二次冷却水量对镁合金板坯凝固过程的影响

胡文义^{1,2},乐启炽²,郭 薇¹

(1. 龙岩学院化学与材料学院,福建龙岩 364012;2. 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: 通过对镁合金板坯半连续铸造过程中凝壳位置进行探测,并利用光学显微镜和体视显微镜研究了二次冷却水量对板坯凝壳形状、位置和凝固组织的影响。结果表明:随着二次冷却水量增大,垂直于轧制面的对称面上凝壳形状变得平缓,而另一对称面上的凝壳变得陡峭,板坯角部凝壳位置明显升高。增大二次冷却水量能够抑制板坯心部柱状晶的生长,并使凝固组织更加细小均匀。

关键词: 镁合金板坯; 半连续铸造; 凝壳; 微观组织

目前,中国原镁产量和出口量逐年增长,但靠近终端市场的高附加值镁合金产品的开发和应用却相对不足,一定程度上依赖进口。由于合金产品在应对资源与环境问题时具有诸多优势^[1],使其在交通、3C、航空航天等领域的应用前景十分广阔^[2-3]。 在镁合金产品制备过程中,直接水冷半连续铸造(半连铸)是制备变形镁合金产品所需锭坯的主要方法,尤其对于挤压和轧制过程,半连铸锭坯的质量直接影响后续变形过程^[4]。近年来,国内外市场对镁合金板材的需求逐渐增长,其中宽幅镁合金板材主要通过开坯轧制法生产^[5],而该方法对镁合金半连铸板坯质量提出了更高的要求,促使板坯的半连续铸造技术受到更多生产厂商和研究机构的关注^[68]。

由于板坯截面形状的对称性不同于圆坯,因此其半连续铸造工艺参数的调节比 圆坯更加复杂,在实际生产过程中更难于控制^[9-10]。在板坯生产过程中,因工艺控制 不当导致的异常现象主要有熔体分流不畅、二次冷却水返水、熔体下漏等,不仅易 引发安全事故,还易使产品出现冷隔、夹渣、裂纹、组织粗大等质量问题^[11-12]。常规 半连续铸造(无电磁搅拌)的可控工艺参数主要包括铸造速度、铸造温度、一次冷 却水量、二次冷却水量、结晶器内熔体分流方式等。本研究通过在实际生产过程中 保证一次冷却水量(结晶器内冷却水量)、铸造速度、铸造温度等条件不变,仅改 变二次冷却水量,获得冷却水量变化时AZ80镁合金板坯凝固过程中凝壳形状、凝壳 位置及板坯凝固组织的变化情况,为后续生产过程中工艺参数的制定提供参考。

1 试验材料与方法

试验过程中所使用的合金为AZ80,制备的板坯截面尺寸为300 mm×130 mm, 铸造速度为80 mm/min,铸造温度为680 ℃,二次冷却水量分别为40 L/min和 70 L/min。试验过程所使用的原料为工业纯镁锭(99.9%)、工业纯铝锭(99.7%)、 锌锭(99.5%)、无水氯化锰及部分同牌号重熔锭坯。所述合金在容量为200 kg的井 式电阻炉中熔化,先加入镁锭及重熔锭坯,待镁锭熔化后加入工业纯铝和锌锭,最 后在搅拌过程中加入氯化锰。合金成分合格后,进行精炼、除铁、静置,待熔体温 度稳定于铸造温度后,封闭坩埚,安装导液管,开始铸造。铸造过程达到稳态后, 使用直径为4 mm的不锈钢棒由液面垂直插入液穴内,探测不同部位的液穴深度。

如图1a所示,将板坯横截面上的两个对称面分别定义A和B,其中A对称面垂直于

作者简介:

胡文义(1987-),男,副 教授,博士,研究方向为 有色金属铸造技术工艺及 其数值模拟技术。E-mail: 692143009@qq.com。 通讯作者: 乐启炽,男,教授,E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn。

中图分类号:TG146.2 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2020) 10-1055-05

基金项目:

国家自然科学基金 (51904151);龙岩学院博 士启动项目(LB2018011)。 收稿日期: 2020-07-24。 轧制面, B对称面垂直于侧面;根据对称性,在1/4截面 上选取25个点作为凝壳探测位置,各个相邻点沿4对称 面方向距离为12.5 mm,沿B对称面方向距离为34 mm。 如图1b、1c所示,点1、2、3分别为4和B对称面上进行 微观组织观察时的取样位置。试样经过锯切、抛光、 腐蚀后通过LEICA-DMR金相显微镜采集显微组织,通 过体视显微镜采集宏观组织。

2 结果和分析

2.1 冷却水量对凝壳的影响

其他工艺参数保持不变,将冷却水量分别调整为 40 L/min和70 L/min时,铸造过程达到稳态后,板坯两 个对称面上的凝壳形状和位置如图2所示。

由图2a、b可知,冷却水量变化时,凝壳的最 低处均位于板坯横截面的中心,且均处于液面以下 145 mm附近,其位置受冷却水量变化的影响较小。如 图2a所示,在A对称面上,随着冷却水量增大,距离心 部12.5 mm测量点位置附近的凝壳位置略有上升,使心 部附近凝壳变得陡峭;而在距离心部25 mm的测量点 和边部之间的范围内,凝壳位置下降;冷却水量增大 后,该对称面上的液穴深度(边部凝壳位置与心部凝 壳位置的差)由75 mm减小到73 mm。由图2b可知,在 B对称面上,随着冷却水量的增大,仅心部凝壳位置无 明显变化,其余部位的凝壳上升,边部凝壳位置由液 面下69 mm位置上升至液面下59 mm位置,变化最为明 显,使该对称面上的凝壳形状整体变得陡峭,同时该 面上的液穴深度由76 mm增加到86 mm。在镁合金半连 续铸造过程中,锭坯的凝壳形状是在一次冷却和二次 冷却综合作用下形成的。在板坯的A对称面边部,当一 次冷却水量不变,二次冷却水量增加时,更多的热量 通过锭坯表面传递给二次冷却水,靠近二次冷却水冲 击点附近的锭坯降温速率较大,温度较低,体积收缩 速度加快;同时,由于体积收缩,锭坯与结晶器内表 面之间形成的缝隙增大,进而降低了一次冷却强度^[15-17], 使该位置附近的凝壳高度降低。在B对称面上,由于高 温熔体流向边部的流动填充过程中,大量的热量由轧制 面散出,熔体温度逐渐降低,二次冷却水量增大后,进 一步增加了侧面和角部的冷却强度,使B对称面上除心 部外其余部分的凝壳高度上升,目边部最为明显。

图3为不同二次冷却水量下,根据图1a中的探测点 位置及其对应点凝壳位置绘制的板坯凝壳三维图。图 中所示的A轴和B轴方向与图1a中所示A对称面和B对称 面方向一致,两轴的原点为板坯横截面的中心,H方向 为所示位置到液面的距离。由三维图可知,半连续铸 造过程中,板坯凝壳形状为中心低、边部高的碗状; 板坯表面上的凝壳最低处位于轧制面的中心,因此在 铸造过程中应注意防止该处熔体由结晶器下端漏出。 当冷却水量由40 L/min增加到70 L/min时,凝壳形状由 平缓变得陡峭,尤其在板坯的角部,凝壳位置显著升 高,变化最为明显。





图3 板坯内部的凝壳形状 Fig. 3 Solidified shell shape in slab

在半连续铸造过程中,金属熔体的热量沿热通量 最大的方向向外传递^[13],而板坯同一水平截面的四个 边上的沿水平方向的散热过程相近,常使板坯内各点 的热量以最短的路径导出^[14],其热量的传输情况近似 如图4所示。可见,板坯角部附近的热量向相互垂直的 两个表面散失,因此角部附近的冷却强度显著大于心 部附近,因此该位置凝壳高度最高。而当其他条件不 变,增大二次冷却水量时,板坯角部的冷却强度将明 显增大,该位置凝壳高度增加。

2.2 二次冷却水量对板坯凝固组织的影响

二次冷却水量的变化将引起半连铸过程中板坯内部 温度场的变化,进而影响金属熔体凝固过程中的形核及 长大过程,使凝固后的组织发生变化。图5和图6分别为 不同二次冷却水量下板坯A和B对称面上的凝固组织,其 中图a和b分别为二次冷却水量40 L/min和70 L/min下的宏



图4 板坯横截面热量传输示意图 Fig. 4 Heat transfer schematic of slab on cross section

观组织,图1a-1、a-2、a-3和b-1、b-2、b-3分别为对应二次冷却水量下板坯心部、心部到边部正中间位置、边部的微观组织,具体位置如图1a和1b中的1、2、3所示。

如图5a、b宏观组织图所示,当冷却水量较小时该 对称面上板坯心部为柱状晶区,其柱状晶均斜向上指 向板坯中心,心部到边部正中间位置处为等轴晶区, 边部附近为粗晶区。当二次冷水量增大后心部柱状晶 的生长方向发生改变,接近水平生长,边部附近出现



图5 板坯A对称面上的凝固组织 Fig. 5 Solidification structure of slab on A-symmetry-plane

极薄的细晶区,心部到边部正中间位置处的晶粒尺寸 变化不明显。通过微观组织图可知,二次冷却水量较 小时板坯心部可见大量生长方向一致且一次枝晶细长 的羽毛状枝晶,冷却水量提高后枝晶生长取向更加贴 近水平方向;而在心部到边部的正中间位置,冷却水 量提高后晶粒变为明显的雪花状等轴晶;冷却水量增 大使板坯边部组织细化。在板坯心部,凝壳出现更加 陡峭的坡度,而枝晶生长方向近似与其所在凝壳处的 弧面相垂直,随着该对称面上心部的凝壳变得陡峭, 其心部树枝晶生长方向向水平方向倾斜。同时,水量 增大后该截面上温度梯度及过冷度增大,使晶粒来不 及长大而成为细小的等轴晶。

从宏观组织图6a、b可见,水量为40 L/min时该对称面上板坯心部附近为柱状晶区,枝晶生长方向均为斜向上指向板坯中心,截面上其他部分为等轴晶区。 二次冷却水量增大后心部出现细小的等轴晶区,柱状

晶区缩小且晶粒尺寸变小,外侧等轴晶细化,边部出 现一薄层细晶区,该对称面上的组织整体细化。由图 6a-1的微观组织可知,二次冷却水量为40 L/min时板坯 心部可见生长方向一致的羽毛状树枝晶;当二次冷却 水量增大到70 L/min后,心部枝晶的生长取向性明显减 弱,一次枝晶臂长度显著变短,晶间可见大量破碎枝 晶臂。通过对比不同冷却水量下心部到边部正中间位 置的微观组织可知,冷却水量增大后该处组织细化, 树枝晶退化,第二相所占面积明显下降。在板坯边部 附近,冷却水量增大同样使该处的树枝晶显著退化, 枝晶臂变短变粗。结合该对称面上的凝壳变化情况可 知,冷却水量增加后该对称面上温度梯度及过冷度同 样变大,枝晶生长时间变短,且边部熔体更易于在结 晶器内表面形核,形核核心数量增加,增加的形核核 心随着熔体流动到板坯内部,使整个截面上的组织细 化,柱状晶区缩小。



图6 板坯B对称面上的凝固组织 Fig. 6 Solidification structure of slab on *B*-symmetry-plane

3 结论

(1)随着冷却水量的增加,板坯中心位置的凝壳 高度无明显变化;在垂直于轧制面的对称面上,心部 周围凝壳上升,边部凝壳下降,使该面凝壳形状更加 平缓;在厚度方向对称面上,随二次冷却水量增大, 除心部外其他部位凝壳高度均上升,液穴深度增大; 板坯角部凝壳随着二次冷却水量增大而显著上升。

(2)提高二次冷却水量有助于抑制板坯心部附 近一次枝晶的生长,并使板坯内部柱状晶区的范围缩 小,弱化枝晶组织;同时,增大二次冷却水量可细化 等轴晶组织,提高板坯组织均匀性。

参考文献:

- [1] SONG J F, SHE J, CHE D L, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8 (1): 1–41.
- [2] 余琨,黎文献,王日初,等.变形镁合金的研究、开发及应用[J].中国有色金属学报,2003,13(2):277-288.
- [3] WANG S F, HU W W, GAO Z H, et al. The application of magnesium alloy in automotive seat design [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 395-396: 266–270.
- [4] BETTLES C, BARNETT M (Eds.). Advances in wrought magnesium alloys: fundamentals of processing, properties and applications
 [M]. Woodhead Publishing, 2012.
- [5] WATANABE H, MUKAI T, ISHIKAWA K. Differential speed rolling of an AZ31 magnesium alloy and the resulting mechanical properties
 [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39 (4) : 1477–1480.
- [6] MACKIE D, ROBSON J D, WITHERS P J, et al. Characterization and modelling of defect formation in direct-chill cast AZ80 alloy [J]. Materials Characterization, 2015, 104 (3): 116–123.
- [7] JIANG H S, ZHENG M Y, QIAO X G, et al. Microstructure and mechanical properties of WE43 magnesium alloy fabricated by directchill casting [J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 684: 158–164.
- [8] 邢清源,杨守杰,李晓玲,等.Sc、Er元素在Al-Zn-Mg合金中的作用机理研究[J].铸造,2019,68(2):144-151.
- [9] HU W, LE Q, ZHANG Z, et al. Numerical simulation of DC casting of AZ31 magnesium slab at different casting speeds [J]. Journal of Magnesium & Alloys, 2013, 1 (1): 88–93.
- [10] 张青来,郭海玲, Bondarev A B,等. AZ31B变形镁合金板坯的组织与性能研究 [J]. 金属热处理, 2008, 33 (7): 24-28.
- [11] ETIENNE JFR, CARON E, WELLS MA, et al. Evaluation of the surface heat flux in the secondary zone during the direct-chill casting of magnesium alloy AZ31 [J]. Magnesium Technology, 2005: 229–234.
- [12] CARON E, WELLS MA. Secondary cooling in the direct-chill casting of magnesium alloy AZ31 [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2009, 40 (4): 585–595.
- [13] BRUNO L G S, LI H T, PATEL J B, et al. Numerical modelling of melt-conditioned direct-chill casting [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 77: 1310-1330. G.S. Bruno LebonaHu-TianLiabJayesh B.Patel
- [14] CARON E J F R, BASERINIA A R, NG H, et al. Heat-transfer measurements in the primary cooling phase of the direct-chill casting process [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2012, 43 (5) : 1202–1213.
- [15] WECKMAN D C, NIESSEN P A. A numerical simulation of the D. C. continuous casting process including nucleate boiling heat transfer [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1982, 13 (4): 593–602.
- [16] SENGUPTA J, COCKCROFT S L, MAIJER D, et al. The effect of water ejection and water incursion on the evolution of thermal field during the start-up phase of the direct chill casting process [J]. Journal of Light Metals, 2002, 2 (3): 137–148.
- [17] LEONG K C, HO J Y, WONG K K. A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 112: 999–1019.

Effect of Secondary Cooling Water Intensity on Solidification Structure During Semi-Continuous Casting of Magnesium Slab

HU Wen-yi^{1, 2}, LE Qi-chi², GUO Wei¹

(1. School of Chemical and Materials Science, Longyan University, Longyan 364012, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract:

The effect of secondary cooling water intensity on the solidification structure and solidified shell shape and position during direct chilling casting of magnesium slab was investigated by stereo microscope, optical microscope and the measurement of solidification shell positions. The results show that the solidified shell shape on the symmetry plane perpendicular to rolling surface becomes less steep, but that on the other symmetry plane steepened and the solidified shell near slab corner rose significantly with increasing secondary cooling water flow rate. Moreover, the growth of primary dendrite was restrained and grains was refined under the condition of high secondary cooling water flow rate.

Key words:

magnesium slab; semi-continuous casting; solidified shell; microstructure