中都可找到它的踪影，磁的一切特征越来越被人们重视。

近几年来人类又开始单独对磁场在日常生活及生产领域中进行了广泛的研究与探讨，并逐步开始了应用。初步显现出利用磁场为人类造福的光明前景。在地球的形成和人类的进化过程中，水系起着独特的作用，没有任何物质能够与水相比拟。虽然如此，对水的研究仍未被物理学家所重视。至于磁场对水的磁化处理实例，在 1913 年 G 德维尔的书中（俄文版）就有过介绍磁化水成功地治疗伤口和溃疡的例子。在 1945 年比利时人 T·韦梅朗应用水的磁化处理减少锅垢的形成并获得了专利。在农业方面：前苏联库班用极其简单的方法连续几年提高了甜菜的产量。这种方法是把种子浸在磁化水中五小时，结果不仅使产量上升还使甜菜的甜度有所提高。每公顷的甜菜产量增加近九公担。用磁化水灌溉的向日葵可增加 21%。大豆增产 40%。玉蜀黍秆的粗度增大 26%，不只是植物的外观发生变化，产量也极好。葱、胡萝卜和蕃茄用磁化水灌溉后生长较快，产量较高。在建筑业中用磁化水调合的水泥板的固化速度显著加快和最终强度的明显提高。用磁化水来清除石油工业

设备中的结垢：在灌水油田的开采和运输中，在管道壁上大量析出来的无极盐类使检修周期变短了。用电磁场作用在无水石油中（含有很少水）沉积物生成减少了 25—30%。对于含水的油而言，这种作用减少沉积物为 50%，石油的含水量愈多愈好。明显的延长了石油管道的检修周期。

在机械制造业中，也逐步对磁场的特性应用愈来愈广。如在金属铸造中，用磁化处理的沙型强度高，透气性能好。近几年又应用铁丸磁性铸造也取得了可喜的成果。不过在机械制造业中应用磁场进行金属热处理各国研究的比较多，无论在理论方面还是应用方面都获得了突破性的进展。早在 1959 年美国的发展与研究公司的总冶金师 Bassett 最先提出了在磁场的作用下进行金属热处理用来改善金属材料的力学性能，提高金属零件在服役中的使用寿命。此后世界各工业发达的国家如美国、前苏联、日本、中国……等国的热处理工作者相继在磁场退火、磁场淬火、磁场正火、磁场加热淬火、磁场回火及磁场氮化等方面发表了很多有价值的论文和试验报告。但是，在此以前，因有关磁场热处理的理论一直是个空白，同时又没有研制出能满足大批生产所需的磁场热处理装置，所以至今使磁场热处理工艺没有广泛地应用于生产。作者从 1976 年至 1996 年首先自费研制了一台小型的磁场淬火槽（磁场强度为 3000 奥斯特的交流磁场），对磁场形变淬火理论、工艺做了较全面的试验与探讨，揭示了磁场形变淬火的强韧化实质，又于 1987 年发明了适用生产所需的  $\phi G$  系列磁场淬火槽，填补了国际空白，并通过了省热处理专业委员会专家教授们的技术鉴定。同年参加了

国际热处理新技术博览会。

总之对磁场淬火强韧化理论的建立和磁场淬火槽的研制成功,这仅仅是能在机械制造业中为广泛的应用磁场开了个突破口。为人类利用磁场在金属热处理工艺中去挖掘材料潜力,提高机电产品的内在质量坚定了科学的信心。

# 前 言

广义的形变热处理,即任何将压力加工与热处理紧密结合起来,同时达到成型与强化双重目的的综合工艺,早就被人们所认识,并且相当广泛的加以利用。明朝崇祯十年(1637)宋应早撰《天工开物》一书中锤锻第十记载“凡熟铁、钢,已经炉锤,水火未济其质未坚。乘其出火之时,入清水淬之,名曰健钢、健铁。言乎未健之时,为铁为钢,弱性尤存也。”

由此看来,最早的形变热处理工艺是与锻造过程紧密结合起来,很可能就是原始形态的形变热处理(锻热淬火)。到了近代,由于机械制造工业的不断发展,另件的尺寸日益复杂,对性能的质量要求不断提高,逐渐将锻造与热处理分开各自独立的发展起来了。虽然如此,压力加工与热处理紧密结合的工艺仍在许多场合下广泛应用。例如:钢丝在等温淬火前后进行冷拉拔以获得高强度的铅淬拔丝工艺早已被人们所熟知。某些奥氏体耐热钢于固溶处理后加工形变,然后时效已成为多年来习惯采用的典型工艺。至于从节省热能消耗并减少氧化损失出发而普遍采用的锻热淬火,更可以说明是典型的高温形变热处理工艺了。

上述事实已充分说明,形变热处理并不是什么新创的工艺方法。只是过去由于受到技术水平及试验研究手段所限,对这种工艺方法的本质缺乏足够的了解,对金属在形变与相变过程中发生的组织结构变化以及两者相互影响的规律尚不十分清楚,因而在大多数情况下,并未找出最佳工艺方案,以便最大限度地发挥材料强度潜力。加之由于原有机加工方法的限制,某些另件的毛坯在高强度状态下,难于进行最终的压力加工以达到要求的形变尺寸和

表面精度。因此形变热处理的发展在相当一段时间里受到了限制。随着科学技术的不断发展,另件的工作条件更为苛刻,现有的强化手段(合金化、形变强化及热处理强化)在单独使用时已无法满足性能质量上的要求。另一方面,随着试验研究手段的不断提高,人们对金属内部组织结构的变化规律及其同加工处理过程之间的联系了解的更为深入。因此综合运用形变强化与热处理强化以获得金属材料更高的使用性能,自然而然的日益引起了人们的广泛兴趣。从而在现代金属科学及工艺水平的基础上进行着大量的试验与研究,发现钢形变后在组织结构中引入了大量的位错结构,并在热处理相变中被继承,使材料获得了较高的强度与韧性的组合。

作者从大量的试验中得知,奥氏体状态的钢在强磁场的磁化下淬火,同样可使材料的性能获得高强度与高韧性的组合。提高材料的耐磨性,并在组织中形成了位错结构。这种位错结构被材料在淬火后的组织所继承。由此证明了强磁场起到了与压力加工形变的同等作用。奥氏体状态的钢在强磁场的磁化下与压力加工的形变下使其在内部组织结构上发生的变化是相同的。大量的对比试验证明,两种作用(强磁场与压力加工)对钢的强韧化效果也是相似的。外磁场同样可使钢发生形变,虽然这种磁场形变与机械压力加工形变表现的方式不同,但最终所能达到的效果是相同的。也就是说在对钢的形变强化来讲,机械压力加工方法和磁场磁化形变的本质相同而仅是方法不同而已。磁场的磁化形变,是利用强磁场使奥氏体状态下晶格上的原子按不同晶向发生原子之间距离的改变,致使奥氏体晶格发生畸变,使晶内的位错移动和弥散碳化物的析出并钉扎位错的作用,最终在组织中形成了位错胞。所以磁场是改变金属内部晶格结点上不同晶向的原子间距来实现材料形变的。因此经磁场形变的机械另件外形尺寸及精度是不发生任何变化的。所以磁场磁化形变把形变热处理推向更高和更全面的发展阶段。可以断言,只要可进行热处理的任何工具、刀具、模具、轴承



及其机械另件都可用磁场磁化进行形变热处理,实现其形变强化与相变强化相结合的目的。

虽然磁场形变热处理于 1959 年由 Bassett 最先提出,但在此以前对有关磁场形变热处理的形变机理一直没有被试验揭露,同时又因适合生产使用的大型磁场形变淬火装置也难于用一般简单的磁路结构来设计出所需的强磁场。这样长期以来,对磁场形变热处理的深入研究使人们失去了信心,给推广应用磁场形变热处理增加了难度。所以关于高温奥氏体磁场形变淬火,低温奥氏体磁场形变淬火,马氏体相变中磁场形变淬火及马氏体相变后的磁场形变热处理的试验工作至今无人开展。钢的宏观形变热处理由于容易在生产工艺中实现(不需另外增加形变设备),所以在国内外研究的比较多,并在理论上也趋于成熟,而且关于形变热处理的试验数据也比较全面。我们知道金属材料的磁场形变与压力加工形变其形变的实质都为使材料在组织内达到晶格畸变并产生位错结构来实现形变强化之目的。两者形变的本质是相同的,这样我们就可利用钢的宏观形变热处理的试验数据来对相应的磁场形变热处理的情况进行间接的了解和判断。但,这决不是强做姻缘成一家,而本是一户分两门而已。作者虽然对磁场形变理论及开发适合生产使用的磁场淬火装置做了较多的试验与探讨。但由于作者是自费开展此项工作,在试验与开发中,虽然受到了社会各界人士的支援,最后还是因受经济条件和个人精力的制约,已无法进行下去。因此关于磁场对高温奥氏体的形变淬火,磁场对低温奥氏体形变淬火,磁场对马氏体相变过程中的形变淬火以及马氏体相变后的磁场形变热处理的试验与研究工作便无力开展。但是从国内外已发表的磁场形变热处理的资料可以证实,磁场对过冷奥氏体不同冷却阶段的形变淬火试验至今也仍是个空白。为了透彻的了解奥氏体从高温到低温以及马氏体相变以后的每个阶段磁场形变热处理的情况,作者便有意借用钢的宏观形变热处理相对应的部分来

揭示磁场形变在该相应温度的淬火情况,这样便有助于对磁场形变热处理的全面了解。以便于同行们可根据对机械另件的不同性能要求,采取磁场形变热处理的相应工艺,使磁场形变热处理工艺可以灵活的运用,各需所取。

处在高科学技术飞速发展和知识经济快速增长的今天,必然对机械另件的形状尺寸要求日益复杂,另件的工作条件也更为苛刻。所以对另件在力学性能方面提出了更全面和更高的要求。《金属的磁场形变原理与钢铁的磁场形变热处理效益》,这本小书正是为机械另件能适应这种新时代的需求而“降生”,望广大的热处理工作者们能接受它,并给予抚育和厚爱。作者自1976年开展对磁场形变热处理的试验与探讨以来,在完成对磁场形变淬火理论研究及开发适合生产用的磁场淬火装置的过程中受到了社会各界朋友的支援。如:杨锡忠、杨进学、丁志军等工程师。洛阳轴承研究所的谢学智高级工程师。《国外金属热处理》编辑部的孙莹高级工程师。山东工业大学热处理教研室的教授有:王世清、孙希太、李承欧、黄国靖、丁洪太。青岛热处理专业委员会的高级工程师有:刘伯荣、胡宝山、曲爱贞。青岛机械研究所所长魏述良高级工程师。青岛海洋大学教授路德明、张仲南。青岛化工学院教授王兴源等都给予了无私的赞助。在这里仅表示诚挚的谢意。

作 者

# 目 录

内容简介	
作者简介(照片、《国际名人大辞典》证书)	
序	1
前言	5
<b>第一章 磁场形变原理</b>	<b>1</b>
第一节 原子中的电子分布	1
第二节 原子中的电子运动状态	2
第三节 金属与合金的抗磁性、顺磁性、铁磁性	4
一、抗磁性	5
二、顺磁性	5
三、铁磁性	6
四、铁元素在高温奥氏体状态下的磁化特点	8
<b>第二章 磁场形变淬火与宏观形变淬火的实质关系</b>	<b>10</b>
第一节 高温宏观形变淬火	12
一、高温宏观形变淬火钢的力学性能特点	12
1. 在拉伸性能方面	12
2. 冲击性能方面	13
二、高温宏观形变淬火钢的组织	14
1. 马氏体形态与精细结构	14

2. 奥氏体的组织结构 .....	15
3. 残余奥氏体 .....	15
4. 碳化物的析出 .....	17
第二节 低温宏观形变淬火 .....	18
一、低温宏观形变淬火钢的力学性能 .....	18
1. 拉伸性能 .....	19
2. 冲击性能 .....	20
二、低温宏观形变淬火钢的组织 .....	21
三、低温宏观形变淬火钢的回火特性 .....	22
第三节 马氏体相变中的宏观形变淬火 .....	23
一、宏观形变诱发马氏体相变 .....	23
二、马氏体相变中的宏观形变对钢的力学性能的影响 .....	26
第四节 马氏体相变后的宏观形变 .....	27
一、马氏体宏观形变的特点 .....	28
二、马氏体宏观形变强化的原因 .....	30
第五节 复合宏观形变热处理 .....	31
一、高温宏观形变与低温宏观形变相结合的 复合形变淬火 .....	31
二、低温宏观形变淬火与马氏体宏观形变时效相结合的 复合形变热处理 .....	33
三、高温宏观形变淬火与马氏体宏观形变时效相结合的复合 形变热处理 .....	35
第三章 磁场形变淬火及设备 .....	37

第一节 磁场形变淬火的力学性能 .....	38
一、拉伸试验 .....	38
二、硬度试验 .....	40
三、冲击试验 .....	40
四、抗回火性能试验 .....	41
五、磁场形变淬火的耐磨性 .....	43
第二节 磁场形变淬火的强韧化机理 .....	46
一、磁场形变淬火可细化马氏体组织 .....	46
二、碳化物的析出 .....	48
三、磁场形变淬火可减少组织中的残留奥氏体量 .....	49
第三节 影响磁场形变淬火强韧化效果的因素 .....	51
一、钢的化学成份影响 .....	51
二、磁场性质对磁场形变淬火的影响 .....	56
三、磁场大小对磁场形变淬火的影响 .....	58
第四节 磁场形变淬火对工件淬火变形的影响 .....	59
一、水分子结构 .....	60
二、对马氏体转变阶段的影响 .....	61
第五节 磁场形变淬火工艺特性 .....	62
一、金属内部组织的晶粒度对磁场形变淬火强韧化 效果的影响 .....	62
二、被淬火工件的长短尺寸对磁场形变淬火效果 的影响 .....	63
三、淬火夹具的材质对磁场形变淬火效果的影响 .....	64

第六节	操作方法对磁场形变淬火的影响 .....	67
一、	在磁场淬火槽内工件的淬火位置对淬火效果的影响 .....	67
二、	淬火介质的流动速度对磁场形变淬火的影响 .....	67
第七节	磁场形变淬火装置 .....	68
一、	从提高筒状螺旋管绕组电流(I)来获得强磁场的方法分析 .....	70
二、	从提高筒状螺旋管绕组的匝数(N)来获得强磁场方法的分析 .....	70
三、	用降低筒状螺旋管线圈的高度(L)来获得适合生产所需的强磁场的方法分析 .....	71
<b>第四章</b>	<b>对其他磁场形变热处理工艺的介绍 .....</b>	<b>74</b>
第一节	磁场形变回火 .....	75
一、	脉冲磁场形变回火最佳工艺的确定 .....	75
二、	脉冲磁场形变回火对力学性能的影响 .....	76
三、	脉冲磁场形变回火对残余应力及残余奥氏体量的影响 .....	76
第二节	磁场形变对化学热处理的影响 .....	78
一、	对磁场形变渗碳工艺的解析与展望 .....	78
二、	磁场对渗氮工艺的影响 .....	83
第三节	磁场形变正火工艺的电子显微镜试验及工艺前途的分析 .....	84

# 第一章 磁场形变原理

任何物质处在磁场中都能够被磁场或多或少的磁化,只是磁化的程度不同而已,磁场淬火就是把金属或合金在外磁场的磁化中从高温奥氏体状态冷却到低温进行马氏体转变的过程。这种磁场淬火方法对金属或合金在组织和力学性能方面与普通淬火方法在本质上有什么区别?为了弄清楚这个问题,就必须先从金属的原子结构谈起。

金属元素的原子是由居于原子中心带正电的原子核和核外带负电的电子构成,由于原子核带的电量跟核外电子的电量相等而电性相反,因此原子做为一个整体是不显电性的<sup>[1]</sup>。金属或合金的磁性是由运动着的电子所决定的,原子核正电荷运动所形成的磁性为核外负电荷运动所形成的磁性的两千万分之一。所以在这种情况下原子核正电荷所产生的磁性可以忽略。那么,核外电子是如何形成磁性的呢?在外磁场的作用下,核外电子被磁化的变化规律以及这些变化规律对金属或合金在发生同素异构转变时有何影响?为了说明这个问题,我们先看一看原子中的电子在核外是如何分布和运动的。

## 第一节 原子中的电子分布

我们知道,在含有多个电子的原子中,电子所含的电量并不相同,能量低的通常在离核近的区域运动,能量高的通常在离核较远的区域运动,根据电子的能量差异和通常运动的区域,电子有离原子核距离远近的不同,可以将核外电子分成不同的电子层,即原子

中的电子是分层排布的,分别用 K、L、M、N 表示电子层。科学家发现,在同一电子层中电子的能量还稍有差别,并且电子层的形状也各不相同,根据这个差别,又可把一个电子层分成一个或几个亚层,电子层中的亚层顺序分别用 s、p、d、f 等符号表示。K 电子层只包括一个亚层,即 s 亚层;L 电子层包括两个亚层,即 s 亚层和 p 亚层;M 电子层包括三个亚层,即 s 亚层、p 亚层、d 亚层;N 电子层包括四个亚层,即 s 亚层、p 亚层、d 亚层、f 亚层。在同一电子层亚层的电子能量是按 s、p、d、f 的次序递增的。为了清楚地表示某个电子处在核外哪个电子层和亚层,可将电子层的序数 n 标在亚层符号的前面。如 K 层内的 s 亚层的电子标为 1s。处在 L 层内的 s 亚层和 p 亚层的电子标为 2s 和 2p。处在 M 层内的 d 亚层的电子标为 3d。处在 N 层的 f 亚层的电子标为 4f 等等。

电子的运动所占据的空间称为轨道,有资料告诉我们,电子层中的 s、p、d、f 四个亚层分别有 1、3、5、7 个轨道,各电子层可能的最多轨道数如下:

电子层	亚层	轨道数
K	s	$1=1^2$
L	s、p	$1+3=4=2^2$
M	s、p、d	$1+3+5=9=3^2$
N	s、p、d、f	$1+3+5+7=16=4^2$

总之决定金属或合金磁性的核外电子是根据自身能量的高低,按层次和轨道分布的。

## 第二节 原子中电子的运动状态

原子中的电子不仅在核外空间的轨道上做不停地运动,而且还做自旋运动,电子的自旋运动有两种状态,相当于顺时针和逆时



针两种方式。平常我们用向上箭头 $\uparrow$ 和向下箭头 $\downarrow$ 表示不同的自旋运动状态。

通过以上的叙述我们可以看出,电子在原子核以外的运动状态是相当复杂的,必须由它所处的电子层,电子亚层和自旋状态三个方面来决定。因此我们再进一步看一看原子中核外电子排布的规律。

奥地利的物理学家保利(Pauli 1900~1958)在实验的基础上得知,在原子中的电子排布排在同一亚层的一个轨道上有两个电子,它们的自旋方向相反,而在自旋方向相同的电子必然处于不同的轨道上。这个结论是保利提出来的叫做保利不相容原理。

德国的物理学家洪特(Hund 1896~)从大量的实验中总结出,原子中核外电子在同一亚层中的各个轨道上电子的排布尽可能分占不同的轨道,而且自旋方向相同,这样的排布使整个原子的能量最低。

铁元素在热处理生产中占据了很大的比重,下面我们着重对铁原子中的核外电子分布进行研究。铁在周期表中原子序数为26,所以铁原子的核外电子是26个。根据保利不相容的原理和洪特规则,可得出铁原子中电子的排布结果,如表1-1和图1-1。

表 1-1 铁原子的核外电子分布表

核外电子数	元素符号	电 子 层			
		K	L	M	N
		1s	2s · 2p	3s · 3p · 3d	4s · 4p
26	Fe	2	2 6	2 6 6	2