DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.09.009

电磁场在钢铁材料制备中的应用

蒋丹青,王　江,任忠鸣
(上海大学 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室,上海 200444)

摘　要:电磁场作为清洁、高效、无接触的调控手段,在钢铁冶金领域有着举足轻重的地位。本文综述了近年来电磁场在钢铁材料制备中的研究进展,重点介绍了电磁冶金新技术在钢铁连铸、凝固以及固态相变过程中的应用现状,主要包括中间包感应加热,板坯连铸电磁控流、脉冲磁致振荡、磁控电渣重熔以及磁场对马氏体相变和碳化物析出行为的调控等方面,同时阐述了磁场在不同冶金过程中的作用机理,并展望了未来的研究发展方向。

关键词:电磁场;钢铁;连铸;凝固;固态相变

中图分类号:TG244　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)09-0792-08

Application of Electromagnetic Field in Fabrication of Iron and Steel

JIANG Danqing, WANG Jiang, REN Zhongming
(State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: As a clean, efficient and non-contact control method, electromagnetic field plays an important role in the field of iron and steel metallurgy. In this paper, the research progress of electromagnetic field in steel material preparation in recent years is reviewed. The application status of new electromagnetic metallurgy technology in the process of continuous casting, solidification and solid phase transformation of iron and steel is mainly introduced, including the induction heating of tunds, electromagnetic current control of slab continuous casting, pulsed magnetic oscillation, magnetically controlled electroslag remelting and the regulation of magnetic field on martensitic transformation and carbide precipitation behavior. At the same time, the action mechanism of magnetic field in different metallurgical processes is described, and the future research and development direction is prospected.

Key words: electromagnetic field; iron and steel; continuous casting; solidification; solid-state transformation

“十四五”期间,国家将持续推进钢铁行业绿色化改造,同时,随着现代装备制造业的高速发展,下游用户对钢铁产品质量和性能的要求也愈加严苛,因此,如何在满足低能耗需求的条件下制备出高质量的钢铁产品,成为冶金工作者研究的热点问题之一。电磁场作为清洁、无接触以及高效的冶金过程控制手段,倍受钢铁制造行业的广泛青睐。其主要作用原理是通过电磁场的电、磁、热、力等效应[1-20],用以改变冶金过程中的热力学和动力学条件,从而达到改善钢铁材料质量的目的。如在凝固过程中,电磁搅拌或电磁制动可以增强或抑制熔体流动,稳恒磁场能够在金属熔体中产生热电磁力,以及在固态相变过程中,磁场可以改变子相与母相间的吉布斯自由能差等[21-25],使之成为细化钢中凝固组织、改善元素偏析,提高力学性能的有效手段[26-30]。本文着重介绍了电磁场在钢铁材料制备中的应用现状和研究进展,并对其在不同过程中的作用机理进行了阐述。

1　电磁冶金新技术在连铸过程中的应用

冶金工作者利用电磁场的力、热等效应,可实现对金属熔体进行加热、施加约束力、搅拌力和阻尼力等作用效果,进而开发出中间包感应加热、软接触电磁连铸、电磁搅拌技术和电磁制动等一系列在钢铁连铸生产领域有着广泛应用的先进技术。

1.1　中间包感应加热新技术

连铸中间包是钢液浇铸过程中承上启下的重要冶金反应器,中间包加热控温是提升铸坯乃至后续轧材质量一致性的新技术。为保证连续浇铸过程中间包内钢液温度稳定,实现生产顺行与恒温恒拉速

收稿日期:2022-07-10
基金项目:国家自然科学基金(52127807);国家重点研发计划(2021YFB3702502);上海市科委基础研究项目(20511107700、21511103600);上海青年科技启明星计划(20QA1403800);上海市教委曙光学者计划(20SG42)
作者简介:蒋丹青(1987—),博士.研究方向:连铸坯凝固组织及偏析控制研究.电话:15618272500,
Email: danqing_jiang@163.com
通讯作者:王　江(1985—),博士,教授.研究方向:电磁冶金、磁场调控金属增材制造等研究.
Email: jiangwang@i.shu.edu.cn

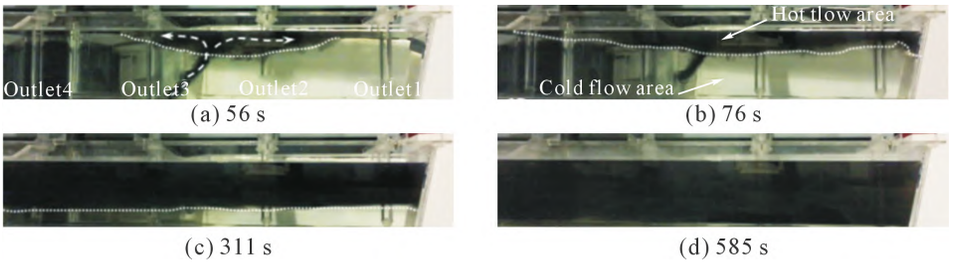
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

连铸，中间包加热控温技术日益受到重视。

20世纪80年代，Ueda等[31]基于低频通道式感应加热炉，开发出首个具备感应加热功能的连铸中间包，并发表了相关专利，开创了中间包感应加热的先河。之后，Yoshii等[32]开发了一种由内部环形耐火材料通道以及感应线圈组成的单通道式感应加热中间包，现场试验结果表明，在没有通道式感应加热的情况下，钢液会出现10~20 ℃的温降，采用通道式感应加热可使钢液温降控制在0~5 ℃以内。1987年，Futagawa等[33]在单通道感应加热线圈的基础上，设计研发了一种双通道感应加热中间包，并且采用风冷装置冷却线圈，使钢液温度更加均匀，加热效率和设备安全性也大幅提升。毛斌等[34]、李爱武等[35]以及张家泉等[36]分别发表专利，相继提出了蝶形、旁通式、十字型中间包通道感应加热装置，使其能够应用到各类结构的中间包中，推动了我国通道式感应加热技术在理论研究和工程应用方面的进步。近年来，已完全实现不同结构高效能感应加热中间包的自主开发，并在多家特钢企业不同容量的中间包中得到推广应用。如图1所示[17]，北京科技大学和中科电气[37-38]采用数值模拟和水力学模拟的研究方法，针对中间包的结构、包内钢液的流场、温度场、磁场以及夹杂物的运动规律进行研究，开发出H型、分流式等结构的中间包，并成功应用于工业生产，均有较好的冶金效果。此外，他们还提出常见奇数流和偶数流感应加热中间包流场设计优化准则，极大地推动了国内中间包感应加热技术的发展。

1.2　板坯连铸电磁控流新技术

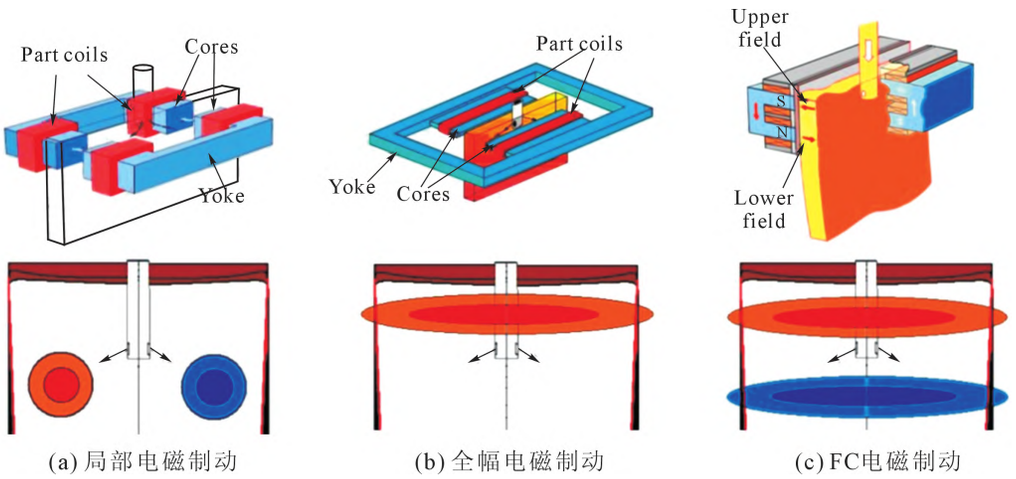
利用结晶器电磁搅拌、电磁制动等成熟技术，可实现对结晶器内流场多模式、智能化的电磁控流，根据不同钢种、坯形以及质量标准，选择合理的电气控制参数，极大减少了产品冶金调试的盲目性，对连铸生产有着积极意义。电磁搅拌作为最早开发并广泛使用的冶金技术之一，已有上百年的历史。早在20世纪初，就有人提出在金属凝固过程中应用电磁搅拌技术的构想，以达到改善凝固组织，提高性能的目的[39]。经过上百年的发展，电磁搅拌技术的应用已较为成熟，成为各个钢铁生产企业必备的冶金技术之一。电磁制动与电磁搅拌的作用本质相同，都是利用钢液在磁场下运动所产生的感应电流，进而在磁场中感生出电磁力来控制钢液流动，如图2所示[16]。由起初的局部电磁制动模式，发展到后来的全幅一段式、全幅两段式以及基于行波磁场的电磁控流技术[40-42]。21世纪初，NKK和Rotelec在上述技术的基础上又开发出多模式电磁控流技术，如图3所示[16]，其原理是利用行波磁场在一套装置上可以同时实现对结晶器内钢液的加速、制动以及搅拌功能[16,43-44]。近年来，相关研究工作者又提出全幅三段式以及电磁阀式电磁制动



(a) 56 s　(b) 76 s　(c) 311 s　(d) 585 s

图 1　中间包流场的水力学模拟[17]

Fig.1　Water modeling of flow field in tundish[17]



(a) 局部电磁制动　(b) 全幅电磁制动　(c) FC电磁制动

图 2　不同类型的电磁制动[16]

Fig.2　Different types of electromagnetic braking[16]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

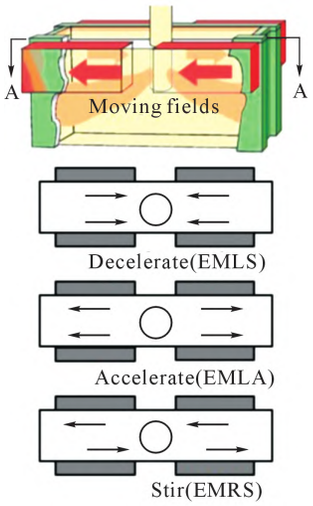


图 3 多模式电磁控流技术[16]
Fig.3 Multi-mode FC-Mold[16]

技术[45]。

肖红[46]针对板坯连铸结晶器流场控制难题，为了实现浇铸过程中不同工况下结晶器内流场的合理性、有效控制板坯皮下洁净度，创新性地提出对高拉速工况下的注流实施电磁减速、中低拉速下的注流实施电磁搅拌的多模式电磁控流技术。近期，任忠鸣等[1]基于“电磁场→结晶器流场→铸坯质量”这一因果关系，如图4所示。深入研究结晶器流场对渣钢界面稳定性、坯壳均匀性以及夹杂物去除效率的影响，提出了多模式定制磁场的新概念，针对不同的钢种和工况条件，定制了独有的电磁场控制参数，此理论必将成为电磁场控制结晶器内金属流动技术发展的新方向。

总之，电磁力作用下的连铸过程是一个涉及能量传输转换、动量和质量传输、组织演变等多物理场耦合的复杂过程，如若控制不当，对铸坯不仅不能起到良好的改善效果，反而会恶化铸坯的质量。此外，连铸本身是一个动态变化的过程，因此，要使电磁搅拌、电磁制动以及多模式电磁控流等技术发挥出最大的冶金效能，需根据具体情况进行动态分析，并借助基于大数据的冶金专家数据库和人工智能等技术，以实现对电磁力影响区内的钢液动态化、智能化的优化控制。

2 电磁场控制凝固过程新技术

2.1 强磁场细化轴承钢凝固组织研究

在金属凝固过程中，由于固/液界面存在温度梯度和热物理性参数急剧变化，根据Seebeck效应，固/液界面处会产生热电流，与磁场相互作用产生热电磁力，在此力的作用下将产生新的对流，从而影响金属凝固过程[47-52]。在热电磁力和热电磁对流作用下，凝固组织发生细化的机理主要有以下3个方面：①稳恒磁场引发的热电磁对流，使得枝晶根部发生溶质富集，会加速枝晶根部重熔而脱落，从而形成枝晶碎片；②稳恒磁场也会引发作用于已凝固固相上的体积力，该体积力使得固液两相区的枝晶折断的机率大幅提高，从而形成枝晶碎片；③热电磁对流会对枝晶碎片迁移产生影响，在凝固过程中，枝晶碎片或游离枝晶会被输运到柱状枝晶生长前沿，阻碍柱状晶的生长而发生CET(Columar-to-Equiaxed Transition)转变，进而细化凝固组织。根据该作用机理，侯渊[53]提出利用稳恒磁场在凝固中产生的热电磁力及热电磁对流调控轴承钢定向凝固组织，进而移植到轴承钢实际连铸生产过程中。如图5所示，发现在相同的温度梯度及抽拉速率条件下，随着磁场强度的增加，柱状晶组织发生紊乱，出现不规则枝晶；当磁场强度提高到4 T时，整个铸坯纵截面上已无完整的柱状晶组织，说明施加稳恒磁场促进轴承钢凝固过程

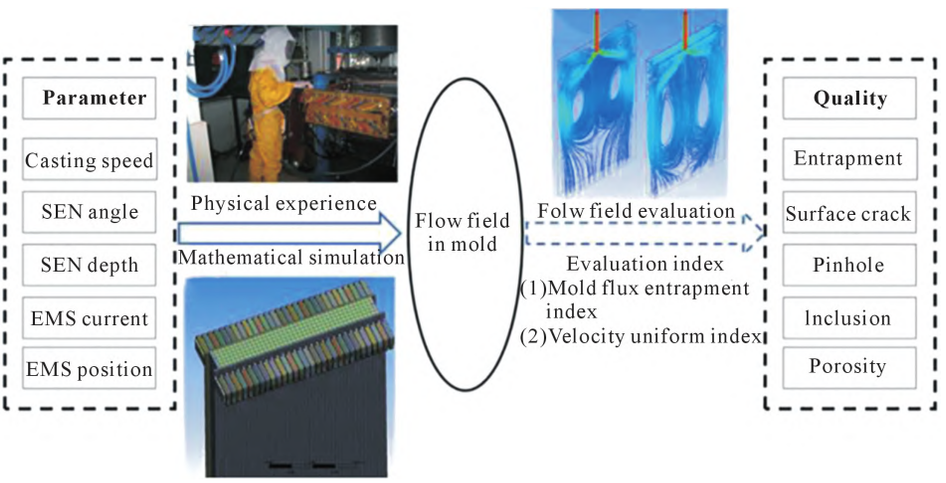
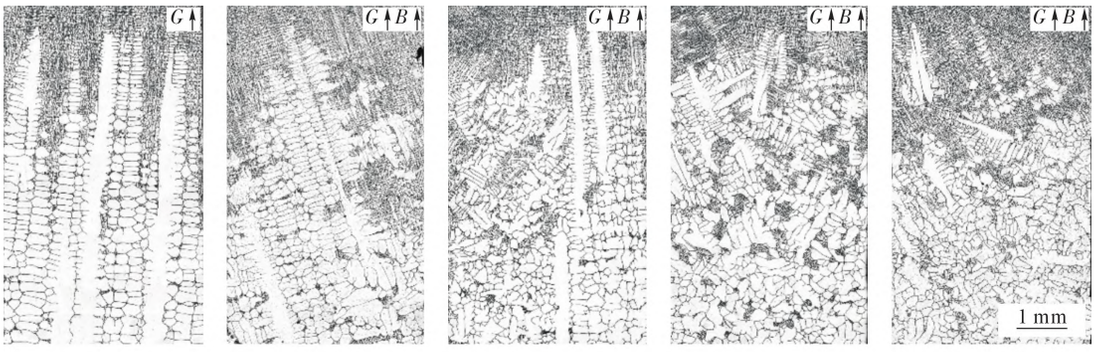


图 4 电磁场控制连铸中结晶器内流动研究路线[1]
Fig.4 Research process of electromagnetic controlling of flow in continuous casting mold[1]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) B=0 T　(b) B=0.5 T　(c) B=1 T　(d) B=2 T　(e) B=4 T

图 5 不同磁场强度下定向凝固 GCr18Mo 钢固/液界面处纵截面的枝晶形貌[53]

Fig.5 Dendrite morphology of longitudinal sections at solid/liquid interface of directionally solidified GCR18Mo steel under different magnetic fields[53]

中柱状晶向等轴晶的转变，同时经成分分析还发现，稳恒磁场的施加有利于改善轴承钢的元素偏析。

2.2 连铸坯电磁搅拌+凝固末端压下复合控制技术

对于含碳量较高的钢种而言，因其固液相线温度区间较大，凝固过程中的糊状区相对较宽，单一的某一阶段例如在结晶器、二冷区或末端施加电磁搅拌，在钢连铸过程中，并不能使连铸坯质量完全满足要求，基于此，国内的一些学者也提出复合电磁搅拌技术以及电磁搅拌+轻压下协同控制技术[54]，可有效改善高碳钢连铸坯中心疏松、偏析等缺陷。然而，由于工业生产的连续性和流程化，现场试验会导致大量的人力、物力消耗，而铸坯的凝固组织和偏析状况与连铸的多个参数相关，为深入掌握连铸参数对铸坯凝固组织和偏析的影响规律，Jiang等[55]基于相似原理设计建设了专用于连铸过程的热模拟装备，如图6所示[1]。将实际连铸过程中的电磁搅拌、二次冷却以及末端压下等关键控制手段集成于一套装置中，以此研究了上述条件对轴承钢连铸坯凝固组织和宏观偏析的影响规律，为轴承钢工业生产提供有价值的参考。

2.3 脉冲磁致振荡技术

电磁搅拌技术在改善连铸坯中心偏析、扩大等轴晶率方面具有良好效果。然而，由于电磁力作用在糊状区以及整个液相区域，钢液流动范围较大，强度较为剧烈，因此，在实际应用过程中，难免会出现钢液异常波动、卷渣卷气等问题。鉴于此，翟启杰等[56-60]基于对金属凝固过程中脉冲电流化机制的研究，提出脉冲磁致振荡(PMO)技术，如图7所示，其原理是将脉冲电流导入环绕在铸坯表面的线圈中，通过在铸坯固液界面附近形成特定的脉冲电磁效应，促进固液界面前沿金属液形核并形成“结晶雨”，从而细化凝固组织，达到改善宏观偏析的目的。其装备主要包括PMO感应线圈、PMO电源系统和PMO总控系统，该技术自2005年首次提出以来，经过十几年的发展，已在苏钢、中天钢铁等企业的GCr15轴承钢、20CrMnTi齿轮钢和锚链钢的连铸生产线上得到应用，结果表明，PMO技术不仅可以显著增加铸坯等轴晶比例，改善铸坯偏析，而且可以提高铸坯拉速，并放宽对中间包过热度控制的要求。

2.4 磁控电渣重熔技术

电渣重熔在高品质特殊钢的生产中占据重要地

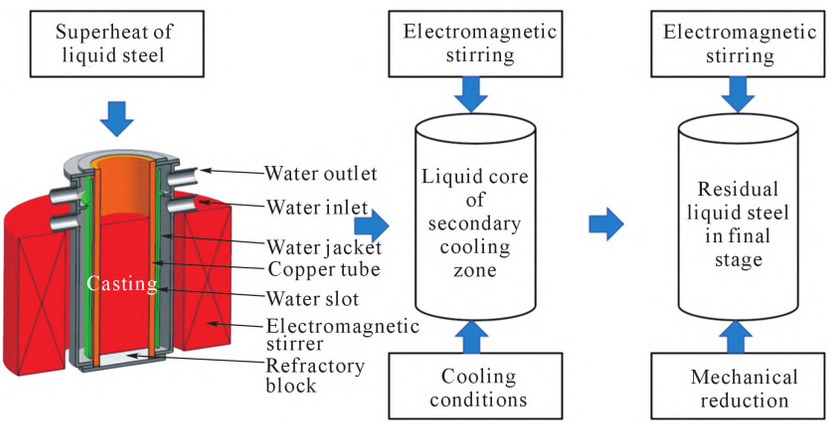


图 6 连铸过程热模拟实验平台功能示意图[1]

Fig.6 Schematics of the functions of the experimental equipments for continuous casting of steel[1]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

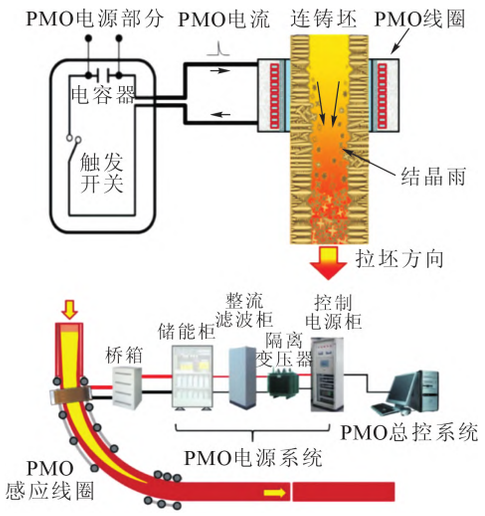


图 7 脉冲磁致振荡凝固均质化(PMO)技术原理示意图及技术装备示意图[56]

Fig.7 Schematic diagram of principle of PMO technology and schematic diagram of PMO technical equipment[56]

位，主要作用是去除非金属夹杂物以及改善原始铸锭偏析，而其冶金效果与熔滴尺寸直接相关，熔滴尺寸越小，和熔渣的有效接触面积越大，凝固速率越快，越有利于夹杂物的去除和凝固组织的细化。一般而言，熔滴尺寸由重力、表面张力等力之间的平衡所决定，难以改变。如图8所示，当施加一个外加的电磁力时，这一平衡将被打破，熔滴发生破碎，因而使得熔滴尺寸大幅减小[6]。基于上述熔滴破碎机理，Zhong等[61]在前人研究的基础上，提出了在电渣连铸过程中施加横向静磁场的磁控电渣连铸技术，如图9所示。研究结果表明，采用该技术后，电渣锭的枝晶间距大幅降低，凝固组织明显细化，轴向偏析降低，成分分布趋于均匀，S、P杂质元素的去除效率大幅提高，非金属夹杂物含量显著降低，且硬度有所增加。

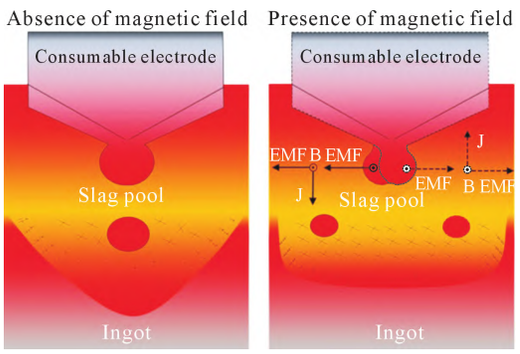


图 8 稳恒磁场破碎液滴机理[61]

Fig.8 Refinement mechanism of electromagnetic force for metal droplet[61]

综上所述，不同类型的电磁场在多个领域、多个尺度对凝固过程的传热、传质以及动量传输产生积极的影响，但仍有诸多问题亟待解决：第一，磁场

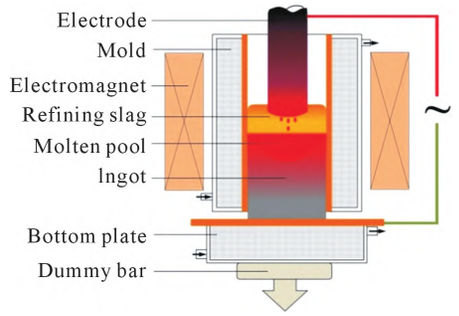


图 9 磁控电渣连铸装置示意图[61]

Fig.9 Diagram of magnetically-controlled electroslag continuous casting apparatus[61]

在不同条件下对凝固组织演化以及溶质元素分布影响的深层机制仍缺乏系统研究；第二，在实际应用过程中，高温钢液的流场和温度场也难以准确测量，仅借助数值模拟不能对电磁场下的凝固过程加以定量说明，仍需深入研究。同时，最优的磁场参数对钢种、坯形等工艺条件具有较强的依赖性，仍需建立相应的控制模型及专家系统。

3 电磁场在钢铁材料固态相变过程中的应用

对材料组织性能的优化和控制离不开固态相变这一重要的物理过程，而磁场的存在则会改变材料在固态相变中的热力学和动力学条件，使其微观组织及性能发生改变。已有大量研究表明，磁场可以显著影响马氏体相变、贝氏体相变以及碳化物的析出过程[23,62-63]。

3.1 磁场对马氏体相变的影响

马氏体相变过程中，是由顺磁性的母相奥氏体通过切变形成铁磁性的子相马氏体，如图10所示[63]。当施加磁场时，马氏体的吉布斯自由能从G_{ferr}降低到G^{H}_{ferr}，奥氏体的吉布斯自由能由G_{para}降为G^{H}_{para}，ΔG_{ferr}远高于ΔG_{para}，因而两相平衡温度就由T_0升高到T_0'，使得马氏体开始转变温度Ms点也随之升高，更

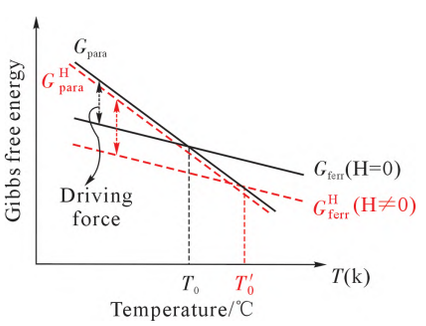


图 10 有无磁场条件下，顺磁相和铁磁相自由能随着温度的变化关系[63]

Fig.10 The relation of Gibbs free energy of paramagnetic phase and ferromagnetic phase with temperature with and without magnetic field[63]

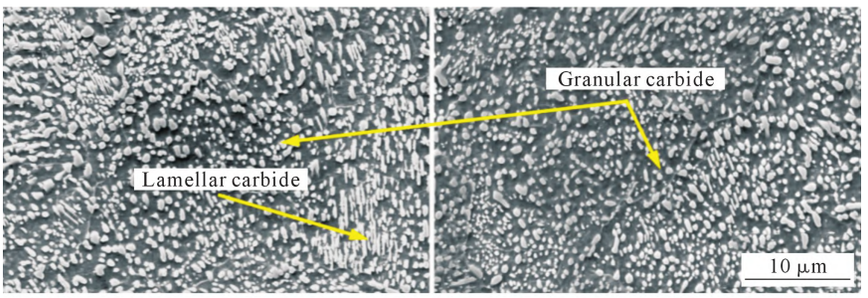
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有利于基体由奥氏体向马氏体转变。

早在1987年，Omori等[64]和Kudryavtsev等[65]在FeMnGa合金固态相变时，使用强磁场进行处理，发现该成分的合金马氏体开始转变温度升高了约20 K。之后，Kakeshita等[66]提出了磁场强度与马氏体开始转变温度Ms点的经验公式，并采用实验的方法进行了验证，计算结果与实验结果吻合度较好。除了改变热力学条件，在动力学方面，磁场的施加还大幅提升马氏体相变的反应速率，Martin等[67]研究发现，在马氏体等温时效过程中，施加强磁场可以使马氏体的转变速率提高若干个量级。王亚男等[68]和Kurita等[69]研究发现，在马氏体相变过程中，施加磁场有助于马氏体转变量的增加，并且增加量与磁场强度成正比。Choi等[70]研究发现，磁场的施加降低了马氏体的形核能垒，使得马氏体尺寸减小。

3.2　磁场对碳化物析出行为的影响

如前所述，磁场对固态相变过程的影响主要由于母相和子相的磁吉布斯自由能差异导致。同理，由于碳化物的磁性差异，磁场的施加也会对各种碳化物的析出行为产生重要影响。传统观点认为，渗碳体只有在210 ℃居里温度以下时才是铁磁性的，磁场对其才有影响。而最新研究表明，即使在210 ℃以上，渗碳体仍表现出磁性状态，磁场对其形核长大以及粗化过程均有影响。Wu等[71]发现，Fe-C-Cr合金钢在强磁场下进行热处理时，施加磁场后析出的$(Fe,Cr)_3C$合金碳化物的数量是未施加磁场时的3倍。Zhang等[72]研究发现，强磁场的施加促进了基体上碳化物的细化，使得力学性能大幅提高。Li等[73]在前述研究者利用强静磁场的基础上，探索性地利用工频交变磁场，在CGr15轴承钢球化退火过程中调控碳化物析出行为，如图11所示。结果表明，在相同的保温时间下，未施加磁场时，碳化物的形态主要为带状和层片状，施加磁场后，碳化物的形态主要为短棒状和颗粒状。



(a) 无磁场　　(b) 0.1 T交变磁场

图 11　GCr15 轴承钢球化退火组织[73]

Fig.11　Spheroidizing annealing microstructure of GCr15 bearing steel[73]

4　结语

在现代高科技推动下，钢铁工业正发生着巨大变革，与此同时，电磁冶金技术的广泛应用也为钢铁工业的创新与发展增添了动力，已成为制备高性能、高质量钢铁材料不可或缺的技术手段。然而，电磁场的引入使得钢铁材料的冶金过程变得更加复杂，一些影响机制仍不清楚，还需在理论描述和基本现象方面深入研究；另一方面，由于设备以及现场工况条件等限制，一些新的电磁场下钢铁材料的制备与调控方法，尚处于实验室研究阶段，与实际应用存在着较大差距，还需突破诸多技术瓶颈。同时，现有的应用较为成熟的电磁冶金技术，例如中间包感应加热、电磁控流等也需根据不同的钢种、坯形以及工艺条件，借助大数据等技术建立相应的控制模型、数据库以及专家系统，以实现冶金过程的智能化控制。

参考文献：

[1]　任忠鸣，雷作胜，李传军，等. 电磁冶金技术研究新进展[J]. 金属学报，2020, 56(4): 583-600.

[2]　ZHAO Z, CHAI Y Q, ZHENG S H, et al. Electromagnetic field assisted metallic materials processing: A review[J]. Steel Research International, 2017, 88(5): 1600273.

[3]　侯渊，任忠鸣，王江，等. 纵向静磁场对定向凝固GCr15轴承钢柱状晶向等轴晶转变的影响[J]. 金属学报，2018, 54(4): 801-808.

[4]　刘昱东，魏晨，闫育洁，等. 强磁场对CrCoNi中熵合金过冷凝固组织与性能的影响[J]. 铸造技术，2022, 43(5): 346-350.

[5]　魏晨，李金山，闫育洁，等. 强磁场对过冷Cu-Co合金组织演化行为的影响[J]. 铸造技术，2022, 43(3): 180-186.

[6]　赵东，吴纯，乔鹏飞，等. 强磁场辅助合成FePtCu纳米粒子及其有序结构调控[J]. 稀有金属材料与工程，2021, 50(12): 4534-4538.

[7]　ZHANG Y, ZHANG W, ZENG L, et al. Segregation behavior and precipitated phases of super-austenitic stainless steel influenced by electromagnetic stirring[J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103575.

[8]　BRIAN G T. Review on modeling and simulation of continuous casting[J]. Steel Research International, 2018, 89(1): 1700312.

[9]　DOMGIN J F, ANDERHUBER M, DE DONCKER M, et al. Optimization of an electromagnetic technology in arcelormittal gent for improving products quality in steel industry[J]. Journal for Manufacturing Science and Production, 2015, 15: 105-117.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[10] 王强,王芳,贺铸,等. 电渣重熔精炼过程数值模拟研究进展[J]. 钢铁研究学报,2021, 33(8): 681-694.

[11] ASAI S. Recent development and prospect of electromagnetic processing of material[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2000, 1(4): 191-200.

[12] 李喜,任忠鸣. 静磁场下热电磁效应及其对凝固组织的影响[J]. 中国材料进展,2014, 33(6): 349-360.

[13] HOU Y, SHUAI S S, DONG Y H, et al. Effect of thermoelectric magnetic convection on shrinkage porosity at the final stage of solidification of GCr18Mo steel under axial static magnetic field[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(B): 881-889.

[14] HOU Y, REN Z M, ZHANG Z Q, et al. Columnar to equiaxed transition during directionally solidifying GCr18Mo steel affected by thermoelectric magnetic force under an axial static magnetic field [J]. ISIJ International, 2019, 59(1): 60-68.

[15] 王江. 二元合金定向凝固中内生热电流与外加磁场交互作用的研究[D]. 上海:上海大学,2015.

[16] CHO S M, THOMAS B G. Electromagnetic forces in continuous casting of steel slabs[J]. Metals, 2019, 9: 471.

[17] TANG H Y, GUO L Z, WU G H, et al. Hydrodynamic modeling and mathematical simulation on flow field and inclusion removal in a seven-strand continuous casting tundish with channel type induction heating[J]. Metals, 2018, 8: 374.

[18] JIE J C, YUE S P, LIU J, et al. Revealing the mechanisms for the nucleation and formation of equiaxed grains in commercial purity aluminum by fluid-solid coupling induced by a pulsed magnetic field[J]. Acta Materialia, 2021, 208: 116747.

[19] YANG B, LEI H, BI Q, et al. Electromagnetic conditions in a tundish with channel type induction heating[J]. Steel Research International, 2018, 89(10): 1800145.

[20] VAKHRUSHEV A, KHARICHA A, KARIMI-SIBAKI E, et al. Generation of reverse meniscus flow by applying an electromagnetic brake[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52: 3193-3207.

[21] CHO S M, THOMAS B G. Electromagnetic effects on solidification defect formation in continuous steel casting[J]. JOM, 2020, 72: 3610-3627.

[22] ZHANG L, HOU Y H, GUO X, et al. Effect of electromagnetic stirring on the microstructure and properties of Fe-Cr-Co Steel[J]. Materials, 2018, 11(8): 1437.

[23] 冯路路. 合金元素及强磁场对高碳钢珠光体相变及微观结构的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2021.

[24] WILLERS B, BARNA M, REITER J, et al. Experimental investigations of rotary electromagnetic mould stirring in continuous casting using a cold liquid metal model[J]. ISIJ International, 2017, 57(3): 468-477.

[25] SUN H B, LI L J, YE D X, et al. On the alternate stirring mode of F-EMS for bloom continuous castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49: 1909-1918.

[26] LI X, WANG X H, BAO Y P, et al. Effect of electromagnetic stirring on the solidification behavior of high-magnetic-induction grain-oriented silicon steel continuous casting slab[J]. JOM, 2020, 72: 3628-3633.

[27] ZHANG Q, LI T J. Optimization of traveling magnetic field for horizontal continuous casting of thin slab containing tin phosphor bronze[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32: 3532-3539.[28] XU Y, WANG E G, ZHUANG L, et al. Effects of vertical electromagnetic stirring on grain refinement and macrosegregation control of bearing steel billet in continuous casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2017, 24(5): 483-489.

[29] SUN H, LI L, CHENG X, et al. Reduction in macrosegregation on 380 mm×490 mm bloom caster equipped combination M+F-EMS by optimising casting speed[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2015, 42(6): 439-449.

[30] WANG C X, WANG S Q, ZHANG L F, et al. Analysis on the deflection angle of columnar dendrites of continuous casting steel billets under the influence of mold electromagnetic stirring[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47: 5496-5509.

[31] UEDA T, OHARA A, SAKURAI M, et al. A tundish provided with a heating device for molten steel[P]. European Patent, EP0119853A2, 1984-09-26.

[32] YOSHII Y, HABU Y, YAMANAKA H, et al. Method of heating a molten steel in a tundish for a continuous casting apparatus[P]. United States Patent, US4582531, 1984-08-02.

[33] FUTAGAWA T, KASHIWA Y, SATO Y, et al. Development of molten steel heating device in tundish[J]. Tetsu to Hagane-Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987, 73: S928.

[34] 毛斌,陶金明,蒋桃仙,等. 蝶形通道有芯感应加热装置[P]. 中国专利,101234423, 2008-02-28.

[35] 李爱武,毛斌,蒋海波,等. 一种中间罐旁通式双通道电磁精炼与加热装置[P]. 中国专利,201618847U, 2010-11-03.

[36] 张家泉,孙海波,闫博,等. 一种紧凑式十字形中间包通道式感应加热装置[P]. 中国专利,102009143A, 2011-04-13.

[37] 马钰,唐海燕,张硕,等. 通道式感应加热五流中间包流场的水力学模拟[J]. 钢铁,2020, 55(11): 57-64.

[38] 张硕,唐海燕,刘锦文,等. 六流H型通道感应加热中间包的结构优化[J]. 钢铁研究学报,2019, 31(9): 784-794.

[39] BIRAT J P, CHONE J. Electromagnetic stirring on billet, bloom, and slab continuous casters: State of the art in 1982[J]. Ironmaking & Steelmaking, 1983, 10(6): 269-281.

[40] TAKEUCHI E, ZEZE M, TOH T, et al. Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy[M]. Warrendale: TMS, 1992.

[41] ZEZE M, HARADA H, TAKEUCHI E, et al. Application of a DC magnetic field for the control of flow in the continuous casting strand[J]. Iron & Steelmaker, 1993, 20(11): 53-57.

[42] LEHMAN A, TALLBÄCK G, RULLGÅRD Å. Electromagnetic braking improves steel quality in continuous casting[J]. ABB Review, 1996, 1: 4-10.

[43] KUNSTREICH S, DAUBY P H. Effect of liquid steel flow pattern on slab quality and the need for dynamic electromagnetic control in the mould[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2005, 32(1): 80-86.

[44] KUNSTREICH S. Electromagnetic stirring for continuous casting-Part 2[J]. Metallurgical Research & Technology, 2003, 100: 1043-1061.

[45] 于湛. 电磁场控制连铸结晶器内流动研究[D]. 上海:上海大学,2011.

[46] 肖红. 连铸电磁冶金控制新技术及其应用研究[D]. 北京:北京科

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

技大学,2021.

[47] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M. Influence of a high magnetic field on columnar dendrite growth during directional solidification [J]. Acta Materialia, 2007, 55(16): 5333-5347.

[48] LI X, GAGNOUD A, FAUTRELLE Y, et al. Dendrite fragmentation and columnar-to-equiaxed transition during directional solidification at lower growth speed under a strong magnetic field [J]. Acta Materialia, 2012, 60(8): 3321-3332.

[49] DU D F, FAUTRELLE Y, REN Z M, et al. Effect of a high magnetic field on the growth of ternary Al-Cu-Ag alloys during directional solidification[J]. Acta Materialia, 2016, 121: 240-256.

[50] LIU H, XUAN W D, XIE X L, et al. Columnar-to-equiaxed transition and equiaxed grain alignment in directionally solidified Ni_3Al alloy under an axial magnetic field[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48: 4193-4203.

[51] LI X, FAUTRELLE Y, ZAIDAT K, et al. Columnar-to-equiaxed transitions in Al-based alloys during directional solidification under a high magnetic field[J]. Journal of Crystal Growth, 2010, 312 (2): 267-272.

[52] LI X, REN Z M, SHEN Y, et al. Effect of thermoelectric magnetic force on the array of dendrites during directional solidification of Al-Cu alloys in a high magnetic field[J]. Philosophical Magazine Letters, 2012, 92(12): 675-682.

[53] 侯渊. 热电磁效应对钢凝固中柱状晶向等轴晶转变和凝固缩孔的影响[D]. 上海:上海大学,2021.

[54] 安航航. 高碳钢大方坯凝固机理与宏观偏析关键控制技术研究[D]. 北京:北京科技大学,2017.

[55] JIANG D Q, WANG R, ZHU L Q, et al. Thermal and numerical simulation of mould electromagnetic stirring of GCr15 bearing steel[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(18): 2173-2180.

[56] 李莉娟,王郢,翟启杰. 脉冲磁致振荡(PMO)凝固均质化技术在特殊钢中的应用[J]. 钢铁研究学报,2021, 33(10): 1018-1030.

[57] 张云虎,仲红刚,翟启杰. 脉冲电磁场凝固组织细化和均质化技术研究与应用进展[J]. 钢铁研究学报,2017, 29(4): 249-260.

[58] 张伶玲,石昊,徐衡,等. PMO对连铸GCr15轴承钢枝晶生长的影响[J]. 上海金属,2019, 41(5): 73-80.

[59] SUN J, SHENG C, Wang D P, et al. Fine equiaxed dendritic structure of a medium carbon steel cast using pulsed magneto-oscillation melt treatment[J]. Advances in Manufacturing, 2018, 6: 189-194.

[60] SUN J, SHENG C, Wang D P, et al. Influence of pulsed magneto-oscillation on microstructure and mechanical property of rectangular 65Mn steel ingot[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25: 862-866.

[61] ZHONG Y B, LI Q, FANG Y P, et al. Effect of transverse static magnetic field on microstructure and properties of GCr15 bearing steel in electroslag continuous casting process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 660: 118-126.

[62] 吴光辉. 强磁场下铁基材料回火过程中微观组织与合金碳化物演变的热力学机制[D]. 武汉:武汉科技大学,2021.

[63] 侯廷平. 强磁场条件下耐热钢中合金碳化物的析出行为[D]. 武汉:武汉科技大学,2012.

[64] OMORI T, WATANABE K, UMETSU R Y, et al. Martensitic transformation and magnetic field-induced strain in Fe-Mn-Ga shape memory alloy[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95: 082508.

[65] KUDRYAVTSEV Y V, UVAROV N V, PEREKOS A E, et al. Effect of the temperature and magnetic field induced martensitic transformation in bulk $Fe_{45}Mn_{26}Ga_{29}$ alloy on its electronic structure and physical properties[J]. Intermetallics, 2019, 109: 85-90.

[66] KAKESHITA T, SABURI T, KINDO K, et al. Effect of magnetic field and hydrostatic pressure on martensitic transformation and its kinetics [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36: 7083-7094.

[67] MARTIN D S, VAN DIJK N H, BRÜCK E, et al. The isothermal martensite formation in a maraging steel: A magnetic study [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 481-482: 757-761.

[68] 王亚男,廖代强,武战军. 稳恒磁场对马氏体转变的影响[J]. 金属热处理,2007, 32(4): 68-71.

[69] KURITA Y, EMURA S, FUJITA K, et al. Effects of magnetic fields on martenstic transformation and serration of austenitic Fe-Ni and Fe-Cr-Ni steel at 4K[J]. Fusion Engineering and Design, 1993, 20: 445-450.

[70] CHOI J Y, FUKUDA T, KAKESHITA T. Effect of magnetic field on isothermal martensitic transformation in a sensitized SUS304 austenitic stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577: S605-S608.

[71] WU G H, HOU T P, WU K M, et al. Influence of high magnetic field on carbides and the dislocation density during tempering of high Chromium-containing steel [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 479: 43-49.

[72] ZHANG Y D, HE C S, ZHAO X, et al. Low temperature tempering of a medium carbon steel in high magnetic field[J]. ISIJ International, 2005, 45(6): 913-917.

[73] LI Y C, LI C J, CHEN S Y, et al. Effect of spheroidizing annealing in combination with alternating magnetic field on microstructure and mechanical properties of GCr15 bearing steel [J]. ISIJ International, 2022, 62(6): 1275-1282.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net