

特大规格 AZ 系镁合金扁锭的半连续铸造工艺

侯 健, 廖启宇, 贾永辉, 乐启炽, 宝 磊, 王 彤

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 以特大规格AZ系镁合金扁锭实际生产过程为例, 分别从铸造前准备、铸造系统设计、铸锭后处理三部分具体描述镁合金特大扁锭的加工工艺过程。该产品的生产验证过程和后续冶金质量考察结果表明, 使用半连续铸造工艺与低频电磁外场、脉冲电磁外场相结合的生产工艺, 其产品整体质量稳定良好, 符合技术规范要求。

关键词: 半连续铸造; 镁合金; 大规格

在能源紧张和环保的压力下, 镁合金变形材的大规模应用势在必行, 其中板材是镁合金变形材应用最为广泛和最为大宗的工业产品类型^[1-6]。大批量工业化生产宽幅板材及板卷上具有明显优势的热轧开坯工艺路线的前提条件是制备大规格、高质量、低成本的铸造板坯产品。通过半连续铸造工艺与电磁外场的相结合, 可制备出最大宽纵比为3.5即横截面尺寸为1 400 mm×400 mm及最大长度为3 700 mm的大规格镁合金铸造板坯, 合金型号为AZ31与AZ80, 铸件表面需要处理至镜面效果, 并且表面无任何铸造缺陷。

本文以AZ系镁合金扁锭实际生产过程为例分别从铸造前准备、铸造工艺设计、铸造后处理三部分具体描述镁合金大扁锭的所有加工工艺过程。生产实例尺寸、合金型号、施加外场类型如表1所示。

1 铸造前准备

成熟的半连续铸造工艺离不开前期完善的熔炼工艺与供液系统。

1.1 熔炼工艺

在铸造前, 根据欲熔炼合金的总质量、合金成分及元素收得率计算添加的镁锭及合金元素的总量。熔炼过程中根据总量分批次将工业纯镁和工业纯铝加入坩埚中, 加热使其完全熔化, 再依次加入工业纯Zn以及MnCl₂开始精炼, 待熔体温度升高到660~680℃时, 通入氩气对熔体进行除气。随后, 利用光谱仪检测合金成分。当合金成分达到熔体温度的预设要求时, 向熔体中放入不锈钢过滤网, 为随后启动供液装置做准备。

本熔炼工艺中采用覆盖剂和保护气相结合的方式, 即合金熔炼过程中铺撒覆盖剂阻燃, 在静置和浇注过程中采用经干燥处理的CO₂+ (0.5%~1%质量分数) SF₆混合气体来保护镁合金熔液。出现燃点时立即补撒覆盖剂进行灭火。

1.2 供液系统

本工艺中的供液系统^[7]如图1所示, 通过图中的液位检测装置可清晰判断坩埚内合金熔体量, 并通过控电箱可以实现导液动力装置与液位检测装置的联合控制; 导液管及相关装置可满足生产制备不同规格镁合金铸锭; 导液管出口位置的支撑装置保障了稳定供液并可随时对出料口位置进行调整; 通过电极板和出料口连接控电箱

作者简介:

侯 健(1989-), 男, 博士, 主要从事凝固过程特理宏观场的数值模拟工作。E-mail: 1015305264@qq.com

通讯作者:

乐启炽, 男, 教授。E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn

中图分类号: TG249.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)10-1048-07

收稿日期:

2020-05-06 收到初稿,
2020-06-10 收到修订稿。

可以实现导液管加热时温度分布均匀，实现大体积熔体的连续供液。具体过程如下：①经熔炼工艺处理后的熔体在炉内静置后，开启控电箱控制对向电极板和导液管的出料口通电，对导液管进行加热，控制导液管的温度与合金熔体的温度差为5~15℃，同时通过石墨碳棒和液位检测装置检测坩埚内合金熔体的液位；②启动动力装置，通过电控箱开启倒液泵，合金熔体在倒液泵作用下被导入导液管，并进入结晶器，通过控制导液泵调控合金熔体的流量，将坩埚内的合金熔体经导液管输送到结晶器；③合金熔体经出料口流入结晶器开始铸造；随着合金熔体的输送，坩埚内的合金熔体逐渐较少；当合金熔体的液面离开用于液位检测的石墨碳棒时，控电箱收到信号并关闭动力装置，停止向结晶器输送合金熔体。具体浇注参数如表2所示。

2 铸造系统设计

2.1 分流盘设计

如图2所示，根据生产铸坯截面尺寸及宽纵比的不同，自行设计了熔体分流盘^[8-9]，通过改善熔体在铸造过程的分流进一步解决了由于宽度方向与纵向的不对称性导致大规格扁锭温度分布不均匀的问题。

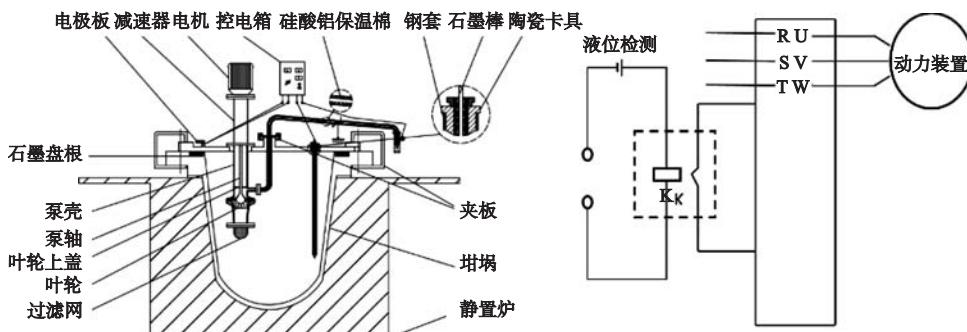
分流盘上方设置有高度调整装置，可在一定范围内调整高度。如图所示，分流盘由矩形侧壁和梯形底槽构成一体结构。其中，梯形底槽由两个倾斜的侧板和两个垂直的端板组成，其轴向截面为梯形，端板高度为10~60 mm，侧板与水平面的角度范围为20°~60°。矩形侧壁上设有圆形分流孔，直径为15~22 mm，矩形侧壁的每个角部均设有总面积为5 000~50 000 mm²的矩形分流口。

2.2 外场发生装置及负载线圈设计

如图3所示，外场装置主要包括^[10-12]：变压器、可控硅控制器、可控硅组件、电解电容组、IGBT控制器、IGBT组件、霍尔传感器、负载线圈、无级电容组、PLC核心组件、数显/控制表和触摸屏主令元件；其中变压器的一端与三相交流电源连接，另一端依次与可控硅控制器、可控硅组件和电解电容组连接，电解电容组还分别与无级电容组、IGBT组件和负载线圈连接，PLC核心组件分别与IGBT控制器、霍尔传感器和数显/控制表连接，IGBT控制器与IGBT组件连接，负载线圈与霍尔传感器连接，所述的数显/控制表与触摸屏主令元件连接；所述的变压器起到电压变换和隔

表1 各生产实例合金型号、尺寸及外场施加类型
Table1 The alloy, size and applied electromagnetic field for four industrial production cases

项目	生产实例1	生产实例2	生产实例3	生产实例4
浇注方式	单管浇注	单管浇注	双管浇注	双管浇注
尺寸/mm	1 450×400×1 700	1 450×400×1 200	1 230×450×3 500	1 230×450×3 700
施加电磁场类型	低频	低频	脉冲	脉冲



(a) 供液系统内部结构图

(b) 联合控制液体检测及动力装置电路原理图

图1 供液系统
Fig. 1 Fluid supply system

表2 DC 铸造各生产实例浇注相关工艺参数
Table 2 Pouring parameters for four industrial production cases

浇注工艺参数	生产实例1	生产实例2	生产实例3	生产实例4
浇注方式	单管浇注	单管浇注	双管浇注	双管浇注
浇注温度/℃	680	680	660	670

离保证操作安全作用；可控硅组件及可控硅控制器起整流作用；电解电容组是储能滤波单元；IGBT组件是功率元件，IGBT控制器是触发单元；负载线圈与无级电容组并联构成LC震荡回路，所述的负载线圈为矩形截面，由绝缘扁铜线缠绕而成；所述的霍尔传感器、数显/控制表、PLC核心组件和触摸屏主令元件构成信号检测与控制回路；其中的霍尔传感器对LC震荡回路中的电流信号进行检测，通过数显/控制表实时显示并与PLC核心组件进行信号传输，实现IGBT控制器对IGBT组件的控制。所述的负载线圈置于结晶器冷却水腔中。通过线圈定位上夹板、线圈定位下夹板、紧固螺母和紧固螺杆固定。

各生产实例电磁场相关输入参数：电流、频率及占空比如表3所示。

2.3 引锭头设计

引锭头具体结构如图4所示^[13-14]。引锭头从上到下依次为引锭头上部方槽、引锭头底座和引锭头固定柱，其中引锭头上部方槽内部为阶梯式的两层槽型结构，每层槽型结构的边角部分为弧形，并且下层槽型结构的中心向下凹陷；引锭头底座内部设有空腔，该空腔通过上部方槽底部的引锭头气孔与上部方槽的内部连通；其中下层槽型结果的中心凹陷深度范围为1.5~4.5 mm。各生产实例启车与稳态拉坯速度如表4所示。

2.4 冷却系统设计

铸造过程中的冷却系统^[7, 15-16]结构与现场实物分别如图5、图6所示。根据冷却换热方式及安装位置、冷却次序的不同可将铸造过程中的冷却系统分为一次冷却系统、二次冷却系统以及三次冷却系统。

一次冷却系统如图5所示。当带有一定初始压力的熔体流出分流盘后，在电磁线圈产生的外部变化的电磁场作用下熔体会以一定的速度冲击结晶器内壁。随后，熔体中的部分热量由导热性优异的6系铝合金（6061、6082铝合金）材质结晶器内壁传向水箱中的冷却水。随着热量的散失，熔体开始凝固并开始收缩。铸坯表面与结晶器内壁通过中间出现的气隙进行热量交换。

一次冷却与二次冷却系统如图5a所示。一次冷却系统中的冷却水在进水口压力及水的自然重力作用下通过结晶器底端的具有一定间距孔径的水孔以射流冲击的方式冲击铸坯表面的一定区域进行换热，此区域称为冲击区。在冲击区的下方，冷却水在重力的作用下持续与铸坯表面进行换热，此区域称为自由落水区。对于尺寸要求较大的铸坯，需要在二次冷却水孔下方一定距离额外安置水箱以保证冷却系统的冷却强

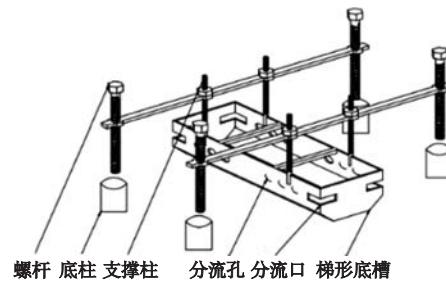


图2 分流盘示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shunt

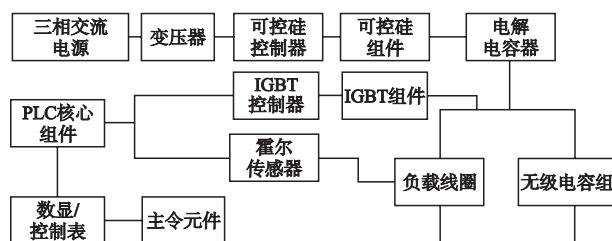


图3 发生装置主要硬件及其连接方式

Fig. 3 The main hardware and its connecting method of production equipment

表3 各生产实例电磁场相关输入参数

Table 3 Inputting parameters of electromagnetic field for four cases

项目	生产实例1	生产实例2	生产实例3	生产实例4
电流调控范围/A	10~200	10~200	5~180	5~180
频率调控范围/Hz	5~40	5~40	5~40	5~40
占空比调控范围/%			5~80	5~80

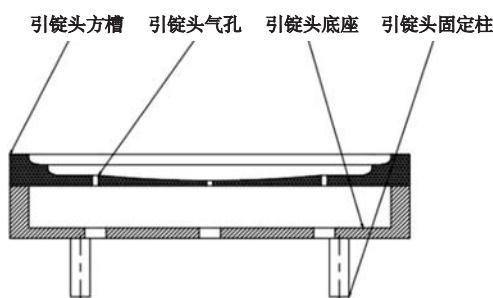


图4 引锭头内部结构

Fig. 4 Structure of dummy bar

表4 各生产实例启车与稳态拉坯速度

Table 4 Initial speed and withdraw slab speed for four cases

项目	生产实例1	生产实例2	生产实例3	生产实例4
启车速度 / (mm·min⁻¹)	15	15	3	4.5
稳态拉坯速度 / (mm·min⁻¹)	20	20	25.5	2.5

度，此冷却称为三次冷却系统，其冷却方式与二次冷却系统相似。

3 铸造工艺过程与冶金质量考察

半连续铸造结合电磁外场工艺过程如下^[17]：

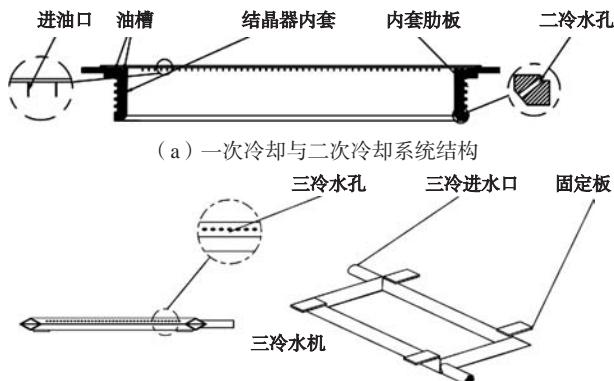
首先，对结晶器、分流盘进行干燥处理并开启保护气装置。随后，炉内合金熔体经熔炼、净化和静置后在供液装置的作用下经导液管从出料口流入分流盘，再由分流盘中的分流孔/分流口流入到结晶器内套中；向针阀油杯中注入润滑油，润滑油经油槽和出油孔流到结晶器内套中，实现铸锭表面润滑；向一冷水箱和三冷水箱内通入冷却水，向气体保护喷管中通入保护气体保护合金熔体，避免合金熔体的氧化与燃烧；当液面达到与分流盘的上沿平齐时，开始由脉冲电源向电磁线圈通入脉冲电流或低频电流，对合金熔体施加脉冲磁场或低频磁场，启动铸造机开始铸造；铸造过程中，通过调节导流锥与导液管口下端的间距以及通过分流盘调整装置调节分流盘位置，调控导液管出口合金熔体流量以及结晶器内合金熔体的温度分布，保持液面稳定；铸造到预定长度时，停止供给镁合金液，在合金熔体的液面低于分流盘底时，铸造机停车，取出分流盘，待铸锭上表面凝固后，关闭脉冲电流，停止电源、冷却水和保护气体，吊出铸锭，铸造结束。

液穴深度是半连续铸造过程中的一个极其重要的参数，在半连铸稳定状态下对分流盘处各位置液穴深度进行了多次测量并取其平均液穴深度值。在镁合金扁锭稳态铸造情况下，测量液穴深度结果表明（图7与表6），平均液穴深度由边部到中心逐渐增大，液穴形状近似左右对称。最大液穴深度值位于中心，分别为105.75 mm, 143.75 mm, 125 mm, 132.5 mm。

对截面尺寸为400 mm×1 450 mm（生产实例1，生产实例2）的镁合金扁铸锭的直读光谱分析结果表明

表5 各生产实例二次、三次冷却系统喷水量
Table 5 The rate of spraying cooling water for four cases

冷却系统水量	生产实例1	生产实例2	生产实例3	生产实例4
二次冷却系统喷水量 范围/(L·min ⁻¹)	0.5~0.6	0.7~0.8	0.3~0.4	0.3~0.4
三次冷却系统喷水量 范围/(L·min ⁻¹)	0.3~0.4	0.3~0.4	0.2~0.3	0.2~0.3



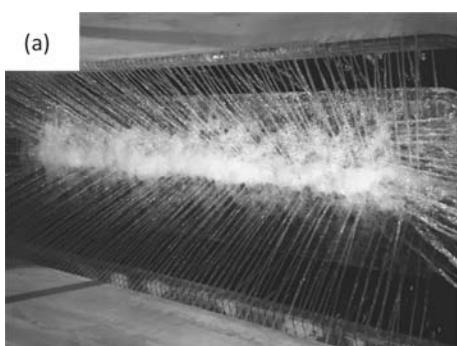
(b) 三次冷却系统结构图

图5 冷却系统

Fig. 5 Cooling system

（图8与表6），主合金元素Al在整个宽度和厚度方向上的宏观偏析均较小。在靠近铸锭底部附近，其偏析率大致为21%和22%，在扁铸锭上部，偏析率大致为17%和16%。

将底部切除100 mm，对长度为630 mm的AZ80镁合金大扁铸锭进行无损探伤（图9）。统计结果（图10）表明，铸锭无铸造裂纹，但在距离引锭底部附近约200~300 mm范围内，仍然集中存在大量的外形尺寸在1~2 mm的氧化物夹渣。可见，对采用底流式铸造工艺的导液方式，铸锭底部切除量至少要300 mm，方可消除铺底和启车初始阶段的流道氧化物夹杂和不稳定流动导致的卷杂。在铸造稳定（铸造长度至少大于



(a) 二次冷却系统现场图



(b) 三次冷却系统现场图

图6 冷却系统现场图
Fig. 6 Scene view of cooling systems

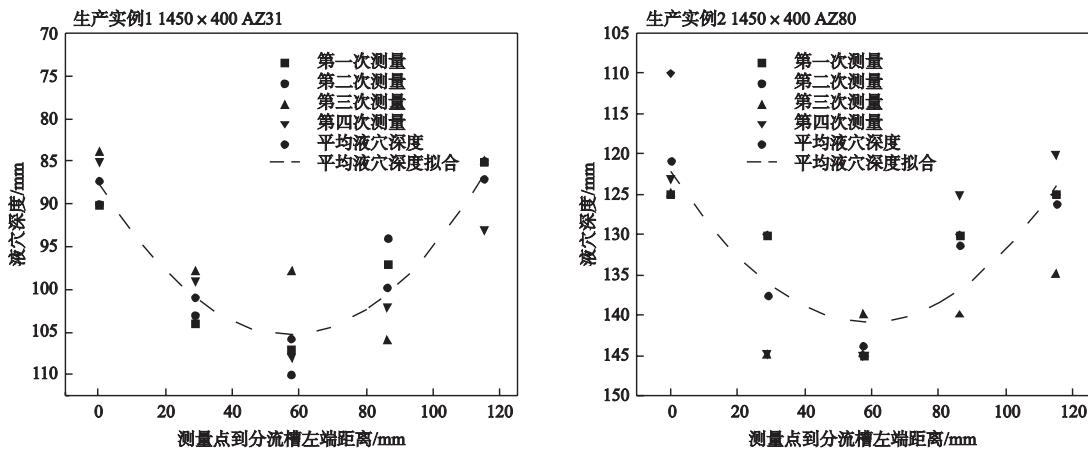


图7 生产实例1和2稳态下分流盘液穴深度
Fig. 7 Depth of melt cave at steady state for case1 and case2

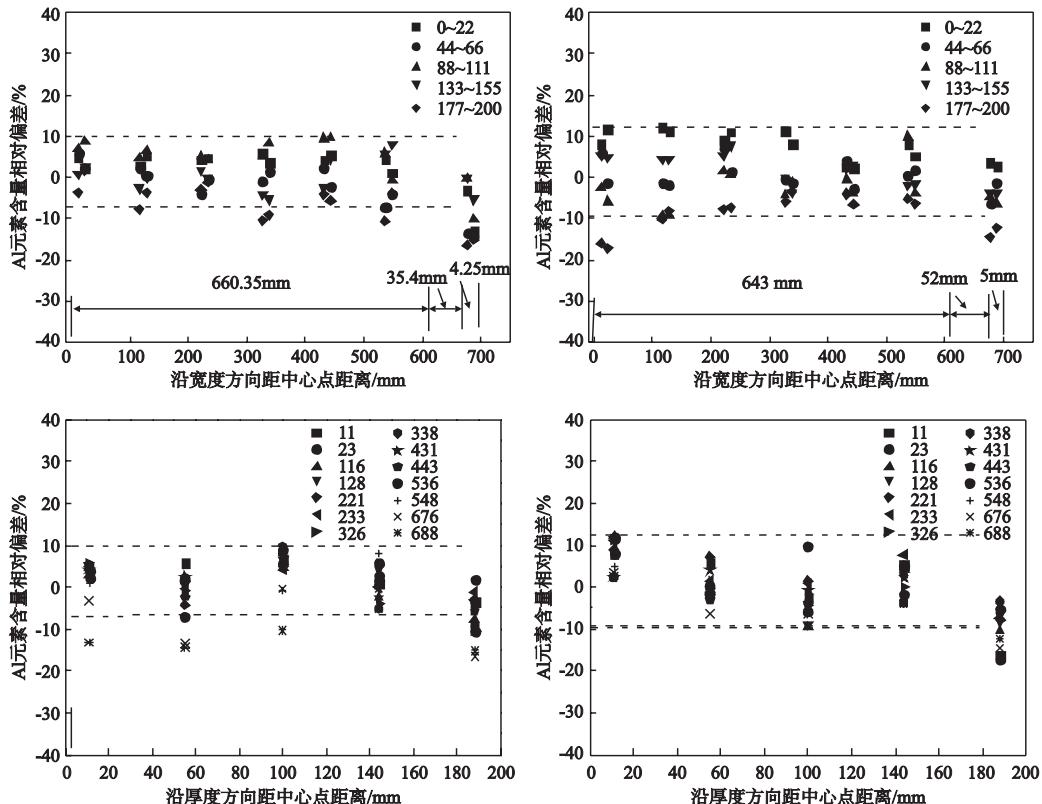


图8 生产实例2镁合金扁铸锭的宏观偏析水平
Fig. 8 Macrosegregation of magnesium slab under the condition of case2

表6 各生产实例分流盘处平均液穴深度
Table 6 Average depth of melt cave for four cases

平均液穴深度	生产实例1	生产实例2	生产实例3	生产实例4
中心液穴深度/mm	105.75	143.75	125	132.5
左侧边部/mm	87.25	120.75	102.5	103.5
右侧边部/mm	87	126.25	92.5	112.5
左侧中心/mm	101	137.5	120	132.5
右侧中心/mm	99.75	131.25	110	127.5

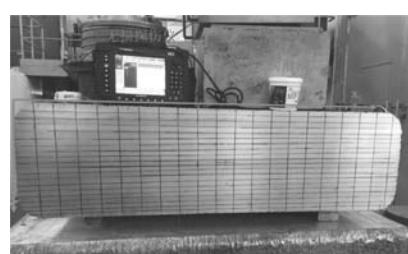


图9 生产实例2的无损探伤现场
Fig. 9 Non-destructive testing scene of case 2

300 mm)之后, 无可识别的夹杂物, 在300~400 mm阶段存在少量夹杂物, 根据超声无损检测AMS-STD-2154标准的不连续缺陷分级, 铸锭达到A级水平。

目前已经成功制备出毛坯横截面尺寸为390 mm×1 430 mm的AZ31和AZ80等AZ系列镁合金大扁坯的无裂纹铸锭。通过对样品的质量考察表明, 大扁铸锭表面铣后横截面尺寸为厚342~370 mm 宽1 398~1 402 mm, 厚向和宽向的表面单面铣切量分别为20~48 mm和28~32 mm, 铣切成材率为85.7%~93%; 锻坯在宽度和厚度方向上的最大晶粒尺寸至少减小40%和38%; 主元素Al在铣切后铸锭横截面宽度和厚度方向上的宏观偏析分

别小于1.2%/100mm和4.6%/100mm; 超声无损检测达到AMS-STD-2154标准的A级水平。

4 铸锭后处理

铸造完成后, 将铸坯送入热处理炉, 如图11a所示。通过热处理工艺消除铸造产生的部分缺陷及内部应力以提供良好的机械加工性能, 图11b展示了热处理后机械加工过程。从图11c可以看出, 最终产品表面质量良好。按照上述工艺生产, 整个铸造生产过程稳定, 铸件尺寸、表面质量、偏析以及产品内部铸造缺陷、后处理等按照相关规范检验均合格, 符合生产要求。

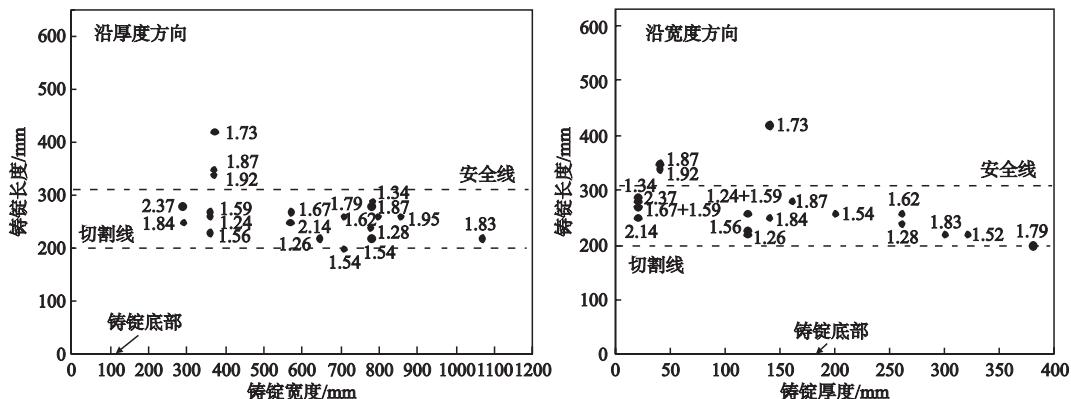


图10 生产实例2 AZ80的无损探伤统计结果
Fig. 10 Statistical results of non-destructive testing for case 2

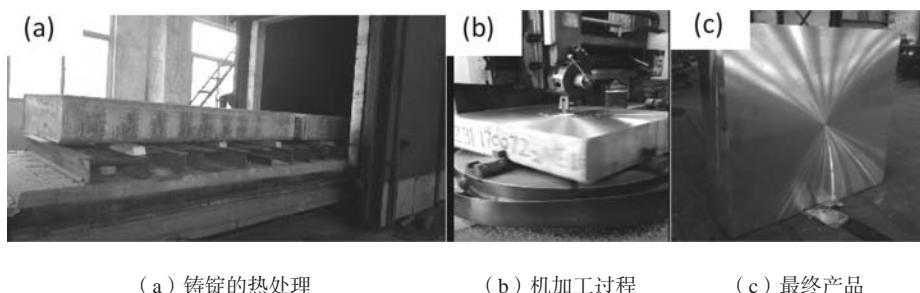


图11 铸锭后处理及最终产品
Fig. 11 Post treatment of slab and final product

5 结束语

在传统半连续铸造工艺的基础上额外运用电磁外场技术, 设计了一套适用于特大规格AZ系镁合金电磁半连续铸造工艺。运用此工艺制备的镁合金扁锭, 最大宽度可达1 450 mm, 最大长度可达3 700 mm。基于实际生产, 优化了半连续铸造系统中的分流盘、一次冷却系统、二次冷却系统、三次冷却系统以及引锭的结构。后续冶金质量考察结果表明: 主合金元素Al在整个宽度和厚度方向上的宏观偏析均较小。在靠近铸锭底部附近, 其偏析率大致为21%和22%, 在扁铸锭上部, 偏析率大致为17%和16%; 根据超声无损检测AMS-STD-2154标准的不连续缺陷分级, 铸锭达到A级水平。铸锭经热处理及机械加工等铸造后处理工艺后, 铸锭表面光洁并且无明显裂纹等铸造缺陷。此工艺已运用到特大规格镁合金扁锭的生产中, 生产出的产品质量稳定, 符合相关技术要求。

参考文献：

- [1] 胡文义, 乐启炽, 刘轩, 等. 大规格AZ31镁合金板坯半连续铸造温度场数值模拟 [J]. 材料热处理学报, 2015 (5) : 214–219.
- [2] ZARANDI F , SEALE G , VERMA R , et al. Effect of Al and Mn additions on rolling and deformation behavior of AZ series magnesium alloys [J]. Materials ence& Engineering A, 2008, 496 (1-2) : 159–168.
- [3] 胡文义, 乐启炽, 刘轩, 等. 电磁铸造镁合金大规格板坯偏析与组织研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45 (9) : 2434–2438.
- [4] ZARANDI F , SEALE G , VERMA R , et al. Effect of Al and Mn additions on rolling and deformation behavior of AZ series magnesium alloys [J]. Materials ence& Engineering A, 2008, 496 (1-2) : 159–168.
- [5] HOU Jian, ZHANG Qinglong, NIU Yanxia, et al. Electromagnetic shielding property of duplex magnesium alloy with laminated structure processed by accumulative roll bonding [J]. Materials Research Express, 2018, 5.
- [6] JIA Weitao, LE Qichi, TANG Yan, et al. Role of pre-vertical compression in deformation behavior of Mg alloy AZ31B during super-high reduction hot rolling process [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34 (11) : 103–117.
- [7] 乐启炽, 贾永辉, 侯健. 用于制备镁合金大规格长扁锭的连续供液装置及使用方法: CN108465790B [P]. 中国, 2020.
- [8] 乐启炽, 侯建, 廖启宇, 等. 大规格镁合金长扁锭半连续铸造装置: CN108637200B [P]. 中国, 2019
- [9] Kerim Askin. Starting dummy bar positioner for continuous casting of metals [J]. 1977.
- [10] 乐启炽, 侯健, 贾永辉, 等. 一种半连续铸造液穴熔体的电磁处理装置及其工作方法: CN106925736B [P]. 中国, 2018.
- [11] 乐启炽, 侯健, 贾永辉, 等. 一种电磁半连续铸造装置及其铸造方法: CN106944598B [P]. 中国, 2018
- [12] Gardin P, Dumont B, Anderhuber M, et al. Electromagnetic casting of slabs: development of numerical models for an AC and DC configuration in the mould [J]. Revue De Métallurgie, 2002, 98 (11) : 1015–1024.
- [13] 乐启炽, 张志强, 崔建忠, 等. 镁合金锭坯的油滑电磁立式半连续铸造方法与结晶器: CN101239371A [P]. 中国, 2008.
- [14] Hirayama R, Fujisaki K. Combined system of AC and DC electromagnetic field for stabilized flow in continuous casting [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (10) : 4042–4044.
- [15] 乐启炽, 崔建忠, 张志强. 组合外场作用下大尺寸镁合金板坯连铸装置与方法: CN102284686A [P]. 中国, 2011.
- [16] CARON E, WELLS M A. Secondary cooling in the direct-chill casting of magnesium alloy AZ31 [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2009, 40 (4) : 585–595.
- [17] 乐启炽, 张志强, 胡文义, 等. 一种轻合金熔体磁致振动凝固的装置及方法: CN106282869B [P]. 中国, 2017.

Direct Chill Casting of Large-Size AZ Series Magnesium Alloys Slab

HOU Jian, LIAO Qi-yu, JIA Yong-hui, LE Qi-chi, BAO Lei, WANG Tong

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract:

In this paper, the production process of large-size magnesium slab is described from three aspects of the pre-casting preparation, casting system design and post treatment of slab. The industrial production verification and the follow-up metallurgical quality inspection results have illustrated that the direct-chill(DC) casting process combined with low-frequency electromagnetic field and pulse electromagnetic field can ensure that the magnesium slab products has stable and reliable quality, which fully meets the requirements of technical specification.

Key words:

direct-chill casting; magnesium alloy; large size