

[文章编号] 1004- 0609(2002)S1- 0011- 07

物理场对金属凝固组织的影响^①

范金辉^{1,2}, 翟启杰¹

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072; 2. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050054)

[摘 要] 综述了国内外关于电流、磁场和超声波处理对金属凝固过程与凝固组织影响的研究概况, 根据电磁学、声学及金属凝固原理分析了物理场细化和改善凝固组织的主要机制, 提出了外加物理场凝固细晶技术在工业中应用尚需研究解决的技术与理论问题, 特别强调了脉冲物理场处理技术的优越性及应用前景。

[关键词] 物理场; 凝固; 组织

[中图分类号] TG 113

[文献标识码] A

金属材料在材料中占主导地位, 对国民经济的发展起着重要作用。传统的金属材料经历了漫长的发展, 在强化理论、评估与表征、应用与再生等方面已形成了较完整的理论与工程体系。近年来, 生态环境材料的提出, 将环境意识引入材料科学中, 材料工作者从生态环境的角度重新考虑现有材料的发展道路, 在现有理论与体系的基础上对材料的强化、评价与再生等方面进行了新的思考。

图 1 所示为环境与材料共同组成的大系统。材料与环境联系的基本途径有 3 条: 资源、能源和废弃物。从环境中获取足够的资源和能源生产材料, 而材料的生产和使用又将大量废弃物排入环境中。对于材料的评价可用如图 2 所示的三角形说明^[1]。在这个三角形中, 环境性包括材料从生产到报废全过程中所消耗的资源量、能源量以及排放的三废量, 称为“材料的环境协调性”。功能性指材料的性能或功能指标。传统的材料工程学主要研究材料的功能性与经济性的平衡, 即高的性能价格比。而新的评价理论要求材料的功能性、环境性和经济性的平衡, 即高的性能价格比和高的性能环境负荷比。材料的高性能、低成本与良好的环境协调性是相互联系的, 例如, 高强度可以减少用材量, 延长服役寿命, 这将减少资源消耗、能源消耗和三废排放。从环境材料的角度出发, 物理场细晶强化成为金属材料理想的强化手段。

关于物理场对金属凝固过程作用的研究始于 20 世纪 30 年代, 而后一直无太大的进展。这一方面是由于对高密度电流、超强磁场和超声波大功率的要求制约了该技术的应用, 另一方面材料领域孕

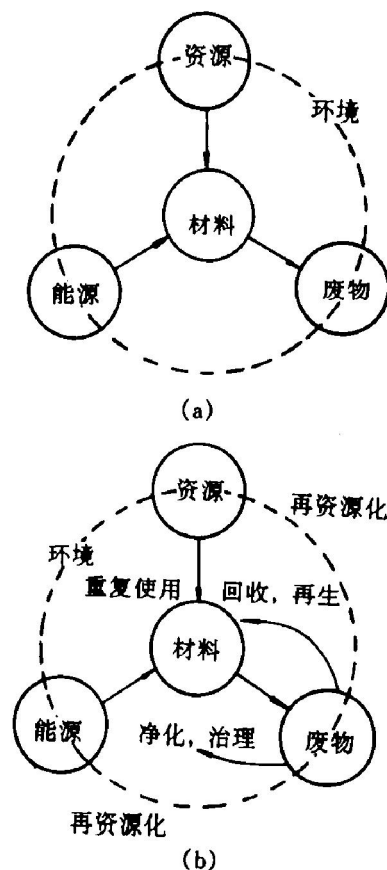


图 1 材料-环境系统

Fig. 1 Material-environment system

(a) —Traditional material; (b) —Ecomaterial

育处理、变质处理和微合金化等凝固细晶技术在这一时期发展很快, 人们更愿意接受工艺简单的凝固细晶技术。值得注意的是, 进入 21 世纪后, 材料的环境协调性的提出对传统的凝固细晶技术提出了质疑, 而物理、材料和电子等领域科学技术的飞速发

① [基金项目] 上海市重大科技攻关资助项目(01JC14001)

[收稿日期] 2001- 07- 09; [修订日期] 2001- 11- 25

[作者简介] 范金辉(1970-), 男, 博士研究生。

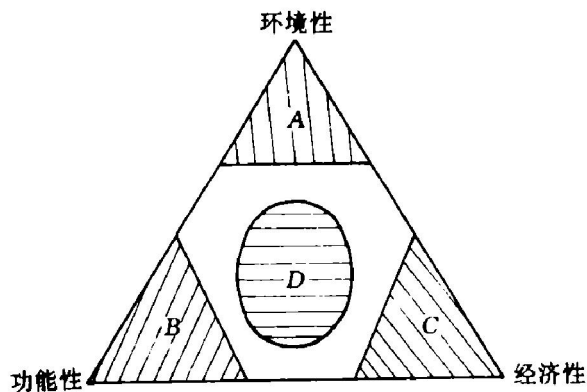


图 2 材料三角形框架

Fig. 2 Triangle frame of materials

展使大功率电流、磁场和超声等物理手段的产生成为可能。因此,从 20 世纪 90 年代起物理场凝固细晶技术再度成为材料领域的研究热点,而输出峰值高、设备负荷小的脉冲物理场成为物理场凝固细晶技术的新亮点。

外加物理场处理技术是在金属凝固前或凝固过程中对金属熔体施加物理场,利用金属和物理场的相互作用,改善其凝固组织。该技术具有环境友好、操作简便等优点。目前该领域的研究热点主要集中在以下 3 个方面:1) 让电流通过金属熔体,即电流处理;2) 让金属熔体在磁场中凝固,即磁场处理;3) 对金属熔体进行超声波处理。

外加物理场凝固细晶技术,国外起步较早,但近年来国内的研究异军突起,特别是在脉冲物理场凝固细晶技术以及对钢铁材料等高温合金的研究方面,已走在了世界的前列。

1 电流对金属凝固的作用

在外加物理场处理技术中,人们研究最多的是电流处理技术。国内外学者采用直流电流、交流电流以及高强度脉冲电流处理金属熔体,从低熔点的锡铅合金、较高熔点的铝铜合金到高熔点的钢铁材料,进行了大量的研究工作,取得了许多研究成果。图 3 所示为金属熔体通电的两种方式。

1.1 电流对金属凝固组织的影响

1.1.1 非脉冲电流的作用

Misra^[2~4]首先在低熔点过共晶 Pb-15% Sb-7% Sn 和亚共晶 Pb-10% Sb-3% Sn 三元合金的凝固过程中使用了电流处理技术,施加电流密度为 300~400 A/m² 和电压约为 30 V 的直流电,得到了均匀细小的凝固组织,还发现把直流电换成交流电也可

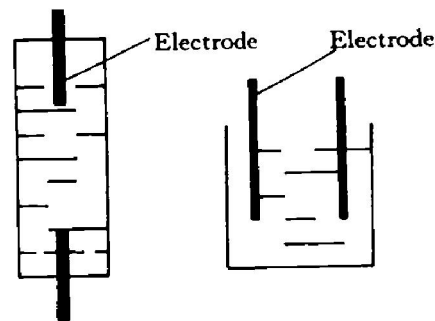


图 3 金属熔体两种通电方式

Fig. 3 Electrified styles of metal melt

得到同样的结果。

顾根大^[5]研究了电流作用下 Al-33% Cu 和 Al-12.7% Si 两种共晶合金的单向凝固行为,发现电流使 Al-Cu 共晶合金生长界面易于呈胞状生长,使胞状共晶团数量增加,尺寸变细。电流强烈改变了 Al-Si 共晶生长形态,使之以亚共晶方式生长,共晶硅片间距明显减小。李辉等^[6]将 Al-10% Si 亚共晶合金在电流密度为 0.35~1.40 A/cm² 下通电处理 50 min,结果使亚共晶铝硅合金过冷度加大,初生 $\alpha(\text{Al})$ 由树枝状变成颗粒状。

王家炘等^[7]提出在铸铁凝固 10~20 s 时间范围内通电,电流使石墨无论在尺寸、形状和分布上都比普通条件下形成的石墨为好,电场可使铸铁的抗拉强度提高 30% 左右。热分析表明,电流增加铸铁结晶过冷度,减小结晶温度区间,并能减弱有害杂质的影响。Misra^[8]采用电流密度 500 A/m²,电压 20 V 的电流处理镍镁耐磨铸铁,发现电流改变了铸铁一次结晶组织,在原来的铁素体+石墨的组织中出现了珠光体,并使石墨尺寸平均减小 20%~40%。

1.1.2 脉冲电流的作用

脉冲电流(简称电脉冲)对合金凝固组织影响的研究主要集中在锡铅等低熔点合金上。Nakada 和 Flemings^[9]首先研究了电脉冲 Sn-15% Pb 合金的凝固过程,发现在凝固的起始阶段施加电脉冲可使凝固组织中的初生相由树枝状变为球状;此外还发现初生相的形貌不仅与电脉冲的初始峰值电压有关,还与合金液中的固相分数及冷却速度有关。实验表明:短的电脉冲触发时间、大的电容器组起始电压和慢的冷却速度有利于细化组织。Barnak 等^[10]对 Sn-40% Pb 和 Sn-37% Pb 两种合金的实验表明:电脉冲使这两个合金的共晶团簇尺寸大大减小,如果电流密度为 1000~1500 A/cm²,脉冲电流频率为 1.5~5 Hz,共晶团簇可减小一个数量级;此外富

Pb 树枝晶的截面积增加 10% ~ 20%, 并通过实验证明随着电流密度增加, 结晶过冷度增加。

李建明等^[11]对 Pb-60% Sn 合金的研究表明: 大电容、低电压电路所产生的脉冲电流可使初生相球化、共晶团沿电极方向伸长; 而小电容、高电压电路所产生的脉冲电流可减小共晶体的片间距, 并使得共晶体的层片均沿电极方向生长。鄢红春等^[12]选用 Sn-10% Pb 亚共晶合金, 脉冲宽度为毫米数量级进行实验。结果表明: Sn-10% Pb 合金在由大容量(1 200 μF , 1 500 V) 电容器放电提供的脉冲电流作用下凝固时, 粗大的富 Sn 树枝状初晶细化成近球状结构, 并用经典热力学和连续介质电动力学对脉冲电流作用下熔体的结晶成核理论和晶粒尺寸作了深入研究, 表明当所加脉冲电流密度达 10 000 A/cm^2 量级时, 在理论上可以获得大块纳米晶。对 Pb-40% Sn 合金的理论计算结果与实验值基本一致^[13]。

我国率先开展了脉冲电流对较高熔点的铝铜合金及钢铁材料凝固过程影响的研究。訾炳涛等^[14]应用强脉冲电流细化 LY12 铝合金的凝固组织。当金属熔体冷至液相线时, 向试样施加不同强度的脉冲电流, 放电电压为 0~ 7 kV, 电容器电容量为 0~ 400 μF , 脉冲间隔约 30 s, 直至试样冷至固相线以下完全凝固成锭。结果表明: 强脉冲电流可显著细化其凝固组织, 脉冲电流愈强, 细化效果愈显著。王建中等^[15]对 Al-5.0% Cu 合金进行了电脉冲处理, 铸锭的凝固结构得到了改善, 柱状晶区缩小, 等轴晶区扩大, 晶粒得到很大程度的细化。他们发现, 经脉冲孕育处理后的 Al-5.0% Cu 合金液具有良好的抗孕育衰退能力。采用频率为 1 Hz 的电脉冲在连铸结晶器内对 Q235 钢方坯进行电脉冲孕育处理, 连续处理 5 min, 连铸坯凝固组织细化了 3 倍以上, 并使柱状晶由粗而长变为细而短的短杆状组织。唐勇等人在 1 560 $^{\circ}\text{C}$ 对 9Cr2MoV 钢液施以电脉冲, 脉冲发生频率为 1 Hz, 发现柱状晶明显缩短。另外, 对 T8 钢、60 钢、Q235 钢、70b 钢等进行了电脉冲处理研究, 凝固组织均得到了明显的改善^[16, 17]。

1.2 电流对金属凝固组织作用的机理

根据人们现有的认识, 电流对材料的影响主要有以下几个方面: 电传输效应、Jouler 效应、Peltier 效应、起伏效应、收缩效应等^[18, 19]。

电传输效应是液体金属中各种离子在电场作用下发生定向迁移的现象, 只能在直流电场中表现出

来。电传输效应可使金属凝固时界面有效分配系数发生变化。焦耳热效应是人们熟知的。对于凝固体系来说, 焦耳热相当于内热源, 它将使凝固系统整体冷速降低, 过冷度减小。对于固液共存的状态而言, 由于液体金属的电导率比同材质固体金属的小数倍, 所以固相是电流优先选择的通道, 因而固相内产生的热效应大于相邻的液相, 这可降低界面处的温度梯度, 甚至导致固相重熔, 所以最终的结晶组织比较均匀。

电导率不同的两种材料接触时, 接触面的接触电位差产生了附加的热量, 称为 Peltier 热, 其大小与通过界面的电流密度成正比, 电场作用下, 在固/液界面上产生的 Peltier 热使界面上的凸出部分熔化, 从而使界面趋于光滑圆整。所以电场作用促进球形或准球形晶粒的形成, 抑制树枝晶生长。

电场作用于熔点附近的凝固系统时, 金属液中近程有序原子团的结构、尺寸和数量都会随着电场强度、方向而变化, 加剧了结构起伏、能量起伏及温度起伏, 从而促进均质形核。这种现象称为起伏效应。

当有快速变化的强脉冲电流通过金属熔体时, 将在熔体内产生快速变化的强脉冲磁场。强脉冲电流和强脉冲磁场之间的相互作用会在金属熔体内产生很强的收缩力, 使熔体反复地被压缩, 并使熔体在垂直于电流方向作往复运动。訾炳涛等人在实验中观察到的冲击波动证明了这一点。这种运动除了碎断树枝晶外, 同时还使熔体迅速失去过热、提高形核率。所以脉冲电流愈强, 细化效果愈显著。

2 磁场对金属凝固过程的作用

与电流作用相比, 磁场对合金熔体的作用具有一个明显的优点, 即磁场作用的非接触性。传统的材料电磁加工技术主要是依靠低磁感应强度($< 1 \text{ T}$) 的磁场作用, 如电磁搅拌, 而磁场对金属凝固组织的作用研究不多。图4所示是对金属熔体施加

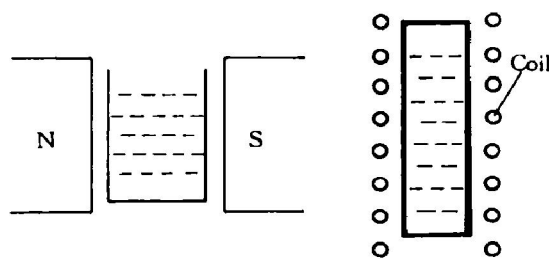


图 4 磁场对金属熔体作用方式

Fig. 4 Effect of magnetic field on metal melt

磁场的示意图。

2.1 磁场对合金凝固组织的影响

2.1.1 非脉冲磁场的作用

王艳等^[20]发现在单独直流磁场作用下,过共晶 Al-18% Si 合金在定向凝固时形成富 Si 特殊表面。当磁感应强度为 0.15T 左右时,中心组织发生粗化现象。磁感应强度为 0.24T 时,开始发生 Si 的偏析现象。改变稳恒直流磁场的方向, Si 的偏聚方式不改变。

Johnson 等^[21]首先发现交变磁场可以减小等轴晶尺寸和减小柱状晶区的相对体积。Bassyouni^[22]发现,只有当磁感应强度为 0.027~0.033 T 时,交变磁场才能够明显细化铝合金组织。葛丰德和宁志良等^[23, 24]认为,细化效果取决于一次电流强度、一次电流波形及频率等因素,并不仅仅取决于磁感应强度。

2.1.2 脉冲磁场的作用

訾炳涛^[25]首次研究了用强脉冲磁场改善金属凝固组织的技术。所用实验材料是 LY12 铝合金。将铝合金在约高于熔点 80 °C 的温度保温 10 min 后,当金属熔体冷至液相线以下时,开始向试样施加脉冲磁场,约 0.5 min 一次,直至试样冷至固相线以下完全凝固成铸锭为止。结果表明,脉冲磁场能将铝合金的凝固组织从粗大的树枝晶细化为等轴晶,而且磁场愈强,细化效果愈显著。图 5 所示为脉冲磁场和脉冲电流与凝固组织晶粒尺寸的关系。

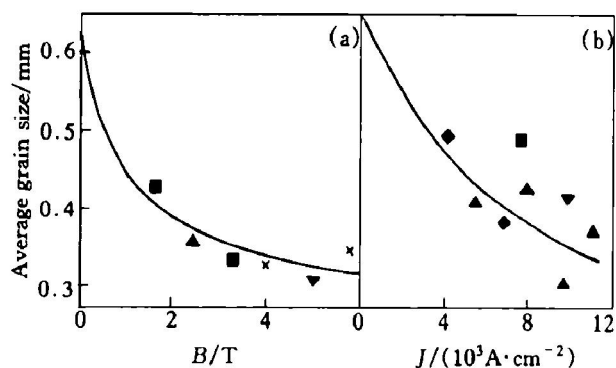


图 5 脉冲磁场和脉冲电流对凝固组织晶粒尺寸的影响

Fig. 5 Effect of pulse magnetic field and pulse electric field on grain size of solidified structure

(a) —Pulse magnetic field; (b) —Pulse electric field

班春燕等^[26]的研究结果表明,脉冲磁场能有效改善 LY12 试样中合金元素的宏观偏析,在脉冲

磁场作用下, Cu 元素的最大偏析率很小,比无磁场作用的试样减小了一个数量级,基本消除了负偏析现象,同时大大改善了 Mg 元素的偏析。另外,能谱分析(EDS)及 X 射线衍射(XRD)分析表明,在脉冲磁场作用下, Cu 元素在 $\alpha(\text{Al})$ 中的固溶度升高, Al 的晶格常数下降。

2.2 磁场对合金凝固组织的作用机理

磁场对液态金属的作用主要有:抑制液体流动、搅拌、电磁悬浮等^[27~29]。

匀强静磁场对凝固体系的作用主要是磁场力。磁场力有可能导致铁磁质颗粒的偏聚,液体金属自然对流的削弱等。

在交变磁场作用下,凝固系统内将产生一个感应电流,磁场与感应电流之间发生电磁作用,产生电磁力,其方向是沿径向将金属压向或拉离轴心,从而使凝固体系产生了规则的波动。这种波动对凝固过程的影响与通常的强化对流产生的影响没有实质区别,因此,交变磁场具有细化晶粒的作用。

从磁场带来的波动效应看,磁感应强度越大,电磁压力越大,因而波动越激烈,晶粒细化效果越显著。但是在磁感应强度增加的同时,感应电流也成比例地增加,这相应地会在凝固体系内增大热效应,从而使过冷度减小,进而使形核率下降,所以磁感应强度过大时,会引起晶粒粗化。因此,磁场强度与晶粒细化效果之间的关系曲线应是一条有极值的曲线。

脉冲磁场使熔体内产生脉冲涡流。涡流和磁场之间相互作用产生洛伦兹力和磁压强。它们是剧烈变化的,且其强度远大于金属熔体的动力压强,这就使金属熔体产生强烈振动。这种振动一方面增加了熔体凝固中的过冷度,提高了形核率;另一方面在熔体内造成了强迫对流,使凝固过程中树枝晶或难以长大,或被折断、击碎,而这些破碎的枝晶颗粒游离于结晶前沿的液体中又会成为新的生长核心。所以脉冲磁感应强度愈大,细化效果愈显著。

3 超声波对金属凝固的作用及其研究进展

国内外均有人研究过超声波对金属凝固的影响,但近年来此领域的研究报导却不多。图 6 所示为金属熔体中超声波两种导入方式示意图。

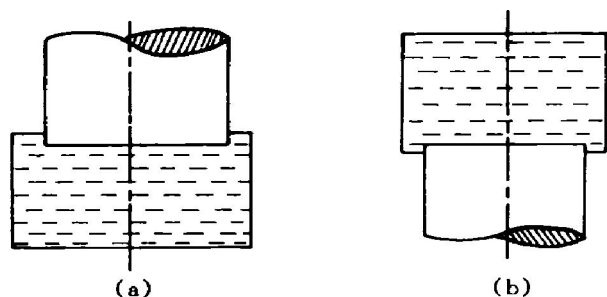


图 6 金属熔体中超声波两种导入方式

Fig. 6 Induced styles of ultrasonic in metal melt

(a) —From top; (b) —From bottom

3.1 超声波对金属凝固组织的影响

Abramov^[30]用超声波处理碳钢细化了晶粒, 超声波振动使铸态下 U8(0.8% C) 和 U10(1.0% C) 钢的晶粒尺寸从 200 μm 减小到 25~50 μm ; 使铸态亚共析碳钢强度提高 20%~30%, 塑性提高 30%~40%。在 ShKh15(1% C, 1.5% Cr) 钢连铸时进行超声波处理可大大减小轴向疏松和缩小铸坯柱状晶区, 扩大其等轴晶区, 使晶粒及碳化物尺寸减小。

Irsid^[31]将超声波振动施加于连续铸造过程中, 发现能明显改善润滑状态, 一是钢和型壁表面的摩擦明显减小, 二是使铸件表面质量得到显著改善, 出型容易。另外使铸件晶粒细化, 而且减轻了 Al-Cu 合金连续铸造铸件的表面偏析。

李英龙等^[32]采用频率为 20 kHz, 最大电功率为 500 W(可调)的超声波发生器, 研究了 Al-Si 共晶和过共晶(20% Si)合金在熔体直至合金凝固全过程和共晶转变前进行超声处理对铸态组织和性能的影响。研究表明: 适宜的超声参数(声强 $I = 3.5 \text{ W/cm}^2$)对初晶 Si 和共晶 Si 组织具有双重细化作用, 使 Si 破碎成颗粒状, 合金的强度和塑性明显提高。

赵忠兴等^[33, 34]采用 20 kHz, 0.25 kW 和 20 kHz, 1 kW 的冶金用超声波发生器处理 Al-Si-Cu-Mg 合金, ZL102, HT100 和 ZCuPb30 合金, 经超声波处理的合金试样均为等轴晶组织, 且明显细化均匀, 合金的宏观及微观偏析均得到改善。

3.2 超声波对金属凝固组织的作用机理

长期以来人们一直在探讨超声波在流体介质中引起的一系列效应的机理, 并在一定实验条件和现象的基础上, 产生了诸如空化理论、破碎理论、生核理论和过冷理论等^[35, 36]。

超声波在液体中传导时, 将会产生周期性的应力和声压变化, 在声波的波面处形成很强的压强梯

度, 产生局部的高温高压效应, 这种效应导致瞬间的正压、负压变化, 致使结晶过程中固/液界面正在形核、长大的晶胚脱落下来, 它们漂移到熔体的各个部位, 从而改变了固/液界面的结晶方式。液体中产生的空化和搅动作用使合金液整体的温度和化学成分均匀化, 细化了合金显微组织, 减轻了合金的宏观偏析倾向, 提高了铸态组织均匀性。

4 展望

如何更有效地利用资源、减少污染、提高金属材料加工的技术水平是材料行业 21 世纪所面临的重要课题。电流、磁场和超声波对金属凝固组织有显著的细化作用, 与传统的添加剂细晶技术相比, 应用这些物理手段控制和细化金属凝固组织可以避免对环境和金属材料本身的污染; 与电磁搅拌细晶技术相比, 可以避免带状偏析的出现。随着对环保和材料品质要求的提高, 电流、磁场和超声波等物理场凝固细晶技术将会受到广泛的关注, 并将很快应用于冶金、机械等行业中。脉冲物理场可以通过功率较低的设备实施间歇式大能量输出, 与超强物理场相比, 具有更加广阔的应用前景。

但是必须注意到, 目前人们对电流、磁场和超声波凝固细晶的机理及规律还缺乏系统深入的认识, 基础研究的不足制约了该技术的应用。这一技术的美好前景和研究上的不足使该技术领域更具魅力, 并成为材料领域的新热点。该领域的研究将会向以下方向发展: 1) 脉冲物理场凝固细晶的研究将会受到更多的关注, 并可望最先应用于生产实际; 2) 凝聚态物理及工业用电等跨学科研究人员将会被吸引到该领域中; 3) 研究经费投入会更大, 研究装备的起点将更高; 4) 基础研究工作将会受到更多的重视, 物理场凝固细晶的机制、规律和条件的研究将会有较大的突破。

[REFERENCES]

- [1] 王天民. 生态环境材料 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
WANG Tian-min. Ecomaterials [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.
- [2] Smith R W. Electric field freezing [J]. Journal of Materials Science Letters, 1987, 6: 643-644.
- [3] Misra A K. A novel solidification technique of metals and alloys: under the influence of applied potential [J]. Met-

- allurgical Transactions A, 1985, 16A: 1354– 1355.
- [4] Misra A K. Effect of electric potentials on solidification of near eutectic Pb-Sb-Sn alloy [J]. Materials Letters, 1986, 4(3): 176– 177.
- [5] 顾根大. 电场作用下金属定向凝固行为的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1989.
- GU Gen-da. Directional solidification behavior of metals under an electric field [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1989.
- [6] 李 辉, 边秀房, 刘相法. 电流处理对铝合金组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 1996, 3: 8– 10.
- LI Hui, BIAN Xiufang, LIU Xiang-fa, et al. Influence of current density on structure and properties of Al alloy [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 1996(3): 8– 10.
- [7] 王家炘, 黄积荣, 林建生. 金属的凝固及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- WANG Jiaxin, HUANG Jirong, LIN Jian-sheng. Solidification of Metal and Its Control [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983.
- [8] Misra A K. Misra technique applied to solidification of cast iron [J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17A: 358– 359.
- [9] Nakada M, Flemings M C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging [J]. ISIJ International, 1990, 30(1): 27– 33.
- [10] Barnak J P, Sprecher A F, Conrad H. Colony (grain) size reduction in eutectic Pb-Sn castings by electropulsing [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32(6): 879– 884.
- [11] LI Jian-ming, LIN Han-tong. Modification of solidification structure by pulse electric discharging [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(12): 1691– 1694.
- [12] 鄢红春, 何冠虎, 周本濂, 等. 脉冲电流对 Sn-Pb 合金凝固组织的影响 [J]. 金属学报, 1997, 33(4): 352– 358.
- YAN Hong-chun, HE Guanhua, ZHOU Ben-lian. Effect of pulse current on the solidification structure of Sn-Pb alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(4): 352– 358.
- [13] 秦荣山, 周本濂. 直接晶化法制备块状纳米材料的探索(II)—脉冲电流作用下金属熔体结晶晶粒尺寸的理论估算 [J]. 材料研究学报, 1997, 11(1): 69– 72.
- QIN Rong-shan, ZHOU Ben-lian. Exploration on the fabrication of bulk nanocrystalline materials by direct nanocrystallizing method (II)—Theoretical calculation of grain size of metals solidified under electropulsing [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1997, 11(1): 69– 72.
- [14] 瞿炳涛, 巴启先, 崔建中. 高密度脉冲电流作用下 LY12 铝合金的凝固组织 [J]. 特种铸造及有色合金, 2000, 4: 4– 6.
- ZI Bing-tao, BA Qixian, CUI Jian-zhong, et al. The solidification structure of LY12 aluminum alloy with high density pulse electric current [J]. special Casting and Nonferrous Alloys, 2000, 4: 4– 6.
- [15] 王建中. 电脉冲孕育处理技术研究及液态金属团簇结构假说 [D]. 北京: 北京科技大学, 1998.
- WANG Jian-zhong. The research of treating technology with electro-pulse modification and the hypothesis of liquid metal cluster structure [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 1998.
- [16] 唐 勇. 电脉冲作用下液态金属结构及其对碳钢凝固组织改善的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2000.
- TANG Yong. Investigation of liquid metal structure and steel solidification improvement under various electropulse conditions [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2000.
- [17] TANG Yong, WANG Jian-zhong, CANG Da-qiang. Electropulse on improving steel ingot solidification structure [J]. Journal of University of Sci and Tech Beijing (Eng. Edition), 1999, 6(2): 94– 96.
- [18] 秦荣山. 电脉冲作用下的非平衡转变研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1996.
- QIN Rong-shan. Investigations on the nonequilibrium transformation by pulse electric current [D]. Shenyang: Institute of Metal Research of Academia Sinica, 1996.
- [19] Qin R S, Zhou B L. Effect of electric current pulses on grain size in castings [J]. International Journal of nonequilibrium Processing (UK), 1998, 11(1): 77– 86.
- [20] 王 艳, 边秀房, 徐昌业, 等. 直流磁场作用下 Al-18Si 合金的凝固行为 [J]. 金属学报, 2000, 36(2): 159– 161.
- WANG Yan, BIAN Xiufang, XU Chang-ye, et al. Solidification behavior of Al-18Si alloy under direct magnetic field [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(2): 159– 161.
- [21] Asai S. Birth and recent activities of electromagnetic processing of materials [J]. ISIJ International, 1989, 29(12): 981– 992.
- [22] Bassyouni T A. Effect of electromagnetic forces on aluminum cast structure [J]. Light Metal, 1983, 33(12): 733– 742.
- [23] 葛丰德, 何洪亮, 霍树海. 脉动磁场铸造 [J]. 机械

- 工程学报, 1989, 25(1): 1- 6.
- GE Feng-de, HE Hong-liang, HUO Shu-hai. Casting with pulsating electromagnetic field [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1989, 25(1): 1- 6.
- [24] 宁志良, 徐志辉, 梁维中. 脉动磁场对 Al-Cu 合金热裂的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 129- 133.
- NING Zhi-liang, XU Zhi-hui, LIANG Wei-zhong, et al. Effect of pulsating electromagnetic field on hot cracking of Al-Cu alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(1): 129- 133.
- [25] 訾炳涛, 巴启先, 崔建中, 等. 强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究 [J]. 物理学报, 2000, 5: 1010- 1013.
- ZI Bing-tao, BA Qi-xian, CUI Jian-zhong, et al. Effect of strong pulsed electromagnetic field on metal's solidified structure [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 5: 1010- 1013.
- [26] 班春燕, 崔建中, 巴启先, 等. 脉冲电流及脉冲磁场对铝合金中合金元素分布的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2002(铝合金专辑): 121- 123.
- BAN Chun-yan, CUI Jian-zhong, BA Qi-xian, et al. Influence of pulsed current and pulsed magnetic field on distribution of alloying elements in Al alloy [J]. Physical Journal, 2002(Al Special): 121- 123.
- [27] 邢书明, 徐亚荣, 胡汉起, 等. 电场和磁场作用下的金属凝固 [J]. 特种铸造及有色合金, 1998(6): 37- 40.
- XING Shu-ming, XU Ya-rong, HU Han-qi, et al. The solidification of metals in electrical or magnetic field [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 1998(6): 37- 40.
- [28] Hans C. Influence of an electric or magnetic field on the liquid-solid transformation in materials and on the microstructure of the solid [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A287: 205- 212.
- [29] 贺幼良, 杨院生, 胡壮麒. 电磁场作用下的金属凝固与成形 [J]. 材料导报, 2000, 14(7): 3- 7.
- HE You-liang, YANG Yuan-sheng, HU Zhuang-qi, et al. Solidification and shaping of molten metals in electromagnetic field [J]. Material Review, 2000, 14(7): 3- 7.
- [30] Abramov O V. Action of high intensity ultrasonic on solidifying metal [J]. Ultrasonic, 1987, 25(2): 73.
- [31] Irsid. Ultrasonic can replace mould oscillation during billet casting [J]. Steel Times Int, 1989(5): 49.
- [32] 李英龙, 李宝绵, 刘永涛, 等. 功率超声对 Al-Si 合金组织和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 719- 722.
- LI Ying-long, LI Bao-mian, LIU Yong-tao, et al. Effect of high intensity ultrasonic on structures and properties of Al-Si alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(4): 719- 722.
- [33] 赵忠兴, 毕鉴智, 郑一, 等. 铝合金超声铸造技术 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999(1): 13- 14.
- ZHAO Zhong-xing, BI Jian-zhi, ZHENG Yi, et al. Casting technology of aluminum alloy treated by ultrasonic [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 1999(1): 13- 14.
- [34] 赵忠兴, 穆光华, 黄金日, 等. 超声波对铸造合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 1996, 3: 21- 25.
- ZHAO Zhong-xing, MU Guang-hua, HUANG Jin-ri, et al. Effect of ultrasonic on the structure and properties of casting alloys [J]. Foundry, 1996(3): 21- 25.
- [35] Mauer F A. An ultrasonic method for Reconstructing the two dimensional liquid/solid interface in solidifying bodies [J]. Metallurgical Transaction. 1991, 22B(8): 467.
- [36] Abramov O V. Ultrasound in Liquid and Solid Metal [M]. CRC Press Boca Ratan, FL, 1994. 289- 329.

Effects of physical fields on solidification structure of metals

FAN Jin-hui^{1,2}, ZHAI Qi-jie¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, China)

[Abstract] The research on the effects of electric, magnetic and ultrasonic fields on solidification process and structure of metals is reviewed. The primary mechanisms of the refinement and improvement on solidification structure are analyzed based on electromagnetics, acoustics and theories of metal solidification. Technology and theory problems those should be researched and solved before the application of the physical fields treatment technology in industry are indicated. The advantages and foreground of pulse physical fields treatment are emphasized.

[Key words] physical field; solidification; structure

(编辑 杨兵)