

# 百吨级钢锭的新一代连铸液态电渣技术展望

侯栋, 王德永, 屈天鹏

苏州大学钢铁学院, 江苏 苏州 215000

**摘要:** 传统双支臂电渣重熔生产百吨级铸锭时, 由于金属母材存在交替熔炼过程, 交替时刻因电流中断极易引发铸锭的表面渣沟、铸锭内部夹渣等典型问题, 限制了百吨级铸锭的制备。本文提出了新一代电渣液态浇铸技术, 采用双感应熔炼坩埚, 依次交替向导电结晶器内持续的提供稳定的钢液, 能够实现电渣重熔的持续稳定进行。基于前人对电渣液态浇铸的研究, 探讨了本文提出的新一代电渣液态浇铸的导电方式、熔化速率、钢液浇注温度等工艺对铸锭质量的影响规律。本文旨在为熔炼百吨级铸锭的提供一种新工艺。**关键词:** 百吨级铸锭; 锻件; 电渣重熔; 电渣液态浇铸; 连铸式液态电渣

## Development of Electroslag with Liquid Metal for 100-ton Ingots

Hou Dong, Wang Deyong, Qu Tianpeng

(School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

**Abstract:** During the traditional double-arm electroslag remelting producing 100-ton ingots, due to the alternate melting process of the metal electrode, the typical problems such as the surface of ingot and slag inclusion in the ingot are easily caused by the interruption of the current at the alternate time, which limits the preparation of 100-ton ingots. In this paper, a new generation of electroslag with liquid metal is proposed, which uses double induction melting crucibles to alternately guide the continuous supply of stable molten steel in the electric crystallizer, and can realize the continuous and stable process of electroslag remelting. Based on the previous research on electroslag with liquid metal, the influence of the new generation of electroslag with liquid metal process, such as conductive mode, melting rate and pouring temperature of molten steel, on the ingot quality was discussed. This paper aims to provide a new process for remelting 100-ton ingots.

**Key words:** 100-ton ingot; forging; electroslag remelting; electroslag with liquid metal; continuous casting electroslag;

## 1. 技术背景

众所周知, 超洁净、均质化、低偏析的百吨级钢锭对我国重大装备和重大工程有着极为重要的作用。中科院金属所联合伊莱特开发的 16 米百吨级圆形锻件, 该技术采用多层板坯进行热挤压成型, 成功解决了特大钢锭的冶炼问题。电渣重熔作为生产特大钢锭的手段之一, 在制备百吨级钢锭时仍存在诸多问题: 铸锭的偏析问题、母材钢锭的制备问题、交换金属母材时由于电流中断引发的渣沟及内部夹渣问题等, 限制了电渣重熔制备百吨级以上电渣锭。

本文通过对现有电渣液态浇铸技术进行改进, 采用双感应熔炼坩埚依次交替熔化母材钢锭, 并持续地依次交替浇铸到电渣液态炉的结晶器中, 本技术有望制备均质化百吨级电渣锭。

## 2. 百吨级铸锭的新一代电渣液态浇铸技术

### 2.1 新一代电渣液态浇铸技术的示意图

本文首次提出“双感应熔炼坩埚交替重熔母锭——电渣液态浇铸”的新一代电渣液态浇铸技术，如图1所示。通过感应加热坩埚将金属母材熔化为钢液，浇铸到渣池中。优点在于：①利用液态金属浇注代替自耗电熔化，导电方式为电源—上导电结晶器—液态熔渣—金属熔池—电渣锭—电源，使得电流和熔渣发热密度分散在熔渣边部，降低了渣池/熔池中心的温度场分布，通过改变电渣炉的温度场分布实现金属熔池的“浅”和“平”，其凝固方向更趋向于轴向，有利于改善铸锭的凝固组织；②采用双感应熔炼坩埚周期性的依次交替熔化母材钢锭、并周期性的向电渣炉结晶器内交替浇铸钢液，完全避免了传统双支臂电渣重熔交换电极因电流中断而引起的电渣锭渣沟和夹渣问题；③传统电渣重熔的母材钢锭采用的大截面模铸锭，而本技术只需要采用小于坩埚内径的连铸坯即可；例如国内某钢厂采用传统电渣重熔的方式，用5支直径1米的20吨母材钢锭通过双支臂交替熔炼了直径1.8米的100吨电渣锭；而本项目提出的新一代电渣液态浇铸技术只需用100支直径20厘米的1吨母材钢锭通过双感应熔炼坩埚交替熔炼100次后即可获得100吨电渣锭。本文有望为制备均质化、超洁净百吨级电渣锭提供参考。

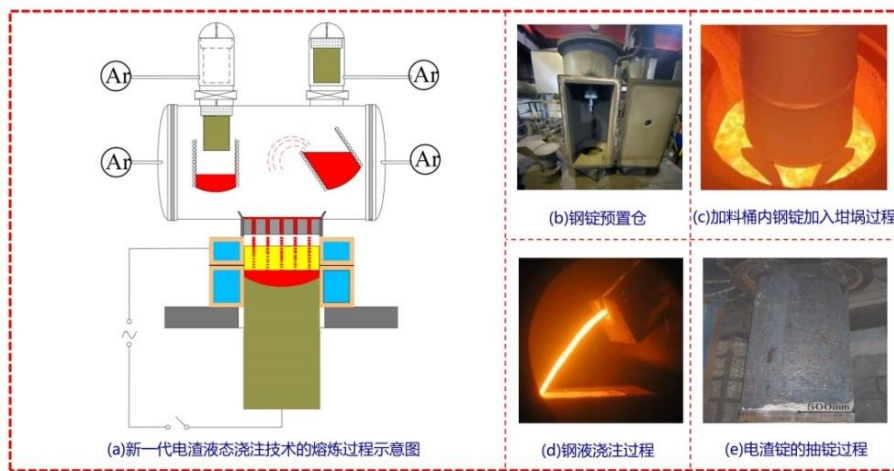


图1 新一代电渣液态浇铸技术：(a)装置示意图；(b)钢锭预置仓；(c)通过加料桶将母材钢锭加入到感应熔炼坩埚内（采用留钢操作）；(d)坩埚内钢液浇注过程；(e)电渣锭的抽锭过程（熔炼过程示意图）

注：熔炼步骤如下：通过钢锭预置仓向两个感应熔炼坩埚内周期性的提供母材钢锭、两个感应熔炼坩埚周期性的交替熔炼母材钢锭为钢液、两个坩埚内钢液周期性的依次交替浇铸到电渣炉结晶器内、电渣炉结晶器获得持续稳定的钢液、冷却凝固为电渣锭。（例如熔炼100吨电渣锭，母材钢锭采用100支1吨铸锭，通过两个熔炼坩埚依次交替100次，实现钢液的连续供给和铸锭成型）

## 2.2 电渣液态浇铸技术的研究进展

乌克兰 Medovar<sup>[1-2]</sup>在实验室研究了电渣液态浇铸和传统电渣重熔的金属熔池和凝固组织的对比，如图2所示。电渣液态浇铸技术能够使得铸锭呈准定向凝固模式，更好的获得等轴晶组织。

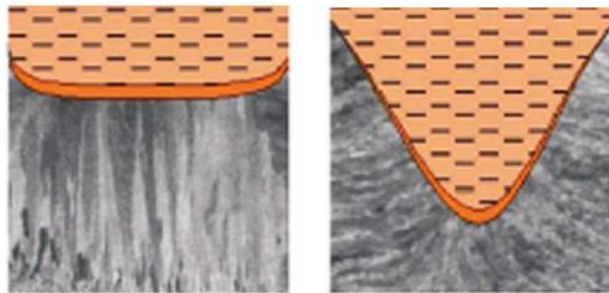


图2 (a) 电渣液态浇铸技术制备的电渣锭凝固组织；(b) 传统电渣重熔技术制备的电渣锭凝固组织

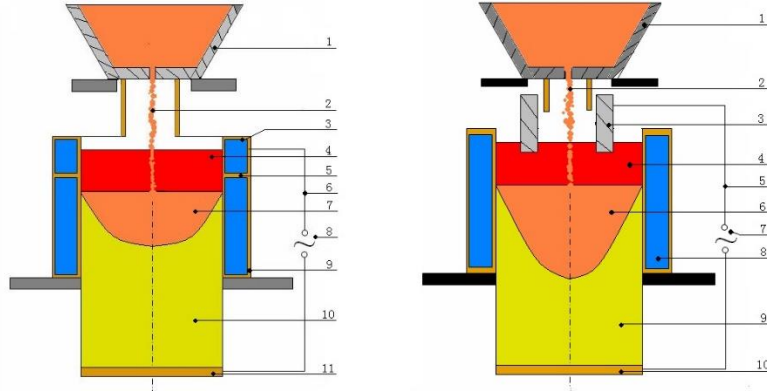
东北大学与国内某钢厂开发了15吨级电渣液态浇铸技术<sup>[3-7]</sup>，如图3所示。结晶器直径为1米，能够很好的进行铸锭的熔炼，但存在问题如下：钢包的长时间保温、钢液浇注过程中的二次氧化，限制了传统电渣液态浇铸的应用。



图3 (a) 电渣液态浇铸过程示意图； (b) 15 吨电渣液态浇铸炉； (c) 电渣锭

### 2.3 电渣液态浇铸技术的工艺分析

如图4所示，东北大学与国内某钢厂开发<sup>[6-7]</sup>了15吨级电渣液态浇铸设计了两种连铸式液态电渣供电回路系统的实验方案，编号为ESCC LM-I和ESCC LM-II。供电回路系统方案ESCC LM-I如图4a所示，采用结晶器导电技术，上、下结晶器之间为绝缘层，电流在上导电结晶器、渣池、金属熔池、铸锭、底水箱、电源和短网之间形成回路；供电回路系统方案ESCC LM-II如图4b所示，采用导电环供电，电流在导电环、渣池、金属熔池、铸锭、底水箱、电源和短网之间形成回路。



(a) ESCC LM- I  
 1—中间包；2—钢水；3—上导电结晶器；4—熔渣；5—绝缘层；6—短网；  
 7—熔炼变压器；8—结晶器；9—底水箱；10—电渣锭；11—电源

(b) ESCC LM- II  
 1—中间包；2—钢水；3—导电环；4—熔渣；5—短网；6—熔池；7—熔炼变压器；8—结晶器；9—底水箱；10—电渣锭；11—电源

图4 连铸式液态电渣供电回路设计方案

采用ESCC LM-I和ESCC LM-II两种供电方案的电渣锭表面质量如图5所示<sup>[6-7]</sup>，表明ESCC LM-II供电方案能够获得表面质量良好的电渣锭。图5a所示为采用供电方案ESCC LM-I生产的铸锭表面质量相片，图5b所示为采用供电方案ESCC LM-II生产的铸锭表面质量相片。两种方案的实验工艺参数见表1。



(a) ESCC LM-I (b) ESCC LM-II

图 5 两种供电工艺制备的铸锭表面质量

表 1 两种供电方案的实验工艺参数

实验工艺参数	ESCC LM-I	ESCC LM-II
熔渣化清后温度, °C	1650~1700	1650~1700
钢种和钢水重量	45#钢、15t	45#钢、15t
钢水浇注温度, °C	1576	1606
熔炼电压, V	50~60	65~75
熔炼电流, kA	17	18
下结晶器冷却水量, m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	140~160	140~160
钢水浇注速度, kg·min <sup>-1</sup>	85~100	60~77
抽锭速度, mm·min <sup>-1</sup>	13.5~16.5	10~13
抽锭行程, mm	1527	2230
渣-金界面控制距离, mm	与导电结晶器上沿 距离 370~380	与导电环下沿 距离控制 210~220

(1) 钢液浇铸温度对铸锭表面质量的影响

在相同渣系与渣量、以及相同供电制度的条件下，进行连铸式液态电渣浇注实验时，浇注温度分别为 1576 °C 和 1606 °C 时的钢锭表面质量见图 6 所示。

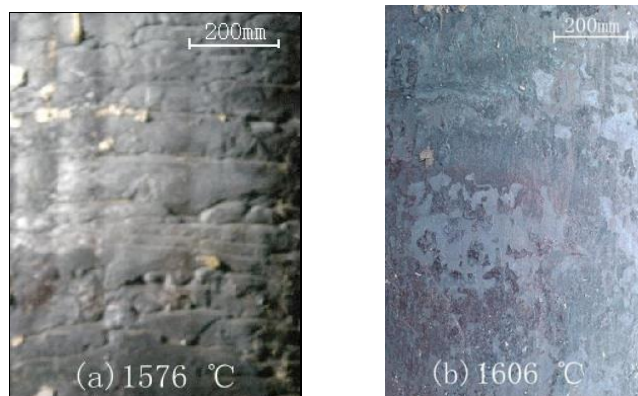


图 6 不同浇注温度下钢锭的表面质量

### （2）电参数对铸锭表面质量的影响

采用不同的供电制度生产同一支钢锭，熔炼设定电压分别为 73 V、80 V，电流为 18 kA 时钢锭的表面质量见图 7 所示，可见电流与电压对铸锭表面质量的影响相比较，电压的影响更为明显。

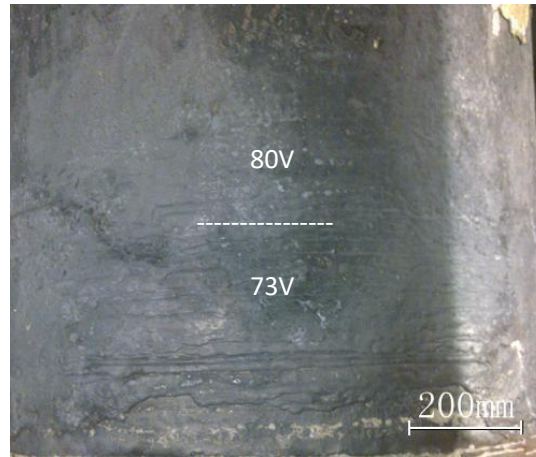


图 7 不同电压下钢锭的表面质量

### （3）两种供电方式对金属熔池的影响

通过改变供电回路系统的导电位置控制电流在渣池和熔池中的分布，从而对熔池的形状和钢锭的内部质量进行控制，因此供电回路系统的设计很关键。对两种供电回路系统的导电过程进行了数学模拟，分析了两种供电回路系统对整个工艺过程的影响。

采用 Fluent 有限元对连铸式液态电渣进行了模拟仿真，如图 8 所示<sup>[6-7]</sup>。模型验证方法为：在现场生产  $\phi 1000$  mm 实心锭的连铸式液态电渣过程使用红外枪对抽出二次冷却区域的钢锭进行测温，将测得的温度和模拟温度相对比验证模型。在钢锭拉出二冷区 1500 mm 时，测量从二冷区到距离二冷区 1000 mm 距离钢锭的温度，每隔 100 mm 测量一次，每个点多次测量取平均值，如图 9 所示。

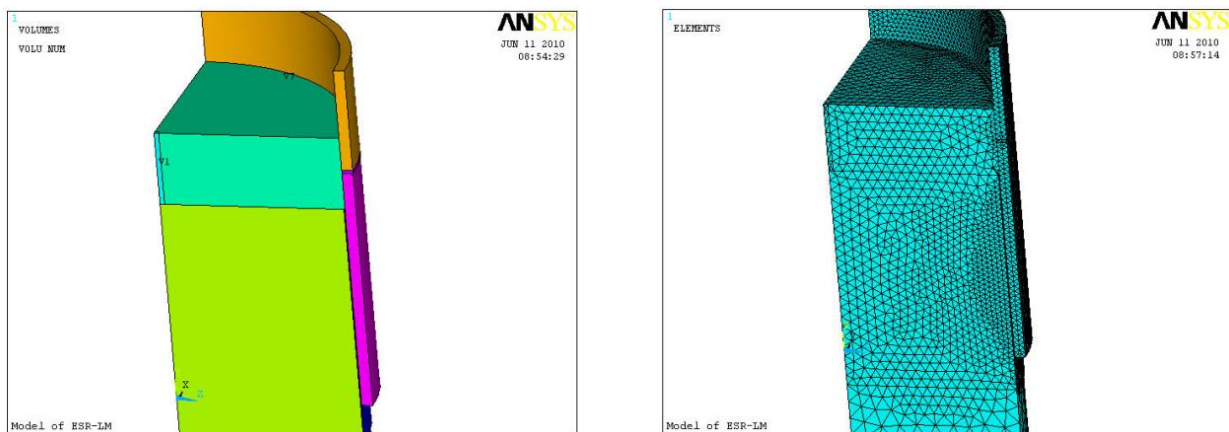


图 8 连铸式液态电渣模型及有限元网格

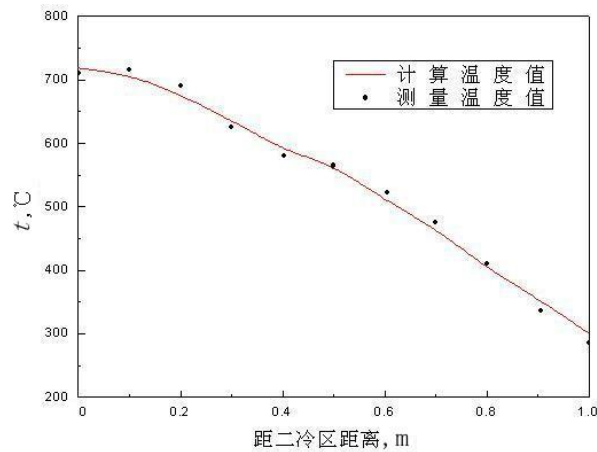


图 9 抽锭 1300 mm 时二冷区下部钢锭表面温度

表 2 两种供电方案金属熔池形状和深度的比较

工艺	金属熔池深度, mm	渣池最高温度, °C
ESCC LM-I	454	1853
ESCC LM-II	564	1989

两种供电方案模拟的熔池如表 2 所示，方案 ESCC LM-II 渣池最高温度、金属熔池深度均高于方案 ESCC LM-I。ESCC LM-II 的金属熔池较深，两相区距离渣池和金属熔池的高温区较远。ESCC LM-I 中更多的热量被结晶器冷却水带走；而 ESCC LM-II 将更多的热量传递给渣池和金属熔池。

### 3 结论与展望

本文提出了新一代电渣液态浇铸技术，采用双感应熔炼坩埚，依次交替向导电结晶器内持续的提供稳定的钢液，能够实现电渣重熔的持续稳定进行。基于前人对电渣液态浇铸的研究，得到以下结论：采用 ESCC LM-II 方式的供电方案，其凝固组织与传统电渣重熔类似，铸锭表面质量比较理想；本文提出的新一代电渣液态浇铸技术，从前人研究结果分析具备可行性。在感应熔炼坩埚方面，采用留钢操作，增大感应线圈热效率，有望满足结晶器内所需的钢液浇注速率。

通过本文对新一代电渣液态浇注技术的论述，将原有电渣液态浇注技术以及双感应熔炼坩埚的生产节奏进行匹配，有望实现百吨级铸锭的均质化熔炼。

### 参考文献

- [1] Medovar B I, Chernets A V, Medovar L B. Electroslag Cladding by Liquid Filler Metal [A], The 4th European Conference on Advanced Materials and Processes [C], Italy: Padua Venice, 1995: 165-171.
- [2] Medovar L B, Tsykulenko A K, Saenko V Ya, et al. New Electroslag Technologies [A], Medovar Memorial Symposium [C], Kiev: E O Paton Electric Welding Institute, 2001: 49-60.
- [3] 姜周华, 邓鑫, 臧喜民. 一种液态电渣连铸渣池液面的控制装置及方法[P], 专利号: ZL 201010257807.5.
- [4] 臧喜民. 电渣连铸技术的开发及工艺研究[D], 东北大学博士论文, 2008: 22.
- [5] 姜周华. 第二代液态电渣冶金技术的发展[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(3): 1-7.
- [6] 邓鑫, 姜周华, 臧喜民. 连铸式液态电渣浇注圆锭表面质量的影响因素[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(3): 209-221.
- [7] 张新法. 液态电渣连铸的数值模拟及工艺研究[D], 东北大学博士论文, 2010.