

电流凝固技术的理论与实践*

范金辉 翟启杰

(上海大学材料科学与工程学院 上海 200072)

摘要: 综述了近半个世纪国内外电流凝固技术的研究概况,介绍了直流电流、交流电流和脉冲电流处理对金属凝固过程与凝固组织影响的一些重要成果,总结了电流凝固技术目前研究工作的不足及发展趋势,提出了该技术在工业中应用尚需研究解决的技术与理论问题,特别强调了脉冲电流处理技术的优越性及应用前景。

关键词: 电流 凝固 组织

中图分类号: TG244

0 前言

在跨入 21 世纪的今天,人们普遍认识到,资源短缺、环境污染已成为制约人类社会发展的的重要因素。随着生态环境材料的提出,材料工作者重新考虑现有材料的发展道路,将环境意识引入材料科学中,尽量采用对生态环境影响小的强化手段,力求使材料具有高的功能及性能、低的环境负荷和低的经济成本。

在材料科学领域里,控制金属的凝固过程是提高金属材料及铸件性能以及开发新型材料的重要途径。随着现代科学技术对材料性能要求的提高,用传统的方法制造材料已不能满足要求。因此,如何创造各种条件寻求环境友好的技术来控制材料的凝固组织,挖掘材料的性能潜力,以获得具有优异性能和特定功能的新型材料,是各国材料工作者关注的课题。因此,电流凝固技术目前日益成为人们研究的热点。

电流凝固技术是在金属凝固过程中或在金属凝固前给金属熔体施加选定的电流,如直流电流、交流电流或脉冲电流等,从而改变金属凝固组织和性能。该技术具有无污染、操作方便、效果显著等优点,受到了材料工作者的高度重视,并显示出十分广阔的应用前景。

金属材料在电流作用下的非平衡现象的研究可以追溯到 19 世纪。物理学家 Gerardin 在金属液两端通以直流电时首先发现液体金属中的离子在电流作用下发生定向迁移的现象,即电传输。根据人们现有的认识,电流对液态金属的作用主要有以下几个方面:电传输效应、Joule 效应、Peltier 效应、起伏

效应、趋肤效应、电磁力效应和孕育变质效应等。利用它们可以有效地控制液体金属凝固时的传热、传质和动量传输过程,进而会影响到金属的凝固组织及其形态、成分分布等。

国内外学者采用直流电流、交流电流以及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。虽然该领域的研究国外起步较早,但近年来国内学者的研究异军突起,特别是在脉冲电流凝固细晶技术以及对钢铁材料等高熔点合金的研究方面,已走在了世界的前列。图 1 所示为金属熔体的两种通电方式。

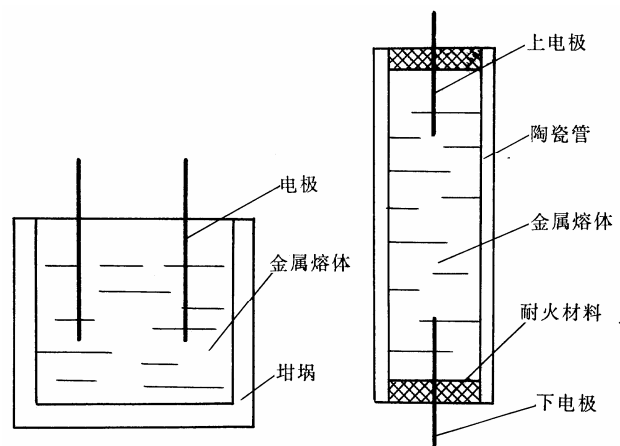


图 1 金属熔体的两种通电方式

1 直流和交流电流凝固技术的发展

20 世纪 60 年代,国外许多学者进行了电流凝固方面的研究工作。Crossley 等发现直流电流可引起 Al-Ni 合金宏观凝固组织粗化,并把它解释为直流电流所产生的焦耳热效应的结果。Pfan 等研究了电流作用下溶质的传输行为,发现由于不同金属离子的迁移方向和速度不同,导致了溶质有效分配

* 上海市重大基础研究项目(01JC14001)。20030230 收到初稿,20031020 收到修改稿

系数 k_e 的变化和共晶合金中两个组元相的相互分离或偏聚。Verhoeven 研究了电流作用下 Sn-Bi 合金的溶质再分配, 不仅证实了 Pfann 的研究结果, 同时还发现对于直径 5 mm 的试样, 交流电流和直流电流都使 k_e 改变, 电流强度越大, k_e 变化越大。由于交流电流作用下, 溶质的电传输速度为零, 说明除了电传输效应以外, 还有其他效应影响 k_e 。通过测量不同温度、不同浓度的液态 Sn-Bi 合金的电传输和电阻率, 发现溶质 Bi 在液体中电传输系数是温度和浓度的函数, 电阻亦随温度和浓度变化^[1,2]。

20 世纪 70 年代, B A III E H K O 在铸铁凝固过程中通电试验表明, 电流可使石墨尺寸平均减小 20%~40%, 片状石墨呈卷曲状, 改善了石墨形状, 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。Vojdani 利用电流产生的 Peltier 效应, 成功地控制了 Ge 单晶的直径, 其控制精度是别的方法所不能比拟的。利用 Peltier 效应的及时性和可控性引入晶体生长层, 可用来研究晶体的生长形态, 它可能成为一种新型的研究晶体形态学的重要方法。Asai 等报道了 Sn-Pb 合金在高密度的直流或交流电场中的宏观凝固组织得到细化, 认为电流通过凝固样品时会产生感应磁场, 并与电场交互作用产生电磁力, 从而使熔体在电磁力的作用下发生流动, 导致其宏观凝固组织细化^[3,4]。

20 世纪 80 年代, A.K.Misra 在 Pb-Sb-Sn 三元合金的凝固过程中使用了电流技术, 通过施加电流密度 30~40 mA/cm²、电压约 30 V 的直流电流, 得到了均匀细小的凝固组织。共晶片间距减小到原来的 1/4, 共晶团数量增加, 这说明电流对形核和生长两个阶段都有作用。同样, 把直流电流换成交流电流也可得到相同的结果(如图 2)。Misra 认为电流影响了界面的稳定性, 按照渗流理论的观点, 电流会沿着具有最大电导的通路流过, 因而在这些通路上产生更多的焦耳热使温度起伏加大^[5,6]。Wheeler 和 Coriell 等研究了在直流或交流电流作用下的定向凝固中金属界面的线性稳定性问题, 他们认为, 在 Sn-Bi 和 Ge-Ga 合金系中, 电迁移性和电导性上的差异是决定界面稳定性的关键因素, 而与焦耳热效应和 Seebeck 效应的关系不大^[7,8]。顾根大发现电流使 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, 尺寸细小。电流强烈改变 Al-Si 共晶生长形态, 使之以亚共晶方式生长, 使共晶硅片间距明显减小。他认为电流的焦耳热效应显著提高固液界面前沿的温度梯度, 可改善连续铸锭的组织 and 性能。同时提出了电流作用下的界面稳定性动

力学理论和修正的有效分配系数公式, 并认为电流提高界面稳定性的主要原因是电场增大固液界面能和液相对流以及电流在干扰界面处产生偏聚。



(a) 未经电流处理



(b) 经过电流处理

图 2 电流处理前后 Pb-Sb-Sn 合金凝固组织 ×100

20 世纪 90 年代, S.Ahmed 等研究了直流电流作用下 Ni 基高温合金定向凝固过程和行为, 发现直流电流密度为 50~400 mA/cm² 时, 凝固组织被显著细化, γ 相呈弥散而细小的球状颗粒状, 且均匀分布于 γ 相基体上, 凝固组织的偏析和孔隙率也减小, 认为可能与外加电流对等离子体的作用有关^[9,10]。李辉等将 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, 结果使其过冷度加大, 力学性能大幅度提高, 初生 α -Al 由树枝状变成颗粒状^[11]。常国威等研究了直流电流对 Al-Cu 合金定向凝固时的一次柱状晶间距的影响, 用回归的方法得到了电流密度与一次枝晶间距之间的定量近似表达式, 证实电流密度越大则一次枝晶间距越小。同时推导出了电流作用下凝固界面形态稳定性的判据, 认为电流通过提高固液界面能、增大固液两相电流产生的 Joule 热的差值、提高温度梯度的途径使界面稳定性增加^[12]。

2 脉冲电流凝固技术的发展

脉冲电流(也称电脉冲)可以通过功率较低的设备实施间歇式大能量输出, 其对金属凝固组织影响的研究工作是近年来新兴的研究方向, 已成为电流

凝固技术的新亮点。

20 世纪 90 年代初期, M.Nakada 和 M.C.Flemings^[13]等首先使用脉冲电流研究 Sn-15%Pb 合金的凝固过程, 发现在凝固的起始阶段施加脉冲电流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脉冲电流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。他们观察到施加脉冲电流时金属液面出现了波动, 认为是脉冲电流充放电造成的收缩力的缘故。在金属液内不同的位置这种收缩力大小是不一样的, 从而使得熔体不同位置的流动速度存在差异。根据牛顿粘性定理, 速度梯度的形成会导致剪切应力, 他们认为若剪切力足够大, 会撕裂凝固过程中出现的柱状树枝晶, 将其打碎为球状碎片, 成为等轴晶的核心, 起到细化凝固组织的作用。

J.M. Li 等^[14]对 Pb-60%Sn 合金的研究进一步肯定了脉冲电流改善凝固组织的作用, 他采用了两种形式的脉冲电流: ①电源电容 460 μF , 充电电压 2.6 kV, 脉冲间隔时间 60 s。②电源电容 0.004 4 μF , 充电电压 30 kV, 脉冲间隔时间 2.7 ms。试验发现, 前者可使初生相球化、共晶团沿电极方向伸长, 而后者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。J.M. Li 等认为, 脉冲电流的引入使得液相向固相转变时所需的驱动力减小, 从而降低了液-固相变需要的过冷度。

20 世纪 90 年代中期, J.P.Barnak 和 H.Conrad 等^[15]试验表明, 脉冲电流使 Sn-Pb 合金的共晶团大大减小。如果电流密度为 1 000~1 500 A/cm^2 , 脉冲频率为 1.5~5.0 Hz, 共晶团尺寸可减小到原来的 1/6(如图 3), 并通过试验证明随着电流密度增加, 结晶过冷度增加。但是, 他们不同意 M.Nakada 的观点, J.P.Barnak 等对 Pb-Sn 合金液凝固过程中产生的收缩力进行了计算, 得到的最大应力值也不过 1 kPa 左

右, 如此小的应力不足以将柱状晶打碎, 但完全能够造成 Pb-Sn 金属液的波动。认为脉冲电流对凝固组织的影响可归因于其对形核率的影响, 即脉冲电流可能会降低形核功。Barnak 等根据金属的非均质形核理论指出脉冲电流有可能显著地改变系统的 Gibbs 自由能 ΔG 和固-液界面能 γ_{LS} 。

鄢红春和周本濂等^[16]使 Sn-10%Pb 亚共晶合金在脉冲电流作用下凝固, 所用电流参数为电源电容 1 200 μF , 充电电压 1 500V, 脉宽为毫秒量级。结果表明, 粗大的富 Sn 树枝状初晶细化成近球状结构。他们指出脉冲电流作用于熔体时产生的瞬态磁压强 p 远大于熔体内部的动力压强 p_d , 熔体被反复压缩。熔体的这种运动可使其迅速失去过热, 由此导致过冷度增加。他们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形核理论和晶粒尺寸做了深入研究, 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。

秦荣山^[17]认为脉冲电流对形核率的影响表现为两个方面: 即增加体系温度和改变形核势垒, 他推导了电流作用下介质的形核率。为了避免由于电流的通过使得体系温度的升高, 人们尽量采用短脉冲的作用, 其下界的限制是在一个脉冲宽度内, 新相胚能够有足够的时间生长成一个稳定的核。否则电流作用生成的核将在电流去掉后变成不稳定的核而分解, 他给出了估计脉冲宽度下界的最粗略的方法, 认为脉冲电流对金属凝固的主要作用在形核阶段。随着形核数目的增加和新相体积的增大, 电流的作用越来越不明显。电流对形核势垒的作用与电流密度的平方成正比。当脉冲电流密度达到一定值 J_c 时, 熔体可以在不需要过冷的状态下直接结晶。

20 世纪 90 年代末期, 我国率先开展了脉冲电流对较高熔点的铝铜合金及高熔点钢铁材料凝固过程影响的研究工作。訾炳涛等^[18]应用脉冲电流作用于 2A12 铝合金, 所用电流参数为放电电压为 0~7 kV, 电源电容量为 0~400 μF , 约 30 s 放电一次。结果表明, 脉冲电流可显著细化其凝固组织, 脉冲电流的强度愈高, 细化效果愈显著。他认为在凝固过程中, 脉冲电流和由它所产生的脉冲磁场的相互作用, 不仅可使熔体受到收缩力的作用, 产生收缩效应, 而且它们之间存在的相位差可使熔体受到舒张力的作用, 产生舒张效应。并指出熔体正是在这两种力和变形效应的共同作用下, 使凝固组织得到显著细化。

王建中等^[19]首次将脉冲电流引入熔点以上尚未凝固时的 Al-5.0%Cu 合金熔体中, 铸锭凝固后, 柱状晶区缩小、等轴晶区扩大, 晶粒得到很大程度

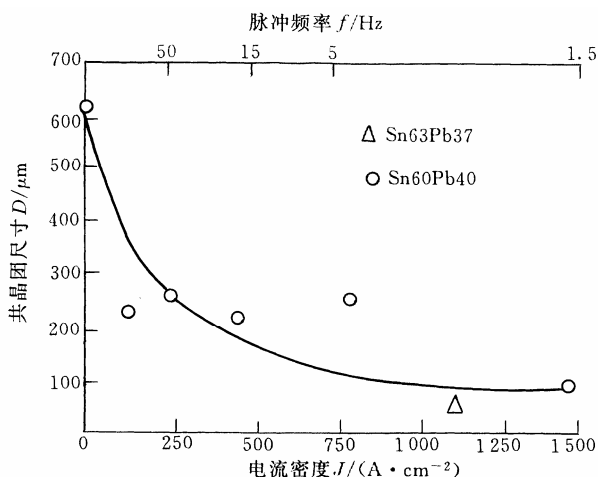


图 3 脉冲电流对 Sn-Pb 合金共晶团尺寸的影响

的细化。同时发现, 处理后的合金液, 具有良好的抗孕育衰退能力。他提出了电脉冲孕育的观点, 认为脉冲电流的加入起到了改变液态金属结构的作用。根据晶胚的团簇模型和胶体 DLVO 理论, 建立了晶胚—原子间交互作用关系式, 指出外电场是在液态金属中孕育大尺度晶胚的有效方法。在脉冲电流作用下, 晶胚外电层在不断的畸变和松弛过程中, 促使孕育形成大尺度稳定晶胚。

唐勇^[20]在王建中的基础上, 做了更进一步的工作。对 T8 钢液和 9Cr2MoV 钢液施以脉冲电流, 脉冲频率为 1 Hz, 发现脉冲电流的主要作用是减小柱状晶的尺寸(如图 4)和改善珠光体的形貌, 使珠光体片层间距减小, 钢锭宏观元素偏析程度有所改善, 数学推导表明, 脉冲电流作用后, 过共析钢中 C 元素的扩散系数提高为原来的两倍。唐勇首次从微观角度对脉冲电流处理后的液态金属结构进行了试验研究, 发现处理后过共晶 Al-14.6%Si 熔体凝固初生 Si 相的尺寸及数量大大减少, 组织形态更接近共晶组织, 且经过一次重熔后得到的凝固组织仍保留着脉冲电流处理后的组织特征, 说明对该种合金脉冲电流孕育处理具有一次遗传性。他使用液态金属 X 射线衍射仪检测结果表明, 无论是低过热度(675 °C)还是较高的过热度(875 °C), 处理后熔体的有序度都相对于同温度下未经过脉冲处理的液体有所增加。

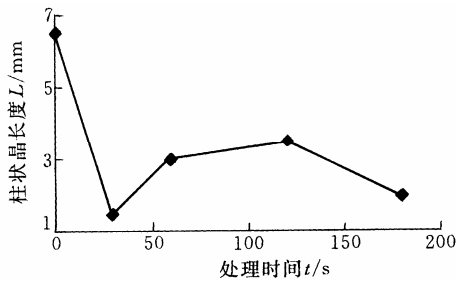


图 4 9Cr2MoV 钢柱状晶长度与脉冲处理时间的关系

最近两年, 何树先等^[21]对 Al-19%Si 过共晶铝合金脉冲电流处理试验表明, 脉冲电流能够有效地改变初晶硅的析出形貌, 由长条形转变为方块形, 当充电电压 2 kV, 充电电容 1 000 μ F, 放电次数为 5 次时, 初生 Si 尺寸明显细化, 平均减小到原来尺寸的 1/4, 并且电压越高、电容越大、放电次数越多, 越有利于初生 Si 的细化。他认为团簇理论很难适用于凝固过程中脉冲电流的处理, 从试验结果分析推断, 脉冲电流在合金凝固过程中产生的电磁力碎断枝晶作用是导致凝固组织细化的主要原因, 并在对脉冲电流作用时自感应产生的电磁力进行了定量计算的基础上, 提出充电电压越高, 充电电容越大, 距离轴线距离越远的位置, 产生的电磁力越大。

王静松等^[22]发现在未加任何孕育剂的情况下, 铸铁铁液经过脉冲电流处理后, 在凝固过程中发生了石墨化转变(如图 5), 在相同参数脉冲电流作用下, 处理时间长, 有利于石墨化转变的进行, 原铁液中的硅有利于缩短处理时间。他们分析认为, 脉冲电流的施加引起了铁液中不同原子及原子团的电子施主/受主特性的改变, 改变了铁液中碳的活度及原子团的尺度, 从而引起铸铁铁液凝固过程中石墨化转变。

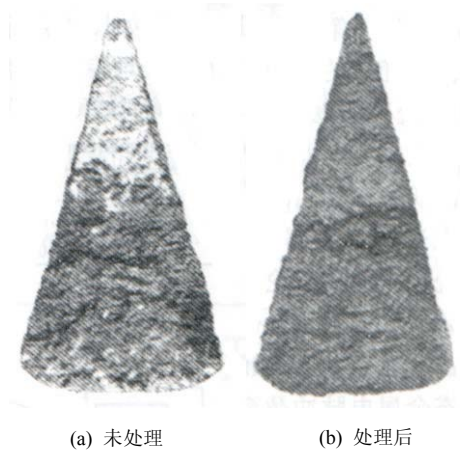


图 5 电脉冲处理前后铸铁三角试样断口

3 研究工作的不足

以电流来改善金属材料的凝固组织已取得了显著成绩。然而, 一方面这些工作还基本停留在实验室研究阶段上, 基本都是探索性的初步工作, 研究结果也主要是说明了电流对金属凝固产生影响的试验现象, 尚未得出有明确规律性的试验结果, 研究方法和手段分散, 所采用的合金种类、电流参数、处理方式等千差万别, 试验参数一般还不能定量控制, 试验结果的描述还有许多不一致, 离实际应用还有很大距离。另一方面金属材料在电流作用下的机理及规律, 目前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。电流凝固的理论研究和认识基本大都停留在定性的基础上, 缺乏针对某种合金在某种参数处理后的具体研究结果, 对试验现象的解释也存在很多猜测和推理, 远未形成较成熟的理论体系。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, 并成为材料领域的研究热点。

4 结论

总结已有的研究工作, 电流凝固技术的发展趋

势有以下几个方面特点。

(1) 在研究选用的合金上, 由便于开展试验研究的锡铅合金等低熔点合金, 逐渐转向工业和日常生活中广泛应用的铝铜合金及钢铁等高熔点合金材料。

(2) 所使用的电流形式, 由低电压、低密度直流电流或交流电流转向输出峰值高、设备负荷小的高电压、高密度脉冲电流。

(3) 在处理方式上, 前期工作大多是研究电流对金属凝固过程的影响, 而最近人们开始在液态金属凝固前施加电流, 研究电流对金属液态结构的作用及其组织遗传性问题。

(4) 理论研究方面, 目前主要是应用电磁学、结晶学、凝固理论和非平衡态热力学等知识从宏观上研究凝固过程中的传热、传质、动量传输和生长动力学, 研究电流在材料凝固中形核和生长两个阶段中的作用机理, 近来逐渐向微观领域深入发展, 人们开始采用原子论的方法来研究液态金属及合金的热力学性质、液态结构、电子态、原子和电子迁移性质、表面性质以及多相平衡等。

(5) 近年来国内学者的研究异军突起, 特别是在脉冲电流凝固细晶技术以及对铝铜合金及钢铁材料等高熔点合金的研究方面, 已走在了世界的前列, 我国已成为世界脉冲电流凝固细晶技术研究的中心。

随着对环保和材料品质要求的提高, 电流凝固技术将会受到更广泛的关注, 有望成为工业上高效的细化金属凝固组织和提高材料性能的高新技术, 并可望摸索出较为成熟的理论体系以指导进一步的研究和实践, 还会发现更多的新现象、新问题和更多的新用途, 以推动社会技术进步。

参 考 文 献

- Hans C. Influence of an electric or magnetic field on the liquid-solid transformation in materials and on the microstructure of the solid. *Materials Science and Engineering*, 2000, 287(8): 205~212
- 顾根大. 电场作用下金属定向凝固行为的研究: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1989
- 闵乃本. 晶体生长的物理基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1982
- Asai S. Birth and recent activities of electromagnetic processing of materials. *ISIJ International*, 1989, 29(12): 981~992
- Misra A K. A novel solidification technique of metals and alloys: under the influence of applied potential. *Metallurgical Transactions A*, 1985, 16A(7): 1 354~1 355
- Smith R W. Electric field freezing. *Journal of Materials Science Letters*, 1987, 6: 643~644
- Wheeler A A, Coriell S R, McFadden G B, et al. The effect of an electric field on the morphological stability of the crystal-melt interface of a binary alloy. *Journal of Crystal Growth*, 1988, 88: 1~15
- Coriell S R, McFadden G B, Wheeler A A, et al. The effect of an electric field on the morphological stability of the crystal-melt interface of a binary alloy, II: Joule heating and thermoelectric effects. *Journal of Crystal Growth*, 1989, 94: 334~346
- Ahmed S, Bond R, McKannan E C. Solidification processing superalloys in an electric field. *Advanced Materials and Processes*, 1991, 10: 30~38
- Ahmed S, McKannan E C. Control of γ' morphology in nickel base superalloys through alloy design and densification processing under electric field. *Materials Science and Technology*, 1994, 10(11): 941~946
- 李辉, 边秀房, 刘相法. 电流处理对铝合金组织及性能的影响. *特种铸造及有色合金*, 1996(3): 8~10
- 常国威, 袁军平, 王自东, 等. 电流密度对定向凝固组织中柱状晶间距的影响. *金属学报*, 2000, 36(1): 30~32
- Nakada M, Shiohara Y, Flemings M C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging. *ISIJ International*, 1990, 30(1): 27~33
- Li J, Li S L, Lin H T, et al. Modification of solidification structures by pulse electric discharging. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1994, 31(12): 1 691~1 694
- Barnak J P, Sprecher A F, Conrad H. Colony (grain) size reduction in eutectic Pb-Sn castings by electroplusing. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1995, 32(6): 879~884
- 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. *金属学报*, 1997, 33(4): 352~358
- 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. *材料研究学报*, 1997, 11(1): 69~72
- 訾炳涛, 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. *特种铸造及有色合金*, 2000(4): 4~6
- 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: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 1998
- 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: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2000
- 何树先, 王俊, 孙宝德, 等. 高密度脉冲电流对过共晶

- Al-Si 合金凝固组织的影响. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 275~278
- 22 王静松, 薛庆国, 王建中, 等. 脉冲电场处理对铁液凝固过程石墨化的影响. 铸造, 2001, 50(11): 677~679

DEVELOPMENT OF THEORY AND PRACTICE OF ELECTRIC CURRENT SOLIDIFICATION TECHNIQUE

Fan Jinhui Zhai Qijie

(College of Material Science & Engineering,
Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract: The domestic and overseas research survey of electric current solidification technique in recent half century is

reviewed. Some important achievements are introduced regarding the influence of DC, AC and pulse electric current on the solidification process and structure of metals. The shortage and tendency about electric current solidification technique presently is summarized. Technology and theory problems that should be researched and solved before the application of the current treatment technology in industry are indicated. The advantages and foreground of pulse current treatment are especially emphasized.

Key words: Electric current Solidification Structure

作者简介: 范金辉, 男, 1970 年出生, 博士研究生, 副教授。主要研究方向为金属凝固控制和铸件质量控制。

E-mail: fan-jinhui@sohu.com

中国科协第五届青年学术年会征文通知

中国科协第五届青年学术年会将于 2004 年 11 月 2~5 日在上海市召开。大会的主题为: “科技、工程与经济社会协调发展”, 会议口号为 “科技增强国力, 青年开创未来”。本届年会将附设 15 个专题分会场, 中国机械工程学会作为第 10 分会场的牵头学会负责 “机械工程技术” 分会场(含现代设计理论与方法、先进制造技术两个专题)的组织与论文征集工作。请各有关单位积极推荐在科研、教育、企业等部门和单位从事科技研究、开发与管理的青年学者, 尤其是国家杰出青年基金获得者, 各省、自治区、直辖市、各部委跨世纪人才入选者, 百千万人才工程入选者(45 岁以下)积极参与本届年会和论文交流。本届年会将正式出版论文摘要文集, 收录参加本届青年年会交流的学术文章摘要, 该文集不保留知识产权, 作者可继续向其刊物投稿。文集由中国科学技术出版社出版。

1. 论文摘要要求

每位作者只能提交一篇尚未在其他学术刊物上发表过的科技论文摘要, 正文字数不超过 800 字。请在 800 字内阐述论文的主要观点, 勿附任何图、表, 并尽量减少公式。必需的公式和外文, 请打印清楚。提交的摘要内容以 “机械工程技术” 为主题, 围绕 “现代设计理论与方法” 和 “先进制造技术” 两个专题, 探讨内容主要为以下几部分: 学科发展前沿问题; 世界科技发展趋势; 国家重大科技项目的研究成果以及在社会经济建设中的应用开发成果; 基础科学研究的重大成果; 对 21 世纪可持续发展的探讨与展望。

2. 格式要求

① 文章题目(居中); ② 作者姓名(位于题目下方, 居中); ③ 作者单位(位于姓名下方); ④ 关键词(位于正文前, 3~4 个); ⑤ 正文(5 号宋体, 可分段落, 但一律不用各级标题。文中所用计量单位, 一律按国际通用标准或国家标准, 并用英文书写, 如 km^2 , kg 等。面积请勿用 “亩” 表示, 而要换算为公顷, 用 hm^2 表示。文中年代、年月日、数字一律用阿拉伯数字表示); ⑥ 参考文献 (“参考文献” 四字居中), 文献正文单独排列(引用文献一般不超过 5 条)。书籍引用时内容应包括: 作者姓名. 书名. 出版社名, 出版年月, 页码(如有两个以上作者, 作者间用逗号分开); 期刊引用时内容应包括: 作者姓名. 文章名. 期刊名, 年份, 卷(期)、页码; ⑦ 作者简介(位于参考文献下方, “作者简介” 四字左起顶格排, 后空一格, 接排简介内容。作者简介内容 50 字左右, 包括姓名、出生年月、工作单位、职务职称、专业领域、地址、邮编、电话、传真、E-mail)

3. 重要事项

2004 年 7 月 30 日(以稿件寄出地邮戳为准)为截稿日期。论文摘要文稿请用 word 录入排版, 可以用电子邮件方式或软盘交送, 发出电子文件的同时请提供文摘清样稿 1 份及报名表, 送交下列地址。

稿件一律经专家评审筛选后录用, 编入文集。论文被录用者具有代表资格, 将会收到会议正式通知。

邮寄件请标明 “中国科协第五届青年学术年会征文第 10 分会场” 字样。

通信地址: 北京西城区三里河路 46 号 中国机械工程学会

邮政编码: 100823

联系人: 左晓卫

电话: 010-68595318

传真: 010-68595314

E-mail: cmes-ac@cmes.org