

振动激发金属液形核技术在铸锭和板坯凝固过程中的应用

陶红标 张 慧 王 超 王明林 王 玫 赵 沛

(钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081)

摘 要 叙述了研发的振动激发金属液形核技术的工作原理、技术特点以及在实验室对金属锌、1Cr7 铁素体不锈钢铸锭处理效果,并进行了开发的 220 mm × 1 600 mm 板坯连铸机振动激发金属液形核技术装置对 16Mn 系列钢种应用的工业化试验。结果表明,未经振动激发形核处理的板坯等轴晶率 ≤ 10%,中心疏松和偏析为 1.5 级,经振动激发形核处理的板坯等轴晶率 ≥ 30%,中心疏松和偏析为 0.5 级。分析表明,对大型铸锭使用振动激发金属液形核技术便于在线控制钢锭的凝固组织,有利于提高钢锭凝固组织的等轴晶率和改善内部质量。

关键词 铸锭 板坯 振动激发形核 凝固 等轴晶率 冶金质量

Application of Technology of Vibration-Excited Nucleation in Liquid during Ingot and Casting Slab Solidifying Process

Tao Hongbiao, Zhang Hui, Wang Chao, Wang Minglin, Wang Mei and Zhao Pei

(National Engineering and Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The work principle and technology characteristics of developed technology of vibration-excited nucleation in liquid and the treated effect on ingot of metal zinc ingot and 1Cr17 ferrite stainless steel ingot in lab are presented. And the commercial pilot production for application of developed device using the technology of vibration-excited nucleation in liquid for 220 mm × 1 600 mm slab caster on 16Mn series steel grades is carried out. Application results show that for the cast slab non-treated by vibration-excited nucleation the equiaxed zone rate of slab is ≤ 10% with center porosity and segregation rating 1.5, but for the cast slab treated by vibration-excited nucleation the equiaxed zone rate of slab is ≥ 30% with center porosity and segregation rating 0.5. Analysis shows that for large-scale ingot, application of technology of vibration-excited nucleation in liquid is available to control solidification structure of ingot in line, increase equiaxed zone rate of ingot and improve its inner quality.

Material Index Casting Ingot, Slab, Vibration-Excited Nucleation, Solidification, Equiaxed Zone Rate, Metallurgy Quality

以模铸方式生产钢锭时,凝固过程中的动量衰减非常迅速,其内部主要为自然对流状态,大断面铸锭内部不仅存在着常见的带有“V”型偏析的“小钢锭”缺陷,在中心及边部之间有时还存在着倒“V”型偏析,这将进一步加剧中心疏松及缩孔缺陷的严重程度^[1-2]。这种偏析的控制方法大致包括控制凝固组织、减小糊状区垂直方向上的流动、降低富集溶质在液相的对流和抽吸作用等,具体措施包括低过热度浇注、电磁搅拌、机械或超声波振动、加入形核剂、提高铸模锥度、铸模上部增加冒口、冒口内采用发热剂等^[3,4]。

对凝固过程中的金属施以振动将促使枝晶熔断和破碎^[5],并且增加了游离激冷晶的数目,从而抑制柱状晶的生长,提高等轴晶率,细化凝固组织,达到减轻偏析的目的。振动凝固的研究对象涉及黑色金属、有色金属等,其公认的效果有:细化晶粒、组织均匀化、组织净化(去气、除渣、脱硫、提纯)等^[6],并

相继开发了多种与振动相关的凝固过程控制技术,包括铸型振动^[7-8]、超声振动^[9]和电磁搅拌技术等。基于“晶体游离”、“枝晶熔断”和“结晶雨”3种等轴晶形成理论,研发了振动激发金属液形核技术。

1 振动激发金属液形核技术开发研究

1.1 工作原理

振动对促进形成等轴晶的作用包括 3 个方面:(1)促进凝固初期晶核在凝固器壁上的游离;(2)促进凝固过程中金属液表面结晶雨的形成;(3)折断了凝固前沿的树枝晶,使其游离到金属液中,形成等轴晶生长的核心。振动激发金属液形核技术是通过氯化铵水溶液凝固实验而提出的。实验发现,当采用带有冷却结构的振动棒插入 30% 氯化铵水溶液时,棒体表面将迅速产生大量的细小晶粒,晶粒在高频振动的作用下被弹射到氯化铵溶池内,形成结晶雨,振动激发金属液形核技术的工作原理如图 1。

由图 1 可知,当采用带有冷却结构的振动冷却

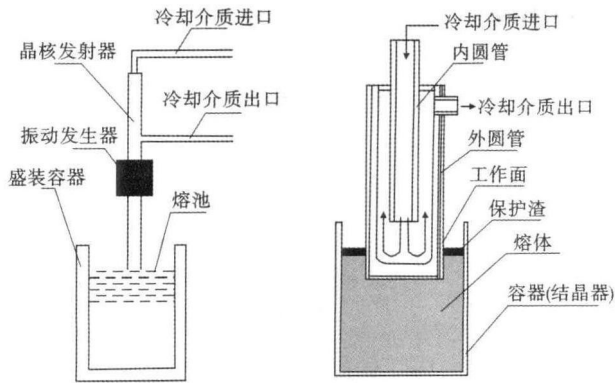


图1 振动激发金属液形核技术的工作原理

Fig. 1 Work principle of technology of vibration-excited nucleation in liquid

棒(称之为晶核发射器)插入金属液时,金属液将在晶核发射器上迅速凝固形核,在晶核发射器的高频振动作用下,冷却棒体表面形成的晶核将被连续不断地弹射到金属液中,成为凝固过程中大量晶核核心来源,为随后金属液凝固形成大量等轴晶组织奠定基础,最终达到提高铸件的等轴晶率和促进凝固组织均质化的目的。

晶核发生器在连铸结晶器或铸模内钢液的浸入深度为50~60 mm,钢液上方还有40~50 mm厚的保护渣。保护渣和熔体(钢液)的温度分别为900~1200℃和1500~1520℃,采用冷却介质(气体或水雾)进行冷却的目标是确保与钢液接触的金属陶瓷套管表面温度降低到1450~1480℃,内壁温度900~1100℃。由于表面温度具有30~50℃的过冷度,此时在壁面能够发生非均质形核过程,氯化铵水溶液模拟实验表明在1 s的时间内振动冷却棒体表面可向溶液内弹射出数百万个直径20~40 μm的晶粒,成为溶液凝固的形核核心,这样就可扩大中心铸坯等轴晶区,并细化晶粒,达到提高等轴晶率和控制中心偏析的目的。

1.2 技术特点

晶核发射器在处理过程中,金属熔体或氯化铵水溶液的温度保持不变,而冷却介质进、出口温差以及晶核发射器表面温度迅速升高且很快保持稳定,传热达到动态平衡,表明在型壁表面一直发生着晶粒的形成和剥离过程。多组试验数据表明,尽管冷却强度不同,但晶核发射

器表面温度始终保持在金属熔体或氯化铵水溶液的固、液相线温度之间,这正是晶核发射器表面发生枝晶游离的必要条件;此时溶液只能在晶核发射器表面形核,并由振动弹射到溶液中,而不会在其表面形成稳定生长的凝固壳,在晶核发射器表面发生着“形核而不结壳”的动态过程。

分别以30%氯化铵水溶液、锌、生铁和不锈钢为研究对象进行了大量的物理模拟实验,探讨了振动激发金属液形核的技术特点,结果表明:

(1) 振动和冷却促进了溶液表面结晶雨的形成,振动激发形核过程中产生的晶粒主要起始于晶核发射器棒体与氯化铵水溶液之间的接触界面;

(2) 晶核发射器的冷却强度和振动频率越高,则形成的晶粒数量越多且粒径越小;

(3) 高频、小振幅振动获得的凝固组织比低频、大振幅振动获得的凝固组织更均匀,晶粒更细小。

1.3 实施效果

在实验室采用振动激发金属液形核技术对金属锌、1Cr17铁素体不锈钢铸锭的凝固过程进行了处理,所获得的铸锭的铸态组织形貌如图2和图3。

在金属锌的凝固实验中,采用双槽式铸模进行了有、无振动处理条件下的凝固对比实验。实验中先将锌液注入模内,此时铸模中部挡板不插入,2个槽相通,注毕测温,稳定后插入钢质挡板将2个槽隔开,再用振动冷却棒处理其中1个槽内的锌液,锌液在模内自然凝固。双槽式铸模侧面用耐火材料,底部为通水冷却的铜板,铸模内2个槽的结构以及砌筑材料均完全一致,每个槽长115 mm、宽100 mm、

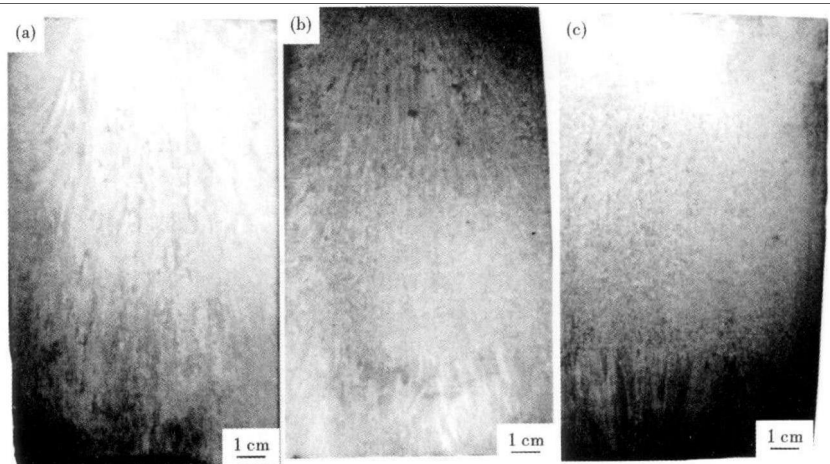


图2 锌锭纵截面凝固组织:(a)未处理;(b)过热度24℃,水冷,处理48 s;(c)过热度27℃,气冷,处理101 s

Fig. 2 Morphology of solidification structure of zinc ingot: (a) non-treated; (b) overheat extent 24℃, water cooling, treated for 48 s; (c) overheat extent 27℃, gas cooling, treated for 101 s

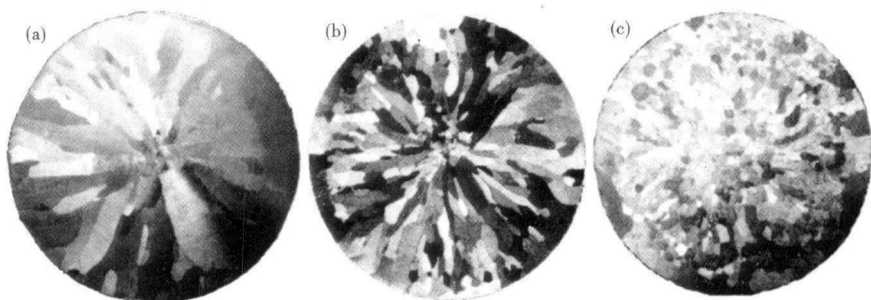


图 3 1Cr17 铁素体不锈钢铸锭横截面凝固组织: 钢液开始凝固温度- (a) 未处理, 1 528 ℃; (b) 冷却棒插入不振动, 1 530 ℃; (c) 振动冷却处理, 1 527 ℃, 处理 44 s

Fig. 3 Morphology of solidification structure of 1Cr17 ferrite stainless steel ingot cross section; liquid initial solidification temperature- (a) non-treated, 1 528 ℃; (b) cooling bar insert, non-vibration, 1 530 ℃; (c) vibration cooling treated for 44 s, 1 527 ℃

高 270 mm。晶核发射器的振动频率为 308 Hz, 振幅为 0.5 mm, 气体冷却时的流量为 60 m³/h, 水冷却时的流量为 2.5 kg/min。

1Cr17 铁素体不锈钢的成分为(/%): 0.045C、0.34Si、0.21Mn、0.022P、0.005S、16.41Cr、0.094Ni, 余为 Fe, 钢的液相线为 1 505 ℃。在图 3 所示 1Cr17 铁素体不锈钢的凝固试验中, 钢液最后在感应熔炼炉内随炉冷却完成凝固, 感应炉内腔上、下口内径分别为 300 mm 和 280 mm, 高度为 350 mm, 横截面取样铸锭在中部进行。图 3(a) 为未经处理的铸锭, 钢液开始凝固的温度为 1 528 ℃, 图 3(b) 为未振动仅采用通水冷却棒体进行处理的铸锭, 钢液开始凝固温度 1 530 ℃, 图 3(c) 为振动冷却处理的铸锭, 钢液开始凝固温度 1 527 ℃, 晶核发射器的振动频率为 308 Hz, 振幅为 0.5 mm, 冷却水量为 4.65 kg/min, 处理时间为 44 s。可见, 当凝固过程中未对钢液作任何处理时, 铸件组织结构中, 柱状晶非常发达; 当带有水冷系统的晶核发射器只插入钢液中并不振动

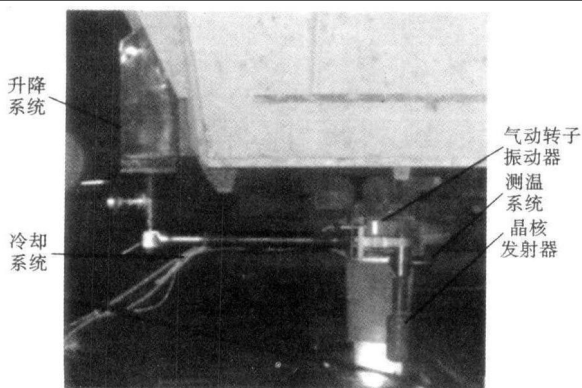


图 4 用于板坯连铸机的振动激发金属液形核技术装备
Fig. 4 Device of technology of vibration-excited nucleation in liquid for slab caster

时, 尽管对降低钢液中心过热度有利, 但等轴晶率未能得到明显提高, 铸件表现为较细柱状晶的“穿晶”结构。

晶核发射器能够为等轴晶的形成提供大量的核心, 可将金属锌和铁素体不锈钢组织中的等轴晶率提高到 80% 以上。

基于上述结果, 开发了适合于板坯连铸机的振动激发金属液形核技术装置(图 4), 并以 16Mn 系列钢种为试验对象开展了该技术的工业应用试

验, 有、无振动处理条件下的 Q235B 钢板坯横截面组织如图 5 所示, 其中板坯断面为 220 mm × 1 600 mm, 浇注过热度为 30 ℃, 拉速为 1.15 m/min。可见, 使用振动激发形核技术处理过的连铸坯等轴晶率可达 30% 以上, 且内部等轴晶细小、致密, 中心疏松和偏析可达 0.5 级, 而未经过处理的常规连铸坯的等轴晶率一般在 10% 以下, 接近于穿晶组织, 中心疏松和偏析达到 1.5 级。

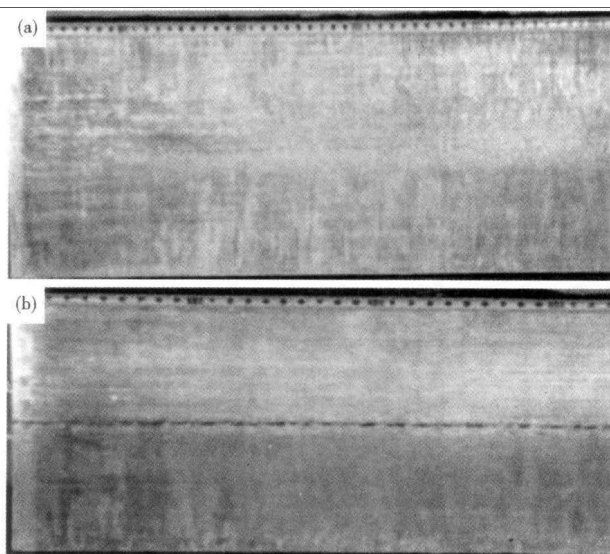


图 5 Q235B 连铸板坯横截面凝固组织: (a) 振动激发形核处理; (b) 未处理

Fig. 5 Morphology of cross section solidification structure of steel Q235B cast slab: (a) treated by vibration-excited nucleation; (b) non-treated

2 振动激发金属液形核技术在钢锭凝固过程中的应用

为了提高钢锭质量, 生产中浇注完钢锭后在冒

口端部多采用发热剂作为保温材料^[10]。随着铸锭的大型化,铸锭的高径比有逐渐减小的趋势,国外400~500 t大钢锭最佳高径比是1.1~1.3,铸模锥度具有增高趋势,一般达到10%以上^[11]。

相关研究表明^[12],冒口高度一般应为铸模总高度的12%以上,对于50 t以上大型铸锭,冒口高度一般在500 mm以上,冒口内发热剂及保温剂形成的渣层厚度一般在350 mm以上,温度为1350℃左右。

振动激发金属液形核技术在板坯连铸工业试验过程中也发现了一些不足:

(1)中间包底和结晶器之间的高度较小,安置晶核发射器装备的空间有限;

(2)当晶核发射器棒体内部冷却过强或操作控制不当时,棒体表面会很快结壳,如果钢壳的外径超过板坯厚度时,连铸生产顺利进行就会受到影响,虽然可以通过迅速降低冷却强度以加速棒体表面凝壳的熔断,但是由于结晶器内板坯的厚度相对较小,所以冷却强度的调整时间很短,这给晶核发射器的稳定运行带来不便;

(3)当振动强度高时,晶核发射器棒体会加剧结晶器内钢液面的波动,这会给连铸生产的顺利进行和铸坯表面质量的提高带来负面影响。

振动激发金属液形核技术更适合于在大型铸锭模铸生产中应用,原因在于:

(1)冒口上部空间很大,这为晶核发射器棒体的操作带来很大的便利;

(2)大型铸锭冒口的内径一般都能在500 mm以上,棒体表面即便形成了凝固壳,也有足够时间来调整振动和冷却强度以加速棒体表面凝壳的熔断;

(3)大型铸锭的铸模内钢液的波动要求较低,

可以大幅度增加晶核发射器棒体的振动强度,防止棒体表面凝固壳的生长;

(4)铸模内钢液的过热度低,晶核发射器表面弹射的晶粒很少被钢液熔化,晶粒的存活率高;

(5)铸模冒口内钢水凝固时间较长,为振动激发金属液形核技术提供了很长的处理时间,因凝固过程钢水总量恒定,振动激发金属液形核技术的处理有累积效应,处理时间越长,弹射的晶粒数量越多,其占铸锭总重量的比例越高。

振动激发金属液形核技术装备中,晶核发射器整体高度可设计在800~1000 mm,其中与钢液接触的部分可采用金属陶瓷质的耐材棒,其高度可设计在500~700 mm,棒体底端可靠近冒口与铸锭的交界线。振动激发金属液形核技术操作过程是:浇注结束后,铸模内钢液从底部以及铸模壁面开始向上、向内凝固,到达凝固中期时,插入晶核发射器棒体进行振动冷却处理,处理时间为全部凝固时间的40%左右,接近凝固末期时提出晶核发射器棒体。

3 结束语

振动激发金属液形核技术有利于金属铸件凝固组织的等轴晶化和晶粒细化,铸锭及连铸板坯的偏析缺陷能够得到明显减轻。由于大型铸锭的模铸生产具有铸模内钢液过热度低、冒口内钢液凝固时间长、冒口上部空间大、钢液表面波动要求低等工艺特点,因此振动激发金属液形核技术更便于对钢锭的凝固组织进行在线控制,从而有利于钢锭内部质量的提高。

国家973项目(夹杂物稳定性及铸坯均匀度控制的研究)资助(2010CB630806)

参考文献

- 张维平,沈厚发.影响钢锭中A、V形偏析的几种因素[J].鞍钢技术,1996(6):41-52.
- 元俊杰,梁小平,姚雁文,等.大型铸锭A偏析的形成机理及影响因素[J].大型铸锻件,2010(3):42-45.
- 沈厚发,方大成.大型钢锭中通道(A、V)偏析的预测及防止[J].大型铸锻件,1995(3):45-47.
- 杨伟宁,包民伟,徐明华.模铸中碳钢偏析的改善[J].上海金属,2003,25(5):8-11.
- 胡汉起.金属凝固[M].北京:冶金工业出版社,1985:294-300.
- 何德坪,陈锋.振动凝固细化晶粒的新进展[J].兵器材料科学与工程,1989(6):4-10.
- Witzke S, Riquet J P, Durand F. Diffusion Field Ahead of a Growing Columnar Front: Discussion of the Columnar-equiaxed Transition[J]. Acta Metallurgical, 1981, 29: 365-374.
- 伊藤幸良, 岡島忠治, 田代清. 振动法による430ステンズ鋼の凝固組織微細化[J]. 鉄と鋼, 1980, 66(8): 1093-1102.
- 赵忠兴, 张辽远. 超声振动对铸造合金结晶过程的影响[J]. 沈阳工业学院院报, 1997, 16(3): 9-13.
- 马薇, 赵建华, 宋刚. 冒口保温条件对大型铸锭凝固过程影响的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(21): 41-43.
- 刘晓光. 大型钢锭的生产技术及其发展[J]. 大型铸锻件, 1993(2): 52-55.
- 王海荣. 短冒口钢锭的研制与利用[C]. 第七届全国锻压学术年会文集, 1999, 10: 147-150.

陶红标(1976-),男,博士研究生,工程师,2000年安徽工业大学毕业,凝固、连铸技术开发。E-mail:taohb_2000@sina.com

收稿日期:2012-05-28