



超声场对低碳钢性质的优化作用

姚德生

(武汉水利电力学院)

1985年5月15收到

本文论述了超声场在低碳钢激冷淬火过程中对其性质优化所产生的重要影响。在实验中选用了两类低碳钢——A₃钢和20钢,共做了140多个试件。从它们在超声场中激冷淬火后的效果来看,其强度指标比淬火前和纯水淬都有一定的提高,硬度也提高了不少,金相组织均为细化的板条马氏体,而且在电子断口形貌中观察到大面积的韧窝,这些都证明了超声场对钢(特别是廉价的低碳钢)的优质化方面起了重要的作用。最后初步探讨了在热处理过程中起积极作用的超声场效应的实质。

一、引言

关于钢的热处理的物理效应,最初人们只是研究电磁场的热效应,随着新科学技术的问世,后来发展有流场、激光场、辉光放电、等离子体等等物理场效应。近些年来,在我们实验室研究了超声场在低碳钢热处理中产生作用的问题。众所周知,为了能够得到强度和塑韧性相配合的优质钢材,我们必须设法在激冷淬火过程中得到低碳马氏体组织。为此,我们从介质的物理性质和热处理的工艺上考虑,首先设法改善低碳钢激冷淬火过程中的热交换条件,提高试件的冷却速度和冷却过程中的均匀性,这就要靠物理场起积极的作用。为了检验超声场的效果,利用扫描电子显微镜以及各种力学仪器,分析了在超声场中激冷淬火后低碳钢的冶金学性质和机械性能。发现低碳钢在热处理时的超声场效应十分显著,有助于探索优质价廉的合金材料,并在节能、防止热处理公害等方面有一定的社会、经济效益,目前正在工厂实际生产中试用。

二、实验

1. 试样的制备

应用声学

在实验中,我们采用表1中所列化学成分的试验钢材,分别制成直径 $\phi 10\text{mm}$ 、标距为100mm的A₃钢试件和直径为 $\phi 14\text{mm}$ 、标距为80mm的20钢拉伸试件,以及梅氏标准冲击试样。此外,为了观察分析金相组织,磨制了各种不同直径的金相试样。

2. 实验方法

首先将不同尺寸的三个试件编为一组,每组试件分批放入已经加热至淬火温度的高温炉内,我们采用的是SX-6-13型高温箱式电阻炉。保温时间依所采用的试件直径而异,其加热温度按规律

$$T = A_{c_3} + 30 \sim 50^\circ\text{C}$$

来选取,上式中 A_{c_3} 为钢在加热时的临界点,即铁素体转变为奥氏体的终了温度。一般应适当提高淬火加热温度,但不宜过高,以免钢试件的晶粒变得粗大,从而降低其塑、韧性,这样一来就可以提高钢的淬透性和硬度的均匀性。

在超声场淬火槽中盛有淬火介质(如清水),超声波换能器用压电式和磁致伸缩式均可。试件的保温时间,我们是按实验所用的SX-6-13型炉上标的加热系数 $a = 1\text{min/mm}$ 计算的。保温后将其中一组试件放入超声场淬火槽的介质中激冷淬火,同时将其中另一组放入没有超声场存在的净水中淬火,按此实验方式循环做各类各组实验。为了使超声场效应显

表1 试验用钢的化学成分(%)

钢 材	化 学 成 分				
	C	Si	Mn	S	P
A ₃	0.17	0.193	0.47	0.025	0.014
20	0.22	0.34	0.51	0.020	0.017

注 经武汉钢铁公司钢铁研究所化分室分析鉴定

著,我们将超声波发生器调节到能使它达到最佳状态的发射频率。

由于低碳马氏体的开始温度 M_s 点较高,这类钢试件有自回火的能力,因此应用这种场效应将钢试件激冷淬火后,可不必再进行回火的工序,显然可以大大简化钢工件的热加工工艺,达到节约能源和时间的目的。

3. 检测方法

(1) 冶金学性质的检测 将在超声场中激冷淬火后的钢试件磨制成金相试样,用 JSM-35C 型扫描电子显微镜(日本电子光学公司 JEOL 的产品)分别观察了它们的显微组织(如图1—4所示)和淬火拉伸试样的电子断口形貌

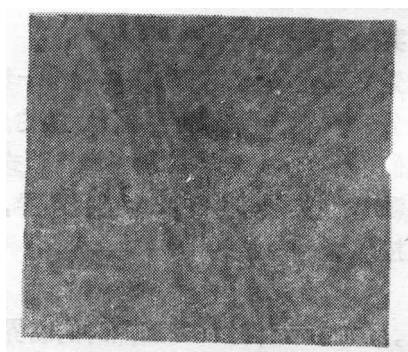


图1 A₃ 钢超声场中淬火. 扫描电镜 1500X. 板条 M + 自回火碳化物

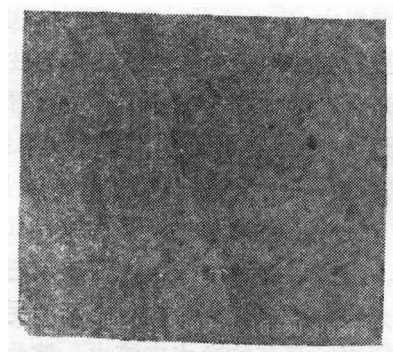


图2 A₃ 钢超声场中淬火. 扫描电镜 540X. 板条 M + 自回火碳化物



图3 20 钢超声场中淬火. 扫描电镜 1500X. 板条 M

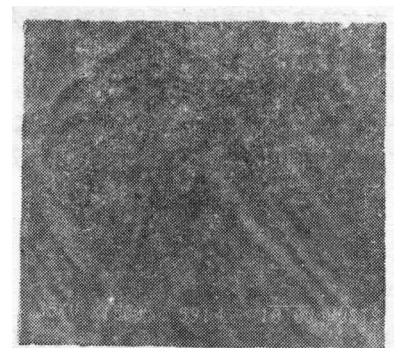


图4 20 钢超声场中淬火. 扫描电镜 1500X. 板条 M

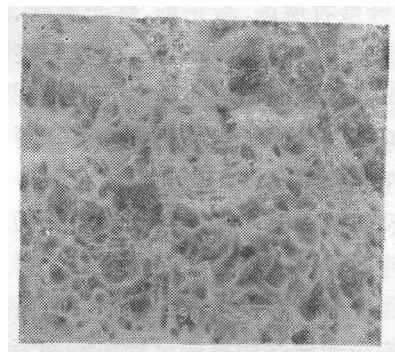


图5 A₃ 钢超声场中淬火后拉伸试样断口形貌 (二次电子像) 2000X.

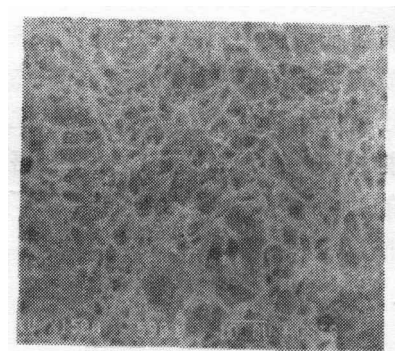


图6 A₃ 钢超声场中淬火后拉伸试样断口形貌 (二次电子像) 1500X.

(如图 5—8 所示)。为了对比,对 A₃ 钢原材料(供货态)的拉伸试样也进行了电子断口形貌分

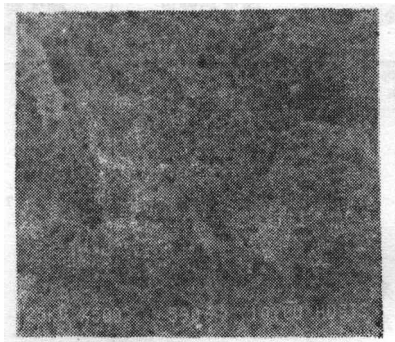


图 7 A₃ 钢超声场中淬火后拉伸试样断口形貌 (二次电子像) 500X

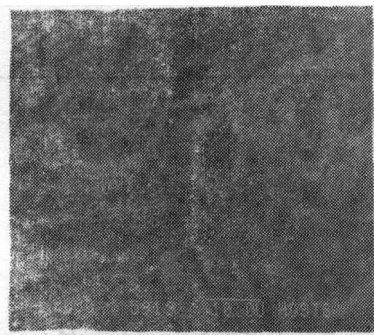


图 8 A₃ 钢水淬后拉伸试样扫描电镜 2000X。出现微裂纹

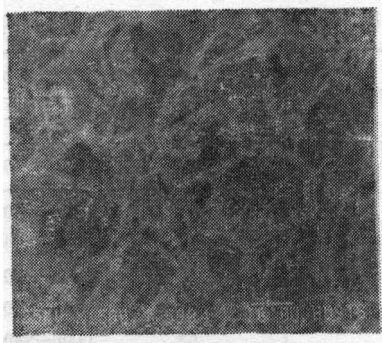


图 9 A₃ 钢原材料(供货态)拉伸试样断口形貌 (二次电子像) 1500X。

析,如图 9 所示。

(2) 机械性能的检测 用 Amsler-25T 型和 ZDM-5T 型拉伸试验机及冲击试验机,分别测量了经过超声场激冷淬火的 A₃ 钢试件、无超声场存在时的普通水淬试件以及原材料试件,测量它们的抗拉强度 σ_b 和屈服极限 σ_s 。同时还将上述试件测试结果与 45 钢调质态的性能作了比较(见表 2 所示)。

此外,还用 HW187.5 型布洛维硬度计(广西桂林光学仪器厂制造)测定激冷淬火后各种试件的淬硬性,测定的方法是测定每个试件三点表面硬度 HRC 后,再取平均值,淬火前的试

表 2 A₃ 钢、45 钢在不同介质中淬火后的机械性能

选用的钢材	试样编号	热处理工艺	抗拉强度 $\sigma_b(\text{kg/mm}^2)$	屈服极限 $\sigma_{0.2}(\text{kg/mm}^2)$	伸长率 $\delta(\%)$	σ_s/σ_b	淬火介质
A ₃ 钢	1#	加热温度 930—940℃	62.7	50.6	17.5	0.81	加超声场作用的自来水
	2#	”	61.1	44.3	15.0	0.73	”
	3#	”	61.8	44.3	14.4	0.72	”
	4#	”	63.3	46.8		0.74	”
	5#	”	64.2	47.5	13.2	0.74	”
	6#	”	63.0	44.3	16.1	0.70	”
	7#	”	56.6	42.4	11.3	0.75	”
	8#	”	58.9	42.0		0.71	”
	9#	”	57.9	40.5		0.70	一般自来水
	10#	”	53.8	39.2	20	0.73	”
	11#	”	55.4	41.8	13.7	0.75	”
	12#		43.4	29.1	26	0.67	原材料(供货态)
	13#		44.4	25.6	28	0.58	”
45 钢	1#	850℃ 水淬 550℃ 回火 φ 100	70	45	13	0.64	一般自来水
	2#	850℃ 水淬 550℃ 回火 φ 200	65	40	12	0.62	同上

表3 A₃ 钢和 20 钢在不同介质淬火后的硬度

选用的钢材	试件编号	淬火工艺		淬火介质	淬火后硬度 (HRC)	淬火前硬度 (HB)
		加热温度 (°C)	保温时间 (min)			
A ₃ 钢	1#	930—940	10	加超声场作用的自来水	56	171
	2#	930—940	10	”	54.3	
	3#	930—940	10	”	55.7	
	4#	930—940	10	”	50.6	
	5#	930—940	10	”	47	
	6#	930—940	10	”	48.5	
	7#	930—940	10	一般自来水	42.3	
	8#	930—940	10	一般自来水	45	
20 钢	9#	930—940	14	加超声场作用的自来水	44.9	156
	10#	930—940	14	”	45.5	
	11#	930—940	14	”	47.5	
	12#	930—940	14	一般自来水	42.5	

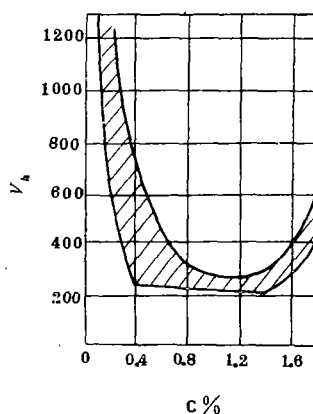
样硬度 HB 也同时测定,这些测量的数据列在表 3 中。

三、实验结果分析

1. 金相组织分析

从图 1—4 中的扫描电子显微镜观察可以看出:当低碳钢在超声场中激冷淬火时,它们的金相组织不仅都是板条马氏体,而且这些板条马氏体的板条束都较细化;超声场中的激冷淬火试件,虽然在淬火后没有经过回火,但是它们却均未出现淬火裂纹。这些重要的现象产生,我们初步分析产生的原因,认为是由于低碳钢含碳量较低,而从常用的经验规律如图 10 所示的碳素钢的临界冷却速度 V_K 与其含碳量的关系图中曲线来看,可知低碳钢的临界冷却速度很高。所谓钢在淬火时得到的临界冷却速度就是它在淬火时能够得到全部马氏体的最小冷却速度,要想使钢的冷却速度大于临界冷却速度,必须创造强烈的冷却淬火条件。实验证明:采用超声场可以使低碳钢的淬火冷却速度超过它的临界冷却速度 V_K 。因此,在我们的激冷淬火实验中采用了超声场,可以大大提高低碳钢的淬透性,从而在淬火过程中,马氏体的板条群之间不会发生相变撞击,可以避免裂纹的产生。

2. 电子断口形貌分析

图 10 碳素钢的临界冷却速度 V_K 与含碳量的关系

从图 5 和图 6 所示的拉伸试样电子断口形貌中,我们能够看出:在电子显微镜中大量视野可观察到大面积的韧窝。这也是一种重要的现象。分析其原因:一般来说,低碳钢在未经过淬火的时候,原材料的塑、韧性都很好,如图 9 所示的 A₃ 钢原材料(供货态)拉伸试件的断口形貌中,清楚地可观察到韧窝的尺寸,要比图 5 和图 6 中所示的以相同放大倍数的 A₃ 钢经过超声场中淬火后的拉伸试样断口形貌中的韧窝尺寸大些,说明供货态的塑、韧性好。可是这种钢原材料的强度过低,使得广泛应用 A₃ 钢方面,不得不受到限制。然而我们采用超声场中激冷淬火低碳钢,不仅提高了它的淬硬性和淬透性,而且它还富有良好的塑、韧性,这就

是我们寻求的低碳马氏体——具有足够强度和良好的塑、韧性相配合的特性的材料。这一特性对金属及其合金材料而言，目前是十分可贵的性质。

此外，从图 8 所示一般水淬后拉伸试样的电子断口形貌中可以看出：一般水淬后出现了许多微裂纹。其原因是钢试件在淬火过程中，马氏体转变过程体积会增大，使它产生第 I 类应力。我们还知道，钢试件在水淬过程中，马氏体转变温度范围内，其试样的表面冷却速度大大超过心部的冷却速度，因而造成较大的冷却不均匀性，导致钢试件裂纹的出现。可是我们将钢试件放入超声场中进行激冷淬火，超声场能够使钢试样的冷却均匀性大大提高，即钢试样在马氏体转变温度范围内，冷却速度可达到内外均匀，故不会出现裂纹，可以大大降低产品的废品率。

3. 机械性能分析

从表 2 中所列的试样机械性能的测试结果可以看出：超声场中激冷淬火后的试样比它在淬火前的抗拉强度 σ_b 提高了 27—48%，屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 提高了 44—97%；再与一般水淬的试样抗拉强度 σ_b 相比，也提高了 5—15%，屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 提高了 7—17%；经过超声场进行激冷淬火后的钢试样，其塑性(δ)仍保持较高的数值；在超声场中进行激冷淬火试件的屈强比(σ_s/σ_b)比它在淬火前和一般水淬的试件都有一定的提高。

从表 3 中所列的试样的硬度测试结果可以看出：在超声场中进行激冷淬火的试样的硬度比其淬火前和一般水淬试样的硬度都有一定的提高。

综上所述，可以清楚地看出：钢试样的冶金学性质的检测与机械性能的检测结果是致的。超声场下淬火，可使低碳钢获得综合机械性能良好的低碳马氏体组织，也就是说，在宏观上的机械性能与微观上金相组织能够达到统一。

四、超声场效应的实质

我们知道超声场是一种物理场，正是由于它的客观存在，可用来改变某些物质的性质。由大量实验证明：超声场对低碳钢激冷淬火过程，能够产生比较显著的场效应。进一步，我们应从理论上对这种重要的场效应加以分析，找出其规律。首先对试样的激冷淬火过程的冷却机理作一个理想化的模型分析，据有关钢的激冷淬火介质的理想化冷却曲线图(如图 11 所示)，我们可把钢试件加热至淬火温度后投入到淬火介质中，进行马氏体转变直至室温为止，此全过程大体上可分为三个冷却阶段。

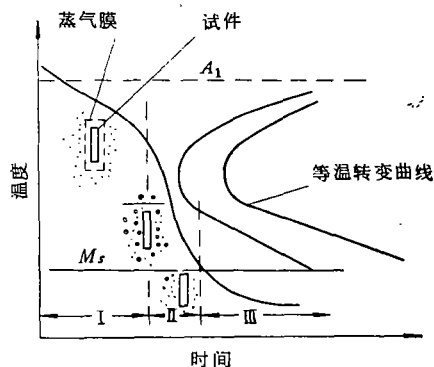


图 11 钢试件在介质中冷却的三个阶段
(I) 蒸气膜阶段；(II) 沸腾阶段；(III) 对流阶段

第一个阶段：我们称它为气膜冷却阶段，即将炉中取出来的高温试样放入淬火介质时，钢试件由于处于高温状态，试件表面必定会形成一层蒸汽膜，这种蒸汽膜会使钢试件与淬火介质隔开，起到了隔热的作用，因而钢试件的冷却速度将减慢。

第二阶段：称之为汽化沸腾阶段，即随着温度的降低，汽膜将会减薄，以致使汽膜达到破裂的程度，此时淬火介质与钢试件可直接接触。这样一来，淬火介质就会大量地汽化，而且呈现沸腾状态，沸腾的蒸汽将会带走大量的热量，使它们之间的热交换迅速，其结果使钢试件的冷却速度大大加快。

第三阶段：称之为对流冷却阶段，即当钢试件的温度接近介质沸点以下时，汽化沸腾阶段结束，这时主要靠对流传热使钢试件冷却下来，显然这时钢试件的冷却速度是缓慢的。

五、结 语

超声场作为一种物理场,它在低碳钢激冷淬火实验中已经证明对冷却介质起着积极的作用,突出的是改善了激冷过程中淬火介质与淬火试件之间的热交换条件,从而提高了试件的冷却速度和冷却过程的均匀性。

我们研究的低碳钢激冷淬火过程中的超声场效应,已经具有重要的经济效益,因为低碳钢的价格较低,工艺性能良好,超声场激冷淬火时耗电量极少,工艺操作又简便,特别是激冷淬火后可自身回火,不需要再另行回火,性能即达到要求。由此可见,它既可以节约能量,又可以节约淬火回火的工艺时间。因此,可以说,用低碳钢能代替高质量而价格昂贵的钢材,这样一来,就能大幅度地降低机器制造的材料和工艺的成本,对实现四化目标有着重要的经济意义。

参 考 文 献

- [1] A. Crawford, Ultrasonic Engineering, London, 1955, 207—217.
- [2] M. J. Roberts, Met. Trans., 1970, 3287.
- [3] L. L. Beranek, Acoustics, McGraw-Hill Book Company, 1954, 540—711.
- [4] 大连工学院,《金属学及金属热处理》教材,1979.

我们从上述的理想化模型所分析的冷却三个阶段可以看出:要想改变钢的性质,在激冷淬火过程中得到低碳马氏体组织(没有残留的奥氏体),必须设法缩短气膜冷却阶段,而且愈快愈好,这样能使钢试件很快地处于激冷的沸腾冷却阶段,提高淬火钢试件内的 $\gamma-\alpha$ 转变的同时性。第二阶段要冷却强烈些,使钢试件在650—550℃的温度区域内能够高速冷却,提高钢试件在马氏体转变温度范围内的冷却均匀性。第三阶段的开始温度要求高一点,以利于减少钢试件的变形和防止开裂。实际上,在我们所作的实验中正可看出:钢试件淬火时,淬火介质在超声场的作用下,第一阶段所形成的高温气膜很快地被破坏,这样一来,大大加快了试件的冷却速度(超过其临界冷却速度),并使最大的冷却速度朝着较高温度方向移动。

超声场为何能实现这些作用的机理,还需进一步探索。定性地说,超声波在淬火液中的空化效应可产生激烈的水击作用,足以使钢试件初期表面形成的蒸汽膜,在极短的时间内被破坏掉,使钢试件冷却完全处于激冷的汽液沸腾冷却状态。而超声的振荡作用既有利于晶粒的细化,还有利于减小钢试件内部和表面的温差,从而使材料的性能有所提高,而且不致出现微裂纹。

用动态规划方法综合不等距线阵

兰 军

(中国科学院声学研究所)

1985年5月21日收到

动态规划方法是综合不等距阵的一个有效方法,但当阵元数比较多时计算量比较大。本文通过对阵元位置进行限制,避免过多的重复计算,使运算量大幅度减少。此外提出了重复迭代方法,可使旁瓣级进一步降低。

一、引 言

不等距阵是雷达和声呐设备中一种重要类

型的基阵。已经提出很多种不等距阵的综合方法,例如,按某种原则把幅度束控系数等效成阵元密度的方法^[1],微扰法^[2]等。这些方法仅当