

· 综述 ·



中间包等离子体加热技术研究进展及应用

李京社¹, 王存², 陈永峰³, 杨树峰¹, 刘威¹, 白云^{1,4}, 黄成永^{1,5}, 孙烨¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 北京奥邦新材料有限公司, 北京 101407; 3 新兴铸管股份有限公司, 邯郸 056300; 4 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214400; 5 上海梅山钢铁股份有限公司, 南京 210039)

摘要: 在钢铁行业面临转型升级的新常态形势下, 借助智能装备驱动钢铁产业向绿色高端化发展, 有望实现钢铁生产组织的最优化。连铸中间包实现恒温、低过热度浇铸可有效改善钢材质量, 为此发展中间包加热技术十分必要。针对近年来日益受到重视的中间包等离子体加热技术的相关热点问题, 系统阐述了其加热原理和设备特点, 介绍了等离子体加热技术国内外设备、冶金功能研发以及应用进展状况, 重点分析了等离子体加热技术对中间包内钢液流场、温度场、夹杂物去除、钢液化学成分的影响, 以及实际应用冶金效果。基于对等离子体加热技术研究和应用的深入认知, 探讨了国内自主研发新型中空石墨电极加热过程发现的新问题, 以及进一步提高其冶金效果的途径。分析表明, 国内自主研发的中空石墨电极等离子体加热装置, 更好的适配了国内钢铁行业变革需求, 是解决浇铸钢水过热度不稳定、钢水洁净度水平低和钢水组织成分不均匀问题的有效途径, 补齐精准定位“一键加热”中间包的智能化短板。

关键词: 连铸; 中间包; 等离子体加热; 流场; 温度场; 夹杂物去除

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00239 **中图分类号:**TF4

Research and Application Progress of Plasma Heating Technology for Continuous Casting Tundish

Li Jingshe¹, Wang Cun², Chen Yongfeng³, Yang Shufeng¹,
Liu Wei¹, Bai Yun^{1,4}, Huang Chengyong^{1,5}, Sun Ye¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Beijing Aobang Advanced Materials Co., Ltd., Beijing, Beijing 101407, China; 3 Xinxing Ductile Iron Pipes Co., Ltd., Handan 056300, China; 4 Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214400, China; 5 Shanghai Meishan Iron and Steel Co., Ltd., Nanjing 210039, China)

Abstract: In the steel industry is facing the new normal situation of transformation and upgrading, with the help of intelligent equipment to drive the steel industry to green and high-end development is expected to achieve the optimization of the steel production organization. Continuous casting tundish with constant temperature and low superheat can effectively improve the quality of steel, so it is necessary to develop the heating technology of tundish. Therefore, tundish heating temperature control technology has been paid more and more attention. Regarding to the hot issues of tundish plasma heating technology, which has attracted increasing attention in recent years, systematically describes the heating principle and equipment characteristics, introduces the research and development of equipment and metallurgical functions of plasma heating technology at home and abroad, and mainly analyzes the influence of plasma heating technology on the flow field, temperature field, inclusion removal and chemical composition of steel liquefaction in tundish, and the metallurgical effect of practical application. Based on the deep understanding of the research and application of plasma heating technology, the new problems found in the heating process of a new type of hollow graphite electrode plasma equipment independently developed in China are discussed, and the ways to further improve its metallurgical effect are discussed. Analysis indicates that the domestically developed hollow graphite electrode plasma heating equipment is better suited to meet the transformation needs of China's steel industry. This equipment provides an effective solution to issues such as the instability of superheat in casting steel, lower cleanliness levels in molten steel, and uneven composition of molten steel. It addresses the shortcomings in the intelligent positioning of the "one-key heating" intermediate package, thus enhancing its precision.

Key Words: Continuous Casting; Tundish; Plasma Heating; Flow Field; Temperature Field; Inclusion Removal

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 52104318; No. 52074030)

作者简介: 李京社(1959—), 男, 博士, 教授; **E-mail:**lijingshe@ustb.cn; **收稿日期:** 2023-11-30

通信作者: 杨树峰(1981—), 男, 博士, 教授; **E-mail:**yangshufeng@ustb.cn

在新一轮科技革命和产业变革背景下,以智能化发展为牵引,叠加“碳达峰”和“碳中和”的目标约束,构建具有自主知识产权的高品质钢材制造体系,有助于推动国内钢铁行业实现钢铁低碳、低成本、高质量持续发展。连铸是现代钢铁生产流程中承上启下的环节,中间包的冶金功能^[1]满足高效率、高质量、低成本,对稳定生产高洁净度钢液显得至关重要。

中间包在传统意义上的冶金功能主要包括:钢液分流、连浇、减压及去除夹杂物^[2-4]等作用^[5]。在浇铸过程难以避免的热损失以及耐火材料的蓄热不稳定,导致难以实现过热度窄范围控制^[6]及凝固坯中心偏析加重^[7-10],甚至发生回炉、停浇、漏钢^[11]等事故。实际生产冶炼工序通常采用高温出钢避免事故发生,依靠低拉速、高过热度等方法实现稳定浇铸。但是,降低过热度可以提高富集溶质的液相在枝晶间的流动阻力,促进等轴晶转变时机^[12-13],有利于生产无缺陷的连铸坯^[14-16]。因此,发展中间包钢液加热功能,实现连铸低过热度、恒温稳定浇铸受到国内外同行的高度重视^[17]。

生产实践表明^[18-22],等离子体^[23]、电渣^[24]、陶瓷电热^[25]、电磁感应^[18]等多种中间包加热技术,均能有效补偿钢液热量损失。等离子体加热装置以其安装便捷、定位精准、高效低耗、安全环保等优势备受关注,将智能化融入设备中以期实现“一键加热”,为实现稳定生产高质量连铸坯奠定基础。基于此,北京科技大学与北京奥邦新材料有限公司共同开发了中空多石墨电极等离子体加热装置,并在国内宝钢梅钢、芜湖新兴铸管等钢铁企业作为一种改善铸坯质量、调整生产节奏的重要冶金手段,企业有望加快推进钢材产品提质升级。鉴于中空石墨电极等离子体加热装置是由国内自主研发的新型设备,为了便于行业合理、高效利用该项新型技术,作者基于团队近年来在相关方面的理论研究、装备开发与应用实践,针对该技术的发展现状进行综合评述。

1 中间包等离子体加热原理

电弧等离子体是一种功能强大的加热源,被广泛应用于多种生产工艺上。等离子体分为高温等离子体和低温等离子体,其中高温等离子体多用于加热、熔化物料,可利用其实现对液态金属的加热、保温等功能。传统等离子体加热装置是将等离子体枪及与阳极底电极相连的钢液作为电流两极。

当等离子体枪将气体吹入两极之间,气体被电离,形成高能量的等离子体。等离子体中的电子与正离子之间发生碰撞,从而产生电子能量的损失和正离子能量的增加,能量在离子与电子之间转移过程中产生的损失,最终以释放热量的形式来实现加热效果。新型中空多石墨电极自行构成回路,石墨电极代替原来的金属枪,摒弃了传统等离子体加热装置沉重的包底阳极,改善加热系统的操作性,降低运行成本。加热过程通过控制机械臂加热位置,改变电压调整等离子体电弧长度以及加热电流。此外,加热系统配备了连续测温装置实时检测钢液温度,实现对钢液温度精准的控制。

利用等离子体产生电弧加热钢液,是一个电场、电磁场、流场、辐射场交叉协同影响的过程,等离子体弧加热钢液过程示意图如图 1 所示^[26]。电弧的电流密度影响磁场分布和焦耳热,焦耳热和洛伦兹力推动氩气等离子体的运动和能量传输,决定了电弧物理场(温度、压力)的分布特征,温度场和压力场影响着等离子体的电导率。这些参数循环、交互作用,共同决定了等离子体加热钢液的效果。

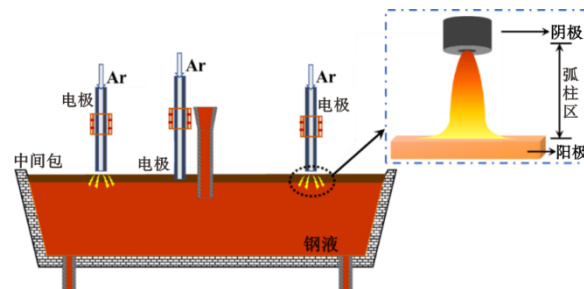


图 1 中间包等离子体弧加热钢液示意图^[26]

Fig. 1 Schematic diagram of plasma arc heating molten steel in tundish^[26]

等离子体加热钢液的过程,需要了解直流电弧等离子体形成过程。根据欧姆定律可知,电流在阴极附近密度最大,阳极附近密度较小。这意味着,阴极尖端附近的电弧温度最高,且由于电磁收缩力大弧形更加收敛;而阳极区附近温降严重,弧形更加外扩,形成钟摆状。近年来,有学者对电弧等离子体形成特征规律及电弧-钢液面的传热规律进行研究^[26],结果表明,电弧温度沿轴向呈现下降趋势;沿径向温度呈现正态分布,在中心轴上出现温度最高值,沿着两侧呈现温度下降趋势。随着等离子体弧的拉长,等离子体弧柱变得细长,等离子体弧末端钟摆范围外扩,末端能量消耗严重导致温度下降

比较明显。对于不同弧长条件下电弧温度分布基本一致,呈现典型的“钟型”。

2 等离子体加热技术装备研发进展

等离子体中间包加热技术的开发可追溯到 20 世纪 80 年代,由英国 TRD(Tetronics Research & Development Co.Ltd)公司首先进行研究和应用^[20, 27]。最初,等离子体加热装置采用交流电电源,阴极材料为具有放射性的 W-Th 电极,阳极为与底电极接触的钢水^[25, 28]。该加热系统应用需对中间包进行改造并增设中间包盖,以减少热量损失、降低等离子体弧产生的强光辐射。同一时期,德国 Demag 公司提出了 W-Th 双层电极,但冷却效果依然较差。此后,美国 PEC(Plasma Energy Corporation)公司采用直流电为加热电源,并将加热等离子体枪设置为阳极且材料改进为无放射性的 Cu 管。德国 BGH(Boschgotthardshütte)公司和日本住友金属公司对石墨等离子体枪进行研发^[29],将原本金属等离子体枪换成中空石墨电极,加热效率更高且极大降低了等离子体加热装置成本。为了提升生产效率、节约能源和提高钢材质量。日本新日铁公司相继开发了单枪式“NS-Plasma I”和双枪式“NS-Plasma II”等离子体加热装置^[30]。单枪式加热装置的等离子体加热枪为阴极,与阳极接触的钢液为阳极,热补偿功率较低,适用于小型连铸机,保护气体消耗以及运行成本较低。双枪式等离子体加热装置在单枪式设备的基础上增加一个枪体,将阳极、阴极枪都放置在钢液上方,双等离子体枪和钢液之间都会形成等离子体弧,加热能力比单枪式高,并且不需要埋设阳极钢板,减少了阳极板铺设及维护费用。除此以外,采用了更长寿命的电极,提高了设备的稳定性。

国内衡阳钢管在 20 世纪 90 年代从英国 TRD 公司引进第一套中间包,但由于缺乏现场经验及关键技术,生产中未达到预期加热效果及未能实现自动加热中间包功能^[31]。唐钢引进 TRD 公司等离子体加热装置,但采用了国内配置的电源及其它附属设备。为了适应中间包等离子体加热装置,唐钢对中间包结构进行优化,增加了溢流坝、挡墙等,从而解决了第一包起弧困难的问题,实现了零液面起弧^[32]。武钢、宝钢从美国 PEC 公司引进等离子体发生装置,但后续相关生产少有报道。台湾中钢引进的美国 PEC 公司 1.0 MW 等离子体中间包加热装置,应用效果良好。同时,国内校企联合共同开展了等离子体加热装置的研究工作。中国科学技术大学

与马钢联合研发等离子体发生器并应用于马钢连铸机;北京科技大学、清华大学、济钢合作研发并用于济钢板坯连铸机^[33-34]。然而,由于未解决加热过程的电磁干扰、噪音、加热效率等关键技术问题,加之成本原因,国内等离子体加热装置研究和应用一度中断。近年来,由于国内钢铁企业面临转型绿色低碳以及高品质钢材生产发展的大趋势,国内青岛特钢^[35]和荣程钢铁^[36]又相继引进新日铁开发的改进型直流等离子体加热装置,并得到不同程度的实际应用。

中国经历了引进、试用、改造和研发等过程,积累了大量的装备使用经验和研究成果。基于此,北京奥邦新材料有限公司与北京科技大学^[26]共同设计了中空多石墨电极中间包等离子体加热装置(PTH-Plasma Tundish Heating),存在两个阴极和一个阳极,利用石墨电极代替水冷金属电极,等离子体加热装置及现场安装示意图如图 2 所示。多个石墨电极自行构成回路,有效提高了加热功率及均匀性,且无需对中间包结构进行改造,减少装置及运行成本。此外,该技术采用 PLC 控制系统,可根据钢液表面随时改变电极位置,消除石墨电极浸入钢液,并结合氩气保护,避免采用石墨电极加热使钢中碳含量、氮含量超标的风险。新型等离子体加热装置分别于 2017 年和 2019 年在芜湖新兴铸管四流圆坯连铸机和宝钢梅山钢铁公司^[37]两流板坯连铸机上成功应用,其加热装置主要由等离子体枪、电源系统、起弧器、气体系统、冷却水系统、连续测温系统、机械臂升降结构、控制台等组成。

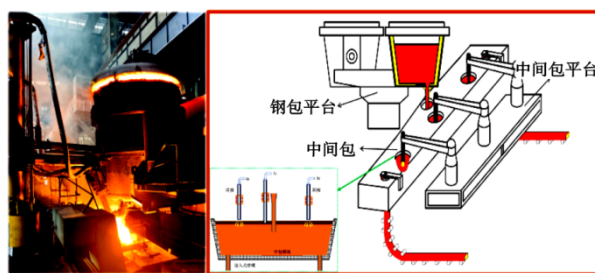


图 2 等离子体加热装置及现场安装示意图^[26]

Fig. 2 Schematic diagram of plasma heating equipment and on-site installation^[26]

3 等离子体加热技术冶金功能研究和应用进展

3.1 等离子体加热中间包内流场研究

中间包内钢液特定的流场是获得良好冶金效果的基础^[38]。因此,为了调控中间包内钢液流场,

在中间包内设置了挡墙、挡坝以及湍流抑制器等控流装置,并针对其具体参数开展了大量研究。钟良才等^[39]针对中间包内湍流控制装置结构研究表明,方形带顶缘或圆形带顶缘的结构能较好改善中间包内流动特性。刘东旭等^[40]采用数值模拟针对不同控流装置组合研究表明,挡墙与挡坝间距主要影响两者之间的钢液以及挡墙右侧钢液的流动特征;挡墙高度主要影响挡墙左侧钢液的回流,同时影响流向水口方向钢液的速度。郑瑞轩等^[41]针对挡墙类型和导流孔研究表明,挡墙导流孔倾角对中间包内钢液流场的影响最大,其次是导流孔孔径和挡墙类型。采用改进的导流隔墙,钢液流出导流孔后,大部分在中间包上部流动,增加钢液的流动路径,减小死区体积,使钢液温度分布比较均匀。综上所述,通过调整中间包内控流装置,可以获得具有良好冶金效果的中间包内流场。在实际生产中,等离子体加热产生的冲击和温度梯度也会对中间包内钢液流场产生较大影响。赵梦静等^[37, 42]在物理模拟中展示了不同蒸汽流量下不同时刻中间包内的流动状态,如图 3 所示。在不加热的情况下流体通过坝体 60~120 s 后直接流至出口,不利于夹杂物的去除,如图 3(a1)-(a2)。当蒸汽流量为 4 kg/h 时,随着时间的增加流体从坝体上向自由表面流动,其趋势与没有等离子体加热时不同,如图 3(b1)-(b2)。当蒸汽流量增加到 6 kg/h 时,流体向自由表面流动的趋势更加明显,如图 3(c1)-(c2)。水模拟实验采用高温蒸汽仪模拟等离子体加热过程,在蒸汽流量为 0 kg/h 时中间包内流动特性较差,导致夹杂物没有足够的时间浮起,钢液的成分和温度不能充分混合,这将严重影响板坯的质量;随着蒸汽流量的增加,有效改善了钢液的流场,促进了钢液的向上流动,延长了钢液的流动路径,有利于夹杂物的去除。

作者团队近期对比分析了等离子体加热不同位点和中间包控流装置对流场的影响。如图 4 所示,等离子枪与钢液之间形成的等离子体弧冲击熔

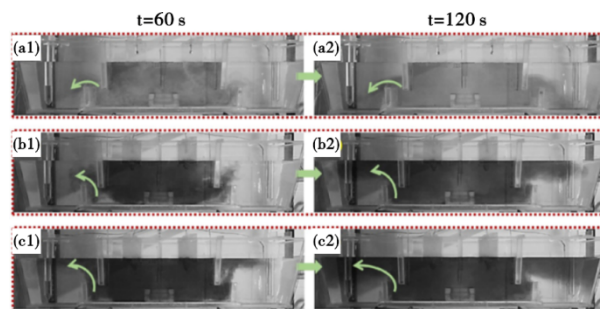


图 3 水蒸气流量对不同时刻下中间包内流场的影响:(a1) 0 kg/h, 60 s; (a2) 0 kg/h, 120 s; (b1) 4 kg/h, 60 s; (b2) 4 kg/h, 120 s; (c1) 6 kg/h, 60 s; (c2) 6 kg/h, 120 s^[37]

Fig. 3 The influence of water vapor flow rate on the flow field inside the tundish at different times: (a1) 0 kg/h, 60 s; (a2) 0 kg/h, 120 s; (b1) 4 kg/h, 60 s; (b2) 4 kg/h, 120 s; (c1) 6 kg/h, 60 s; (c2) 6 kg/h, 120 s^[37]

池表面形成凹坑产生了一个局部流场,在等离子体的驱动下液面上部形成顺时针方向的涡流,与主流股相互作用,在较大范围内影响中间包内主流股运动,进而影响中间包的冶金效果;而挡墙或挡坝主要是改变主流股的流动方向,影响范围较小。基于此,王勇^[43]针对等离子体加热位置与控流装置对中间包流场的耦合作用进行研究,表明等离子体加热位置位于挡墙内侧时,可以消除挡墙外侧上部的死区,且随着加热功率提高,死区比例减小;而在挡墙外侧加热时,死区比例变化不大;同时,缩小挡墙与挡坝间距,可以提高加热点处钢液的流动速度,改善加热效果。

现在研究表明,等离子体加热功率、加热位点、中间包控流装置等均会对中间包内流场产生不同程度影响,而中间包控流装置对流场影响范围最小。因此,等离子体加热装置适用不同结构类型的中间包,且可以快速顺应生产节奏。

3.2 等离子体加热中间包内温度场及升温速率研究

为了实现连铸过程顺利进行的同时提高铸坯

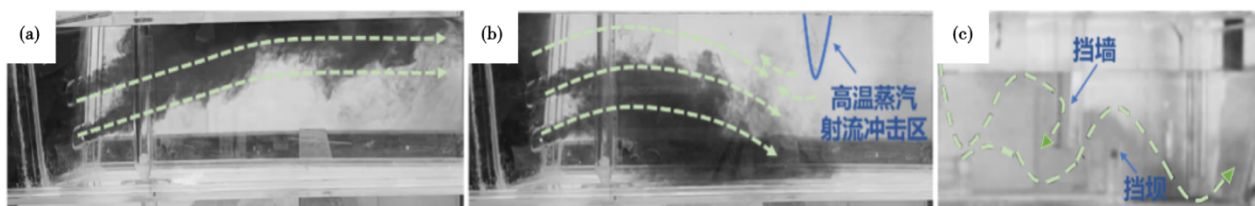


图 4 水模拟挡墙、挡坝和射流冲击对流场的影响:(a)加热点靠近注流区,(b)加热点靠近边部,(c)挡墙和挡坝

Fig. 4 Water simulates the influence of retaining wall, retaining dam and jet impact on flow field: (a) the hot spot is close to the flow injection area, (b) the hot spot is close to the side, (c) retaining wall and retaining dam

质量,精准控制中间包内的钢液温度十分重要。为了避免停浇、水口结瘤等情况出现,通常采用提高出钢温度的方法,但该方法温度控制不稳定且增加钢液加热成本。等离子体加热首要目的是补偿浇铸过程中钢液热损失,实现低过热度、中间包内温度均匀、恒温浇铸。因此,要求等离子体加热技术能够实现高效、稳定加热。青岛特钢等离子体加热实践表明^[35],随着加热功率的提高,加热效率随之增加;钢液过热度波动可以控制在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内^[44],且整个加热过程温度变化平稳,实测热效率一般为60%~70%^[45-46]。因此,提升等离子体加热中间包热效率,降低加热成本,成为当前中间包等离子体加热技术热点问题。

等离子体加热技术主要是通过等离子体弧实现电能和热能的转换,而加热条件下钢液-渣界面的不稳定性,导致电极与钢液之间形成的等离子体弧波动,系统输出功率和热效率下降^[33]。为了提升加热效率,电弧炉或LF炉通常采用长弧加热,并造泡沫渣包裹电弧^[47-48]。研究表明,等离子体加热的主要传热方式为电弧对钢液面的辐射传热、耐火材料反射到钢液面的间接辐射传热以及电阻加热,热量占比分别为18%、52%和30%^[36, 49]。因此,在中间包内炉渣较少时,等离子体加热装置能够较好的调控钢水温度,但在炉渣变厚时不仅阻碍钢液直接吸收等离子体和炉衬的辐射热,使绝大部分辐射热量被保护渣吸收,并且由于中间包内湍动强度较低,渣中的热量不能快速传递给钢液。同时,由于炉渣自身阻抗增大消耗了许多电压,等离子体的电压降低,加热升温效果明显下降^[33]。

除上述加热机理导致等离子体加热效率较低外,等离子体加热属于大功率点加热,中间包内流场湍动能强度低,加热点处热量无法快速传导至周围,会形成“热点”,且加热点上部钢液会由于热浮力作用而滞流,降低传热效率^[50]。采用等离子体加热后,中间包内钢液的温度场分布并不均匀,通常是中间包上表面温度高、底部温度低^[43, 51-52]。等离子体加热虽然明显缩小了中间包边部低温区域,提升了水口钢液温度,减小纵向温差,但加热点附近热量聚集,且随加热功率提升,高温区域体积增加,各流温度均匀性较差。

为解决这一问题,冶金工作者尝试调整等离子体加热位置或结合底吹、电磁搅拌技术等方式,以期改善包内钢液温度的均匀性和加热效果。王

勇^[43]和 Barron-Meza 等^[53]针对等离子体在中间包内的加热位置及控流装置研究表明,采用挡墙内部加热时,加热点位于流股上端,对流换热效率较高,且将挡墙向边部移动,缩短二者间距,钢液从挡墙流出后向上运动,提高加热点处钢液的流动速度,改善加热效果,钢液的温度场分布更均匀。采用中间包搅拌技术加强钢液搅拌,也能均匀中间包内钢液温度。钟云涛等^[32]将等离子体加热技术复合电磁搅拌技术,加热点上部钢液以0.2~0.4 m/s的速度旋流,加速了中间包内钢液的对流传热,整体温度均匀化,降低了水口处温度波动,提高了等离子体加热热效率。樊俊飞等^[50, 54]将等离子体加热技术与底吹氩技术结合,相比无底吹时加热区域上部高温钢液不能很好地混合并向两侧传导,加热区域钢液温度比较均匀,两侧温度分布情况有所改善。赵梦静等^[37, 55]对比分析了自然浇铸、等离子体加热和等离子体加热结合底吹搅拌工况下中间包内温度场特征,如图5所示。等离子体加热有效改善了浇铸过程中间包内钢液的温降现象,但加热点处的高温钢液积聚现象严重,且随着加热时间的延长,中间包内钢液温差越来越大,采用底吹搅拌后高温钢液的积聚现象基本消除。除此以外,对加热点与中间包温度之间的关系展开研究,结果表明当加热点位于挡墙内侧时,处于中间包主流股上端,在此加热热量更容易随主流股传输至流场末端;随着加热点向外侧移动时,加热点上端热量补偿效果弱,特别是当加热点在挡墙外侧时,热量在末端积聚形成局部高温区,导致热损失增加从而降低热效率。这些研究为中间包等离子体加热的实际使用提供了重要的理论支撑,更好的指导了实际应用,加快等离子体加热装置在不同中间包上的高效使用。

作者团队近期进行了等离子体加热中间包工业试验,对中间包内钢液温度均匀性及出钢过程中温度稳定性进行统计分析^[26],测温流程如图6所示。宝钢梅钢(同一加热功率)、芜湖新兴铸管(不同加热功率)进行了多炉次等离子体加热试验,浇铸过程中温度变化如图7所示。图7中点线部分为浇铸过程中等离子体加热(PH-Plasma Heating)期间的温度变化,在开启等离子体加热装置后,钢液温度有一段响应时间,随后钢液温度按照一定升温速率稳定升高。等离子体加热有效减缓了中间包内大幅温降现象,对稳定中间包钢液温度具有显著效果。加热功率决定了升温速率,在2400 kW的高加热功

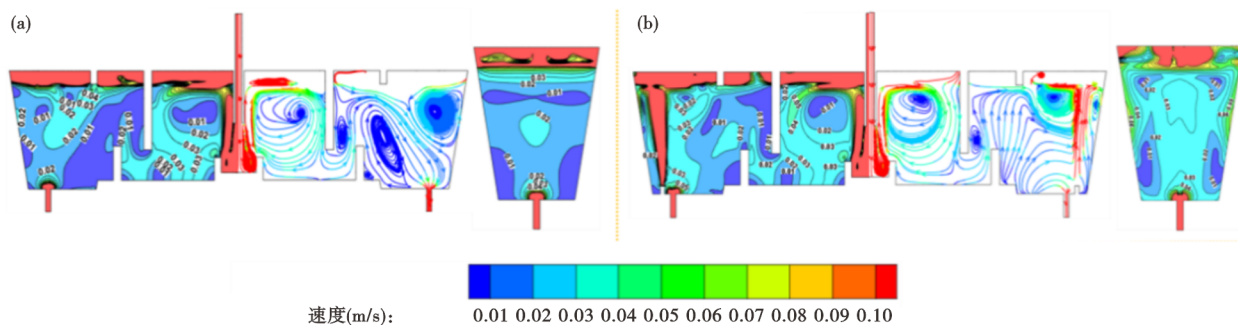


图5 中间包内钢液纵截面温度云图: (a) 等离子体加热, (b) 等离子体加热复合底吹氩^[55]

Fig. 5 Temperature cloud of transverse and longitudinal section of molten steel in tundish: (a) plasma heating, (b) plasma heating composited with bottom blowing argon^[55]

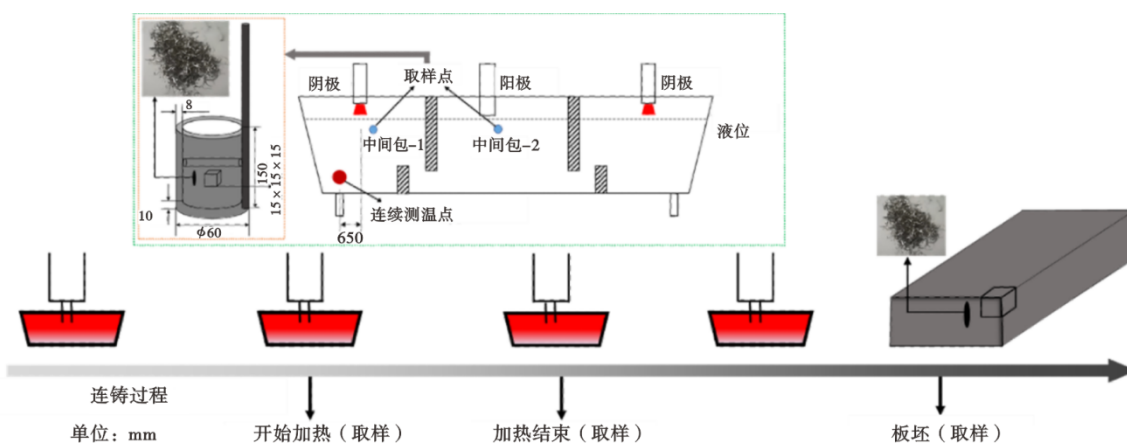


图6 等离子体加热前后取样、测温流程及试样加工示意图^[26]

Fig. 6 Schematic diagram of sampling before and after plasma heating, temperature measurement process and sample processing^[26]

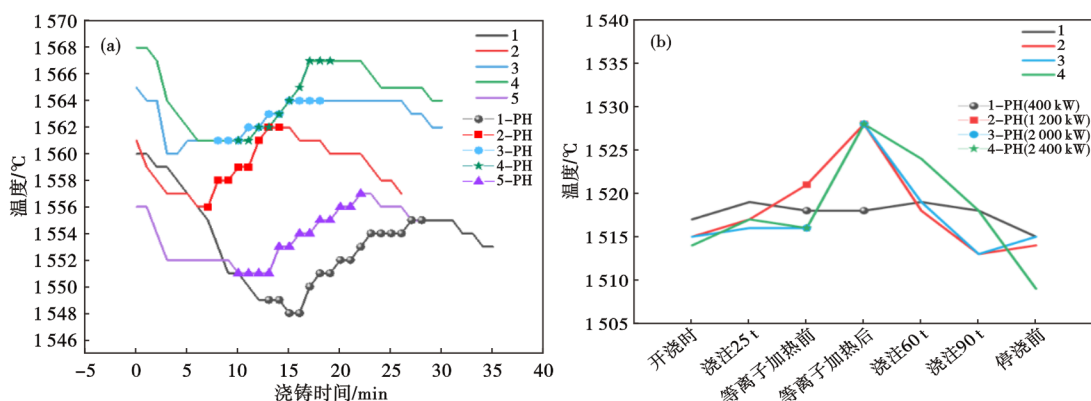


图7 不同企业应用等离子体加热前后中间包内温度变化图: (a) 宝钢梅钢^[26], (b) 芜湖新兴铸管

Fig. 7 Diagram of temperature variation in tundish before and after plasma heating in different enterprise applications: (a) Shanghai Meishan Iron and Steel^[26], (b) Wuhu Xinxing Ductile Iron Pipes

率下实现快速且大幅度的加热效果,可以避免停浇等事故的发生;在400 kW的低加热功率下可满足钢液保温功能,选择合适的加热时机、加热功率,有望实现中间包恒温浇铸。等离子体加热装置在使用过程中,可根据企业实际生产情况个性化定制加热工艺参数。

3.3 等离子体加热对中间包内钢液中C、N的影响

根据西华特定律,中间包内钢液具有强烈的吸氮、吸氧趋势^[56-57]。为了避免浇铸过程中钢液增氮,浇铸过程除采用水口、氩封等保护措施外,钢液上部会加入一定量覆盖剂,隔绝钢液和空气,抑制浇铸过程吸氮^[58-59]。然而,等离子体弧对液面的冲击

及保护气体引起的翻滚会排开钢液表面覆盖剂,使钢液暴露在大气中形成气液界面,且等离子体弧会吸附空气,并激发、电离生成大量异构形态的活化分子,使其更容易溶解进入钢液^[60-61]。同时,石墨材质的等离子体枪也会带来钢液增碳风险^[62]。因此,冶金工作者针对石墨材质的等离子体加热装置,对钢液中碳、氮控制技术开展相应试验研究。

为了避免加热过程中钢液增氮,等离子体加热通常采用保护性气体对加热点形成气封,隔绝钢液与空气。骆忠汉^[63]针对加热过程使用保护性气体的研究表明,在非密闭中间包内采用氮气或氩气作为等离子体气源时,钢液增氮量较高,而在密封中间包内,大量氩气充满中间包时可起到保护作用,即使采用氩气和氮气混合气体,增氮量也会较低,说明采用氩气作为等离子体气源时可以起到一定的氩封作用,但如果吹氩量不足,仍然难以完全覆盖等离子冲击形成裸露区域。胡志高等^[64]采用直流等离子体炉研究了保护渣对钢液吸氮的影响,结果表明,保护渣尤其是渣中的 TiO_2 及 B_2O_3 能有效地减缓在等离子体弧作用下出现的钢液吸氮现象。采用石墨作为底电极的加热系统生产实践表明^[31],浸入钢水中的石墨电极会全部被侵蚀,平均增碳量为0.003 6%。

新型等离子体中间包加热装置,采用直流电源并在氩气氛围中使用,中空电极材料为石墨,对加热前后中间包内钢液进行检测分析。结果表明,钢液中N含量变化不大,由于石墨电极的损耗导致C含量略有升高^[51],但 $w[C]$ 在 $3 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 的绝对值范围波动^[26]。同时,等离子体加热装置由PLC系统控制,可根据钢液表面随时改变电极位置,使石墨电极不会浸入钢液中,避免钢中碳含量的显著变化^[34]。生产实践证明,等离子体加热装置在使用过程中,调整其使用方式可以有效避免对钢液的纯净度产生影响。

3.4 等离子体加热对中间包内钢液中夹杂物去除的影响

净化钢液、脱除钢液中夹杂物是中间包重要作用之一,对于夹杂物去除的衡量,还是以实验检测与统计为主。在冶金过程中,夹杂物的去除主要依靠自身浮力或者吹气搅拌带动夹杂物上浮、聚集长大和吸附在钢包内壁来实现^[65]。中间包内钢液流动状态相对稳定,钢液中夹杂物不会随着强对流运动或卷入,为钢液中夹杂物的上浮提供了动力学条

件。优化中间包内控流装置以延长钢液停留时间,避免短路流,且以主流股沿渣面运动为目标,确保钢液中夹杂物有充足时间上浮,并尽量被覆盖剂吸收^[66-68]。任何影响中间包流场和渣系的工艺措施,都会对中间包内钢液中夹杂物上浮造成影响。

等离子体加热对中间包内钢液中夹杂物去除效果的影响,一般分为两个方面^[69]:一是等离子体加热导致中间包内钢液产生上升流,有助于钢液流经渣层,易于夹杂物上浮吸收;二是加热后渣层温度高、流动性好,提高了渣对夹杂物的吸收能力,但在高温熔渣态,覆盖剂对钢中典型夹杂物的吸收效果还需进一步进行验证。叶茂林^[51]对方坯连铸机等离子体加热前后的中间包内钢液中夹杂物特征和数量进行了统计分析,发现加热后夹杂物的种类、数密度都呈现下降的趋势,而平均尺寸变化不大,说明等离子体加热改善了中间包内钢液的流场情况,促进了小尺寸夹杂物的碰撞上浮行为,有利于小尺寸夹杂物的去除。赵梦静^[26]对板坯连铸机等离子体加热前后的中间包内钢液中夹杂物特征和数量进行了统计分析,结果表明,等离子体加热对中间包内钢液中夹杂物类型及尺寸无明显影响,但是对夹杂物成分占比产生一定影响。等离子体加热后,试样中 Al_2O_3 -MnS复合夹杂物占比降低, Al_2O_3 夹杂物占比略有升高,MnS夹杂物占比大多数降低。因此,等离子体加热有利于铸坯中尺寸较大夹杂物的去除。

目前研究大多依据工业试验讨论夹杂物的去除效果,这是一种较为粗糙的定量定性方式。近年来,关于夹杂物去除的数值模型进展迅猛^[70],去除过程主要包含夹杂物在钢液中长大上浮、穿越钢-渣界面、被渣相溶解吸收三个步骤,而夹杂物在界面处的运动状态决定了夹杂物是否能去除,夹杂物在钢-渣界面处的受力分析如图8所示^[71]。以往模型仅包含流场,而等离子体加热过程存在电场-磁场-流场-温度场的耦合,模型的复杂性及高难度使得目前等离子体加热条件下的夹杂物去除模型十分匮乏,需要进一步加强研究和分析。

4 问题与讨论

近年来,钢铁行业面临绿色低碳及高品质钢材生产转型的关键时期,促进了中间包加热装置在企业中应用。国内自主研发的新型等离子体加热装置,缓解了国内钢铁行业由于技术装备短板造成的“卡脖子”难题,为解决浇铸钢水过热度不稳定、钢

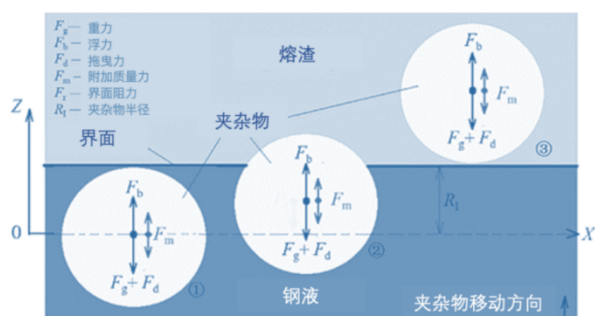


图 8 夹杂物在钢-渣界面去除动态受力分析模型示意图^[71]
Fig. 8 Schematic diagram of dynamic force analysis model for steel-slag interfacial removal of inclusions^[71]

水洁净度水平低和钢水组织成分不均匀的问题提供了有效途径。随着中间包钢液加热技术的不断发展,其技术优势越来越突出。对于新型等离子体中间包加热技术,相关配套研究亟待深入。尤其是在高温条件下适用的中间包覆盖剂、耐材以及系统性加热工艺等方面的开发,成为中间包加热进一步发展的限制性环节。

4.1 中间包等离子体加热工艺研究

中间包内钢液的温度下限主要依靠控制上连铸平台高温钢液来调整,在中间包浇铸过程中,温度波动大主要有两个原因:第一,开浇炉次提温过高,虽然可以有效补偿中间包的蓄热不足问题,但同时也会扩大整个浇铸过程的过热度波动范围;第二,浇铸末期间包钢液温度持续降低,导致下一炉次浇铸前期温度较低。当中间包内钢液温度较低时,等离子体加热能够及时补偿耐火材料及钢液自身的热量损失,避免了低温浇铸事故。由于中间包钢液温度变化的复杂性以及大包补偿中间包钢液热量的滞后性,致使采用简单的低温加热或单段加热工艺不能有效减小浇铸过程过热度波动范围,如图 9 所示^[55]。在浇铸前期加热时,中间包钢液快速升温使得中后期温度较为平稳,但浇铸末期钢液温度降低较快;在浇铸中后期继续加热可以减缓钢液温度波动继续扩大,能实现中间包温度较为平稳,有利于连续稳定浇铸。因此,利用等离子体加热装置实现低过热度、恒温浇铸,需要根据实际浇铸过程中间包钢液温度变化规律,改变加热时机、加热时长、加热功率等参数,形成一套完整的加热工艺体系。

4.2 中间包等离子体加热技术覆盖剂研发

等离子体加热是利用高能量的等离子体气流对钢液进行加热,加热过程可能会对覆盖在钢液表

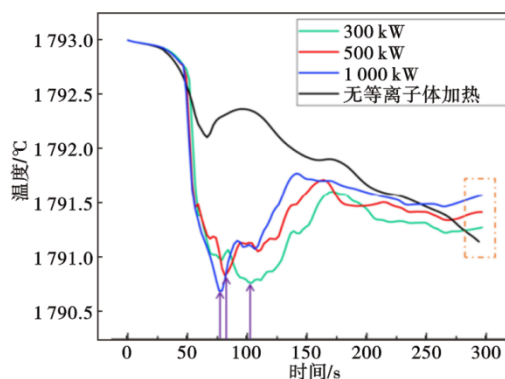


图 9 浇铸过程中间包温度变化统计^[55]

Fig. 9 Statistics of tundish temperature variation during casting^[55]

面的覆盖剂产生一定的影响,从而使其物理化学性质在一定程度上发生变化,进而影响中间包等离子体加热的热效率以及覆盖剂对钢液中夹杂物的吸附等冶金性能。目前,国内还没有关于等离子体加热对中间包覆盖剂冶金性能影响的系统研究。因此,作者团队对等离子体加热后覆盖剂宏观形貌、化学成分、结晶性能、物相结构等特性进行了研究。等离子体加热前后的覆盖剂样品成分变化不大,但宏观形貌由疏松多孔变为均匀、致密的玻璃态^[72],且覆盖剂微观晶体结构的结晶率变低使得玻璃性能变好。此外,目前工业试验表明覆盖剂渣层过厚时加热效率降低,关于覆盖剂泡沫化埋弧操作的使用条件有待进一步研究。

在未来的工作中,应继续针对不同加热条件下夹杂物运动的模拟研究进行深入探索,实现等离子体加热过程中间包内钢液中夹杂物的运动行为精准预测,探明不同覆盖剂成分对夹杂物吸附效果。为提高中间包等离子体加热电能的利用率,需要明确中间包覆盖剂在等离子体加热状态下与钢水、等离子体、中间包耐火材料间复杂的传热规律,建立等离子体加热状态下中间包系统内各相之间的动态平衡方程,确定稳态浇铸和钢水成分稳定的参数窗口。结合热物性、耐材寿命、加热效率、钢液洁净度等多因素,建立在等离子体加热条件下的覆盖剂成分设计原则与模型,开发与工业生产条件适配的高吸附、高保温覆盖剂,以提高等离子体加热装置的实际应用效果。

4.3 等离子体加热中间包耐材开发

在等离子体加热应用中,存在中间包耐材侵蚀加重的现象,尤其是在阳极区渣线位置侵蚀较为严重。耐火材料侵蚀主要是由于热胀冷缩使耐材渣

线位置产生微裂纹,而裂纹加速了化学侵蚀,化学侵蚀反应又促进了裂纹的形成与剥落,循环往复造成耐材剥落和掉块等现象。由于等离子体加热电弧中心温度可高达20 000 °C,使得覆盖剂长期处于熔融状态且等离子体弧冲击对液面产生扰动,加剧了熔渣对耐材的冲刷作用。同时,在等离子体加热的超高温条件下,熔渣-钢液-耐材之间存在低温条件下未出现的电化学反应。因此,关于等离子体加热条件下耐火材料的侵蚀机理还需进行深入研究,需要基于侵蚀反应的限制性环节,建立等离子体加热条件下覆盖剂对耐材侵蚀速率模型,为适配等离子体加热工艺的耐火材料长寿化提供理论支撑。

5 结论与发展

连铸中间包加热控温技术是当前钢铁生产中具有代表性的新技术,对实现冶炼低温出钢、连铸低过热度、恒温浇铸,进一步降低碳排,提升连铸生产效率、产品质量都具有重要意义。同时,也极大丰富了中间包冶金学的研究内容。

近年来,中间包加热技术在国内钢铁企业得到快速推广,其技术经济性、提升与稳定铸坯质量的效果也在不同企业得到体现。具有国家自主知识产权的新型中空石墨等离子体加热技术,克服了传统等离子体加热技术的缺点。由于设备与生产之间需要时间进行适配运行,新型等离子体加热装置的成熟使用工艺及技术理论亟待深入研究与解决。比如,等离子体加热时超高温条件下覆盖剂的物性及冶金性能的变化、中间包耐火材料的过度消耗、等离子体使用的加热工艺路线等问题。此外,如何确定不同生产条件下的最佳工艺参数,如何根据具体钢种制定更高效的加热制度,如何更加精准控制夹杂物去除,如何降低浇铸过程中温度波动,以及如何稳定控制等离子体弧等均是未来需要进一步深入研究的方向。相较于国外设备的引进,自主研发设备可以更好满足钢铁行业的“中国时代特色”需求,而新设备的成熟应用及推广是一个系统性的工作,需要在实际生产中多方配合并进行不断完善,共同促进中国钢铁工业高质量发展,为打造制造强国奠定坚实基础。

参考文献

- [1] Mclean A. The Turbulent Tundish-Contaminator or Refiner: ISS Steelmaking Conference Proceedings [C]. Toronto: Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. 1988. 3.
- [2] 姜学锋, 时朋召, 王玉平, 等. 单流厚板坯中间包物理模拟研究和应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 16-21.
- [3] 时朋召, 徐李军, 谢桂强, 等. 中间包通道式过滤器对硅钢W470中夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 1-4.
- [4] 张新文, 施嘉凯, 汪德伟, 等. 连铸开浇首炉二次氧化程度对比与分析[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 56-60.
- [5] Quan Q, Zhang Z X, Qu T P, et al. Physical and numerical investigation on fluid flow and inclusion removal behavior in a single-strand tundish [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30(6): 1182-1198.
- [6] Moore C, Heanley C P, Cowx P M. Plasma tundish heating as an integral part of continuous casting [J]. Steel Times International, 1989, 13(2): 44-46.
- [7] Dong Z Y, Chen Q Q, Yang Y G, et al. Experimental and numerical study of hydrodynamic cavitation of orifice plates with multiple triangular holes [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256-259: 2519-2522.
- [8] Ludlow V, Normanton A, Anderson A, et al. Strategy to minimise central segregation in high carbon steel grades during billet casting [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2005, 32(1): 68-74.
- [9] Hui Y J, Yu Y, Wang L, et al. Strain-induced precipitation in Ti micro-alloyed interstitial-free steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(4): 385-392.
- [10] Zuo Q W, An X A, Yang J B, et al. Effects of over heat and casting speed on quality of GCr15 billet [J]. Advanced Materials Research, 2014, 997: 534-537.
- [11] 孟晓亮, 罗 森, 周业连, 等. 板坯连铸结晶器液位瞬时异常波动的时频特性[J]. 冶金自动化, 2023, 47(6): 64-71.
- [12] 曹江海, 侯自兵, 郭中傲, 等. 过热度对轴承钢凝固组织整体形貌特征及渗透率的影响 [J]. 金属学报, 2021, 57(5): 586-594.
- [13] 闵 义, 刘承军, 王德永, 等. 37Mn5连铸圆坯中心等轴晶率预测[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(10): 38-43.
- [14] 杨 武, 仇圣桃, 陶红标, 等. 降低过热度对方坯凝固组织的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(2): 45-48.
- [15] Okorokov G N, Donets A I, Shevtsov A Z, et al. A heating tundish—The final link in a continuous steelmaking technology [J]. Metallurgist, 1998, 42(1): 15-20.
- [16] Zu L Y, Meng H J, Xie Z. A compensation model of continuous temperature measurement for molten steel in tundish [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(7): 6-11.
- [17] Qu T P, Liu C J, Jiang M F. Numerical simulation for effect of inlet cooling rate on fluid flow and temperature distribution in tundish [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(7): 12-19.
- [18] Ueda T, Ohara A, Sakurai M, et al. A tundish provided with a heating device for molten steel: KR19840002332U [P]. 1984.
- [19] 张定基, 李克厚. 中间包钢水加热装置[J]. 钢铁研究, 1984,

- 12(1): 69.
- [20] 毛 斌, 陶金明, 蒋桃仙. 连铸中间包通道式感应加热技术[J]. 连铸, 2008, 33(5): 4-8.
- [21] 王日红. 中间包等离子加热技术在合金钢连铸中的应用[J]. 江苏冶金, 1997, 25(6): 39-40+77.
- [22] 陈开义, 常立忠, 王建军. 连铸技术的发展现状与趋势[J]. 宽厚板, 2015, 21(5): 38-43.
- [23] 向顺华, 刘应书, 高仲龙. 连铸中间包中钢水的加热[J]. 工业加热, 1993, 22(6): 8-12.
- [24] 姜周华, 李晨隽, 姜永林, 等. 钢水炉外电渣加热的实验研究[J]. 钢铁, 1995, 30(3): 12-15.
- [25] 佐祥均, 阎建武, 罗利华, 等. 等离子中间罐加热技术在连铸过程中的应用[J]. 钢铁技术, 2016, 45(1): 10-18.
- [26] 赵梦静. 电弧等离子体加热连铸中间包钢液传输行为及应用基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, .
- [27] 白连臣, 彭国仲. 中间包等离子加热技术的发展与应用[J]. 河北冶金, 1996(1): 29-34.
- [28] 么秋杨. 连铸中间包等离子加热技术国内外应用及发展[J]. 四川冶金, 1997, 19(2): 52-55.
- [29] 田建英, 张雪良, 李京社, 等. 连铸中间包等离子加热技术综述[J]. 宽厚板, 2017, 23(2): 45-48.
- [30] 橘高节生, 王艳红. 新日铁新开发的双枪式中间包等离子加热装置“NS-Plasma II”[J]. 鞍钢技术, 2005(6): 50-53.
- [31] 钟云涛, 潘汉玉, Emmanuel Abiona, 等. 中间包等离子加热和电磁搅拌复合技术的开发与使用[J]. 连铸, 2016, 41(6): 37-41.
- [32] Abiona E, Yang H, Chaudhary R, et al. Development of Plasma Heating and Electromagnetic Stirring in Tundish: 8 th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials[C], Cannes: Springer Netherlands, 2015: 1.
- [33] 李润生, 李延辉, 周大刚, 等. 中间包钢水等离子加热技术在我国应用中的问题与探讨[J]. 钢铁, 1999, 34(1): 70-73.
- [34] 范光前, 邹海辉. 等离子体加热中间罐技术在我国的应用及前景[J]. 连铸, 1998, 23(2): 12-13+45.
- [35] 蒋 军, 路海波, 李勤勇, 等. 中间罐等离子加热技术在青岛特钢的应用[J]. 连铸, 2018, 43(2): 7-11.
- [36] 金 鑫. 中间包等离子加热应用[C]. 2019全国高效连铸应用技术及铸坯质量控制研讨会论文集. 扬州, 2019: 106-109.
- [37] Zhao M J, Wang Y, Yang S F, et al. Flow behavior and heat transfer of molten steel in a two-strand tundish heated by plasma[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 561-572.
- [38] Chattopadhyay K, Isac M, Guthrie R I L. Physical and mathematical modelling to study the effect of ladle shroud misalignment on liquid metal quality in a tundish[J]. ISIJ International, 2011, 51(5): 759-768.
- [39] 钟良才, 张 立, 黄耀文, 等. 湍流控制装置的结构对中间包流体流动特性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(4): 6-9.
- [40] 刘东旭, 龚 伟, 朱江江, 等. 控流装置对板坯中间包流场的数值模拟优化[J]. 连铸, 2023, 48(2): 10-18+33.
- [41] 郑瑞轩, 赵立华, 姚 骋, 等. 四流中间包流场影响因素分析与优化[J]. 炼钢, 2021, 37(1): 63-72.
- [42] 姚聪林, 朱红春, 姜周华, 等. 电弧炉内长电弧等离子体的数值模拟[J]. 工程科学学报, 2020, 42(S1): 60-67.
- [43] 王 勇. 板坯连铸中间包等离子加热关键技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [44] Wang Y, Wang C, Zhao M J, et al. Development and application of a multi-graphite electrode DC plasma tundish heating[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(11): 1800-1806.
- [45] Kittaka S, Wakida S, Kanki T. Nippon Steel Type Tundish Plasma Heater "NS-Plasma I" for Continuous Caster[J]. South East Asia Iron and Steel Institute, 2001, 30(2): 38-46.
- [46] 李延辉, 胡学军, 李润生, 等. 连铸中间包钢水等离子加热工艺开发与实践[J]. 冶金能源, 1998, 17(5): 11-17+57.
- [47] P. Porracin, D. Onesti, A. Grosso, 等. 泡沫渣的生成和交流电弧炉动态最优化控制[J]. 钢铁, 2007, 42(6): 88-90.
- [48] 张东力, 王晓鸣, 匡世波, 等. LF精炼渣发泡性能的实验研究[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(6): 12-15.
- [49] 唐海燕, 刘锦文, 王凯民, 等. 连铸中间包加热技术及其冶金功能研究进展[J]. 金属学报, 2021, 57(10): 1229-1245.
- [50] 樊俊飞, 卢金雄, 刘俊江, 等. 六流连铸中间包等离子加热过程的数值模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(4): 429-433.
- [51] 蔡亦凡, 孙彦辉, 杨文中, 等. 变径通道在八字型感应加热中间包中的应用[J]. 炼钢, 2020, 36(2): 42-47.
- [52] Wang Q A, Li B K, Tsukihashi F. Modeling of a thermo-electromagneto-hydrodynamic problem in continuous casting tundish with channel type induction heating[J]. ISIJ International, 2014, 54(2): 311-320.
- [53] Barron-Meza M A, de J Barreto-Sandoval J, Morales R D. Physical and mathematical models of steel flow and heat transfer in a tundish heated by plasma[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31(1): 63-74.
- [54] 樊俊飞, 刘俊江, 卢金雄, 等. 等离子加热六流连铸中间包底吹气过程数值模拟优化研究[J]. 宝钢技术, 2007(5): 67-70.
- [55] Zhao M J, Wang Y, Yang S F, et al. Flow field and temperature field in a four-strand tundish heated by plasma[J]. Metals, 2021, 11(5): 722.
- [56] 傅 杰. 现代电炉炼钢理论与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [57] Zhang F J, Li J S, Liu W, et al. The thermodynamics and kinetics of a nitrogen reaction in an electric arc furnace smelting process[J]. Materials, 2022, 16(1): 33.
- [58] 刘志国, 王洪兴. 连铸保护浇注工艺改进[J]. 中国冶金, 2013, 23(8): 38-41.
- [59] 张江山, 刘 青, 杨树峰, 等. 长水口对连铸中间包钢液保护浇注作用的研究进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(8): 939-948.
- [60] 郭汉杰. 冶金物理化学教程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [61] 张慧书. 采用中空电极喷吹气体的新型LF炉内冶金行为的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [62] 王 存, 潘公平, 杨春政, 等. 中间包钢水等离子体加热试验

- 研究[J]. 钢铁, 1997, 32(9): 21-24.
- [63] 骆忠汉. 连铸中间包等离子加热的冶金作用[J]. 炼钢, 1996, 12(5): 19-23.
- [64] 胡志高, 邹海辉, 王文明, 等. 氮等离子体弧加热中间包用保护渣[J]. 钢铁研究学报, 1997, 9(4): 13-17.
- [65] Miki Y, Thomas B G. Modeling of inclusion removal in a tundish [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1999, 30(4): 639-654.
- [66] 李 键, 卢金霖, 罗志国, 等. 中间包气幕挡墙去除夹杂物的数值模拟[J]. 炼钢, 2023, 39(3): 52-57+85.
- [67] 李中华, 田 伟, 吴飞鹏, 等. 中间包结构对钢液流动及夹杂物去除的数值模拟研究[J]. 炼钢, 2023, 39(2): 42-48.
- [68] Thomas B G, Zhang L. Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting[J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2007, 41(10): 1181-1193.
- [69] 刘 涛, 赵梦静, 杨树峰, 等. 中间包等离子加热工业试验[J]. 中国冶金, 2020, 30(10): 36-40.
- [70] Li J S, Sun Y, Yang S F, et al. Research status of numerical simulation of nonmetallic inclusions interfacial removal[J]. Steel Research International, 2023, 94(6): 1611-3683.
- [71] Yang S F, Liu W, Li J S. Motion of solid particles at molten metal-liquid slag interface[J]. JOM, 2015, 67(12): 2993-3001.
- [72] 陈 赛, 杨树峰, 叶茂林, 等. 等离子加热对中间包覆盖剂性能的影响[J]. 连铸, 2021, 46(3): 1-6.

《特殊钢》期刊官方投稿网站

www.specialsteeljournal.com

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 咨询电话:0714-6297386 0510-80673212

《特殊钢》编辑部邮箱:E-mail:tsghs@sina.com