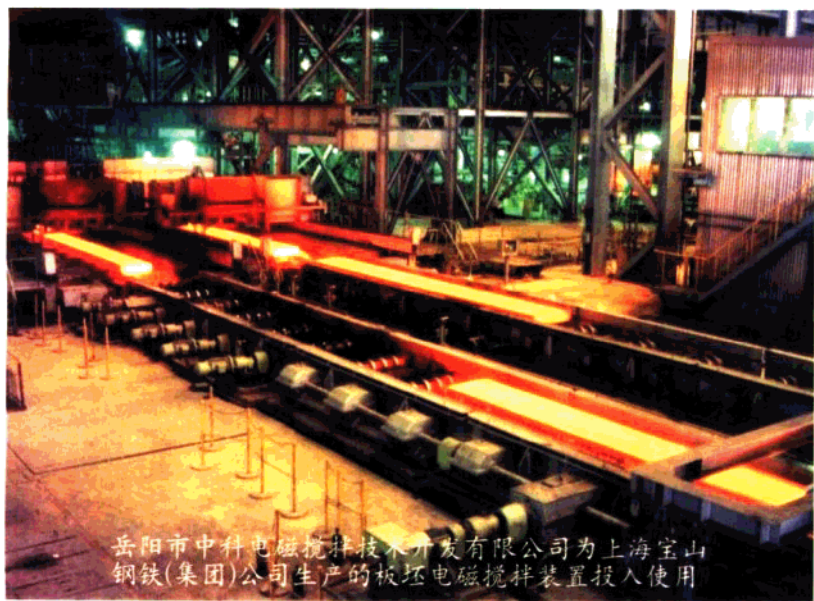


第二届全国连铸电磁搅拌 技术研讨会论文集

1998年庐山



中国金属学会连铸分会
岳阳中科电磁技术公司

第二届全国连铸电磁搅拌 技术研讨会论文集

主 编:毛 斌

编 辑:(以姓氏笔划为序)

万体娅 刘保其 李爱武 周 曙

易本熙 卓悌邦 柴桂华

一九九八·九

序

连铸电磁搅拌技术的应用是 70 年代以来连铸技术最重要的发展之一。随着连铸技术的不断发展,连铸钢种的不断扩大,电磁搅拌技术已越来越引起连铸界的普遍重视,并在生产实际运用中取得了良好的技术和经济效益。

我国连铸电磁搅拌技术的研究和应用始于 70 年代末,至今已有 20 年历程。80 年代中,我国在引进一批特殊钢连铸机和板坯连铸机的同时,也引进一批不同位置 and 不同类型的电磁搅拌装置,它的应用和消化吸收,无疑对提高我国连铸电磁搅拌技术水平起到了积极作用。随着国内高效连铸技术的发展和提高产品质量的要求,我国连铸电磁搅拌技术无论是在线应用或是研究开发及设计制造等方面都有了长足的进步和发展。不仅研制成功方坯连铸的不同位置和类型的电磁搅拌器;而且也研制成功板坯连铸的不同类型电磁搅拌器,特别是适用于断面 $300 \times 1900\text{mm}$ 、功率 502KVA 的板坯电磁搅拌器。与此相配套,研制成功各种变频方式的低频电源。这些装置的制作水平和实际使用寿命都已达到引进装置的水平。跟踪国际上板坯结晶器电磁制动技术的发展趋势,研制成功局部区域电磁制动装置,在线使用取得改善铸坯表面质量、减少内部夹杂物的良好效果;还先后开展全幅一段和全幅二段电磁制动的数值模拟和实验研究,取得了良好的研究成果,为今后工业应用提供了坚实的理论基础。

据不完全统计,从 80 年代中期起,我国先后引进方坯和板坯电磁搅拌器大约有 100 多台,无疑对提高铸坯质量和扩大连铸钢种发挥了积极的作用。然而也应该看到,不少厂家的电磁搅拌技术的运用并不如人意。究其原因大致有:① 电磁搅拌工艺参数优化做得不充分,虽有冶金效果但不显著,难以转化为现实的经济效益;② 电磁搅拌器的使用和维护不当,损坏率较高;③ 钢种不对路。这些都影响了厂家使用的积极性。有鉴于此,连铸学会决定

召开第二次全国连铸电磁搅拌技术研讨会,期望通过生产、科研、设计、制造等单位的广泛交流,总结取得的成果和经验,研讨解决使用中存在的问题的措施和今后发展的思路,进一步把我国连铸电磁搅拌技术的研究、开发和应用推进到一个新的水平。

本文集选编了22篇论文,从一个侧面反映我国连铸电磁搅拌和电磁制动技术的研究、开发现状。与89年的第一次研讨会相比,不仅论文数量有所增加,而且其深度和广度都有较大的提高,特别是数值模拟方面的工作显示了较高的水平,反映我国在这一领域的研究已有了较扎实的理论基础。值得指出的是目前国际连铸技术的前沿研究课题—电磁连铸技术的研究也有了良好的开端。成绩是喜人的。这是广大连铸工作者和科技人员共同努力的结果。我希望本文集的面世对加强各单位的合作;促进学术交流;加速我国连铸电磁搅拌和电磁制动技术的发展有所贡献,对从事这一领域的工作者有所裨益。

中国金属学会连续铸钢分会 周 曙
名 誉 理 事 长

1998.7

目 录

第一部分 方坯连铸电磁搅拌技术

武钢一炼钢方坯连铸二冷段电磁搅拌工艺试验小结	董烈成 等(3)
M + F—EMS 在大方坯合金钢连铸中的应用	阮小江(13)
连铸轴承钢二冷区电磁搅拌	姚留枋等(19)
用结晶器电磁搅拌改善方坯质量	李峰(21)
电机子分离型电磁搅拌器特点浅析	李爱武(26)
大方坯结晶器电磁搅拌力及磁场的有限元分析	麻永林等(34)
RMS 型永磁旋转式磁力搅拌器研制	王世文等(41)
大、小方坯的电磁搅拌—领先的技术和设计准则	S. Kunstreich 等(46)
连铸 0Cr18Mo2 不锈钢 120mm 小方坯时电磁搅拌冶金效果的评价与工艺探讨	叶 枫(69)

第二部分 板坯连铸电磁搅拌和电磁制动技术

连铸电磁搅拌系统中周围部件导磁原因的分析 and 对策	史美平等(87)
电磁搅拌在板坯连铸机上的应用	黄尊贤 等(96)
板坯电磁搅拌器水套冷却系统传热分析	张跃明 等(104)
舞钢板坯二冷区电磁搅拌器设计与制造	李爱武(110)
舞钢板坯二冷区电磁搅拌器的参数及其性能	毛 斌 等(121)
电磁制动对薄板坯连铸结晶器内流动及传热的影响	干 勇 等(129)

全幅两段电磁制动钢水流动及弯月面形状的数值模拟	荣 升 等 (139)
电磁制动器在板坯连铸中的应用与研究	ABB 公司 (148)

第三部分 电磁连铸技术

软接触结晶器连铸的电磁特性分析(1)	邓 康 等 (165)
软接触结晶器电磁连铸中初始凝固基础研究	任忠鸣 等 (174)
冷坩埚电磁连铸弯月面形状的数值模拟	曾德鸿 等 (178)

第四部分 电磁搅拌用低频电源

一种 EMS 电控系统	李玉梅 (193)
微机控制的电磁搅拌用变频器	牛基仁 等 (202)

第一部分

方坯连铸电磁搅拌技术

武钢一炼钢厂方坯连铸二冷段电磁 搅拌工艺试验小结

赵继宇 李已根 刘东夫 刘炳宇 吴献忠

(武汉钢铁公司)

董烈成

(武汉冶金科技大学)

摘要:武钢为了将硬线钢等高碳钢从模铸转移到连铸中生产,并为了改善以后在连铸中生产的硬线钢的铸态质量作准备,即与武汉冶金科技大学合作,共同开发方坯连铸二冷段电磁搅拌技术,但由于各方面工作仍未成熟,本次试验还是以低碳钢作为搅拌对象,因此本文以 LQ235 钢和 20MnSi 钢的试验数据为依据,分析电磁搅拌对铸态质量的影响,并对电磁搅拌成套设备作出评价。

通过试验认为,此套二冷段电磁搅拌成套设备能适应二冷段严酷的工作环境,是搅拌钢水的可靠设备,操作简单,安装方便,维修简便,搅拌效果显著,只要作适当改进,可以替代进口,而且价格低廉,能在国内方坯连铸机上普及推广。

The experimental summary of the billet continuous caster S-EMS for WIS(G)C NO.1 steelworks

Zhao Jiyu Li Yigen Lu Dongfu Lu Bingyu Wu Xianzhong

(WuHan Iron & Steel company)

Dong Liecheng

(WuHan Metallurgical university of science & Technology)

Abstract: WIS(G)C No.1 steelworks, in order to change the production technology from the ingot pouring to continuous casting for the high carbon steel, especially for the hard wire rod products; and to ensure the as-cast product quality.

Therefor, WuHan Metallurgical university of science & technology and WuHan Iron & steel company developed cooperately the second cooling zone electromagnetic stirrer(S-EMS) for the billet continuous casting process. But, it was due to the limited conditions, we have only studied the

LQ235 and 20MnSi steel grade.

According to the experimental investigation data, analysed the as-cast product quality and evaluated the complete sets of equipment.

By means of this examination recognized, it can be used at the seriously working situations of the second cooling zone, and is a reliable facility to stir molten steel.

This device has a lot of advantages, such as, convenient to operate, install and maintain, especially can get good stirring effects, and this device is more cheaper than the imported EMS.

If continuously improve this device, it can be used in the billet continuous caster, so it has worthy to spread all our country and can replace the import facilities.

一 前 言

加速发展连铸是我国钢铁工业的重要技术政策,冶金部已经把提高钢产量的连铸比作为实现工业技术结构优化的重要任务,要求到 2000 年连铸比达到 70% 以上,在连铸蓬勃发展的形势下,新工艺新设备应运而生不断得到开发利用,电磁搅拌技术就是其中之一。经过多年实践它的改善铸坯凝固组织的独到之处现已为冶金工作者所共识。电磁搅拌技术在连铸中应用的基本特征是在连续铸钢的过程中,凭借电磁力的作用,引起铸坯内液相钢水的搅动,创造出抑制柱状晶发展,促进成份均匀,夹杂物细化且分布均匀的热力学和动力学条件,从而改善铸坯的铸态质量。特别对于含碳量超过 0.45% 的钢,即使中等过热度,也有强烈的柱状晶增长趋势,使铸坯形成小钢锭结构,从而使中心疏松,中心缩孔和中心偏析等的缺陷增加。一炼钢每年有 X 万吨硬线钢的生产任务,为了使硬线钢的生产能从模铸转移到连铸生产中来,并为了使硬线钢能有较好的铸态质量,从而为进一步提高成品的质量和成材率作准备。武钢与武汉冶金科技大学合作,开发方坯连铸的二冷段电磁搅拌技术,并先在其中一流试验成功后,再在其它几流推广。经过双方的共同努力,二冷段电磁搅拌成套设备已于 97 年连铸年修时在第八流中安装上机,并正式开始运行。

本次试验的目的为:

1) 以不同的搅拌强度搅拌铸坯内未凝固部份的钢水,检验铸坯铸态质量改善的效果,以获得最佳的工艺参数。

2) 考验电磁搅拌器在二冷段严酷环境中的适应能力,考核电磁搅拌器成套设备在连铸生产中使用的可靠性。

由于各方面的条件并未成熟,高碳钢至今还未转到连铸中生产,本次试验还是以低碳钢作为搅拌对象,观察其搅拌效果。因此本文以 LQ235, 20MnSi 钢的试验数据和低倍照片为依据,分析对其铸态质量的影响,并对电磁搅拌器作出评价。

二 试验条件及技术参数

1. 试验条件

武钢一炼钢的方坯连铸机是由 500 吨的大平炉供应钢水,其工艺流程为:

500 吨顶吹平炉冶炼—钢包脱氧—350 吨钢包运输车过跨—250 吨 LF 炉加热—钢水罐座—20 吨 $\times$ 2 中间罐—4 流 200mm 方坯连铸机—切割—出坯—钢坯外运。

该方坯连铸机是由马鞍山钢铁设计院设计,主要设备由武钢生产制造,连铸机机型为 MYF 型,这种机型是在消化引进德国、日本、意大利、美国机型的基础上设计的,具有工艺新颖,结构坚固可靠,操作简单等优点,它的最大特点是采用刚性引锭杆,使拉坯平稳并简化了二次冷却的结构。

2. 铸机工艺参数

1) 铸机半径 8 米,铸机为 8 机 8 流;

2) 铸机断面:200 $\times$ 200mm,定尺:3.6-6.0 米;

3) 拉速范围:0.3-3 米/分,平均拉速:1.1-1.2 米/分;

4) 送引锭最大拉速:3 米/分;

5) 铸机冶金长度:12.85 米,凝固系数:28.5mm/min^{1/2},完全凝固时间:12.3 分;

6) 最大冷却水量:结晶器:1200 米³/小时,二次冷却:360 米³/小时;

7) 供水压力:0.6-0.7Mpa,排水压力:0.2Mpa;

8) 中间包容量:20 吨(最大 22 吨);

9) 结晶器长度:780mm;

10) 机组中心距:1250mm。

3. 电磁搅拌器成套设备的基本参数

本次研制的电磁搅拌器成套设备由搅拌器,控制柜和调压器三部份组成。

1) 搅拌器参数

外径: $\phi 910\text{mm}$

内径: 上口(法兰内径) $\phi 320\text{mm}$, 下口 $\phi 350\text{mm}$

纵向长度: 1100mm, 地脚圆: $\phi 936\text{mm}$, 高度: 440mm, 重量: 600kg;

2) 控制柜尺寸

控制柜的厚 $\times$ 宽 $\times$ 高分别为 $500 \times 800 \times 1800\text{mm}$;

3) 调压器

容量: 270KVA; 输入电压: 380 伏; 输出电压: 45-300 伏可调; 尺寸: $1200 \times 1200 \times 2200\text{mm}$ 。

4. 搅拌器安装与安装位置

二冷段旋转搅拌的电磁搅拌器是安装在铸机的二冷段的, 引锭与铸坯还要从搅拌器的中心通过, 为了确保搅拌器的安全, 因此对铸机需提出要求。

1) 对铸机要求

- 铸机运行正常, 铸坯尺寸认可, 不脱方;
- 铸机外弧侧的三个托辊要在铸机 R8 米的弧线上, 现场要用对弧样板调正, 使对弧误差 $\leq 0.3\text{mm}$;
- 铸机二冷内弧上限位辊与铸坯外弧面距离保证 210mm;
- 铸机的两对侧导辊及拉矫机上的两对侧导辊内表面间距保证 210mm, 且需对称于流中心。

2) 搅拌器在二冷段安装位置对搅拌效果影响很大, 考虑到铸坯凝固壳的厚度等因素, 本次试验搅拌器安装支架设在与结晶器中心线成 17 度的扇形半径上, 搅拌器上口与结晶器中心线距离约为 1895mm。

5. 试验方法

为了排除二次冷却条件和操作因素对铸坯试验结果的影响,本次试验采用取同流的不搅拌试样与不同搅拌强度的搅拌试样分别进行低倍和硫印试验,低倍用 YB4002-91 标准进行评级,硫印用 YB4003-91 评级。用它们的评语进行比较。试验进行两次,第一次铸机固定拉速,采用不同的搅拌强度,摸索最佳的搅拌方案,第二次试验是第一次试验的补充试验。

6. 试验的主要技术参数

试验次数	熔炼号	钢种	取样代号	拉速 m/min	中包 温度℃	搅拌 强度 A	备注
第一次试验 97-12-05	A750495A A750495B	LQ235	11	0.8	1562	不搅拌	1.3 为纵断面
			12	0.8	1562	不搅拌	
			21	0.8	1567	140	
			22	0.8	1567	140	
			31	0.8	1566	160	3.3 为纵断面
			32	0.8	1566	160	
			41	0.8	1561	180	
			42	0.8	1561	180	
			51	0.8	1550	200	
			52	0.8	1550	200	
第二次 98-01-06	A830019A	20MnSi	1	0.8	1570	不搅拌	1.1 为纵断面
			2	0.8	1558	180	3.3 为纵断面
			4	0.8	1550	200	

三 试验结果

1. 改善了铸坯的凝固组织

未搅拌铸坯,柱状晶发达,晶粒粗大直达铸坯芯部,而中心部位只有少量等轴晶。搅拌铸坯,由于电磁力的作用,搅动的钢流冲击着正在成长的柱状晶,使晶梢折断成为等轴晶的结晶核心,从而抑制了柱状晶的发展,使中心等轴晶带加宽,晶粒进一步细化。

等轴晶率用等轴晶带的宽度和铸坯的宽度比值表示。图 1 是 LQ235 钢与 20MnSi 钢搅拌与未搅拌时等轴晶率变化的情况,从图中看出经搅拌后两种钢的等轴晶率都有所提高。LQ235 提高 37.5%,20MnSi 提高了 32.5%。

2. 消除中心裂纹

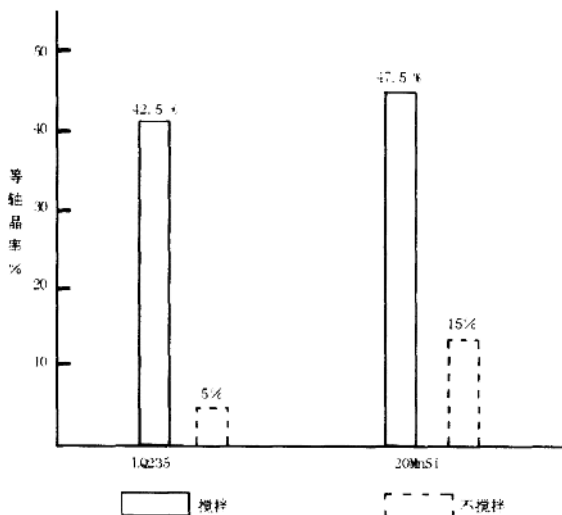


图1 LQ235钢与20MnSi钢搅拌与未搅拌时等轴晶率比较图

未搅拌铸坯,不管是LQ235还是20MnSi都有很严重的中心裂纹,裂纹长度达100mm,低倍评级为三级,而经搅拌后,两个钢种的中心裂纹都被消除,低倍评级为零级。

3. 中心疏松改善,中心缩孔消除

a. 中心疏松

从两个钢种横向与纵向低倍照片看出搅拌后铸坯的中心疏松得到改善,夹杂物分布也由聚集型链状转变为搅拌后的分散型均匀细小分布。

从两个钢种中心疏松评级看,未搅拌铸坯中心疏松都为二级,而搅拌后得到改善,中心疏松降为<1级。

b. 中心缩孔

从两个钢种横向与纵向低倍照片看出,未搅拌铸坯的中心缩孔严重,缩孔贯穿着铸坯的始终,而搅拌后,铸坯的中心缩孔消除。

从中心缩孔评级看, LQ235 钢与 20MnSi 钢两种在未搅拌时, 中心缩孔为 2 级。而搅拌后, 都降为 0 级。

4. 中心偏析减轻

分别在中间包和铸坯的中心部位取样, 进行化验分析, 求其中心部位的偏析度。偏析度 = $C_{\text{固}}/C_{\text{液}}$

式中: $C_{\text{固}}$ 为铸坯的取样部位成分;

$C_{\text{液}}$ 为中间包钢液成分;

经电磁搅拌后, 各元素的中心偏析均有所减轻, 图 2 是 LQ235 钢搅拌与未搅拌时的碳, 硫, 磷三元素中心偏析的对比图, 从图中看出碳中心偏析未搅拌时为 1.07, 而搅拌后为 1, 无偏析。硫中心偏析未搅拌时为 1.03, 而搅拌后为 1, 无偏析。磷中心偏析未搅拌时为 0.82, 而搅拌后为 0.87, 更接近 1。

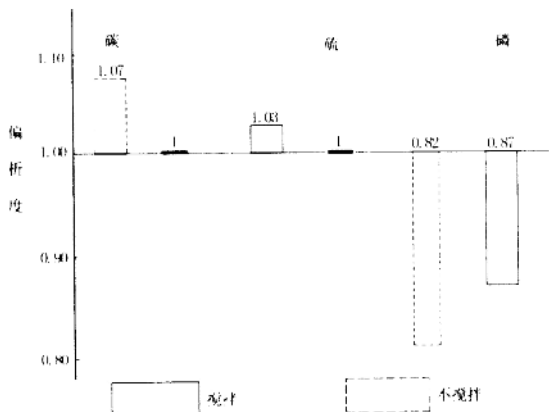


图 2 LQ235 钢搅拌与未搅拌时的碳, 硫, 磷的中心偏析对比图

图 3 为 20MnSi 钢搅拌与未搅拌时的碳, 硫, 磷三元素中心偏析的对比图, 从图中看出碳中心偏析未搅拌时为 1.06, 而搅拌后改善为 0.97, 更接近 1。硫中心偏析未搅拌时为 0.85, 而搅拌后改

善为 0.93, 更接近 1。磷中心偏析未搅拌时为 0.95, 而搅拌后为 1。

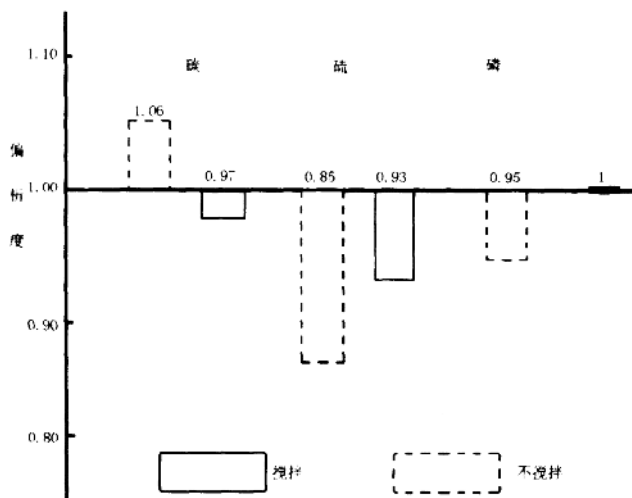


图 3 20MnSi 钢搅拌和未搅拌时的碳、硫、磷的中心偏析的对比图

5. 白亮带得到控制

由于电磁力的作用, 在铸坯的凝固前沿, 加剧了液析作用, 因此在距铸坯 40mm 处出现了白亮带, 其宽度约为 5-6mm, 颜色为银白色。大量资料表明此处碳、硫、磷等元素为负偏析, 其负偏析的程度与搅拌强度有关, 搅拌强度大, 则负偏析严重。本次试验在铸坯白亮带中心处取样分析 C, S, P 并与中间包钢样成分比较求出偏析度。图 4 为 LQ235 钢与 20MnSi 钢白亮带的负偏析图, 从图中看出, LQ235 钢白亮带负偏析分别为:

碳负偏析为: 0.93;

硫负偏析为: 0.97;

磷负偏析为: 0.77

20MnSi 钢白亮带负偏析分别为:

碳负偏析为: 0.92;

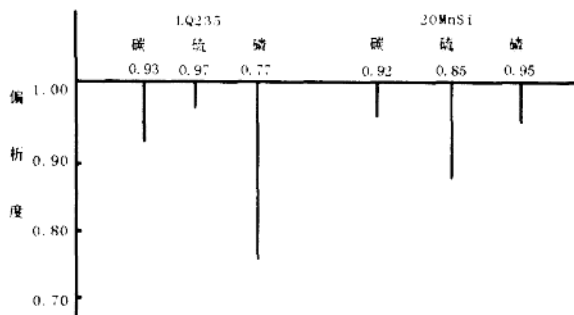


图4 LQ235钢与20MnSi钢白亮带的负偏析图

硫负偏析为:0.85;

磷负偏析为:0.95;

从这两个钢种白亮带负偏析程度看,在这次试验中白亮带负偏析程度并不很大。这是由于试验的搅拌器采用调压器调压,使搅拌功率线性可调,从而使白亮带负偏析得到控制。

四 存在问题

本次研制的 EMS-2 型电磁搅拌器成套设备是第一次在连铸机上进行工业性试验,虽然试验进展顺利,但也存在着问题,需要在以后的设计中克服。

1. 搅拌器水冷系统应安装流量报警器

搅拌器水冷系统是与结晶器水冷系统并联的,虽然在搅拌器水冷系统中安装了水压继电器能保证搅拌器只能在达到一定水压后才能通电工作,却忽略了水流量的作用,在以后的设计中应安装水流量计并能使水流量低于一定值时报警,以进一步确保搅拌器的安全。

2. 改进搅拌器电源进线的方向

本次试验搅拌器的电源进线是安装在铸坯的外弧侧的,从几次漏钢的情况看,当铸坯在出结晶器漏钢时,大量的漏钢钢水是集中在外弧侧的,内弧侧相对要好得多,因此若在安装搅拌器时将搅