

高强铝合金外场辅助半连续铸造研究现状与展望

左玉波^{1,2} 张淑颖^{1,2} 王睿^{1,2} 朱庆丰^{1,2} 崔建忠^{1,2}

(1. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819; 2. 东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要 航空、航天等领域的快速发展离不开大尺寸、更高质、高强度铝材, 而高质量、高合金化铸锭是制备高质量铝材的基础。直接水冷(Direct-Chill, DC)半连续铸造是制备高合金化铝锭的主要方法。经多年发展, 采用DC铸造生产的铸锭质量和成品率方面有很大提高, 但在解决大尺寸高强铝合金铸锭成形性以及调控组织、成分均匀性方面能力有限。外场辅助DC铸造技术可以更好地调控铸造过程流场、温度场, 能为制备细晶、均质、大尺寸、高合金化铝锭提供解决方案。在介绍DC铸造技术基本原理的基础上, 综述了电磁场、超声场、熔体强剪切处理及组合外场辅助DC铸造技术的实现形式、基本原理、作用效果、技术特点和研究进展。分析了DC技术发展过程中遇到的问题并提出解决方案, 展望了技术发展趋势和应用前景。

关键词 高强铝合金; 半连续铸造; 电磁场; 超声场; 组合场

中图分类号 TG249.7; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240172

Research Status and Prospects of External Field-assisted DC Casting of High-strength Aluminum Alloys

ZUO Yubo^{1,2}, ZHANG Qiuying^{1,2}, WANG Rui^{1,2}, ZHU Qingfeng^{1,2}, CUI Jianzhong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819; 2. School of Materials Science & Engineering, Northeast University, Shenyang 110819)

Abstract: Rapid development of aviation and aerospace fields requires aluminum alloy with large size, high quality and strength, which demands high-quality and alloyed ingots. As the main method for preparing high-alloyed aluminum alloy ingots, Direct-Chill (DC) casting technology has made great progress in improving quality and yield of ingot after years of development, which is still limited to solve the formability of large-scale aluminum alloy ingots with high strength and control the uniformity of structure and composition. External field-assisted DC casting technology can commendably regulate the flow field and temperature field, which provides solutions for preparing large-sized and high-alloyed aluminum alloy ingots with fine grain size and well homogeneity. On the basis of introducing basic principles of DC casting technology, the implementation forms, basic mechanism, effects, technical characteristics and research progress of electromagnetic field, ultrasonic field, intensive melt shearing treatment and combined external field-assisted DC casting technology were reviewed. Problems encountered in the process of technological development were analyzed and possible solutions were proposed. Technological development trends and application prospects were forecast.

Key Words: High-strength Aluminum Alloy, Semicontinuous Casting, Electromagnetic Field, Ultrasonic Field, Combined Fields

高强铝合金密度小、比强度高、综合性能好, 广泛应用于航空、航天、轨道交通等领域^[1-3]。采用直接水冷(Direct-Chill, DC)半连续铸造方法, 制备铸锭是生产高强铝合金的重要环节。航空、航天工业的快速发展对铝材尺寸、性能提出更高的要求。飞机制造行业以整体机加工件代替多零件装配部件的发展趋势需求更

厚、更大尺寸的板材或锻件, 如7050铝合金预拉伸厚板的使用厚度达到190 mm以上, 而锻件厚度更是达到300 mm以上, 这就要求更大尺寸的铸锭^[3-4]。现代飞机领域还要求铝材具备高强度、高韧性、高耐腐蚀性、高损伤容限、高淬透性等更优的综合性能, 而实现上述目标离不开铝材的高合金化^[1]。研究者已经逐步开始研

收稿日期: 2024-04-24; 修订日期: 2024-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674078)

第一作者简介: 左玉波, 男, 1976年出生, 研究员, E-mail: zuoyubo@epm.neu.edu.cn

引用格式: 左玉波, 张淑颖, 王睿, 等. 高强铝合金外场辅助半连续铸造研究现状与展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(6): 881-889.

ZUO Y B, ZHANG Q Y, WANG R, et al. Research status and prospects of external field-assisted DC casting of high-strength aluminum alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 881-889.

制和储备 700 MPa 和 800 MPa 级别具有优异综合性能的高合金化超高强铝合金和相关加工制备技术^[5]。高强铝合金铸锭由于合金化程度高,结晶范围宽,氧化、吸气严重,易形成缩松、宏/微观偏析、铸造裂纹等缺陷,铸造成品率低。随着铸锭断面尺寸的增大,液穴变深,铸锭中心和表层凝固不同步的程度增加,导致组织粗大且不均匀,缩松、偏析裂纹等缺陷趋于更加严重。基于传统 DC 铸造技术,通过调整铸造温度、铸造速度、冷却水量等工艺参数难以消除高强铝合金铸锭铸造缺陷,大扁锭、大直径高合金化均质、无裂纹高质量铸锭的铸造技术是世界铝加工界要解决的热点和难点问题^[2]。

在 DC 铸造过程中引入电磁场、超声场、熔体强剪切处理以及组合外场一方面可以产生强制对流,均匀温度场,减小液穴深度,减小铸造应力,从而抑制铸造裂纹,减弱偏析,减少缩松;另一方面,外场的引入促进形核、晶核游离和增殖,有利于细化晶粒尺寸,提高组织均匀性。外场辅助 DC 铸造技术取得了很好的效果,受到研究者的关注,徐大召等^[6]综述了电磁场、超声场在 DC 铸造过程中的应用与相关研究。本研究介绍 DC 铸造技术原理和引入外场的形式,综述电磁场、超声场、熔体强剪切处理以及组合外场辅助 DC 铸造技术工作原理和研究新进展,分析遇到的问题和解决方案,展望未来的技术发展趋势和应用前景。

1 铝合金 DC 铸造技术原理及应用

铝合金 DC 铸造技术发明于 20 世纪 30 年代,40 年代开始投入使用,50 年代获得推广,经过技术革新和发展,迄今已有近 90 年的历史,但其基本原理并没有改变^[7]。

DC 铸造开始时,铝合金熔体浇注到由结晶器和引锭头所围成的空间内,铝熔体与结晶器、引锭头接触并发生热交换,从而沿其边界发生凝固。铝熔体液面在结晶器中达到一定高度且凝壳具有足够强度支撑铝熔体时,引锭头以设定的铸造速度下移,将已凝固的铸锭拉出结晶器,同时铝合金熔体不断补充到结晶器内。当铸锭下移到一定位置时,冷却水通过结晶器的水孔直接喷到铸锭表面,铸锭被快速冷却。在结晶器内壁冷却作用(一冷)下形成稳定的初凝壳,在喷射到铸锭表面冷却水冷却作用(二冷)下,铸锭从边部向中心凝固,建立稳定的连续铸造过程,并形成“V”字形液穴^[7-8]。

DC 铸造过程以及液穴示意图见图 1。在结晶器内,从上到下依次为液相区、两相区(过渡区)和固相

区。根据两相区内枝晶是否搭接,即固相能否自由移动,两相区进一步分为浆料区(枝晶未搭接,固相可自由移动)和糊状区(枝晶已搭接,固相不能自由移动)。

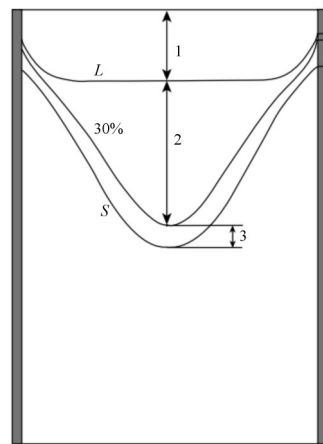


图 1 DC 铸造过程及液穴示意图^[7]

Fig.1 Schematic diagram of DC casting process and sump^[7]

L 为液相线, S 为固相线, 30% 为晶搭接温度等温线, 1 为液相区, 2 为两相区, (1+2) 为液穴, (2+3) 为浆料区, 3 为糊状区

DC 铸造过程中,一冷,即结晶器内壁冷却作用下,快速形成初凝壳。初凝壳一旦形成便在冷却作用下发生收缩,在初凝壳和结晶器内壁之间形成气隙。在气隙区,即初凝壳收缩形成气隙到二冷水见水点这段区域,一冷能力急剧下降,铸锭次表层冷却速率迅速降低。在内部高温熔体作用下,次表层和表层温度升高,导致晶间低熔点共晶组织和低熔点相发生重熔,形成微通道,熔体静压力作用下,晶间富溶质熔体被推向铸锭表面形成表层逆偏析,严重时形成偏析瘤。而一冷区冷却能力较强和铸造速度较慢的情况下,会导致形成初凝壳的位置上移,可能形成层叠式表面,即冷隔缺陷,影响铸锭表面质量。李志猛等^[9]详细分析了 DC 铸造铸锭表层缺陷和表层组织的形成机制。

随着初凝壳下移到二冷水见水点,在冷却水激冷作用下,次表层由气隙区的缓冷迅速过渡到快冷。之后,随着凝固厚度增加,冷却速率逐渐变慢,导致心部和边部的冷却速率存在较大的差异。相对于表层,铸锭中心冷却速率慢,往往形成粗大枝晶和粗大结晶相并容易形成缩松等铸造缺陷。王睿等^[10]综述了 DC 铸造铝合金铸锭缩松的形成机制以及分布特征,分析了熔体氢含量、成分、铸造工艺参数以及施加外场对缩松的影响,探讨了抑制缩松的方案。

DC 铸造过程形成“V”字形液穴,铸锭中心和表层凝固过程不同步,在凝固收缩作用下产生铸造应力,严重时出现铸造裂纹。同时由于液穴的存在,宏观凝固界面沿 V 形液穴推进时,会造成熔体内溶质元素沿锭坯横向分布不均匀,形成宏观偏析,而且通常液穴越深

宏观偏析越严重^[7]。

综上分析,DC铸造相对于模铸提供了更强的冷却能力和更高的生产率,但其凝固特点也对铸锭表面质量和内部冶金质量不利。为此,在近90年的发展过程中,研究者围绕提高铸坯表面质量、抑制铸锭内部缺陷、改善内部组织和提高成品率,在优化铸造温度、铸造速度、冷却水量、液位高度等工艺参数的基础上,基于缩短气隙区、减小液穴深度、延迟枝晶搭接(减小糊状区厚度)、减弱一冷、控制二冷等思想,不断对铝合金DC铸造技术进行改进和升级,开发了一系列新技术并获得了实际应用。王自焄等^[11]、李小亚等^[12]、朱庆丰等^[13]和郑伟^[14]分别综述了国内外铝合金圆铸锭DC铸造技术及其进展。圆铸锭由传统的金属套结晶器铸造技术逐步发展到隔热膜铸造、热顶铸造、油气滑铸造、低液位铸造、低压铸造以及为了解决高强铝合金铸锭铸造开裂而发展的刮水板铸造技术等。林师朋等^[15]综述了近年来国内外先进扁铸锭铸造技术的研究现状和进展,与圆铸锭不同,扁铸锭很少采用热顶铸造,而是采用金属套DC铸造、油滑铝套DC铸造、低液位DC铸造(Low Head Composite, LHC)等,其中LHC低液位铸造技术是目前生产高品质扁铸锭的主流制备技术。对于大尺寸高强铝合金铸锭则在低液位铸造技术的基础上进一步引入了刮水板技术。

DC铸造技术的发展很大程度上解决了铸造成形问题,改善了铸锭表面质量和内部冶金质量,并提高了成品率,但在大尺寸高强铝合金DC铸造方面仍存在一些不足。2xxx、7xxx系高强铝合金铸造工艺窗口窄、铸造稳定性差、铸造应力大,易出现铸造裂纹,随着铸锭尺寸增大,裂纹问题趋于更加严重,而且大尺寸铸锭铸造速度慢,铸锭表面质量差。同时大尺寸铸锭还存在组织、成分不均匀,铸锭心部组织和结晶相粗大,易出现缩松等问题。为此,研究者尝试在DC铸造过程中引入电磁场、超声场、熔体强剪切处理、组合场等外场,通过外场控制DC铸造流场、温度场和凝固过程,以细化组织,提高组织成分分布均匀性,抑制铸造缺陷,进一步提高铸锭质量。

2 电磁场辅助DC铸造

DC铸造过程中通过励磁线圈引入交变电磁场,利用其产生的电磁约束力和电磁搅拌力可实现对铸锭凝固过程的控制。铝合金DC铸造过程中引入电磁场可追溯到20世纪70年代初GETSELEV Z N^[16]开发的电磁铸造技术(Electromagnetic Casting, EMC)。EMC利用电磁感应原理,通过交变电磁场在合金熔体中产

生Lorentz力约束金属熔体,并维持一定的液柱高度,替代了结晶器的支撑作用,实现了无模铸造。由于铸锭不和结晶器接触,EMC技术制备铸锭最大特点是表面光滑、表层偏析小、表面质量好。金俊泽等^[17]、HAO H等^[18]对EMC进行了卓有成效的研究,制备了不同规格铸坯,发现电磁铸造铸坯表面质量显著提高,枝晶间距及晶粒明显细化,化学成分偏析减弱。

EMC采用中、高频电磁场来实现无模铸造,完全靠电磁力约束合金熔体,对设备控制系统要求较高且设备复杂,难以建立稳定的铸造过程,容易出现漏铝现象。同时,由于所用电磁场频率较高,尽管利于提高铸锭表面质量,但对铸锭内部熔体的流动场与温度场影响有限,在铸造高强铝合金大尺寸铸锭时,难以获得均匀的铸态组织和消除铸锭内应力。

VIVES C^[19-20]基于EMC原理并保留结晶器,在结晶器外布置感应线圈,并通过在线圈中施加工频交流电以控制凝固过程,开发了细晶电磁铸造技术(Casting, Refining, Electromagnetic, CREM)。CREM技术具有明显的晶粒细化作用,能够实现铸锭与结晶器内壁的软接触,并且相对于EMC技术,控制难度显著下降,安全性明显提高。

ZHANG B J等^[21-22]、董杰等^[23]在热顶DC铸造技术的基础上,在结晶器周围布置感应线圈,并采用更低的电磁场频率(5~30 Hz),以克服电磁场的集肤效应,提高电磁场的渗透性,开发了低频电磁铸造技术(Low Frequency Electromagnetic Casting, LFEC)。LFEC铸造过程示意图见图2。

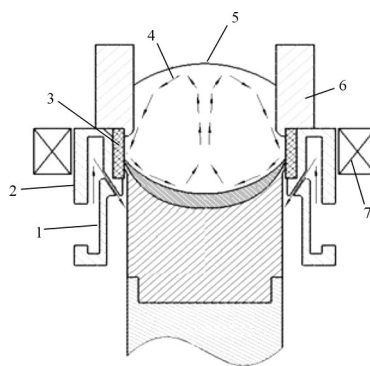


图2 低频电磁铸造示意图^[21]

Fig.2 Schematic diagram of LFEC process^[21]

1. 冷却水 2. 结晶器 3. 石墨环 4. 强制对流 5. 弯月面 6. 热顶
7. 感应线圈

低频电磁铸造过程中,线圈通低频电流,产生低频交变磁场 B ,低频交变磁场在铝熔体激发低频交变感应涡电流。涡电流 J 与低频电磁场 B 交互作用,使熔体受到Lorentz力的作用。由麦克斯韦方程组可得低频电磁铸造过程中,超高强铝合金熔体内任一点处Lorentz

力 f 为^[24]:

$$f = J \times B = \left(\nabla \times \frac{1}{\mu} B \right) \times B = \frac{1}{\mu} \left[(B \cdot \nabla) B - \frac{1}{2} \nabla (B \cdot B) \right] = \frac{1}{\mu} (B \cdot \nabla) B - \frac{1}{2\mu} \nabla B^2$$

式中, μ 为磁导率。Lorentz力由两部分组成,第一项的旋度不等于0,为回旋力。回旋力由铸锭边部到中心梯度分布,边部最大,中心最小,在液穴内形成图2的强制对流,利于减小液穴深度,促进异质形核和晶核的移动。第二项是垂直于铸造方向指向铸锭中心的有势力,减小了铸锭与石墨环的接触压力,减弱了摩擦,有利于提高铸锭表面质量。

LFEC可以改善铸锭表面质量,显著细化组织,提高组织、成分分布均匀性,增强锭坯抗裂纹能力。施加磁场后,产生Lorentz力导致熔体(铸锭)与结晶器内壁(石墨环)接触压力的降低是提高铸锭表面质量的主要原因。

电磁场辅助DC铸造过程中,电磁场对晶粒组织呈现显著的细化作用,其细化效果受到电磁场频率和磁感应强度等关键工艺参数的影响^[21-23]。研究表明,较低的频率、较高的强度利于获得均匀细小的组织,但磁感应强度过大则可能会导致铸锭边部气孔缺陷产生^[25]。LFEC技术细化高强铝合金晶粒组织的主要机理为低频电磁场产生的搅拌作用使得结晶器内熔体温度趋于均匀且略低于合金液相线温度,新进入结晶器内的熔体在进入结晶器的瞬间受到激冷作用,在熔体内部大量形核,并减少晶核的重熔,同时强制对流增加了结晶器壁处的形核和游离^[26]。另一方面,电磁场引起的强制对流使得熔体温度场均匀,成分场均匀,抑制成分过冷,同时晶粒长大过程中随熔体运动和旋转,使晶粒各个方向相对均匀地长大,从而形成均匀、细小的等轴晶组织。研究还表明,低频电磁铸造对铸锭晶粒组织的细化作用很大程度上能够遗传到铸锭均匀化组织和挤压后的变形组织^[27]。

施加电磁场对铸造裂纹具有明显的抑制作用。在制备Zn含量高于9.5%的新型超高强Al-Zn-Mg-Cu合金铸锭过程中,LFEC技术很好地抑制了铸造裂纹的产生^[28]。数值模拟和试验研究表明,DC铸造过程中施加低频磁场能够均匀温度场,减小液穴深度,进而减小铸造应力、抑制铸造裂纹和减弱宏观偏析^[29-30]。

近年来,随着对电磁场辅助DC铸造原理理解的深入,电磁场在工业应用方面也持续受到关注。禹玉江等^[31]采用低频电磁铸造技术制备了直径为500 mm的表面光洁、组织细小的7050铝合金铸锭。高明伟等^[32]

基于环缝式电磁搅拌器,在DC铸造过程中施加电磁场制备了直径为310 mm 7N01铝合金铸锭,获得了显著的组织细化作用。孙自鹏等^[33]基于企业生产平台,施加低频电磁场制备了直径为630 mm的2xxx、7xxx系铝合金铸锭并验证了低频电磁铸造制备大尺寸圆铸锭的可行性,结果表明,电磁场能有效减小晶粒尺寸,改善成分偏析,同时也轻微增加表面壳层厚度,而对缩松的改善作用不明显。赵浩东等^[34]在DC铸造过程中,通过内置式电磁搅拌器施加低频电磁场,制备了直径为880 mm的细晶、均质2219铝合金铸锭,为制备大尺寸高强铝合金铸锭提供了重要的参考。

3 超声场辅助DC铸造

在DC铸造过程中,将超声杆由结晶器上方置入铝合金熔体中,通过超声杆在结晶器内熔体中产生超声场,利用超声场控制凝固过程进而发展了超声场辅助DC铸造技术。

超声场辅助DC铸造技术的基本原理为,超声场引入熔体后,在熔体中引发空化效应和声流效应^[35-36]。超声场通过空化效应在熔体中产生负压,当压力超过空化阈值时产生空化气泡。由于空化气泡中氢分压为零,溶解在熔体中的氢会向空化气泡扩散,并随空化气泡上浮而脱离熔体,所以超声处理具有一定的除气作用。多数气泡在超声振荡作用下发生崩破,形成高温、高压脉冲,在局部产生能量起伏,产生局部过冷,提高形核率,因此施加超声场具有晶粒细化作用。同时,气泡破裂引发的声流效应在熔体中产生搅拌作用,将初生晶核均匀、弥散分布于熔体中,有利于提高组织均匀性。

超声场在DC铸造过程中的作用受到超声功率、超声振幅和频率、超声处理位置、超声杆尺寸和形状等因素的影响。张明等^[37]研究了超声杆端面对铝合金显微缩松的影响,优化了超声杆端面形状,明确了超声场对7050铝合金铸锭中缩松的抑制作用。李军文等^[38]通过施加超声场细化了铝合金铸锭气孔尺寸,减少了气孔含量。张立华等^[39]将超声场引入DC铸造过程,制备了直径为300 mm的7050铝合金铸锭,显著细化了铸锭组织,有效抑制了热裂纹的形成。钟贞涛等^[40]采用超声场辅助DC铸造技术制备了直径为1 250 mm的2219铝合金铸锭,细化了组织,提高了成分分布均匀性。

超声场辅助DC铸造技术在晶粒细化、抑制缩松、控制裂纹、减弱偏析等方面具有明显的作用,具有重要的应用潜力。但在应用环节还存在一些问题。如高频振动作用下,浸入铝合金熔体中的超声杆容易熔蚀,既

污染铝合金熔体又缩短超声杆的使用寿命。另外,超声波在铝合金熔体中衰减速度快,使得超声波在铝合金熔体中的作用区域有限。

针对超声在铝合金熔体中衰减快这一问题,钟贞涛等^[40]、王莹等^[41]和ZHANG L等^[42]提出了多元超声的解决方案,即在DC铸造过程中引入多个超声单元,并采用超声场辅助DC铸造技术成功制备了直径分别为650、1 250和1 380 mm的大尺寸2219铝合金铸锭。

4 熔体强剪切处理辅助DC铸造

FAN Z Y^[43]发明了一种双螺旋高剪切装置,首先用于处理半固态轻金属浆料,获得了均匀细小的球形晶粒组织,之后发现在液相线温度以上对合金熔体进行强剪切处理也能获得很好的晶粒细化效果^[44-45],在此基础上提出使用双螺旋强剪切装置对熔体进行强剪切处理,再浇注到DC铸造结晶器中,开发了熔体处理DC铸造技术(Melt Conditioned Direct-Chill Casting, MC-DC)。鉴于熔体强剪切处理在DC铸造过程中的积极作用,FAN Z Y等^[46]、ZHOU Y B等^[47]又提出一种定子-转子型强剪切装置,并从结晶器上方将该装置端部放入DC铸造结晶器内熔体中,实现在线剪切处理和对凝固过程的控制,进而开发了熔体强剪切辅助DC铸造技术,其示意图见图3。

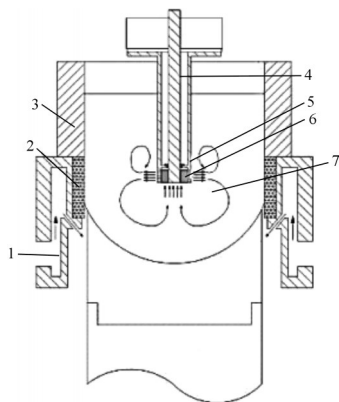


图3 熔体强剪切单元及其辅助DC铸造示意图^[47]

Fig.3 Schematic diagram of intensive melt shearing unit and assisted DC casting process^[47]

1.冷却水 2.石墨环 3.热顶 4.连接轴 5.定子 6.转子 7.熔体

相对于双螺旋强剪切装置,定子-转子型装置结构简单、尺寸小巧、易于控制,剪切率更高,而且具有更优的破碎、减径、分散和混合等作用。与一般的机械搅拌相比,定子-转子型熔体强剪切装置既能提供非常高的剪切率(比一般的叶片式机械搅拌装置高1~2个数量级),也能提供可控强制对流,而且定子的存在使得液面保持稳定,不形成大的漩涡,有利于保护熔体。

熔体强剪切辅助DC铸造过程中,定子-转子强剪切装置的基本工作原理为,高速电机通过连接轴驱动转子高速旋转,带动定子内熔体转动,在离心力的作用下,熔体经定子上的开孔快速喷出,并从装置底部吸入熔体,由此在剪切装置周围和下部形成强制对流。在此过程中,在转子和定子之间的间隙以及定子的开孔中对熔体产生强剪切作用。强剪切作用促进枝晶臂破碎,提高形核率,有利于晶粒细化。强制对流一方面使得温度场均匀,减小液穴深度,降低铸造应力;另一方面,将剪切作用形成的晶核均匀分布在液穴中,提高组织均匀性。通过准确调节强剪切装置的转速和位置可以更精确调控形核行为以及液穴内流场、温度场,进而控制凝固过程。

PATEL J B等^[48]研究表明,强剪切处理对铝合金具有显著的晶粒细化作用。LIU X D等^[49-50]在DC铸造直径为300 mm 2024铝合金铸锭过程中发现位置靠下,在两相区的强剪切处理有利于获得晶粒尺寸更小的蔷薇形和球形混合晶粒组织,并通过试验观察和理论分析明确了强剪切引起的枝晶臂机械破碎机制在晶粒细化过程中的作用。WANG R等^[51]重点关注了熔体强剪切辅助DC铸造过程中缩松的形成行为,结果表明,位置靠上强度较弱的剪切处理时,缩松含量少、尺寸小,且分布均匀;而位置靠下较强的强剪切处理尽管获得了较小的晶粒尺寸,但缩松尺寸反而比较大。熔体强剪切辅助DC铸造过程存在晶粒尺寸变化与缩松尺寸变化不同步的现象,缩松的尺寸除了与晶粒尺寸有关外,还与晶粒形貌有关,细小的等轴枝晶组织有利于减小缩松尺寸。进一步研究还表明熔体强剪切对铸态组织的调控作用很大程度上能够遗传到塑性变形后的组织、性能,枝晶臂细小的等轴晶组织有利于获得较好的组织和性能^[52]。RAO A K P^[53]、LOON W等^[54]通过模拟研究发现,施加强剪切处理后,液穴变浅且液穴内熔体温度分布更加均匀。WANG J C等^[55]使用COMSOL商业软件数值模拟了熔体强剪切辅助DC铸造直径为300 mm的2024铝合金铸锭过程中的流场、温度场,结果也表明施加强剪切后,流场加强,温度场趋于均匀,液穴变浅。PATEL J B等^[48]通过试验观察证实,施加熔体强剪切处理可以减小液穴深度,中心和表层凝固不同步的程度减弱,对减弱高强铝合金的宏观偏析和抑制铸造裂纹具有积极意义。

5 组合外场辅助DC铸造

DC铸造过程中施加电磁场、超声场、熔体强剪切等取得了很好的组织细化和抑制缺陷的效果,但不同

的外场呈现不同的特点,也存在自身的不足。电磁场具有集肤效应,磁感应强度由边部向中心快速衰减,引起外强内弱的对流特点。采用低频磁场一定程度上提高了磁场的渗透性,但无法改变电磁场在合金熔体中集肤效应的本质,并且基于普通金属套结晶器和普通直口热顶铸造时,施加电磁场还存在液面波动的问题。超声场则存在在铝合金熔体中衰减快,影响区域小的不足。施加熔体强剪切引起的对流则存在内强外弱的特点,特别是在制备大尺寸铸锭时更加明显。为此,研究者尝试在DC铸造过程中施加组合场来控制凝固过程。

5.1 双磁场

DC铸造过程中,通过在结晶器周围和上部分别布置励磁线圈,在上部线圈施加静磁场,在结晶器周围线圈施加交变磁场,开发了电磁振荡铸造技术^[56-58]。结晶器上部施加静磁场对熔体有电磁制动的作用,避免了液面的波动。下部施加交变磁场,在合金熔体中产生交变感应电流,一方面感应电流与交变磁场相互作用在液面下引起强制对流,一方面交变感应电流与静磁场相互作用产生电磁振荡。电磁振荡促进结晶器壁的形核和游离,而液面以下的强制对流具有均匀温度场的作用,并将晶核均匀分布于熔体中,因此,电磁振荡具有显著的组织细化作用。采用电磁振荡铸造技术制备了直径为200 mm和270 mm的超高强Al-Zn-Mg-Cu-Zr铝合金铸锭,获得了非常均匀、细小的球形等轴晶组织,并提高了成分分布均匀性^[58-59]。

分别在两组感应线圈内通入存在相位差的交变电流还可产生差相磁场。差相磁场增强了磁场强度,扩大了磁场的有效作用区域。朱庆丰等^[60]在差相磁场作用下水平DC铸造了7075铝合金铸锭,发现差相磁场可以细化铸锭内部组织,消除羽毛晶,均匀熔池内的温度分布,提高铸锭的表面质量。

5.2 超声-电磁组合场

超声-电磁组合场辅助DC铸造旨在DC铸造过程中通过超声杆在结晶器内熔体中引入超声场,通过布置结晶器外的励磁线圈引入交变磁场,目标是利用超声场的空化效应在铝熔体内产生大量晶核,同时利用电磁场增大超声空化效应的作用区域,再利用超声声流和电磁场引起的强制对流将超声空化效应产生的初生晶核均匀分布于合金熔体中,以实现更高效的组织细化和提高组织均匀性。

乐启炽等^[61]提出将功率超声与低频电磁场协同作用于DC铸造轻合金过程,并获得了均匀的温度场、细小的晶粒组织和更好的力学性能^[62]。ZHANG Y B

等^[63]在超声场和中频电磁场组合作用下制备了直径为160 mm的Al-Si合金铸锭,发现组合外场作用下晶粒细化效果明显好于单独施加超声场或单独施加中频电磁场,而且晶粒分布更加均匀。

超声-电磁组合场在细化晶粒、抑制缺陷和提高铸锭质量方面取得不错的效果,在制备大规格铸锭方面有应用潜力,但超声场和电磁场的干扰和协同作用行为、超声引起的声流和电磁场引起的强制对流的叠加/抵消效应等机理性问题需要进一步深入研究。

5.3 熔体强剪切-电磁组合场

如果将强剪切处理看作一种机械外场,那么同时施加熔体强剪切处理和电磁场也算是一种组合场。熔体强剪切-电磁组合场辅助DC铸造^[64]的实现方式是,从结晶器上部沿结晶器中心线将定子-转子强剪切装置工作区置入合金熔体中,同时通过励磁线圈施加电磁场,装置结构示意图见图4。

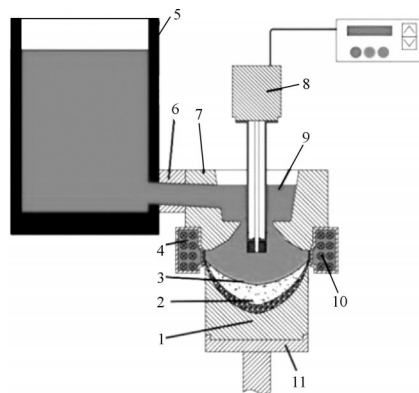


图4 熔体强剪切-电磁辅助DC铸造示意图^[64]

Fig.4 Schematic diagram of intensive melt shearing-electromagnetic assisted DC casting process^[64]

1. 铸锭 2. 糊状区 3. 浆料区 4. 冷却水 5. 熔铝炉 6. 熔体强剪切装置 7. 流槽 8. 热顶 9. 铝熔体 10. 感应线圈 11. 引锭头

熔体强剪切与施加电磁场具有互补性,一方面,熔体强剪切引起的对流内强外弱,电磁场引起的强制对流外强内弱,而且二者产生的宏观对流方向基本一致,所以二者有叠加性,利于获得更加均匀的温度场和成分场,具有辅助DC铸造大尺寸铸锭的潜力。另一方面,熔体强剪切对液穴中悬浮的枝晶、枝晶臂碎片以及熔体中的氧化物等产生强烈的破碎、分散、减径、混合等作用,显著增加形核质点、促进组织细化,但这种作用主要发生在靠近强剪切装置头部的一定空间内,而强剪切和电磁场产生的更强的叠加对流可将形成的晶核均匀分布于熔体中,利于晶粒细化和提高组织均匀性。

刘旭东^[65]采用强剪切-电磁组合外场辅助DC铸造技术制备了直径为300 mm的2024铝合金铸锭,发现组

织得到细化,组织、成分分布均匀性得到提高,并且铸造工艺窗口显著增大,如铸造速度在 50~150 mm/min 的范围内均能实现稳定 DC 铸造过程。王海军等^[66]结合电磁搅拌和机械搅拌的组合作用,制备了直径为 300 mm 的 7075 铝合金铸锭,发现相比常规 DC 铸造,施加组合场后,铸造工艺窗口范围增大,铸造效率得到提高,熔体温度波动由 40 ℃左右减小到 1 ℃,液穴深度由 128 mm 减小到 88 mm,铸锭平均晶粒尺寸减小,成分偏析也明显减弱。

5.4 其他形式的组合场

在 DC 铸造过程中,将内部通入冷却介质的冷却器沿结晶器中心线置入熔池中,产生内部冷却,同时通过结晶器外围的感应线圈施加电磁场,实现内冷场和电磁场的组合应用。LUO Y J 等^[67]在 DC 铸造直径为 508 mm 的 7005 铝合金铸锭时组合应用内冷和电磁场,发现施加组合外场后熔池内熔体的温度迅速降低,温度场趋于均匀,液穴变浅,且随着感应线圈在结晶器冷却水箱内位置下降,这些效果有所增强。

ZHU C 等^[68]在 DC 铸造 2024 铝合金过程中沿着结晶器中轴线向铝合金熔体中连续加入与铸锭同成分的棒材或丝材,从而提供内部冷却作用,与铸锭外部的冷却构成双冷场。在合适条件双冷场作用下,铸锭组织得到细化,组织均匀性得到提高。

总体而言,组合外场辅助 DC 铸造技术还处于探索阶段,其协同作用机制还不明确,距离实际工业应用还存在差距,仍需要进行很多基础性研究,但初步研究取得了不错的效果,为发展大尺寸高强铝合金铸锭制备技术提供了重要的研究方向。

6 总结与展望

航空、航天等领域的快速发展对高强度铝材尺寸、质量提出更高的要求。高质量铝材需要以高质量的铝合金铸锭为基础,而高质量的铸锭需要更加先进的铸造技术和装备作支撑。DC 铸造技术作为制备高性能高合金化铝合金铸锭的主要手段,经过多年的发展,在提高铸锭质量和成品率方面取得很大进步,但在解决大尺寸高强铝合金铸锭成形性以及调控组织、成分均匀性方面能力有限。外场辅助 DC 铸造技术可以更好地调控流场、温度场,能为制备细晶、均质、大尺寸、高合金化铝合金铸锭提供解决方案。本研究在介绍 DC 铸造技术基本原理的基础上,综述了电磁场、超声场、熔体强剪切处理及组合外场辅助 DC 铸造技术的实现形式、基本原理、作用效果、技术特点和研究进展。

外场辅助 DC 铸造在细化晶粒、抑制裂纹、提高组

织、成分均匀性、提高生产率方面呈现很好的效果,但在技术发展过程中也面临着一些问题和挑战。①相对于常规 DC 铸造,外场辅助 DC 铸造技术增加了外场产生装置,设备复杂,一定程度上增加成本和技术人员操作难度,在工业应用推广方面遇到一定的阻力,所以目前是研究多、应用少;②目前利用外场辅助 DC 铸造技术制备大尺寸铸锭方面的研究多集中在圆铸锭,外场辅助 DC 铸造扁铸锭工艺和原理有待于深入研究;③外场对 DC 铸造过程的影响规律和机理在有些方面仍不明确。外场对缩松的影响规律和影响机理仍不清楚。半连续铸造过程中浆料区向糊状区转变过程即枝晶搭接行为在形成缩松、热裂和宏观偏析的过程中起到关键作用,而关于外场对枝晶搭接行为的影响缺乏系统研究和试验验证;④DC 铸造过程中希望液面保持平静,以防止破坏表层氧化膜,而施加外场或多或少会带来液面的波动,有可能会引起氧化膜进入合金熔体。因此,需要优化工艺或研究其他有效措施,确保在引入外场的同时保持液面平静;⑤超声-电磁、熔体强剪切-电磁等组合外场单场与单场相互影响行为以及协同作用机制还不明确。

基于外场辅助 DC 铸造技术及其发展过程中遇到的问题与挑战,可在如下方向开展深入研究,为发展具备自主知识产权的铝合金先进铸锭制备技术做好研究基础储备。①外场辅助 DC 铸造技术在解决高强铝合金大尺寸铸锭的铸造成形性问题以及提高铸锭质量方面有优势和潜力,可首先针对技术难度大、高附加值、大尺寸高强高合金化铝合金,开展外场辅助 DC 铸造技术应用研究,在此基础上进一步推广技术应用;②深入开展适合外场辅助 DC 铸造技术特点的特殊场景方面的应用研究。如电磁场辅助 DC 铸造技术在组织细化、提高铸坯质量方面具有通用性应用价值,同时由于施加电磁场过程中和金属熔体无接触,不污染合金,在纯铝和高纯铝晶粒细化方面有其特殊应用价值。超声处理本身有一定的除气作用,在对氢含量有严格要求的场景有特殊应用潜力。熔体强剪切处理具有破碎、分散、减径和混合作用,在精准控制流场和温度场方面具有技术优势,在制备颗粒增强复合材料方面具有较高的应用价值;③持续开展外场辅助 DC 铸造机理性基础研究,系统研究外场对枝晶搭接行为的影响,进一步揭示外场对缩松、热裂、偏析影响的规律和机理;④基于 DC 铸造扁铸锭的工艺特点,深入研究外场在扁铸锭 DC 铸造过程中的施加方式、作用效果和影响机理;⑤通过数值模拟和试验研究掌握组合场中单场之间的相互影响行为和协同作用机制,发展超声-电磁、熔体强剪切-电磁等新型组合场辅助 DC 铸造技术。

DC铸造过程中施加外场对调控流场、温度场、成分场起到关键作用,在晶粒细化、防止热裂、抑制偏析等方面取得很好的效果,外场辅助DC铸造技术有望成为制备大尺寸高强铝合金铸锭的重要方法。通过深入研究,在解决设备复杂、成本增加等问题后,该技术在合适的领域具有更广的应用空间。组合外场辅助DC铸造技术综合利用单外场的优点,弥补单外场的不足,初步研究取得了不错的效果,为发展更大尺寸高强铝合金铸锭制备技术提供了重要的研究方向。随着对多外场相互影响行为和协同作用机制理解的不断深入和技术的持续改进,组合外场辅助DC铸造技术有望获得重要发展和应用。

参 考 文 献

- [1] 邓运来,张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [2] 张新明,邓运来,张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 257-271.
- [3] 臧金鑫,陈军洲,韩凯,等. 航空铝合金研究进展与发展趋势[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 769-777.
- [4] 杨守杰,戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报, 2005(2): 76-80.
- [5] 臧金鑫,邢清源,陈军洲,等. 800 MPa级超高强度铝合金的时效析出行为[J]. 材料工程, 2021, 49(4): 71-77.
- [6] 徐大召,孟令刚,杨春峰,等. 高性能铝合金外场辅助半连续铸造研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 880-890.
- [7] ESKIN D G. Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [8] GRANDFIELD J F, ESKIN D G, BAINBRIDGE I F. Direct-chill Casting of Light Alloys: Science and Technology [M]. Hoboken: Wiley-TMS, 2013.
- [9] 李志猛,左玉波,朱庆丰,等. 半连续铸造铝合金表面缺陷的形成机理及影响因素[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 108-113.
- [10] 王睿,左玉波,朱庆丰,等. 半连续铸造铝合金铸锭疏松的形成机制及其影响因素[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(2): 17-24.
- [11] 王自焘,刘景茹. 铝挤压铸半连续铸造工艺研究和发展[J]. 特种铸造及有色合金, 1996(2): 20-24.
- [12] 李小亚,王东立,郑春生,等. 铝合金棒坯连续铸造技术进展[J]. 铸造技术, 2002, 23(4): 203-206.
- [13] 朱庆丰,程龙,王睿,等. 铝合金圆铸锭垂直半连续铸造技术的发展[J]. 轻合金加工技术, 2022, 50(6): 1-12.
- [14] 郑伟. 铝合金热顶铸造的研究进展[J]. 有色金属加工, 2023, 52(1): 15-17.
- [15] 林师朋,刘金炎,钟鼓,等. 铝合金扁锭先进半连续铸造技术研究现状[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(11): 1-7.
- [16] GETSELEV Z N. Casting in an electromagnetic field [J]. Journal of Metals, 1971, 23(10): 38-44.
- [17] 金俊泽,张兴国,曹志强,等. 铝合金电磁铸造工艺参数的研究[J]. 材料研究学报, 1996(4): 397-400.
- [18] HAO H, JIN J Z, ZHANG X G. Joule heating in electromagnetic casting[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2(1): 93-96.
- [19] VIVES C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part I. Working principle and metallurgical results [J]. Metallurgical Transactions, 1989, B20(5): 623-629.
- [20] VIVES C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part II. Specific practical problems and their solutions[J]. Metallurgical Transactions, 1989, B20(5): 631-643.
- [21] ZHANG B J, CUI J Z, LU G M. Effect of electromagnetic frequency on microstructures of continuous casting aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2002, 18(5): 1-3.
- [22] ZHANG B J, CUI J Z, LU G M. Effects of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macrosegregation of continuous casting 7075 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A355(1-2): 325-330.
- [23] 董杰,崔建忠. 低频电磁场参数对Al-10Zn-2.5Mg-2.5Cu-0.15Zr合金铸态组织和性能的影响[J]. 金属学报, 2003, 39(5): 482-485.
- [24] 韩至成. 电磁冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [25] ZUO Y B, CUI J Z, DONG J, et al. Effect of low frequency electromagnetic field on the as-cast microstructures and mechanical properties of superhigh strength aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2005, A408(1): 176-181.
- [26] ZUO Y B, CUI J Z, ZHAO Z H, et al. Mechanism of grain refinement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy prepared by low frequency electromagnetic casting [J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(14): 5501-5508.
- [27] 左玉波,崔建忠,赵志浩,等. 低频电磁铸造7050铝合金的组织与性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 77-80.
- [28] ZUO Y B, CUI J Z, ZHAO Z H, et al. Effect of low frequency electromagnetic field on casting crack during DC casting superhigh strength aluminum alloy ingots [J]. Materials Science and Engineering, 2005, A406(1-2): 286-292.
- [29] ZHANG H T, NAGAUMI H, ZUO Y B, et al. Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during low frequency electromagnetic casting of 7XXX aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2006, A448(1): 189-203.
- [30] ZUO Y B, NAGAUMI H, CUI J Z. Study on the sump and temperature field during low frequency electromagnetic casting a superhigh strength Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1-3): 109-115.
- [31] 禹玉江,宋作勇,代金杰. 低频电磁热顶铸造7050铝合金铸锭的表面质量和组织[J]. 轻金属, 2013(4): 68-70.
- [32] 高明伟,张志峰,徐骏,等. 环缝式电磁搅拌对7N01合金连铸锭组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(2): 219-222.
- [33] 孙自鹏,汪永红,张欢欢. 电磁搅拌铸造技术在大规格圆锭上的应用[J]. 铝加工, 2022(4): 56-59.
- [34] 赵浩东,张志峰,白月龙,等. 内置电磁熔体处理对大规格2219铝合金铸锭组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(7): 826-830.
- [35] ESKIN G I. Principles of ultrasonic treatment: Application for light alloys melts [J]. Advanced Performance Materials, 1997, 4(2): 223-232.
- [36] ESKIN G I, PIMENOV Y P, MAKAROV G S. Effect of cavitation melt treatment on the structure refinement and property improvement in cast and deformed hypereutectic Al-Si alloys [J]. Materials Science Forum, 1997, 242: 65-70.
- [37] 张明,李晓谦,黎正华,等. 超声铸造工具杆端面对铝合金显微疏松

- 的影响[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(5): 102-105.
- [38] 李军文, 付莹, 桃野正. 超声波处理时间对铝合金铸锭内的气孔生成及细化的影响[J]. 铸造技术, 2006, 27(10): 1 063-1 066.
- [39] 张立华, 易雪雄, 胡谦谦, 等. 超声场对半连续铸造铝合金铸锭热裂纹形成的影响机理[J]. 机械工程材料, 2012, 36(11): 32-35.
- [40] 钟贞涛, 李瑞卿, 李晓谦, 等. 超声处理对2219大规格铝锭微观组织与宏观偏析的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(9): 1 347-1 354.
- [41] 王莹, 李晓谦, 李瑞卿, 等. 大直径铝锭热顶铸造中超声施振深度的细晶机制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(9): 1 347-1 354.
- [42] ZHANG L, LI X Q, LIU Z L, et al. Scalable ultrasonic casting of large-scale 2219AA Al alloys: Experiment and simulation [J]. Materials Today Communications, 2021, 27:102 329.
- [43] FAN Z Y. Semisolid metal processing [J]. International Materials Reviews, 2002, 47(2): 49-85.
- [44] ZUO Y B, LI H T, XIA M X, et al. Refining grain structure and porosity of an aluminium alloy with intensive melt shearing [J]. Scripta Materialia, 2011, 64(2): 209-212.
- [45] FAN Z Y, WANG Y, ZHANG Z F, et al. Shear enhanced heterogeneous nucleation in some Mg- and Al- alloys [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2009, 22(1-4): 318-322.
- [46] FAN Z Y, ZUO Y B, JIANG B. A new technology for treating liquid metals with intensive melt shearing [J]. Materials Science Forum, 2011, 1 311(690): 141-144.
- [47] ZUO Y B, JIANG B, FAN Z Y, et al. Microstructures of DC cast light alloys under the influence of intensive melt shearing [J]. Materials Science Forum, 2011, 1 311(690): 137-140.
- [48] PATEL J B, LI H T, XIA M X, et al. Melt conditioned direct chill casting (MC-DC) process for production of high quality aluminium alloy billets [J]. Materials Science Forum, 2014, 3 225(794-796): 149-154.
- [49] LIU X D, ZHU Q F, KANG Y L, et al. An investigation of direct-chill cast 2024 aluminum alloy under the influence of high shearing with regards to different shear positions [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 279(3): 116 547.
- [50] LIU X D, ZHU Q F, ZUO Y B, et al. Mechanisms of grain refinement in direct-chill casting 2024 aluminum alloy with intensive melt shearing [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2022, A53(7): 2 577-2 585.
- [51] WANG R, ZUO Y B, ZHU Q F, et al. Effect of temperature field on the porosity and mechanical properties of 2024 aluminum alloy prepared by direct chill casting with melt shearing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 307: 117 687.
- [52] WANG R, ZHU Q F, ZUO Y B, et al. The control of as-cast structure of 2024 aluminum alloy with intensive melt shearing and its effect on microstructure and mechanical properties after T4 treatment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3 179-3 193.
- [53] RAO A K P. Nucleation in Al alloys processed by MCDC casting [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(6): 2 219-2 224.
- [54] LOON L W, REDDY S S, RAO A K P. CFD simulation of direct chill casting process of magnesium alloy billets [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 447-454.
- [55] WANG J C, ZUO Y B, ZHU Q F, et al. Numerical simulation of the flow field and temperature field in direct-chill casting of 2024 aluminium alloy under the influence of intensive melt shearing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 1 491-1 504.
- [56] VIVES C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: Part I Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, B27(3): 445-455.
- [57] CUI J Z, ZHANG Z Q, LE Q C. DC casting of light alloys under magnetic field [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2 046-2 050.
- [58] DONG J, CUI J Z, DING W J. Theoretical discussion of the effect of a low-frequency electromagnetic vibrating field on the as-cast microstructures of DC Al-Zn-Mg-Cu-Zr ingots [J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 295(2): 179-187.
- [59] ZUO Y B, LIU X D, SUN C, et al. Grain refinement and macrosegregation behavior of direct chill cast Al-Zn-Mg-Cu alloy under combined electromagnetic fields [J]. China Foundry, 2015, 12(5): 333-338.
- [60] 朱庆丰, 赵志浩, 王向杰, 等. 差相磁场对水平连铸7075铝合金锭坯组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(9): 791-793.
- [61] 乐启焱, 崔建忠, 张志强, 等. 功率超声与低频电磁协同作用的轻合金锭坯立式半连续铸造方法及设备: CN200710010641.5[P]. 2009-09-02.
- [62] SHAO Z W, LE Q C, ZHANG Z Q, et al. A new method of semi-continuous casting of AZ80 Mg alloy billets by a combination of electromagnetic and ultrasonic fields [J]. Materials & Design, 2011, 32(8-9): 4 216-4 224.
- [63] ZHANG Y B, JIE J C, WU L, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-8 Si alloy prepared by direct chill casting under electromagnetic and ultrasonic fields[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2014, A45(4): 2 014-2 022.
- [64] 左玉波, 李磊, 朱庆丰, 等. 一种剪切、磁场复合作用下的轻合金半连铸装置及方法: CN201410363685.6[P]. 2016-04-20.
- [65] 刘旭东. 熔体强剪切/电磁场组合外场作用下2024铝合金半连续铸造工艺及理论研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [66] 王海军, 徐骏, 张志峰, 等. 耦合搅拌制备7075铝合金大铸锭均匀性[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 723-731.
- [67] LUO Y J, ZHANG Z F. Numerical modeling of annular electromagnetic stirring with intercooling in direct chill casting of 7005 aluminum alloy billet [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2019, 29(1): 81-87.
- [68] ZHU C, ZHAO Z H, ZHU Q F, et al. Hot-top direct chill casting assisted by a twin-cooling field: Improving the ingot quality of a large-size 2024 Al alloy [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2022, 112: 114-122.

(编辑: 栗万仲)