

半连续铸造铝合金表面缺陷的形成机理及影响因素

李志猛^{1,2} 左玉波^{1,2} 朱庆丰^{1,2} 王睿^{1,2} 刘旭东^{1,2}

(1.东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室; 2.东北大学材料科学与工程学院)

摘要 介绍了半连续铸造铝合金锭坯冷隔、皮下偏析层、表面偏析瘤、拉痕等表面缺陷的特点和形成机制。分析了在半连续铸造铝合金锭坯过程中结晶器结构、铸造工艺参数对这些表面缺陷的影响及作用机理。在此基础上总结了提高铸锭表面品质的技术发展和工艺优化方向。

关键词 铝合金;半连续铸造;铸锭表面质量;表层偏析

中图分类号 TG249.6;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.022



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Formation Mechanism and Influencing Factors of Surface Defects in Semi-Continuous Casting Aluminum Alloy

Li Zhimeng^{1,2}, Zuo Yubo^{1,2}, Zhu Qingfeng^{1,2}, Wang Rui^{1,2}, Liu Xudong^{1,2}

(1.Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University; 2.College of Materials Science and Engineering, Northeastern University)

Abstract: The characteristics and formation mechanism of surface defects such as cold shut, surface segregation layer, surface segregation burl and pull marks in semi-continuous casting aluminum alloy ingot were introduced. The effects of mold structure and casting process parameters on the surface defects during semi-continuous casting were analyzed. On this basis, the technical development and process optimization directions to improve ingot surface quality were presented.

Key Words: Aluminum Alloys, Semi-continuous Casting, Surface Quality of Ingot, Surface Segregation

1 DC 铸造现状

半连续铸造(DC 铸造法)是生产变形铝合金锭坯的主要方式。自 20 世纪 30 年代半连续铸造技术被应用于铝合金锭坯制备以来,就以较大技术优势取代了之前的模铸技术成为制备变形铝合金的主要方法^[1]。相比于传统模铸,DC 铸造具有浇注过程平稳、铸锭长度长、易于实现自动化、生产效率高等特点。但 DC 铸造技术仍存在锭坯表面质量差、锭坯内外组织不均匀、大尺寸铸锭容易出现裂纹和较严重的偏析等缺陷。

DC 铸造锭坯各种缺陷的产生与 DC 铸造过程中的凝固特点有关。根据冷却特点的不同,DC 铸造凝固过程的冷却包含两个区域,即熔体与结晶器壁接触时形成的一次冷却区和冷却水直接作用形成的二次冷却区。熔体进入结晶器后,边部的熔体与结晶器壁接触,受到

收稿日期:2020-07-21;修改稿收到日期:2020-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674078,51374067);中央高校基本科研业务费资助项目(N180913003);辽宁省自然科学基金资助项目(2019-KF-05-03)

第一作者简介:李志猛,男,1994 年出生,硕士研究生,沈阳(110819),E-mail:1304722640@qq.com

通信作者:朱庆丰,男,1979 年出生,副教授,沈阳(110819),E-mail:zhuqingfeng@epm.neu.edu.cn

引用格式:李志猛,左玉波,朱庆丰,等. 半连续铸造铝合金表面缺陷的形成机理及影响因素[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):108-113.

LI Z M, ZUO Y B, ZHU Q F, et al. Formation mechanism and influencing factors of surface defects in semi-continuous casting aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):108-113.

结晶器一次冷却作用,快速凝固形成一层由细小晶粒组成的凝固壳。凝固壳在下移过程中冷却收缩会与结晶器分开,在结晶器与凝固壳间形成气隙。气隙的形成会降低凝固壳向外的传热速度,从而降低凝固壳与内层熔体的冷却速率。严重情况下,凝固壳被内部熔体加热还可能发生部分重熔。当二次冷却水喷射到铸锭表面后,凝固壳内的熔体会再次受到强烈的冷却作用。铸锭的冷却速率由外向内逐渐降低,熔体不断凝固,这样在凝固过程中形成一个“V”字形液穴,见图 1^[2]。DC 铸造的这些凝固特点会导致心部和边部组织不均匀并形成宏观偏析,还会在铸锭表层形成一层特殊的凝固组织,在其中易产生气孔、缩松和表层偏析等缺陷^[3]。这些表层缺陷严重降低铸锭的品质,对后续加工产品的性能和品质也有不利影响,因此一般会用机械加工的方法将表皮去除。

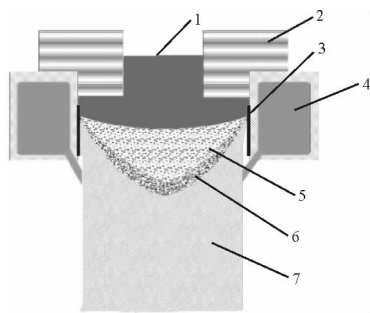
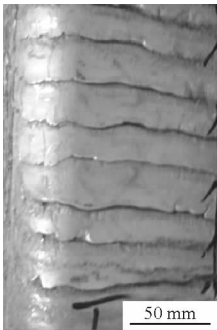


图1 热顶半连续铸造铸锭液穴示意图

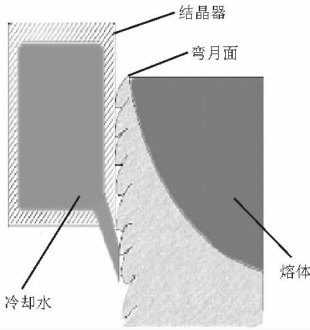
Fig.1 Schematic diagram of the sump during DC casting process

1.液相区 2.热顶 3.石墨环 4.冷却水 5.浆状区
6.糊状区 7.固相区

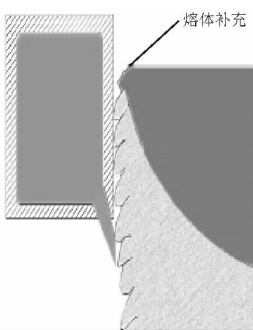
尽管采用机械车削的方法能够去除铸锭表层含有缺陷的组织,但车削增加了工作量,降低了铸锭的成品率。加之车削后的铝屑易被氧化,同时在车削过程中也会掺杂进水、油等污染^[4],使铝屑难以回收。因此,通过技术升级和工艺参数优化提高铝合金 DC 铸锭表面品质一直是铝合金生产企业和科研工作者关注的热点^[5~8]。随着铝合金 DC 铸造技术不断发展,变形铝合金 DC 铸造铸锭的表面质量和成品率不断提高。虽然我国是原铝生产大国,但在半连续铸造技术方面,我国仍然较为落后。一些先进铸造设备仍然以仿制为主,结晶器、操作系统等核心部件仍依赖进口。目前,国内在进口设备的基础上开始自主开发半 DC 铸造技术,并已



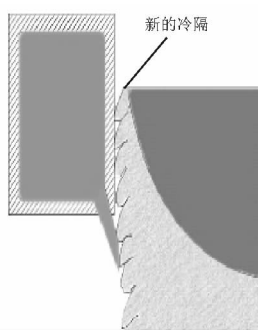
(a) 铸锭表面的冷隔



(b) 边部形成弯月面



(c) 熔体覆盖弯月面



(d) 新冷隔形成

图2 传统 DC 铸锭冷隔的典型形貌与形成过程示意图

Fig.2 Typical morphology and forming process of traditional DC ingot cold shuts

形成了周期性的冷隔。

为了避免冷隔形成,一般会采用降低结晶器冷却强度的方法,如贴隔热膜铸造、热顶铸造等^[11]。热顶铸造是在结晶器上部增加了保温材料,见图1。这种结晶器结构的改变使得初凝壳附近的熔体温度升高,增加了凝壳附近熔体的流动性,避免传统 DC 铸造过程一层一层的搭接而形成的严重的“层叠”状冷隔,显著提高了铸锭的表面品质。正是由于具有这些优势,热顶铸造技术已成为铝合金圆锭生产的主要方法。尽管热顶铸造可以有效地避免表层较大深度“层叠”状冷隔的形成,但是铸

经取得了一定的进展。李小亚等^[9]、王自焄等^[10]分别对铝合金 DC 铸造相关技术的发展和现状进行了较为全面的分析,梳理了铝合金铸锭 DC 铸造技术在我国的应用情况,并分析了热顶铸造的优势。

本课题结合 DC 铸造技术的发展,介绍了铸锭表面缺陷的形成机理和影响因素,并分析不同 DC 铸造工艺制备的铸锭表面缺陷形成机制,旨在对我国铝合金 DC 铸造相关技术的开发提供参考。

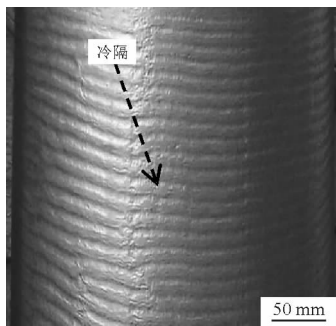
2 铸锭常见的表面缺陷及其形成机理分析

在 DC 铸造过程中,铸锭表层会经历先快速冷却(与结晶器接触),再被加热升温(收缩形成气隙),然后再次快速冷却(二冷水发挥冷却作用)的过程。这些特点导致了铸坯的表层容易出现冷隔、拉痕、拉裂、偏析瘤以及铸锭皮下偏析层、皮下气孔等缺陷。

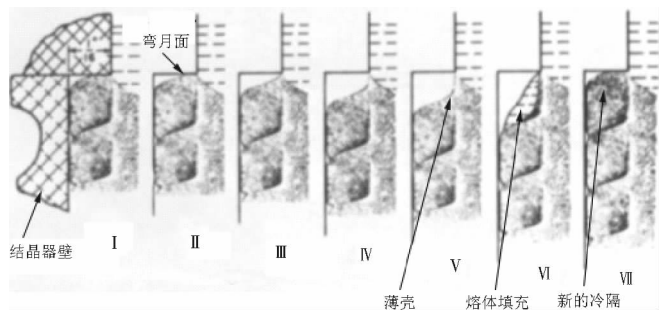
图2为传统 DC 铸锭冷隔的典型形貌与形成过程示意图。冷隔是指在铸锭表面形成的波浪状缺陷。对于传统 DC 铸造法生产的铝合金铸锭而言,其具有层叠状的表面形貌,见图2a。在铸造过程中,当金属流至结晶器壁时,结晶器和空气的冷却作用降低了熔体的温度,熔池边部表层熔体提前凝固形成弯月面(见图2b)。随着铸造进行,新熔体覆盖并再次形成新的弯月面(见图2c),但这些覆盖的新熔体也很快凝固,并形成一个新的冷隔(见图2d)。铸坯边部的凝固如此反复进行就

铸表面仍存在较浅的波浪形冷隔。传统热顶 DC 铸造冷隔的典型形貌及形成示意图见图3。由图3a可见,冷隔表面形貌如同沿铸锭轴向等距离排列的水面波纹一样。波纹的波峰和波谷周期性的相间交替排列,每一道波峰和波谷,基本上环绕铸锭的整个横截面一周,但也有些位置是不连续的^[12]。关于传统热顶铸造铸锭冷隔的形成机制,BERGMANN W J 等^[13]给出了较为合理的解释,其形成过程见图3b,铝熔体在保温帽与结晶器的连接处由于不充分润湿而形成弯月面,见图3b中Ⅰ、Ⅱ阶段;随着铸锭下移,在熔体表面张力的作用

下,弯月面与结晶器壁和保温材料之间形成空腔,见图 3b 中Ⅲ、Ⅳ阶段;由于空腔处传热较低,内部熔体最终会挣破弯月面向空腔填充,见图 3b 中Ⅴ、Ⅵ阶段,而由于熔体未能充分补充或结晶器冷却过强导致铝熔体凝

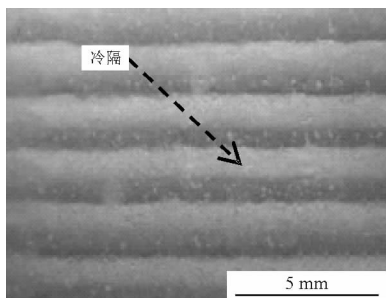


(a) 冷隔

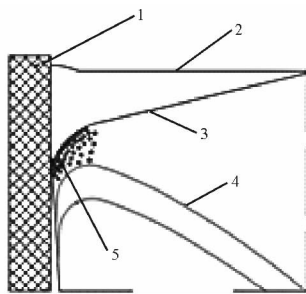


(b) 形成过程

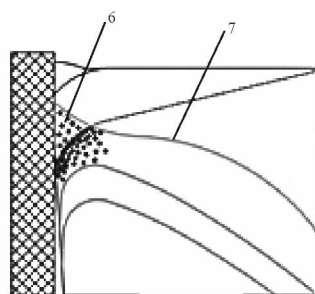
图 3 传统热顶 DC 铸锭冷隔的典型形貌及其形成过程示意图^[13]
Fig.3 Typical morphology and its formation process of the ingot cold shut prepared by traditional hot top DC casting method^[13]



(a) 油气滑铸锭冷隔



(b) 边部熔体形成氧化膜



(c) 熔体挣破氧化膜

图 4 油气滑铸锭冷隔的典型形貌及形成过程示意图^[14]

Fig.4 Typical morphology and forming process of ingot cold shut in oil-gas slip casting^[14]

1. 石墨环 2. 热顶 3. 熔体液面 4. 固相线 5. 搭接晶粒 6. 填充熔体 7. 液相线

拉痕和拉裂是在铸锭凝固壳和结晶器壁之间相互滑动过程中形成的,铸锭表面纵向上存在的条痕称为拉痕,横向上存在的小裂口称为拉裂^[17],见图 5。DC 铸造过程中,熔体与结晶器壁接触后受到冷却作用形成凝固壳,当石墨环、铸锭上有硬质点或者当凝固壳较软时,会划伤铸锭表面,铸锭表面就会出现纵向拉痕,见图 5a。而如果结晶器润滑较差,凝固壳与结晶器壁之间的摩擦力较大,凝固壳又太薄或太软,从而超出凝固壳承受能力的时候,就有可能造成铸锭表面拉裂,见图 5b。严重的甚至还会出现漏铝,造成生产事故。在石墨环上

固速度快,而使得一部分空腔保留下来在表面形成一道凹沟,见图 3b 中Ⅶ阶段。这种现象周期性出现,最终形成冷隔。

为了进一步提高传统热顶 DC 铸造锭坯表面品质,通过在结晶器内通油通气开发了油气滑铸造技术。多孔石墨油气滑技术是当前主流油气滑技术之一,其通过通入油气降低了一冷强度,增加了润滑,因此显著提高了铸锭表面品质。但 BAYAT N 等^[14~16]发现采用铝合金热顶油气滑铸造技术制备的铸锭典型形貌及形成过程示意图见图 4。铸锭表面仍有较浅的波浪状冷隔,见图 4a。其形成方式与常规热顶铸造不同。认为在油气滑铸造过程中铝熔体在气体压力下成形,当铝熔体压力小时,靠近结晶器壁的熔体表面会形成一层氧化膜,见图 4b。随着铸造的进行,铝熔体压力增大,熔体会填充进弯月面线与结晶器壁之间的空腔处(但不与结晶器接触),见图 4c。金属压力的增大会使其表面氧化膜膨胀,形成冷隔的波峰部分,这就是冷隔形成的一个周期。研究还发现,熔池中顶部熔体震荡的周期与冷隔的形成周期一致,所以认为这种冷隔是由于气体不断周期性释放导致熔体压力变化而形成的。研究还发现,提高铸造速度可以有效地减轻这种冷隔缺陷。这可能是由于随着铸造速度提高,可以更快受到冷却水的冷却作用,从而使其更快的凝固。这样由于金属压力的增大导致的表面膨胀就会被抑制,从而减弱冷隔缺陷。

涂抹润滑油、通油气等方法可以减少一冷强度和增加润滑,从而在一定程度上减少甚至消除拉裂和拉痕。

图 6 为铸锭表面的偏析层和偏析瘤。这层组织与铸锭内部组织有明显的分界线,见图 6a^[18],而偏析瘤是指铸锭外表面像汗珠一样的颗粒状缺陷,见图 6b。在 DC 铸造过程中,形成凝固壳后,随着铸造进行,由于凝固收缩的作用,凝固壳会脱离结晶器壁,形成气隙,见图 7^[13]。气隙会导致传热降低,凝固壳中沿枝晶网格和晶界分布的低熔点共晶相会被重熔,形成微通道。凝固前沿的富溶质熔体在静压力和铸锭冷凝收缩力的作用下

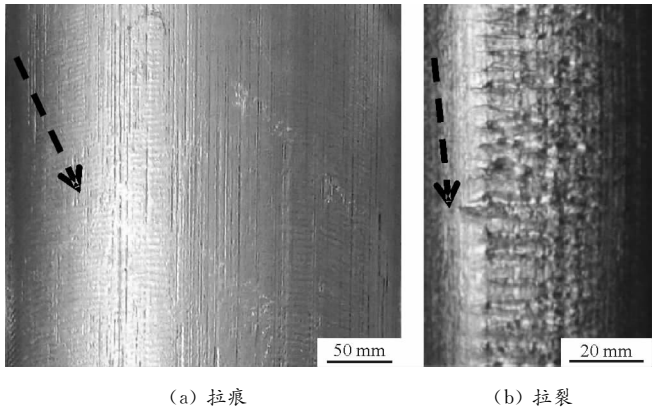


图 5 铸锭表面的拉痕与拉裂

Fig.5 Pull marks and cracks on ingot surface

沿着微通道被挤向铸锭表面,形成汗珠状的颗粒^[19~21]。当冷却水发生作用时,铸锭受到强烈的冷却,表面的“汗珠”被凝固,形成偏析瘤,而被重熔的微通道也再次凝固,形成含有大量合金元素的粗晶界,这一层合金元素含量高的组织即为偏析层。这种凝固过程还导致偏析层内会有很多杂质、气泡等存在。偏析层的存在严重影响了铸锭表面质量,较厚的偏析层在后续变形过程中必须去除。减小偏析层厚度的方法主要是降低一冷强度。采用油气滑铸造技术在很大程度上可以减弱甚至消除偏析层。另外,降低熔体的静压力也可改善偏析层和偏

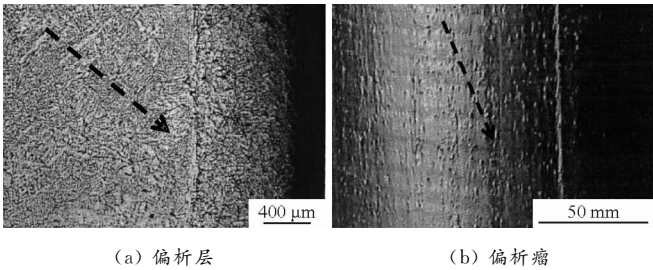


图 6 铸锭表面的偏析层和偏析瘤

Fig.6 Segregation layer and segregation burl on the surface of ingot

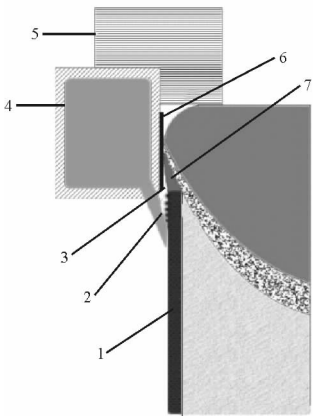


图 7 表面偏析形成示意图

Fig.7 Schematic diagram of surface segregation formation

- 1.偏析层 2.偏析瘤 3.气隙 4.冷却水 5.热顶
6.石墨环 7.重熔区域

析瘤缺陷,代表性技术有低压 DC 铸造技术^[7]。

铸锭的皮下气孔缺陷,见图 8。在铸造过程中,铸锭初凝壳上方弯月面处熔体的波动可能将气体卷入,初凝壳形成时容易在铸锭表面偏析层内或皮下形成一些气孔,见图 8a。液面的波动剧烈还有可能将气体卷入到偏析层内侧,形成孔洞,见图 8b。

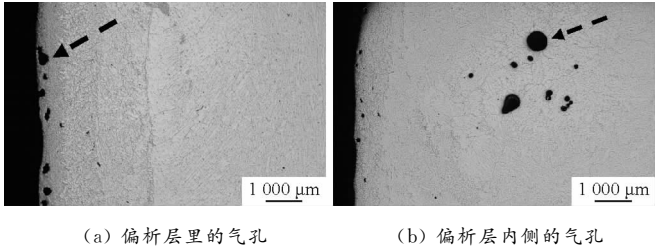


图 8 铸锭表面皮下气孔

Fig.8 Pores under the surface of ingot

3 铸锭常见表面缺陷的影响因素

在实际生产中,导致铸锭表面品质差的因素有很多,其中结晶器结构和铸造工艺参数是影响铸锭表面品质最主要的因素。

3.1 结晶器结构的影响

结晶器结构直接决定着一次冷却强度、见水点位置、热顶铸造 overhang(保温帽悬垂的部分)处的熔体流动,以及润滑条件等,是影响铝合金锭坯质量的关键因素。

结晶器的一次冷却愈强,则结晶器壁与铸锭之间的热传导作用愈集中于结晶器上部区段,也就是愈接近于合金液弯月面区域,这就使铸锭愈容易形成表面缺陷^[7]。反之,一次冷却强度太小则容易导致凝固壳强度不够,容易造成拉裂甚至漏铝。结晶器的有效冷却高度越高,一次冷却强度越大,则气隙区越长,铸锭表层重熔更容易发生,铸锭表面偏析现象更严重。结晶器有效冷却高度越低,结晶器的一次冷却作用越小,凝壳点降低,凝固收缩被有效抑制,形成的气隙区变短,从而减少铸锭表层的重熔,抑制偏析瘤的出现并减少偏析层的厚度。为了提高表面品质,圆锭采用热顶铸造技术,通过增加热顶实现在石墨环的小范围内进行一次冷却;而扁锭则发展成了先进的低液位铸造技术,通过精确控制液面将结晶器内的液位压低,同时安装石墨环降低一冷强度。

一次冷却强度除了受结晶器高度,结晶器壁传热系数等因素的影响,还受二次冷却水逆流导热距离(UCD)的影响。这主要与二次冷却水的见水点位置和水与锭坯表面的喷淋状态有关。铸锭的见水点取决于结晶器出水孔和铸锭轴线的夹角。角度太小,则铸锭见

水点低,使冷却水作用降低,二次冷却强度小。角度太大,冷却水飞溅,冷却水不会沿铸锭均匀流下,也会降低冷却效果,同时二冷水易逆流进入结晶器内而造成生产事故^[22]。采用独立控制的双排水眼结晶器,冷却水角度分别为 45° 和 23° ^[23],可以起到更好的冷却效果。目前,通过可编程控制器(PLC)可实现结晶器的自动润滑、熔体液面高度的自动监控以及脉冲水开关、冷却水量和铸造速度的精确控制^[24],从而为开发结构更加复杂、功能更加先进的结晶器提供有利条件。

除了上述因素之外,影响铸锭表面品质的主要因素还包括热顶流道结构、热顶与石墨环之间三角区(简称:三角区)以及 overhang 的大小^[25]。热顶流道结构有“喇叭口形”、“直筒形”等多种形状,其作用是对熔体进行分流,使熔体较均匀地分布到结晶器内,不同合金不同规格铸锭所使用热顶的流道结构有所不同。Overhang 过大时形成的三角区大,熔体不容易填充到三角区,易造成冷隔等缺陷。Overhang 过小时形成三角区小,石墨环上的凝固坯壳容易向上伸展“爬”到热顶上,影响锭坯表面质量。Overhang 的大小应综合考虑铝熔体的填充效果及其对凝固坯壳上移的阻挡作用,取一个适当的值。

在一冷区通油或气,可以在减小一次冷却强度的同时增加润滑,有利于提高表面质量。先进的圆锭热顶 DC 铸造技术均采用通油或同时通油、气的结构。对于中、小尺寸(直径在 400 mm 以下)的圆锭热顶 DC 铸造技术,多采用连续通油气技术。而对于大尺寸铸锭,多采用连续通油技术。油气膜的形成可以有效地降低一冷强度,从而提高铸锭表面品质^[26,27]。

3.2 铸造工艺参数的影响

当结晶器结构确定以后,铸造工艺参数就成为影响锭坯表面品质的主要因素。铸造工艺参数主要包括铸造速度、液位高度、浇注温度和冷却水流量等。

铸造速度提高,结晶器内的初始凝壳点下移,结晶器有效冷却强度降低^[28]。同时,减少了铸锭与结晶器的接触时间,在气隙产生后,铸锭能更快地被拉出结晶器,受到二冷水的冷却作用,抑制凝固壳的重熔,因此可以改善偏析层等缺陷,见图 9,随着铸造速度从 50 mm/min

min 提高到 65 mm/min,铸锭偏析层明显变薄。铸造速度的提高,还增加了熔体进入结晶器的流量,增加弯月面处的热量输入,避免弯月面的提前凝固,有利于消除冷隔缺陷。但受限于结晶器结构、冷却能力和铸锭开裂倾向等因素限制,铸造速度仅能在一定程度内调控。WECKMAN D C 等^[29]认为,当铸造速度大于某个临界速度时能消除冷隔。

对于传统 DC 铸造而言,液位高度低,初始凝壳点下移,结晶器有效冷却强度降低^[30],有利于提高表面品质。扁锭的低液位铸造技术是通过降低液面高度提高锭坯表面品质的典型应用。对于圆锭热顶 DC 铸造而言,结晶器的有效结晶区域为保温材料下方的结晶器壁,过高的液位会增加熔体与热顶下部结晶器壁的接触压力,增加一次冷却强度和凝固前沿熔体向外渗出的驱动力,从而影响表面品质。为了降低这种熔体静压力对铸锭表面品质的不利影响,挪威海德鲁铝业开发了低压 DC 铸造技术,该技术使熔体静压力趋近于 0,显著改善了表面品质^[6]。

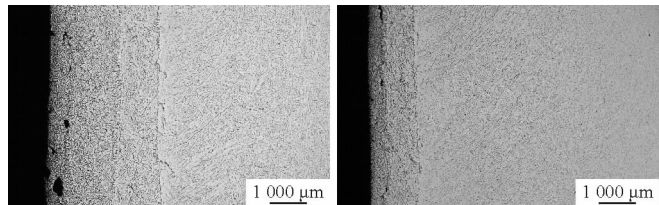
浇注温度是影响 DC 铸造的又一重要参数,适当提高浇注温度,可以提高结晶器熔池内温度,防止铸锭弯月面的提前凝固,从而有效地抑制冷隔产生^[31,32]。但浇注温度过高容易在铸造过程中造成漏铝、底部裂纹和拉裂等事故^[33],同时也会使铸锭表面初凝壳的重熔更严重,产生偏析层和偏析瘤等缺陷。

冷却水量过大,二次冷却强度大,逆流导热距离增加,使铸锭的凝壳点上移,易产生偏析层和偏析瘤等表面缺陷。二次冷却强度过大甚至可能导致铸锭表面的凝固前沿伸到保温帽中,这样会导致严重的搭接式冷隔现象^[34]。如果冷却水量太小,容易产生漏铝等事故,还会影响铸锭内部组织。因此,合理地控制冷却水量是提高铸锭表面品质的关键。

如上所述,结晶器结构和铸造工艺参数是影响 DC 铸锭表面品质的主要因素。为了提高铸锭表面品质,研究者不断对结晶器结构进行改进,并对铸造工艺进行优化^[35,36]。基于减弱一冷强度和减少摩擦,陆续开发了油滑、气滑、油气滑等半连续铸造技术;基于减少铸锭与结晶器壁接触压力,陆续开发了电磁铸造、低频电磁铸造、低压 DC 铸造等技术;基于控制二冷,开发了脉冲供水、多排水眼变角度供水等半连续铸造装备与技术。

4 结语和展望

未来几年,铝合金产品不断增加,采用更加节能环保的方式生产更高附加值的铝合金产品是行业发展的总体趋势。随着行业内竞争日益激烈,如喷射沉积、3D 打印等技术取得了快速的发展,有望在未来取代半连续



(a) 铸造速度为 50 mm/min (b) 铸造速度为 65 mm/min

图 9 不同铸造速度下铸锭偏析层形貌

Fig.9 Effects of casting speed on segregation layer of the ingot

铸造技术。

铝合金表面品质直接关系着铸锭的综合成品率和生产效率,因此改善铝合金铸锭表面品质对工业生产具有重要的意义。DC 铸造铝合金铸锭的表面缺陷主要有冷隔、皮下偏析层、表面偏析瘤、拉痕等。这些表面缺陷的形成主要受铸锭与结晶器的接触状态和一冷区的冷却强度影响。适当降低一冷区的冷却强度、减少接触压力、增强润滑均有利于获得表面品质较高的铸锭。通过优化铸造速度、浇注温度、冷却水量等工艺参数,调整结晶器结构,发展新型 DC 铸造技术等手段控制一冷区的接触条件和冷却强度,从而不断提高铸锭表面品质。目前在控制低合金化、小规格铸锭表面品质方面已经达到较高水平,但是,如何提高大尺寸、高合金化铝合金铸锭表面品质仍然是一大难题。随着我国对大尺寸、高合金化铸锭品质要求的提高和需求量的增加,提高大尺寸、高合金化铝合金铸锭表面品质成为了迫切需求。优化结晶器结构;通过施加外场和控制二冷,进而适当提高铸造速度;发展使一冷区接触压力降低的低压 DC 铸造等半连续铸造技术是提高大尺寸、高合金化铝合金铸锭表面品质方面的重要措施。

参 考 文 献

- [1] GRANGERDA. Ingot casting in the aluminum industry[J]. Treatise on Materials Science & Technology, 1989, 31: 109-135.
- [2] NADELLA R, ESKIN D G, DU Q, et al. Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(3): 421-480.
- [3] MO A, JOHNSEN T E, HENRIKSEN B R. Modelling the surface segregation development in DC casting[J]. Light Metals, 1994: 889-896.
- [4] 周秉才,刘民章.炉料质量对铝合金熔铸质量的影响及其应对措施[J].有色冶金节能, 2018, 34(4): 21-26.
- [5] 谢水生,刘静安,黄国杰.铝加工生产技术 500 问[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [6] MITAMURA R. New hot-top continuous casting method featuring application of air pressure to mold[J]. Light Metals, 1978: 550-555.
- [7] HÅKONSEN A, HAFSÅS J E, LEDAL R. A new DC casting technology for extrusion billets with improved surface quality[J]. Light Metals, 2014: 873-878.
- [8] HAUG E, MO A, THEVIK H J. Macrosegregation near a cast surface caused by exudation and solidification shrinkage[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 38(9): 1 553-1 563.
- [9] 李小亚,王东立. 铝合金棒坯连铸造技术进展[J]. 铸造技术, 2002, 23(4): 203-206.
- [10] 王自焄,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(2):20-24.
- [11] GUNTHER E, MORIT Z. Metal casting system: US Patent, 2983972[P]. 1961-05-16.
- [12] 刘福杰.铝合金 DC 铸锭表面冷隔浅析[J].铝加工, 1996(6): 4-8.
- [13] BERGMANN W J. Solidification in continuous casting of aluminum[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1970, B1(12): 3 361-3 364.
- [14] BAYAT N, CARLBERG T. Surface structure formation in direct chill (DC) casting of Al alloys[J]. JOM, 2014, 66(5): 700-710.
- [15] BAYAT N, CARLBERG T. Surface formation in direct chill (DC) casting of 6082 aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2016, 117(1): 1-7.
- [16] CARLBERG T, BAYAT N, ERDEGREN M. Surface segregation and surface defect formation during aluminum billet casting[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015, 68(6): 1 065-1 069.
- [17] 中国有色金属工业协会组织编写. 变形铝合金熔炼与铸造[M]. 长沙:中南大学出版社,2010.
- [18] 朱庆丰. 铝合金差相电磁水平连续铸造工艺及理论研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.
- [19] PEYMA N, ASHTAR I. Formation of inverse segregation on the surface of belt-cast Al-Fe-Si and Al-Fe-Si-Mn alloys[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(7): 627-630.
- [20] EL-BEALY M O. On the formation of extruded surface segregation layer in aluminum direct chill casting process[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2010, 49(1): 47-61.
- [21] MO A. Mathematical modelling of surface segregation in aluminum DC casting caused by exudation[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1993, 36(18): 4 335-4 340.
- [22] 袁柱桐,任洪阁,刘云龙,等.热顶铸造结晶器设计对铸锭质量的影响[J].轻合金加工技术, 2010, 38(6): 16-18.
- [23] 杨守杰,邢清源,于海军,等.立式半连续铸造技术进展[J].铸造, 2018, 67(1): 14-19.
- [24] 湛余灵,郑守东,张伟一.一种大规模气滑铸造结晶器的设计[J].现代制造技术与装备, 2019(6): 92-93.
- [25] 王高松,赵志浩,崔建忠,等.热顶结构及铸造工艺对 7075 铝合金铸锭表面质量的影响[J].轻合金加工技术, 2011, 39(6): 21-24.
- [26] 屈福,崔建忠,王向杰,等.气膜对 6063 铝合金连铸坯中心裂纹及表面质量的影响[J].特种铸造及有色合金, 2009, 29(1): 42-44.
- [27] MITAMURA R, TADANAO I. Process for direct chill casting of metals: US Patent, 4157728[P], 1979-06-12.
- [28] 董帅.双流低频电磁半连续铸造 7075 铝合金的工艺研究[D]. 沈阳:东北大学,2009.
- [29] WECKMAN D C, NIESSEN P. Heat-transfer conditions in hot-top mould and cold-shut formation mechanism on DC continuously cast non-ferrous alloy rods[J]. Metals Technology, 1984, 11(1): 497-503.
- [30] 腾志贵,李海仙,张珥玲,等.2A12 铝合金 $\phi 110$ mm 铸锭热顶铸造工艺研究[J].轻合金加工技术, 2014, 42(6): 34-37.
- [31] 李军. 7A04 铝合金锭连续铸造工艺的模拟[D]. 内蒙古包头:内蒙古工业大学,2014.
- [32] 胡谦谦. 7XXX 铝合金热顶半连续铸造的数值模拟[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [33] EMLEY E F. Continuous casting of aluminum[J]. International Metals Reviews, 1976, 21(1): 75-115.
- [34] HARRINGTON D G, GROCE T E. Control of continuous casting [P]. US Patent, No. 3612151, 1971.
- [35] PRASAD A, BAINBRIDGE I F. Experimental determination of heat transfer within the metal/mold gap in a DC casting mold: Part II. Effect of casting metal, mold material, and other casting parameters[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2013, A44(7): 3 099-3 113.
- [36] SCHNEIDER W, REIF W. Present situation of continuous casting for aluminum alloys[M]. Cairo: El-Mahallawy N.A., 1992.

(编辑:栗万仲)