● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.022

连续铸造技术发展与应用(一)

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,并以时间顺序介绍了其发展历程和优劣,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趋势。对连铸技术的发展现状做了分析,并对发展趋势进行了展望。

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)08-0845-07

Development and Application of Continuous Casting Technology(I)

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 adopted to divide the continuous casting technology into two categories intuitively: the casting method indirect and not indirect contact with the casting mould. The development history and the advantages and disadvantages were introduced in chronological order, and another technique was introduced based on the analysis of the advantages and disadvantages of one technique, thus the overall development trend of continuous casting technology can be clearly seen. The development of continuous casting technology was analyzed and the development trend was prospected.

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

连铸技术于20世纪90年代普及,现已成为冶金行业比较成熟的主流技术[1],按作业方式可以分为半连续铸造法和连续铸造法。半连续铸造制备的铸锭,具有设备比较简单,大部分零件易于加工和安装等优点[2]。而连续铸造法可以在半连续铸造法的基础上在铸造机尾部配上同步锯实现。相比之下,连续铸造法铸造出的产品具有更广泛的使用环境;连续铸造法也被称为是一种更适用于高速生产的更先进的铸造方法。在实验室的研究过程中人们对这两种方法并不做太大的区分，即在同一铸造技术下，既可以使用半连续铸造，也可以使用连续铸造,这需要视生产环境和产品要求而定。

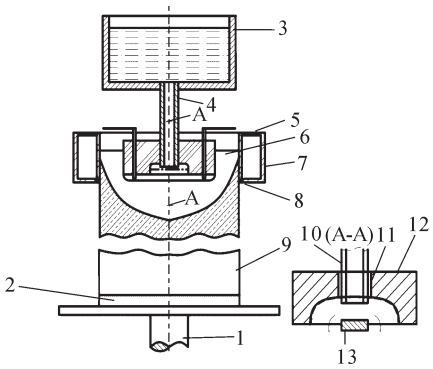
1　与型壁发生接触的连铸方法

1.1　立式铸造

1.1.1　普通模铸造

普通模铸造法是最早使用的一种连续铸造方法,在工业生产中已有相当长的历史,其基本原理如图1直接水冷的连续铸造法[3]所示。据文献记载,在我国,鞍钢铸管厂于1970年完成了普通模连续铸造的研究工作并投入了大量生产[4]。普通模铸造时,冷却水先冷却结晶器壁以后，再从结晶器壁下方喷向铸锭。其中冷却水对结晶器壁的冷却称为一次冷却,而对铸锭的直接水冷通称为二次冷却[5]。而经过生产实践证明，普通模铸造虽然可以满足一般的产品要求,但是铸锭在铸造过程中经常出现拉裂、成层、冷隔、化合物、偏析瘤等缺陷,而铸锭的边部极易富

收稿日期:2018-08-25
基金项目:国家自然科学基金(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
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



1- 液压柱塞；2- 底座；3- 流槽；4- 导流管；5- 圆铸模；6- 铝熔体
7- 水套；8- 出口槽；9- 铸锭；10- 导流管；11- 中间孔
12- 漂浮漏斗；13- 挡流板

图 1 直接水冷的连续铸造法
Fig.1 Water-cooled continuous casting

集气体缺陷[5]：气孔和疏松。由此会造成几何废料过多，且有的缺陷无法通过机械加工处理掉而使铸锭报废的问题[6]。

综合分析普通模铸造缺陷的原因主要是所使用的结晶器高度较高，进入普通铸造模结晶器的铝熔体，在一次冷却的过程中凝结成壳而收缩，与结晶器壁间出现了缝隙使得导热受阻[7]。与此同时还会发生二次加热现象而使表面产生偏析瘤，偏析层深度增加。除此之外还有浇铸前熔体的氢含量高和一次冷却区的冷却强度小等原因。后期人们发展的其他铸造方法主要是针对这些问题展开的。

1.1.2 低结晶器普通模铸造

低结晶器普通模铸造技术是针对普通模铸造中出现的问题，在其技术基础上做了些许改进：将结晶器的高度放低至小于铸锭直径的 1/4。其铸造速度较普通模铸造上有了一定的提高，结晶器的冷却强度也较之增强[8]。因此，铸造出的产品的各项工艺参数都较普通模铸造有了长进，但仍不能摆脱铸造过程中存在的缺陷问题。

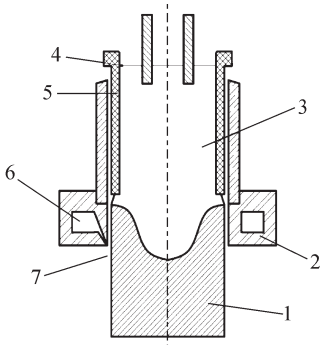
1.1.3 隔热模铸造

随着普通结晶器铸造的弊端逐渐显露，为了解决生产中发现的问题，人们开始开发不同种类的连铸技术。隔热模铸造技术是在普通 模铸造的基础上演变而来的，最初由挪威公司开发。在我国，东北轻合金有限责任公司在 1980 年开始对隔热模铸造技术的研究和开发工作[9]。隔热模铸造法是一种在普通法铸造结晶器的内表面衬有隔热材料的铸造方法，隔热材料通常选用 2.0~2.5 mm 厚的硅酸铝纤维毡。在第一次冷却时水喷到糊有硅酸铝纤维毡的结晶器处表面上部时，由于隔热性能而冷却强度很小，可以忽略不计，而喷到结晶器处表面下部时，液态金属在此区域（也成为有效结晶区）快速冷却成型。接着第二次冷却水直接喷到铸锭上，从而增加了冷却强度。隔热模铸造所用的铸造机和普通法相同，但对铸造机的运行平稳程度要求较严[10]。

隔热模铸造虽然可以很好的避免普通模铸造中出现的冷隔、拉痕和拉裂问题的问题，但还是容易产生大面积热裂纹，并存在一些非金属夹杂物。

1.1.4 热顶铸造

热顶铸造法最初是由法国的 G.Trapied 提出的一种连续铸造方法[11]，其原理如图 2 所示，并于 80 年代在我国发展[12]。它对隔热模铸造法作了改进[8]，而铸造机与隔热模铸造相同[10]。它是在一般水冷结晶器里面覆盖上耐火绝热材料，以构成液体金属的保温槽，使液态金属只在未被石棉层覆盖的结晶器下部的狭窄区域内结晶的方法。与矮结晶器结合使用，缩短了铸模高度并造成了快速结晶的效果。因而在 20 世纪 70 年代广泛得到了世界各国的青睐并发展迅速[13]。西德制铝公司、英国铝业公司、挪威公司和日本的平冈高弥等人[11]，都对热顶模铸造的发展起到了很大的推动作用。



1- 铸锭；2- 结晶器；3- 液体金属；4- 熔渣；5- 石棉层；6- 冷却水
7- 二次冷却水

图 2 G.Trapied 研究的连续铸造结晶器
Fig.2 Continuous casting mould by G. Trapied

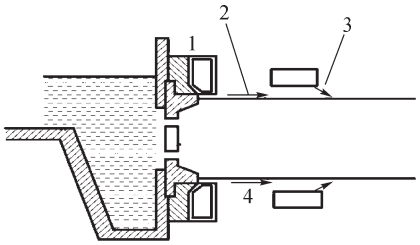
热顶模铸造技术发展到现在已经成为一种比较成熟，被普遍使用的一种先进的铸造技术[14]。铸造时，不使用传统的浮漂漏斗，贮槽内的熔体至少与分配流盘内的熔体保持在同一水平[6, 15]，这样不仅可以提高铸造机的生产率，又能提高金属的纯洁度[16]。热顶模铸造能够实现同时铸造多根铸锭，大大提高了生产效率，降低了工人的劳动强度，并实现了同水平铸造，减少了熔体金属的二次污染。因此具有铸锭内部质量优良，铸锭表面质量优良、生产操作简便等优点。但是在铸造含有较多元素，有极大的热裂倾向性的合金时，热顶模铸造与传统的 DC 铸造法相比较，在相同的合金、规格铸锭的前提下，前者生产的铸锭铸造裂纹几率比后者的大，随着铸锭直径的增大，裂纹的倾向更高[17]。同时热顶铸造要求工人有比较熟

练的操作技术，在工艺参数调解不好的时候，铸锭会产生搭接式表面、偏析瘤、冷隔、波纹、拉痕和拉裂等表面缺陷[13]。

热顶铸造技术发展到现在已经衍生出许多新技术，包括在铸造过程中施加低频磁场的低频电磁热顶铸造技术[13]，在铸造过程中施加多源超声波振动系统的超声空化热顶铸造技术[18]，以及铝合金热顶铸造空心锭技术等[19]。

1.2　横向铸造

横向铸造是在 20 世纪 60 年代开始研制的，最初的着眼点在于解决 H(70~110)mm 小直径铸棒的铸造难题[20]。这种方法使铸锭从水平方向拉出，结晶器高度一般不超过 50 mm[21]，并在其内壁上衬有隔热材料，因此实际使用的结晶器的高度更低，铸造速度也较之前介绍的热顶铸造的高[8]，其原理部分简图如图 3 所示[22]。由于其设备简单，占地较小，因此多由一些中小企业应用[2]。最初我国主要采用的铸造结构分喇叭碗结构与硅酸铝纤维纸结构两种[20]，而按照铸锭的运行方式则分为滑道式和滚道式[10]。



1- 铸模；2- 一次冷却水；3- 二次冷却水；4- 润滑剂

图 3　横向铸造法

Fig.3　The principle of transverse casting

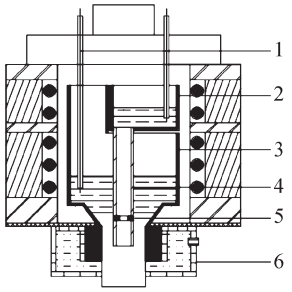
与立式铸造法相比，由于水平铸造法难以对铸坯的上下表面进行均匀润滑和冷却，铸锭上下结晶速度、过冷度、过冷带不一样，因而造成锭坯内部上下组织不均匀及表面缺陷[22]。铸造铸锭时如果工艺控制不当，极易出现表面拉裂，产生废品[23]，同时铸锭形成光亮晶粒，羽毛晶和裂纹的几率增加[8]。但与立式铸造法相比，水平连续铸造法具有：铸造高速化；缩短均匀化处理时间；提高挤压型材的强度[22]；金属化合物一次晶偏析集聚形成的几率小；可以抑制气体缺陷的产生从而可以获得良好的铸锭质量，减少铸造加工费等优势[10]。但同时形成光亮晶粒，羽毛晶和裂纹（多中心裂纹[2]）的几率增加，因此在铸造的时候应严格控制化学成分，调整铸造应力及提高熔体质量[21]。

1.3　新型连铸方法

1.3.1　金属复层材料铸造

金属复层材料铸造技术是利用复合技术将 2 种或 2 种以上具有不同性能的合金或金属复合在一起，而制备出一种具有更加优异性能的新型复合材料的铸造技术。制备得到的材料具有短流程、低耗能、操作简单、绿色环保等优点[24-27]，并可同时兼具多种合金或金属的优异性能，从而弥补了单一合金或金属在使用中的不足，具有很强的设计性，因而在航空、航天、船舶、化学等行业中具有广阔的应用前景[28]。在诸多复合材料制备技术中，双金属复合材料的连续铸造技术是一种十分理想的生产方法，其具有成本低廉，工序简单，且界面复合牢固的优点，具有很好的研究前景。

（1）双流浇注连续铸造法（DSCPP 法）　在工程上特别是高科技领域，人们对材料的要求越来越高，经常遇见要求工件的表面性能不同于其内部性能的情况，以满足不同工况条件下的使用要求[29]。双流浇注技术是 90 年代初由我国的张卫文等人提出的一种制备梯度材料的铸造方法，其原理如图 4 所示[30]。



1- 热电偶；2- 内胆；3- 外单胆；4- 入口处喷嘴；5- 嵌入门；6- 石墨模具

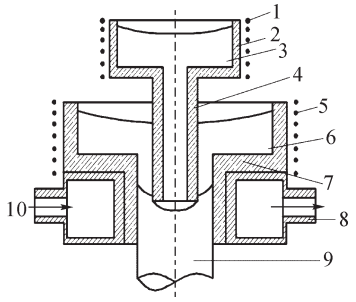
图 4　梯度材料制备实验装置

Fig.4　Experimental apparatus for preparation of gradient materials

这是以多流浇注连续或半连续铸造方式生产合金成分随铸件截面连续梯度变化的结构材料的一种新方法——即在传统的连续铸造设备的基础上，增加了一个内浇包及其导流系统[30-33]。至今为止已经研究开发了 Al-Cu/Al、Al-Si/Al、Mg-Al/Al、2024/3003、7075/6009 等二元及多元合金系列层状铝合金复合材料[34-37]。这种方法制备出的材料本身就具有不同于内部性能的表面性能，省去了传统后期表面喷涂、镀层、离子注射、表面处理等手段，大大减少了成本。梯度功能材料是具有一种或几种特殊功能的材料，最初是以缓和热应力为中心的航空航天材料开发为主，现在被广泛的应用在汽车、船舶、电子、医疗、环保设备和化工设备等领域[38-42]。

（2）充芯连铸法（CFC 法）　充芯连铸法是一种用来制备高熔点金属包覆低熔点金属的复合工艺[43]，通过将低熔点金属液填充在高熔点外层金属管中后凝固成型，以实现材料复合。其分为立式充芯

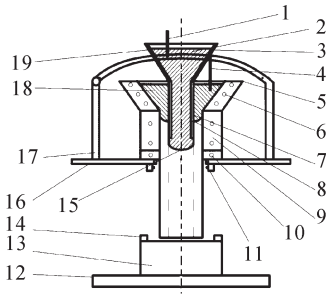
连铸法(VCFC)和水平充芯连铸法(HCFC)[44]。主要用于制备铜包铝一类包覆材料熔点远高于芯材的复合材料。但该工艺以拉拔为手段,没有对金属液充压,因此只能制备直径为 40 mm 左右的棒坯,之后还需要多道次静液挤压工序降低棒坯直径,造价十分昂贵,传统的充芯连铸法原理如图 5 所示[24]。



1- 心部金属加热器;2- 上坩埚;3- 心部金属液;4- 心部金属加热器
5- 外层金属加热器;6- 外层金属液;7- 下坩埚;8- 结晶器
9- 双金属棒;10- 循环水冷却

图 5 充芯连铸法
Fig.5 The process principle of continuous core-filling casting

为了解决这样的问题,2009 年我国北京科技大学的黎红英及其科研团队[45]首次提出了气压顶出的充芯连铸法(原理如图 6 所示),并制备出了外径为 12 mm 的,内径为 8 mm 的铅包锡双金属复合棒坯[46]。2010 年,北京科技大学的刘柱等人又依据这种方法制备出了小尺寸的铜包铝连铸复合材料[46]。而层状金属复合材料在保持母材金属特性的同时具有"相补效应",可以弥补各自的不足[38]。又因为导体在传输交流电时存在"集肤效应",导体内部的电流分布不均匀,大部分电流都集中在导体表面,内部电流很小。因此这种材料相较铝线材可以降低交流输电电阻,并提高材料的力学性能[44];相较于铜线材时,它不仅拥有与纯铜完全相同的传输性能,

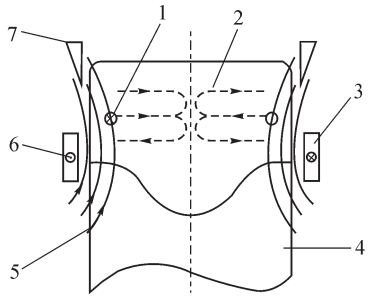


1- 测温仪;2- 芯部金属;3- 芯部金属控温坩埚;4- 测温仪
5- 外层金属控温坩埚;6- 外层金属控温炉;7- 芯部金属液充芯管
8- 外层金属固液界面;9- 上控温结晶器;10- 下控温结晶器
11- 二次冷却装置;12- 退让装置;13- 压力传感器;14- 限位装置
15- 芯部金属固液界;16- 托板;17- 压力罩;18- 外层金属液
19- 窥测孔;20- 加热元件

图 6 受压顶出的充芯连铸法
Fig.6 Schematic diagram of experimental equipment for pressed ejection core-filling continuous casting

又大幅度减轻导线质量,节约了成本,缓解了通信电缆行业近年来铜资源匮乏,铜价居高不下的困境[47]。

(3)电磁制动连续铸造法　电磁控制的双金属复层复合材料连铸工艺其技术原理是利用施加足够强的在结晶器宽度方向上的水平磁场,通过磁场对流动粒子产生的洛伦兹力对金属流动施加作用,阻止两种金属液的混合,在连铸过程中形成界面清楚的层状复合钢坯[48],其原理如图 7 所示[25]。研究表明,与常规铸锭相比,随着电流增大,溶质元素的分布会更加均匀[49],且在一定的电流值及频率下会有明显的晶粒细化现象[50]。在这个过程中应用到了电磁搅拌技术(Electromagnetic Stirring, EMS)和结晶器内电磁制动技术 (Electromagnetic Brake, EMBR)[51]目前已成功制得 Sn+5%Pb 和 Sn;Al+12.3%Si 和 Al+8%Mg;3003/4004 铝合金[28, 52]以及铝硅—铝镁复层材料,而电磁制动已发展成为一种比较成熟的技术[53]。

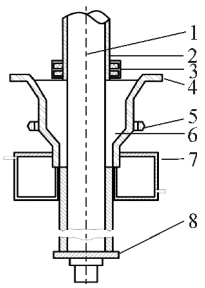


1- 感应电流;2- 熔体流动方向;3- 感应器;4- 铸锭;5- 感应线
6- 线圈电流;7- 磁场屏蔽

图 7 电磁铸造的原理
Fig.7 Principle of the pressures of EMC

(4)轧辊包覆层连续铸造法　轧辊在工作过程中既要有高的耐磨性,又要有高的韧性[48, 51, 52],而近年来出现连续浇注外层轧辊复合层连续铸造工艺方法,又称为 CPC 法,可以同时满足这两个要求。这个技术是由新日铁公司开发,可以使生产的复合轧辊的强韧性和耐磨性显著提高[54]。轧辊复合层连续铸造法是在水冷铸型当中放入轧辊辊芯,垂直状态下将融熔的外层高速钢钢液浇注入碳钢芯轴与冷结晶模的中间位置,使高速钢轧辊辊芯与外层金属充分结合,自上而下凝固,最后将凝固部分向下拉拔,实现连续铸造复合层[55],其原理如图 8 所示。这种复合方式保证了双材质的良好结合,既保持了外层高强度、高耐磨性等优良特性,又可以充分发挥芯部高强度、高韧性的作用[59]。目前的研究方式大多采用数值模拟的方式,选择使复合层与辊芯良好结合的最优工艺参数以指导实际生产[56, 57]。

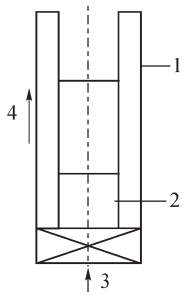
然而在实际的生产过程中,由于辊芯材料的选择主要为高强度合金球墨球铁,在热处理中会出现



1- 轧辊心；2- 玻璃粉末涂层；3- 预热线圈；4- 耐火材料；5- 加热线圈 6- 复合层；7- 铸型；8- 底盘

图 8　轧辊复合层连续铸造法

Fig.8　Roller compound layer continuous casting method



1- 铸型；2-Gasar 多孔金属；3- 水冷；4- 凝固方向

图 9　Gasar 定向凝固法

Fig.9　Diagram of Gasar directional solidification

辊芯强度下降的问题；而在铸造合金元素含量较大且类型较多的材料时，容易在制造工艺中出现较为明显的裂纹倾向等。为了适应现代化轧机以及生产高质量钢材对轧钢工艺方面提出的严格要求，未来还需要进一步的研究工作如成分设计、辊芯的选取、碳化物形成与控制等[55]。

1.3.2　Gasar 连铸法

近年来，连续铸造技术越来越多的尝试应用到一些特殊材料的生产中来，如 Gasar 连续铸造。Gasar 是 1993 年胡克兰学者 V.I.Shapovalov 发明的一种制备多孔金属的方法，称为金属–气体共晶定向凝固法（Directional Solidification of Metal-Gas Eutectic）[58]，由于该工艺制备的多孔金属结构类似藕根，因此也称为藕状多孔材料[59]。目前存在的 3 种 Gasar 制备工艺分别为：Gasar 定向凝固法、Gasar 区域熔炼法及 Gasar 连续铸造法[60]。其中 Gasar 连铸法是由 Nakajima 教授提出的连续铸造技术在 Gasar 工艺制备多孔金属材料中的应用。其工作原理是在充满高压气体（氢气、氮气、氧气或混合气体等）密闭舱室内加热熔化金属，保温足够长时间到气体在金属溶液中溶解饱和后，将熔液连续浇铸经水冷模具，经引锭装置不断拉坯引出，得到具有定向拉长气孔的 Gasar 多孔金属材料的连续铸造技术（原理如图 9 所示[60]）。在制备多孔金属材料上有着远大的工业前景。

从目前的研究报告来看，由于合金的凝固行为相对复杂，有关 Gasar 连铸技术的研究基本还处于纯金属阶段，对合金的研究较少。目前国内对 Gasar 连续铸造工艺由清华大学的刘源教授在 2002 年率先开始相关理论和实验的研究工作的研究[60]到现在仅仅发展了 10 余年，还处于刚刚起步的阶段。因此对凝固过程还没有做到有效控制，制得的多孔金属材料在空隙分布均匀度、孔隙尺寸均匀度方面都不甚理想，还需要进一步的研究工作。

综上所述，将已有的与型壁接触的连铸技术方

表 1 传统连续铸造技术

Tab.1 Traditional continuous casting technology

连续铸造方法	基本原理	优劣	特点示意
普通模铸造	冷却水直接冷却结晶器壁，再从结晶器壁下方喷向铸锭	可以满足一般的产品要求，结晶器高度较高，在铸造过程中经常出现拉裂，成层，冷隔，化合物，偏析瘤等缺陷。废品率较大，难以满足高精度材料的铸造。	铸造速度 表面质量 形成中心裂纹的倾向 逆偏析程度 粗晶组织 ↓ 加快 变优 增大 逐个减轻 几率变大
低结晶器普通模铸造	结晶器高度放低至小于铸锭直径的 1/4，基本原理较普通模铸造相同。	铸造速度较普通模铸造有所提高，但仍出现铸造过程中的缺陷问题。	
隔热模铸造	在铸造结晶器的内表面衬上隔热材料。	很好的避免了普通模铸造中出现的冷隔、拉痕和拉裂问题，铸造速度加快，但仍容易产生大面积热裂纹，存在非金属夹杂物。	
热顶铸造	在一般水冷结晶器里面覆盖上耐火绝热的石棉层，以构成液体金属的保温槽，使液态金属只在未被石棉层覆盖的结晶器下部的狭窄区域内结晶。	结晶器高度变小，缩短了铸模高度并造成了快速结晶的效果。生产率高，铸锭表面质量优良。不适于铸造含有较多元素，有极大热裂倾向的合金。	
横向铸造	使铸锭从水平方向拉出，结晶器高度较低。	适用于小直径的铸棒，铸造速度和表面质量较之前的铸造法都有提高。但是难以对铸坯的上下表面进行均匀润滑和冷却，形成光亮晶粒，羽毛晶和裂纹的几率增加。	

表 2 新型连续铸造技术
Tab.2 The new types of CC technology

连续铸造方法		基本原理	优劣
双流浇注连续铸造法(DSCPP)		以多流浇注连续或半连续铸造方式生产合金成分随铸件截面连续梯度变化的结构材料。	梯度材料使表面材料与内部材料具有不同的性能,省去了后期表面处理技术,节约了成本。
充芯连铸法(CFC)	普通充芯连铸法	将低熔点金属液填充在高熔点外层金属管中后凝固成型,以实现材料复合。	以拉拔为手段,没有对金属液充压,因此只能制备直径为 40 mm 左右的棒坯,之后还需要多道次静液挤压工序降低棒坯直径,造价十分昂贵。
	气压顶出的充芯连铸法	对金属液充压	可以制备小直径复合棒坯, 解决了某些领域资源不足的困境,降低成本。
电磁制动连续铸造法		利用施加足够强的结晶器宽度方向上的水平磁场,利用洛伦兹力阻止两种金属的混合	可以形成界面清楚的层状复合坯。但由于成本昂贵,还出于实验室的研究阶段。
轧辊包覆层连续铸造法(CPC)		在水冷铸型中放入轧辊辊芯,垂直状态下将融熔的外层高速钢钢水浇注入碳钢芯轴与冷结晶模的中间位置,实现连续铸造复合层。	保证了双材质的良好结合, 既保持了外层高强度、高耐磨性等优良特性,又可以充分发挥芯部高强度、高韧性的作用。但在实际生产中会出现辊芯强度下降, 并存在较为明显的裂纹倾向。
Gasar 连铸法		在充满高压气体密闭舱室内加热熔化金属,保温足够长时间到气体在金属溶液中溶解饱和后,将溶液连续浇铸经水冷模具,得到具有定向拉长气孔的 Gasar 多孔金属材料。	材料小比重、高刚度、大比表面积、减震、隔热、小的应力集中效应、独特的热学和电学特性、高耐摩擦性能[61]。研究时间不长,处于实验室发展阶段,对合金的研究较少,大多停留在纯金属阶段。

法归纳在表 1 与表 2 中,并展现了各个技术的特点,可以直观地看出这一类连铸技术的发展趋势。

参考文献:

[1] 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.
[2] 尤培贤,王雪亭,张桂苓. 铝及其合金的横向铸造[J]. 轻合金加工技术,1995(5): 12-16.
[3] 王自焘. 直接水冷连续铸造法[J]. 轻合金加工技术,1980(6): 1-6.
[4] 鞍钢铁管厂. 用连续铸造法生产 ϕ1200 毫米大型铸铁管 [J]. 鞍钢技术,1971,8(1): 48-49.
[5] 赫微, 李海仙. 普通模铸造一次冷却结晶区的铸锭质量及影响[J]. 黑龙江冶金,2009,21(3): 6-7.
[6] 马月,田野,姜德俊,等. 大直径铝合金空心圆铸锭热顶铸造工艺研究 [J]. 有色金属加工,2016,45(4): 28-34.
[7] 石峰,彭学仕. 铝合金圆铸锭普通铸造模的改进[J]. 轻合金加工技术,2004(9): 42-44.
[8] 彭学仕,张万金. 不同连续铸造法铸造铸锭的质量[J]. 轻合金加工技术,1990,28(7): 13-17.
[9] 赵涛,王贵福,刘晓东. 隔热模铸造变形铝及铝合金扁铸锭生产技术 // 全国第十二届轻合金加工学术交流会[C]. 哈尔滨:中国有色金属加工工业协会轻金属分会, 2003.
[10] 石春生,彭学仕. 建筑型材生产工艺(3)——连续铸造技术[J]. 轻合金加工技术,1987,25(7): 1-10.
[11] 平冈高弥,关学丰. 热顶铸造法[J]. 轻金属,1981(7): 55-60.
[12] 王自焘,刘景茹. 铝挤压锭半连续铸造工艺研究和发展 [J]. 特种铸造及有色合金,1996,16(2): 20-24.
[13] 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.
[14] 周金全,江俊. 5005 铝合金 ϕ166 mm 圆铸锭热顶铸造工艺研究[J]. 云南冶金,2016(5): 79-82.
[15] 腾志贵,李海仙,张珺玲,等. 2A12 铝合金 ϕ110 mm 铸锭热顶铸造工艺研究[J]. 轻合金加工技术. 2014(6): 34-37+44.
[16] 张发明. 改进的铝合金连续铸造法 [J]. 轻合金加工技术. 1981,19(5): 1-6.
[17] 杜新宇. 7A04 铝合金热顶铸造圆锭裂纹问题的探讨[J]. 轻合金加工技术,2014(10): 26-29.
[18] 李瑞卿,李晓谦,陈平虎,等. 超声空化对大规格高强铝合金热顶铸造凝固组织的影响及作用机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016,59(10): 3354-3360.
[19] 杜新宇,马质璞. 铝合金热顶铸造空心铸锭缺陷及改进 [J]. 特种铸造及有色合金,2015,35(1): 100-102.
[20] 赵荣新,余新华,马明. 横向铸造结晶器的改进[J]. 轻合金加工技术,1998(9): 14-17.
[21] 彭学仕, 吴欣凤, 王宝让. 铝合金横向连续铸造的工艺特点[J]. 轻合金加工技术,1986,24(2): 1-5.
[22] 〔日本〕新濑诚,杨湘生. 高速水平连续铸造法的开发与应用[J]. 轻合金加工技术,1992,30(6): 14-18.
[23] 谷兰成. 横向铸造 2024 铝合金圆锭表面拉裂的原因和预防[J]. 轻合金加工技术,1997(10): 8-9.
[24] 吴春京,于治民,谢建新,等. 充芯连铸法制备铜包铝双金属复合材料的研究[J]. 铸造,2004,53(6): 432-434.
[25] 贾非,金俊泽,亓锋. 利用电磁力的新型连续铸造技术[J]. 材料导报,2001(7): 18-21.
[26] Joseph C Benedyk. Novelis fusion process: breakthrough in the si-

multaneous DC casting of multiple aluminum alloy layers for rolling ingot [J]. Light Metal Age, 2006, 23(8): 48-50.

[27] Takeuchi E Zene M. Novel Continuous Casting Progress for Clad Steel Slabs with Level Magnetic field [J]. Iron-making and Steel-making, 1997，24(3): 257-263.

[28] 李继展，付莹，接金川，等. 连续铸造法制备 3003/4004 铝合金复层圆铸坯[J]. 金属学报，2013(3): 297-302.

[29] 张卫文，郁鸽，李元元，等. 采用连续铸造方式制备的梯度材料[J]. 材料导报，2000(3): 24-25.

[30] 张卫文，邹敢峰，邓长宁，等. 以连续铸造方法制备梯度材料的实验研究[J]. 金属学报，1998(6): 609-614.

[31] 郑小平，张卫文，邵明，等. 双流连续铸制备层状金属复合材料的研究及其应用 // 第二届层压金属复合材料生产技术开发与应用学术研讨会[C]. 北京：北京机械工程学会，2010（10）：60-69.

[32] 张卫文，李元元，龙雁，等. 半连续铸造法制备 AlCu/Al 梯度材料 [J]. 中国有色金属学报，2002(S1): 188-191.

[33] 张卫文，朱苍山，魏兴钊，等. 生产梯度材料的双流浇注连续铸造方法 [J]. 科学通报，1998(10): 1223-1226.

[34] 许峰，张卫文，罗宗强，等. 连续铸造制备 Mg-Al/Al 梯度复合材料的试验研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2007，27 (8): 624-626，572.

[35] Li Yuan-yuan, Zheng Xiao-ping, Zhang Wei-wen, et al. Effect of deformation temperature on microstructures and properties of 7075/6009 alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(5): 1037-1043.

[36] 张卫文，陈维平，费劲，等. Microstructure and mechanical property of 2024/3003 gradient aluminum alloy [J]. Journal of Central South University of Technology (English Edition). 2004 (2): 128-133.

[37] Weiwen Zhang Xiaoping Zheng，Qiang Huang. Mechanical properties of laminated aluminum-based plates with gradient interface [C]. // MRS International Materials Research Conference. Chongqing. 2008:6.

[38] 刘晓涛，张延安，崔建忠. 层状金属复合材料生产工艺及其新进展[J]. 材料导报，2002(7): 41-43，50.

[39] 陈燕俊，周世平，杨富陶，等. 层叠复合材料加工技术新进展[J]. 材料科学与工程，2002(1): 140-142，132.

[40] 杨红娜，黄航，沃西源，等. 桁架结构卫星接头的研究进展[J]. 航天返回与遥感，2003(2): 58-60.

[41] Zhang Y X, Yang C H. Recent developments in finite element analysis for laminated composite plates [J]. Composite Structures. 2009, 88(1): 147-157.

[42] Grishaber R B, Sergueeva A V, Mishra R S, et al. Laminated metal composites—High temperature deformation behavior [J]. Materials Science and Engineering: A. 2005, 403(1-2): 17-24.

[43] 于治民，吴春京，谢建新，等. 双金属层状复合材料连铸工艺的研究进展 [J]. 铸造技术，2004，25(5): 398-400.

[44] 夏兆辉，姚辉，孙谊媊，等. 铜铝复合材料在电力电气行业的研究和应用 [J]. 热加工工艺，2016，45(22): 24-28，32.

[45] 刘柱，梁贺，臧勃林，等. 受压顶出充芯连铸成形技术的实验研究 [J]. 热加工工艺. 2010，39(17): 48-51.

[46] 黎红英，李莎，梁贺，等. 气压顶出充芯连铸制备双金属复合材料试验研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2009，29 (11): 1047-1049，978.

[47] 汤宝钜，陆春校，黄欣，等. 初探铜包铝(CCA)在通信电缆中的应用 [C]. // 中国通信学会 2006 年光缆学术年会. 北京：中国通信学会，2006(12):409-420.

[48] 孙德勤，吴春京，谢建新. 双金属复合材料铸造工艺研究进展 [J]. 铸造，1999，48(12): 48-51.

[49] 颜莹，张彩碚，崔晶磊，等. 低频电磁场对半连铸高强 Al 合金组织结构的影响 [J]. 中国有色金属学报，2005，15(3): 415-422.

[50] 颜莹，张彩碚，崔晶磊，等. 低频电磁场频率对半连铸高强 Al 合金组织结构的影响 [J]. 东北大学学报，2005，51(5): 444-447.

[51] 张雪. 热双金属复合工艺及其发展趋势 [J]. 西安邮电学院学报，1999(2): 67-70.

[52] 王守诚，魏世忠，龙锐，等. 液固双金属复合铸造现状与前瞻 // 2004 年全国选矿新技术及其发展方向学术研讨与技术交流会 [C]. 中国博鳌，2004: 6.

[53] 吴彩虹. 直流电磁场下铝硅–铝镁复层材料的制备[D]. 大连：大连理工大学，2005.

[54] 杨大可，袁鹤清，陈乃琪，等. 轧辊复合层连续铸造法[J]. 机械工人(热加工)，1995(3): 5-6.

[55] 寇兴武. 高速钢轧辊工艺的改进与研发 [J]. 科技创新与应用. 2015(3): 81.

[56] 吴春京，沈定钊，杨大可，袁鹤清，陈乃琪. 轧辊复合层连续铸造法计算机数值模拟 [J]. 钢铁研究学报，1995(4): 19-24.

[57] 郝素斌，刘瑞玲. 复合轧辊铸造工艺及凝固模拟研究现状[J]. 热加工工艺，2012，41(5): 62-65.

[58] 李再久. Gasar 多孔铜（合金）的气孔结构及其力学性能研究 [D]. 昆明：昆明理工大学，2014.

[59] 李再久，金青林，杨天武，等. Gasar 连铸工艺制备藕状多孔铜 [J]. 中国有色金属学报，2014(6): 1531-1537.

[60] 贾宁涛. GASAR 连续铸造法制备多孔镁及其性能研究 [D]. 大连：大连理工大学硕士，2013.

（未完待续）

（上接 837 页）

[J]. 华南师范大学学报(自然科学版)，1999(3):99-107.

[3] 陈倩翌，甘志银，胡少林. 大尺寸 MOCVD 加热器的模拟仿真 [J]. 科技传播，2011(1)：83-85.

[4] 文尚胜，廖常俊，范广涵，等. 现代 MOCVD 技术的发展与展望 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版)，1999(3):99-107.

[5] 王鹏. 烧结钨板多道次轧制工艺及质量控制研究 [D]. 济南：山东大学,2014.

[6] 黄建辉. 金属材料的高温蠕变性能分析[J]. 中国新技术新产品，2012(09)：141.

[7] 刘宁平，淡新国，张永刚，等. 轧制工艺对热轧钨板材组织和性能的影响[J] .稀有金属快报，2008(8)：34-37.

[8] 刘强强. 粉末冶金纯钨板轧制工艺的控制与优化[D]. 太原：太原理工大学，2012.

[9] 杨昌麟，范景莲，龚星，等. 退火温度对挤压态细晶钨合金性能及组织演变的影响 [J]. 稀有金属材料与工程，2013，42(11): 2293-2297.