DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.034

连续铸造技术发展与应用(二)

张曦月[1],陈孝阳[1],李孔德[1],聂煌辉[1],许征兵[1,2],曾建民[1,2]
(1. 广西有色金属及特色材料加工重点实验室，广西 南宁 530004; 2. 广西生态型铝产业协同创新中心，广西 南宁 530004)

摘　要:采用了新的分类方法,通过对大量文献的分析,更为直观地将连续铸造技术分为两大类:与铸型壁接触的铸造方法和不与铸型壁接触的铸造方法,并以时间顺序逐个介绍其发展历程和优劣,进而在对一种技术优劣分析的基础上引出另一技术,因而能够清晰地看出连铸技术的整体发展脉络。对连铸技术的发展现状做了分析并提出了新的展望。

关键词:连续铸造技术;发展与应用;展望

中图分类号: TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)09-1012-06

Development and Application of Continuous Casting Technology (II)

ZHANG Xiyue[1], CHEN Xiaoyang[1], LI Kongde[1], NIE Huanghui[1], XU Zhengbing[1,2], ZENG Jianmin[1,2]
(1. Guangxi Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metal and Featured Materials, GuangXi University, Nanning 530004, China; 2. Center of Ecological Collaborative Innovation for Aluminum Industry in Guangxi, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A new classification method was used to classify continuous casting techniques into two major categories: casting methods that contact with casting mould walls and casting methods without contact with casting mould walls. The development process and advantages and disadvantages of continuous casting technology were introduced one by one in time order, and the advantages and disadvantages of one technology were analyzed to lead to another technology, so that the overall development of continuous casting technology can be clearly presented. The development status of continuous casting technology is analyzed and new prospects are put forward.

Key words: continuous casting technology, development and application, prospect

上期的《连续铸造技术发展与应用(一)》中,对连续铸造方法进行了分类,介绍了与型壁发生接触的连续铸造方法,包括普通模铸造、低结晶器铸造、隔热膜铸造、热顶铸造等立式铸造和横向铸造;介绍了一些新型的接触型壁式的新型连续铸造,包括金属复层材料连续铸造,以及 Gasar 连铸。并对传统接触型壁式连续铸造和新型连续铸造的原理及适用的优劣进行了对比。

本期对不与型壁发生接触一类连续铸造方法进行介绍。着重介绍电磁连续铸造、热型连续铸造等,并对连续铸造技术今后的发展进行展望。

1　不与型壁发生接触的铸造方法

连铸过程中,由于结晶器的振动和使用保护渣,铸坯表面易于产生振动波纹等缺陷。因此,近年来发展的连铸工艺，铸坯表面的质量成为必须解决的课题。而通过凝固铸锭不与型壁发生接触或者直接用外力直接取代结晶器的方法，使凝固壳表面与结晶器内壁(衬)不粘连而避免了发生拉裂等现象[1],使得铸坯表面的质量得到了大幅度的改善。

1.1　电磁连续铸造法

电磁连续铸造法分为软接触电磁连续铸造法和直流电磁铸造法，是一种利用电磁感应原理实现的无模型连续铸造技术[2]。最早是于 20 世纪 60 年代,由前苏联 Getseleev 等人提出的[3]。与传统的 DC 法相比,其铸模由一个电磁线圈取代。该软接触电磁连铸法工艺是将高频电流通及设置在液态金属表面外侧的线圈,产生高频磁场,以此在液态金属表面产生

收稿日期:2018-08-25
基金项目:国家自然科学基金(51961008,51401057);“铝合金材料先进加工技术”八桂学者专项经费;广西研究生教育创新计划项目(YCSW2018054),广西高校大学生创新创业训练计划项目(201810593210)
作者简介:张曦月(1997-),女,辽宁抚顺人,本科生.主要从事有色金属材料凝固与铸造学习与研究方面的工作.
E-mail: 763935553@qq.com
通讯作者:许征兵(1979-),安徽安庆人,副教授.主要从事有色金属材料加工理论与工艺研究方面的工作.
E-mail: 51happiness@163.com

电磁力，保持金属形状进行铸造[4]。在铸造过程中，电磁压力可以降低接触压力，有效减轻金属熔体外壁和结晶器之间的摩擦作用并可以大幅度提高结晶器的寿命[5]，与型壁发生接触的铸造方法相比可以消除普通连续铸造铸锭表面的偏析瘤及夹杂等缺陷[6]。当接触压力为负值时，金属液柱就与结晶器壁脱离，形成半悬浮的自由表面[7,8]。通过控制电磁力，就可以使金属液在不与型壁接触的条件下实现凝固。而当应用于低电导率、低传热率及高密度金属铸造时，则要求设备巨大且拉速缓慢，为此则需要应用直流电磁铸造法[4]，利用静磁场来控制金属液的形状。

然而软电磁连续铸造的结晶器仍存在一些问题[9]：①分瓣式结晶器的实用性及可靠性不理想；②电磁约束减轻了铸坯的横向振痕；③高频电磁场在结晶器壁中产生大量热；④成本较高。

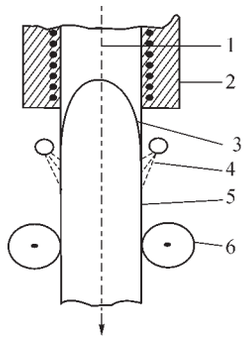
在其发展历程中，开发出了铸造不同形状，不同材料；采用水平方式铸造[2]；脉动 EMC 技术[10]等多种电磁铸造新技术。至今为止，已经应用电磁连铸技术生产研发了 AZ31 镁合金[11]、Incoloy 800H 合金铸锭、黄铜、不锈钢[12]、5356 铝合金[8]、7050 铝合金、AZ61 镁合金[7]、2E12 铝合金、集成电路铝硅键合线用 Al-1%Si 合金[6]以及铝合金复层梯层铸坯[13, 14]等多种应用在不同环境下的产品。在未来，电磁铸造技术依旧有很好的发展前景。

1.2　热型连续铸造法（OCC）

OCC 技术是于 20 世纪 80 年代初由日本大野笃美教授发明的一种加热铸型的连铸方法[15]是一种成本低、效果好的无切削铸造方法。对于难切削加工，又不能辊压、拉延或挤压的合金来说，是一种比较具有吸引力的加工途径[16]。因此在国内外有较多的研究，其中以美国、日本和加拿大较为突出。

1.2.1　技术原理

OCC 的技术原理是将连续铸造铸锭用的铸模加热，使与熔体金属接触的铸模面的温度保持在熔体金属的凝固温度以上，来阻止熔体在铸模壁上生成晶核，只在铸锭的前端进行凝固，在铸模外面冷却铸锭。换句话说，在铸锭表面被液膜覆盖的状态下脱出铸模，使其刚离开铸模外液膜就凝固结束[17,18]（原理如图 1）。用这种方法凝固可以形成表面质量良好的，纯净致密的，铸造缺陷极少的高品质铸坯，铸模表面不会出现金属晶核，因而装置中的摩擦力被减小甚至消失[15,16]，内部由同一方向的柱状晶组成，铸锭表面十分光滑，而具有十分优秀的拉拔性能。因此，OCC 技术在研究上受到比较大的



1- 金属液；2- 热铸模；3- 熔融金属薄层；4- 冷却水；5- 铸锭；6- 夹送端

图 1　OCC 工艺原理
Fig.1　Principles of OCC Process

青睐。

1.2.2　基本凝固方式

大野笃美教授早年提出了 OCC 技术的 3 种基本凝固方法：上引式、下引式和水平式，它们各有优劣。

（1）下引法（如图 2 (a)）是最开始设计的铸造方法，冷却容易，凝固条件优越，且凝固过程中杂质和气泡上浮不容易被卷入铸锭。但是铸型出口处压力难以控制，容易发生漏液事故。在这个基础上改进的 *Π* 型虹吸管式供液管（如图 2 (b)），虽然可以弥补漏液问题，但是由于这种方法的设备十分复杂，所以在实际试验中没有得到发展。

（2）上引式的优劣与下引式相反，但当需要使用液体冷却剂冷却时，有使冷却剂直接漏到金属液上发生爆炸的危险（如图 2 (c)）。

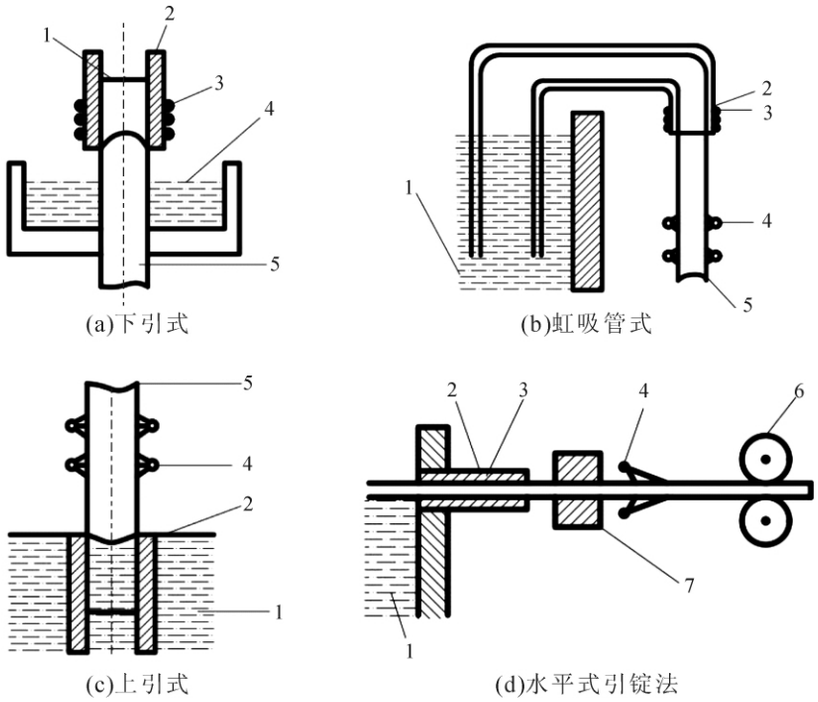
（3）水平式引锭法的优点介于前面两者之间，设备简单，工艺参数易于控制，适用于生产细棒材小直径管材及薄壁板类型材（如图 2(d)）。在水平引锭法的基础上，在 20 世纪 80 年代末期又发明了回转加热铸型和上面开放式水平加热铸型带材连铸设备（OSC），可以制备定向凝固组织和单晶带材[19]。

1.2.3　OCC 技术工业应用及发展

OCC 技术发展之初由大野笃美开始，试验了用下引式铸造法铸造直径 10 mm 的锡棒，上引式方法铸造直径 30 mm 的铝圆柱锭和铜及 Cu-Sn 合金棒及板，后又采用水平式方法进行 Al、Mg、Sn、Zn 等低熔点有色金属的铸造[16,17,21,22]，近些年已经逐渐向具有更大应用前景的高熔点 Mo、Co、不锈钢、Ni 基高温合金方向发展[23,24]。

OCC 技术发展到现在，在工业应用上主要体现在下述几个方面。

（1）金属单晶材料[25]　这也是 OCC 技术的第一次工业应用，由于金属单晶材料表面异常光洁，没有晶界和各种铸造缺陷，具有极好的耐蚀性、耐疲劳



1- 溶液;2- 加热铸型;3- 电炉丝;4- 冷却水;5- 铸锭;6- 牵引轮;7- 导向装置

图 2 OCC 铸造设备原理结构发展顺序
Fig.2 Development sequence of OCC casting equipment principle structure

性、抗高温蠕变性以及优异的变形加工性能和信号传导功能[26]。这种技术多用在制造单晶信号线上,是OCC 技术最成功的应用。目前古河电器公司(Furakawa Electric）和住友电器公司（Sumitomo Electric)生产的铜单晶信号线已广泛应用于通讯业和音响业中。大阪富士公司热型连铸开发室制造的单晶连铸宽 75 mm，厚 5 mm 镁板可轧制成 0.05 mm 的薄箔,并深冲成扬声器的振动膜。

(2)高纯度材料　采用热型连铸技术可以制备纯度为 99.999 6%的铝铸件,作为雾化沉积材料;纯度为 99.999%或较高纯度的铜材料。

(3)复杂界面的薄壁型材,管材[27]　采用 OCC 技术可以避免金属液与型壁接触而在铸型端口处才开始凝固,因此可以很好的保证金属制品的形状尺寸精度及表面质量。日本三井公司已开发了各种截面形状复杂的热型连铸铜管，例如内外均有翅片、双层壁、多通道特征的复杂铜管[20, 26]。

(4)普通加工方法难以实现的型材[28]　如高温合金、硬质合金、不锈钢及高硬度 Al-Cu 合金焊条(丝)等,OCC 法连铸的含钴 stellite 合金焊条,可以完全消除气孔、夹杂、缩孔(松)等内部缺陷且表面质量及生产率都高于积压焊条。用 OCC 法制得的 ϕ4 mm Sn-Zn 共晶合金线材可以减弱其本身塑性加工性能差的特性,而可以拉成 ϕ0.1 mm 的丝无需任何中间退火。

(5)金属包铸复合材料　使用双金属连铸设备可以制备出 Sn-Pb、Sn-Bi、Sn-Zn 等 Sn 包铸共晶材料和 Al-CuAl 包铸共晶管材及 Si 强化 Al 基复合材料，以及实现了利用 OCC 网状铸造金属包铸光纤,这样不仅防止了光纤的断裂,还可以每时每刻地监视结构的物理特性,如:损坏、应力和温度等[16,29]。

(6)与低温强加工技术的结合　OCC 技术生产的钢棒,具有单向柱状晶组织,采用大变形量塑性加工变形方法能够获得内部组织为细小单向纤维晶组织的超高强度钢丝。目前应用该方法成功制备了以 Ni-Ti 为主的 Ni 基,Cu-Cr、Cu-Al-Be、Cu-Al-Ni 等 Cu 基形状记忆合金，并成功应用到合金管接头,合金电车线,控温水阀等特殊的应用环境中[30-33],克服了传统材料强度衰减的缺点，又提高了记忆合金的生产效率。

(7)除杂蠕化产品　一汽集团公司利用 OCC 法的除杂蠕化的作用，使铁液更加的纯净。相比于 sintercast 法 OCC 法的除杂蠕化对产品的兼容性较强且操作步骤简单,生产效率高[34]。

OCC 技术发展到现在仍具有较高的应用前景,如何将技术优势发挥到具有不同物理性质、使用环境的合金中,是人们研究的重点方向。目前较新的技术主要为:超高温度梯度连续定向凝固技术、电渣感

应定向凝固技术[23]以及单晶连铸。

2　连铸技术的发展现状

2.1　国内整体工业发展概况

连续铸造是金属材料的高效制备技术，这个概念1856年由英国人Bessemer提出，并于1930年在铜、铝等有色金属的生产方面开始应用。连续铸造技术在提高生产能力、材料成品获得率、节约资源、简化工艺流程、保证产品质量等方面有着不可比拟的优势，因而已经成为社会发展的必然趋势。目前，全球钢铁行业的连铸比已达到96%以上，有色金属也有90%的连铸率。

中国自20世纪60年代开始研制和应用连铸生产线，最早有上海电缆研究所研制的上引连铸生产线，用于生产铜及铜合金、带铸坯[35]。中国的连铸技术处于一个发展较快的阶段，以中国钢铁行业的连铸比的发展为例（如图3所示）2000年中国的连铸比仅为85.73%，到2010年增加到98.12%，到2015年已达到99.61%，远远超出了世界连铸比。可以看出2000~2015年，连铸技术领域发生的重大事件大多发生在中国[36]。

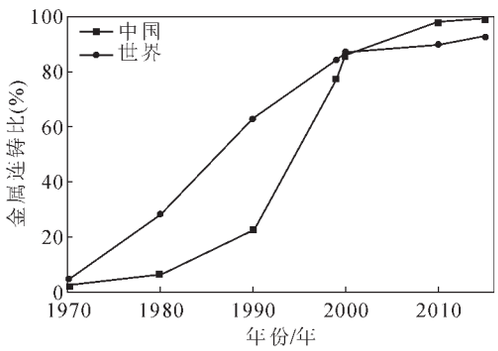


图3　中国与世界钢铁行业连铸比发展

Fig.3　The development of continuous casting ratio in China and the world

然而中国连铸技术同世界工业强国比起来仍有一定的差距。26年前，国际钢铁协会预测连铸比最高极限为93%。我国的连铸比虽然达到了99%以上，但这也意味着连铸产品结构依然是以普通低附加值产品为主，尽管产能很大，但许多代表技术水准的高端产品不得不依赖于进口[37]。

2.2　新技术发展现状

在实际的工业生产中连铸新技术，新设备开发的出发点是提高连铸坯质量，降低连铸生产成本。发展到现今，中国在连铸技术上已经成为了一个发展大国，但与发达的工业国家相比还有一定的差距，主要体现在[38,39]：①近终型连铸连轧技术：我国还处在刚起步的研究阶段，而国外已有一定的产业化规模。尤其是近终型双辊薄带连铸技术，进入商业化应用阶段还存在一定的问题[40]；②高效连铸技术：我国在连铸效率上仍低于发达国家，由此产生较高的连铸成本；③自动控制水平：精细化。

2.2.1　近终型固态成型技术

薄带连铸生产工艺技术是近终型连铸技术的主要产品之一[40]，是一种能够节省投资，降低生产成本，减少能源消耗保护环境的一项新技术[41,42]。2007年上海宝山钢铁公司建设了一条较大规模的双辊薄带连铸生产线，并经实验证明其生产的AISI304不锈钢薄有较高的塑性和强度，有较好的力学性能[43]。

双辊带铸轧技术被誉为21世纪冶金工业最具革命性的技术，也是一种近终型连铸工艺。其技术核心为侧封系统，主要由机械侧封、电磁侧封、气体侧封和组合式侧封4种形式。近年燕山大学的孙慕华等提出了分体式磁轭电磁侧封结构[44]，可以取代机械侧封并可以克服电磁侧封的缺陷，是一种新型的侧封技术。

2.2.2　电磁冶金技术

电磁冶金技术起源于20世纪70年代，包括电磁制动技术和电磁搅拌技术[40]，在连铸领域中应用的最为活跃。随着电磁制动技术的不断成熟，在薄板坯结晶器采用电磁制动技术取得了一定的成果[45,46]。北京科技大学魏军等人开发出利用电磁制动技术原理的CSP结晶器，具有良好的内部质量，可以明显提高薄板坯洁净度水平[47]。类似于电磁搅拌技术，燕山大学的周超等人开发出一种新型的回字形结晶器，用以降低铸坯液穴深度，进而达到了电磁搅拌的冶金效果[48]，降低了铸造机基础建设费用，减少了铸造成本。

2.2.3　消除内部缺陷的技术方法

连铸过程中，如何减少铸件中出现的缺陷，实现铸件的高质量凝固一直是连铸技术发展的核心。其中衍生出一系列的新技术。

(1)压下技术　包括在板坯连铸过程中的轻压下技术以及大压下技术[49]。轻压下技术又包括静态轻压下技术和动态轻压下技术，用以消除中心疏松和中心偏析；而大压下技术是一种主要针对厚板坯的技术，可以完全取代模铸坯生产[50]。

(2)连铸中间包[51]　是设置在钢包与结晶器之间的冶金反应器，是一种可以促进非金属夹杂物去除的重要冶金手段。

(3)TRIZ理论辅助研究[52]　马鞍山钢铁股份有限公司使用TRIZ理论用于辅助分析CSP薄板坯连铸机结晶器的研究，并进一步解决连铸板坯的纵裂

问题,得到了较好的效果。

2.2.4 结晶器监控系统

连铸结晶器摩擦力可以定量反应结晶器与铸坯之间的润滑情况及连铸生产状况,是优化和开发连铸新工艺时需在线监测到的重要参数。而近几年发展的检测方法有:基于傅里叶变换得来的小波理论[53]:这是一种有效的信号分析方法,可以较好的监测结晶器的润滑情况。除此之外还有振动加速法、测力计法、电阻应变片法、振动电机电流法和功率法等。

3 结语

连铸技术由于其历史久应用性高而被广泛研究,随着研究的深入,有人对某些模块做了比较详细的总结,但放到整个连铸技术中仍存在着比较性不强的问题,缺少一个系统的整理。本文对连铸技术做了较完整的归纳整理,并系统说明了从发展之初到现在的技术状况。

整体可知,连铸技术的发展还存在着如下几个问题。

(1)在连续铸造技术的研究过程中,还没有一个十分精确完善的工艺参数的对照指南,人们目前的研究工作还大多基于对实验数据的逐个积累并利用经验法推演, 这其中会存在一定量的误差,结论无限趋于精确值。在接下来的发展过程中,多采用计算机数值模拟技术, 并与实际实验操作相结合,进而更加方便精确地推演出最佳工艺参数。

(2)目前的连铸工艺大多还停留在特定合金种类的铸造阶段,铸出的产品直径大小也有一定的限制。之后的实验研究可以向多种类金属及合金,向更广泛的尺寸区间的方向发展,使连续铸造技术可以成为一种应用范围更加广泛的铸造技术。

(3)目前发展的各个技术各有优劣,在研究上的进展程度和应用广度也有区别,目前为止还没有一种机型完全取代其他机型的趋势。不同的铸造技术或多或少都存在一定的缺陷问题,有的可以通过控制工艺参数来解决,有的则只能通过改进铸造技术和设备来实现。我们的研究是基于现有概念和已有低层次技术的基础上发展出更优越精细的铸造技术,而这往往需要长时间的沉淀和积累。因此,促进各研究单位的数据共享和交流和沟通非常重要。

(4)进一步发展可以实现计算机控制的自动化技术,弥补对人工技术要求的限制。

参考文献:

[1] 王自焘, 刘景茹. 铝加工的铸锭铸造 [J]. 全国熔铸技术培训班(徐州讲义), 1991, 6: 43.

[2] 曹志强,张兴国,金俊泽. 电磁铸造技术及其发展[J]. 轻金属, 1995(10): 51-53.

[3] 任忠鸣,雷作胜,钟云波,等. 上海大学在电磁连铸方面的研究工作 // “第十届中国钢铁年会”暨“第六届宝钢学术年会”[C]. 中国上海, 2015: 21.

[4] 沈明钢. 水平电磁连续铸造法的研究 [J]. 鞍山钢铁学院学报, 1990(2): 21-26.

[5] 王宏明,任忠鸣,雷作胜,等. 钢的软接触电磁连铸技术[J]. 铸造技术, 2005,26(9): 782-784.

[6] 贾非. 电磁连续铸造过程工艺优化及组织性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2002.

[7] 于延浩. 镁合金电磁连铸成型技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

[8] 邢清源. 5356 铝合金电磁连铸、净化和微合金化工艺研究[D]. 大连:大连理工大学. 2015.

[9] 张兴中. 我国连续铸钢技术的发展状况和趋势 [J]. 钢铁研究学报,2004(6): 1-6.

[10] 廖建国. 新日铁板坯电磁连铸技术的开发 [N]. 世界金属导报, 2013-04-16 (B03).

[11] 李伟轩,张世斌,邓康,等. 电磁连铸对镁合金显微组织及腐蚀性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金,2007,27 (12): 914-917,898.

[12] 侯晓光,王恩刚,张永杰,等. 不锈钢软接触电磁连铸的工业试验 [J]. 钢铁,2015(11): 45-52.

[13] 赵秀娟. 成功研制出电磁连铸铝合金复层梯度铸坯 [N]. 中国有色金属报,2009-01-17 (006).

[14] 有色设备杂志社. 电磁连铸铝合金复层梯度铸坯问世 [J]. 有色设备,2009,23(1): 50.

[15] 袁静. 水平连铸单晶铜超微细丝制备与组织性能演变研究[D]. 南昌:江西理工大学, 2011.

[16] Atsumi Ohno, 吕兴华. 用 Ohno 连续铸造法生产镁锭 [J]. 轻金属,1990,27(12): 39-40.

[17] 大野 笃美,朱玉俭. 采用 OCC 工艺开发新产品[J]. 轻合金加工技术,1991(3): 20-23.

[18] 山田史郎,高泽生. 利用表面张力的金属连续铸造法[J]. 轻合金加工技术,1980(4): 22-24.

[19] 张君尧. 用水平式加热模铸造铝带材的方法 [J]. 轻合金加工技术,1995(6): 8-9.

[20] 许振明,李建国,傅恒志. OCC 技术研究现状及其进展[J]. 特种铸造及有色合金,1999,19(1): 33-36.

[21] 林朝平. 从金属内部开始凝固——介绍一种新的连续铸造法[J]. 热加工工艺. 1986,15(1): 66.

[22] K Tada, 赵洪友. 用敞开水平热模生产铝带坯[J]. 有色金属加工, 1995,24(6): 23-25.

[23] 常国威,王新华,王自东,等. 不锈钢连续定向凝固的试验研究[J]. 铸造,2000,49(3): 145-147.

[24] 吴占军. 连铸 L401 线材及其焊接接头组织和性能 [D]. 西安:西安理工大学,2005.

[25] A Ohno, Soda H. Development and application of OCC technology, in F. Weinberg International Symposium on Solidification Processing, I.V. Samarasekera [C], Editor. 1990, Pergamon: Oxford. 1990: 215-228.

[26] 黎沃光. 热型连续铸造法的原理及应用 [J]. 铸造,1996,45(12):

41-46.
[27] 张升太. 从内部开始凝固的新连续铸造法 [J]. 机械工程材料，1983(6): 2.
[28] 黎沃光. 热型连续铸造工艺及其应用[J]. 轻合金加工技术，1997, 45(7): 14-16，13.
[29] 黎沃光. 热型连续铸造法包铸光学纤维 [J]. 特种铸造及有色合金，1997，17(2): 20-23.
[30] 彭立明，毛协民，温宏权. 凝固工艺对自生复合 Cu-Cr 合金电车线综合性能的影响[J]. 功能材料，2001(2): 158-160.
[31] 胡晓斌，刘坤，蔡莲淑，等. 热型连铸柱状晶 Cu-Al-Be 合金丝力学性能试验研究[J]. 世界地震工程，2017(2): 127-134.
[32] 游庭淋，蔡莲淑，余业球，等. 热型连铸法制备 CuAlBe 形状记忆合金管接头[J]. 特种铸造及有色合金，2014，34(10): 1086-1089.
[33] 余业球，蔡莲淑，余峻辉，等. 柱状晶 CuAlNi 形状记忆合金控温水阀的设计与性能[J]. 广东工业大学学报，2014(2): 113-116.
[34] 杨磊，杨敏，胡存凯. G3 缸盖铸件的铸造工艺 [J]. 现代铸铁，2014(2): 30-35.
[35] 于朝清，尹霜，陈龙，等. 连铸技术的最新研究进展[J]. 电工材料，2017(6): 25-29.
[36] 杨拉道，高琦. 国内外连铸技术的发展[N]. 2017-01-03 (B03).
[37] 史宸兴. 连铸历史回顾与未来[J]. 连铸，2016(4): 1-11
[38] 张成元，郑林. 连铸技术的发展与思考 [J]. 江苏冶金，2007，35 (2): 5-8.
[39] 杨拉道，高琦，雷华，等. 连铸技术装备的科技创新必须从精细化开始[J]. 连铸，2016，35(6): 1-9.
[40] 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.
[41] J A Spim Jr. C A Santos, A Garcia. Modeling of solidification in twin-roll strip casting [J]. .Journal of Material Processing Technology. 1998, 102(1-3): 33-39.
[42] F Pan X. Liang, S Zhou, P Ding, X Xu. Edge containment of a twin roll caster for near net shape strip casting [J]. Journal of Materials Processing Technology. 1997, 63(1-3): 788-791.
[43] 王振敏，方圆，齐俊杰，等. AISI304 不锈钢双辊连铸薄带的组织性能 [J]. 材料热处理学报，2007，28(6): 71-74.
[44] 孙慕华. 双辊薄带铸轧新型电磁侧封装置结构设计与研究[D]. 秦皇岛：燕山大学. 2016.
[45] 李宝宽，赫冀成，贾光霖，等. 薄板坯连铸结晶器内钢液流场电磁制动的模拟研究[J]. 金属学报，1997，33(11): 1207-1214.
[46] 黄军涛，赫冀成. 方坯结晶器内钢液凝固及电磁制动的数值模拟[J]. 金属学报，2001，37(3): 281-286.
[47] 魏军，孙彦辉，蔡开科，等. CSP 结晶器 EMBr 的冶金效果和流场理论分析[J]. 钢铁，2007，54(8): 32-35.
[48] 周超，任素波，张兴中，等. 新型结晶器基本参数研究及其内钢液行为仿真[J]. 中国机械工程，2016，34(11): 1541-1545.
[49] 杨拉道，张奇，高琦，等. 板坯连铸动态轻压下技术的理论与实践 [J]. 铸造技术，2012，34(1): 55-58.
[50] 李晓斐. 板坯连铸二冷压下工艺的理论研究[D]. 唐山：华北理工大学，2017.
[51] 郑淑国，朱苗勇. 连铸中间包内钢液流动特性分析模型的研究进展[J]. 鞍钢技术，2016，43(4): 1-9，62.
[52] 舒宏富，王蕾. 应用 TRIZ 理论解决连铸板坯纵裂问题[J]. 安徽科技，2015，37(9): 27-28.
[53] 彭程. 基于小波理论的结晶器摩擦力信号解析及研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2015.

技术资料邮购

《铸造涂料及应用》

《铸造涂料及应用》在内容上反映了铸造涂料的最新成果，在叙述上由浅入深，注重实用，是从事铸造生产、管理、铸造原辅材料生产及销售相关人员的专业用书之一，也可作为高等院校铸造专业或材料成形与控制专业铸造研究方向的本科生、研究生的教学研究用参考书。本书共10章，第1章为绪论；第2章和第3章分别介绍了铸造涂料用耐火粉料、载液、悬浮剂、粘结剂和助剂等原材料；第4章阐述了涂料的粘度及流变性能；第5章介绍了涂料的配制，第6～8章分别重点介绍了砂型(芯)涂料、重力及非重力金属型铸造涂料和其他铸型(芯)涂料；第9章介绍了涂料的缺陷及防止措施；第10章介绍了涂料的性能与检测。

特快专递邮购价：69元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071