

· 工艺材料进展 ·

## 电渣冶金技术的最新发展趋势

姜周华<sup>1</sup> 李正邦<sup>2</sup>

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 北京钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘要** 简要回顾了电渣重熔工业生产 50 年的发展历史, 重点对近年来电渣冶金新技术进行了介绍和评价, 包括快速电渣重熔, 双极串联电渣连铸技术, 特厚板坯电渣重熔, 大型电渣重熔钢锭凝固偏析控制, 可控气氛电渣炉和电渣液态浇铸技术。在新的发展阶段, 电渣冶金技术向高效、节能、环保和满足更高质量方向发展。

**关键词** 电渣冶金技术 电渣连铸 电渣液态浇铸 发展

## Recent Progress on Electroslag Remelting Technology

Jiang Zhouhua<sup>1</sup> and Li Zhengbang<sup>2</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;  
2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The development history of electroslag remelting (ESR) commercial production for 50 years is reviewed briefly, and the presentation and evaluation of new technology of ESR metallurgy in recent years are focused including electroslag rapid remelting, double electrode series electroslag continuous casting technology, ultra-heavy slab ingot ESR, technology for solidification segregation control of heavy ESR ingot, ESR furnace with controlled atmosphere and ESR casting technology with liquid metal. It is indicated that in new development phase the ESR metallurgical technology is developed with high efficiency, saving energy, environmental protection and meeting requirement for higher quality.

**Material Index** ESR Metallurgy Technology, Electroslag Continuous Casting, ESR Casting with Liquid Metal, Progress

1952 年前苏联的乌克兰巴顿电焊研究所的 Me-dovar 和 Paton 在实验室采用电渣重熔技术制备了不锈钢锭成为现代电渣冶金技术的起源(图 1a)<sup>[1]</sup>。1958 年乌克兰扎波洛什市德聂伯尔建立了电渣重熔车间, 拥有 0.5 t P909 型电渣炉 4 台<sup>[2]</sup>, 美国费尔思斯特林公司(Firth sterling)于 1959 年建立了 3.6 t 工业电渣炉, 美欧国家在工业上全面推广直至 1965 年才开始<sup>[3]</sup>。我国于 1958 年在电渣焊的基础上掌握电渣重熔技术, 于 1960 年在重庆特殊钢厂及大冶钢厂建立电渣重熔车间<sup>[4]</sup>。世界电渣重熔工业生产已经历了整整 50 年(1958 年~2008 年)。

我国电渣冶金技术的开发和应用一直走在世界的前列, 为电渣冶金技术的发展做出了重要贡献<sup>[5]</sup>。进入 21 世纪, 国内外电渣冶金技术又有了新的发展<sup>[6]</sup>。

### 1 电渣连铸技术

传统电渣重熔采用一次重熔一个钢锭的间歇式生产方式, 生产效率和钢的成材率低, 生产成本高。另外, 传统电渣重熔的渣池与金属熔池之间存在着较大的热交换, 因此金属熔池深度与电极熔化速度成正比, 为保证钢锭结晶质量, 熔化速度与锭直径之

比不超过 1。当重熔直径小于 300 mm 的钢锭时生产效率就更低, 生产成本相当高。

为克服上述缺点, 奥地利 INTECO 公司开发了快速电渣技术 ESRR (Electroslag Rapid Remelting)<sup>[7,8]</sup>(图 1b), 采用 T 型结晶器, 重熔大断面电极, 在结晶器壁上嵌入导电元件, 使电源电流通过自耗电电极→渣池流入→导电元件→返回变压器, 如此改变了结晶器热分配, 使钢-渣熔池界面远离电极端头, 熔化金属液滴温度是接近液相线滴汇聚于金属熔池, 使金属熔池深度与输入功率无关。此外, 铸锭自 T 型结晶器中抽出, 易受空气对流冷却。

同时, 采用交换电极以及同位素 Co60 控制钢液面、连续拉坯和火焰切割铸坯等连铸技术, 实现了快速和连续化操作。生产结果表明, 对 100~300 mm 的小型铸坯, 熔速提高到 300~1 000 kg/h, 是传统电渣重熔速度的 3~7 倍。铸坯的表面和内部质量良好。

从 2002 年开始, 东北大学钢铁冶金研究所进行了电渣连铸技术的开发研究<sup>[9]</sup>, 采用了双极串联、交换电极、Cs137 液面检测与控制、连续拉坯及在线切割等新技术(图 1c)。

影响电渣连铸小方坯表面质量的因素主要有供

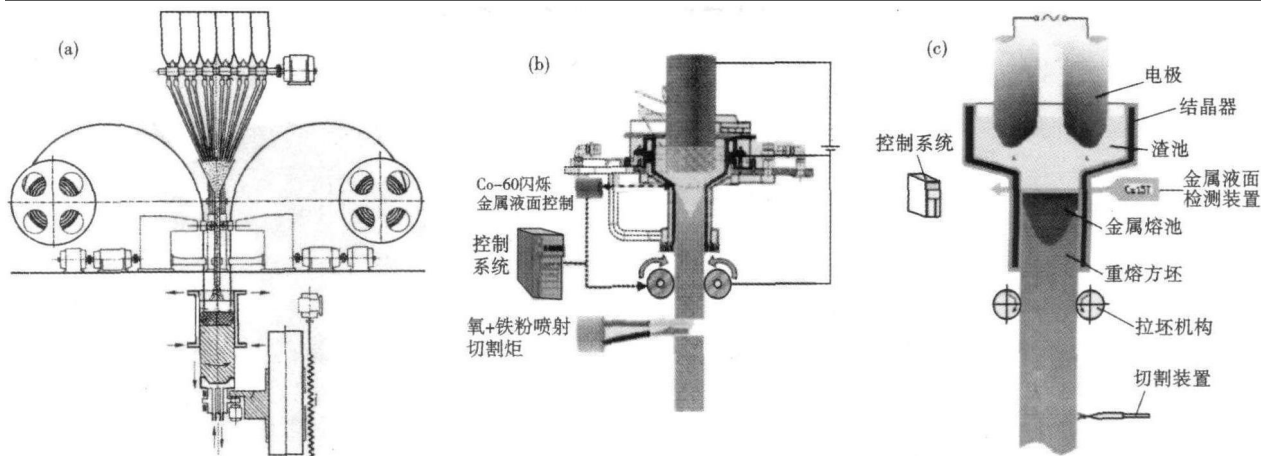


图1 (a)1952年首个电渣重熔实验设备;(b)快速电渣重熔设备示意图;(c)电渣连铸原理示意图

Fig.1 (a) Schematic of first ESR test device in 1952; (b) Schematic apparatus of electroslag rapid remelting; (c) Schematic of principle of electroslag continuous casting

电制度、渣系的物性参数、稳定的拉速、充填比和结晶器表面状况等<sup>[10]</sup>;影响内部质量的主要因素有渣系、熔化速度和凝固速度等因素<sup>[11]</sup>。

以电压60 V、电流3 800 A、渣系R2进行的高速钢W9Mo3Cr4V电渣连铸小方坯实验表明<sup>[12]</sup>,其内部碳化物组织比传统电渣钢锭内部碳化物组织明显细化,在后续的加工中更容易被打碎。当重熔直径小于300 mm的钢锭时,电渣连铸比传统电渣重熔提高熔化速度1~3倍,电耗下降20%~30%,成材率提高10%~15%,质量水平相当<sup>[13]</sup>。

在实验室研究的基础上,电渣连铸技术在国内某特钢企业得到了成功应用。电渣连铸生产300 mm×340 mm方坯和Φ600 mm圆坯的结果表明,铸坯表面和内部质量均与传统电渣锭相当。

## 2 特厚板坯电渣重熔技术

电渣重熔厚板坯优越性体现在以下几个方面:(1)电渣锭组织致密,成分均匀,具有良好的热加工塑性,允许更小的加工压缩比。例如,用700 mm电渣扁锭可生产350 mm厚板;(2)可以省去开坯工序;(3)横向塑性、韧性显著提高,改善了各向异性、断裂韧性、缺口敏感性和低周波疲劳指标显著改善;(4)钢板可焊性良好,焊缝热影响区缩小,可以省去大型焊接结构件(高压容器、锅炉、反应堆壳体)焊接后正火处理;(5)重熔钢板具有良好的低温抗冷脆性;(6)与模铸相比,电渣重熔生产特厚板时,由于产品质量好,成材率可提高9%~18%,足以抵偿全部重熔费用;(7)与连铸特厚坯以及模铸相比,电渣炉的投资最小。

在20世纪70年代乌克兰巴顿电焊研究所在实

验室建成了可生产600 mm×1 500 mm×2 000 mm(锭重14 t)双极串联板坯电渣炉。之后,为乌克兰亚速钢厂设计建造了4台20 t单相双电极串联板坯电渣炉。为俄罗斯设计建造了世界上最大的双极串联70 t板坯电渣炉。1974年底日本新日铁八幡厂建立了40 t双极串联、抽锭式板坯电渣炉(变压器容量5 630 kV·A),可生产300 mm×1 900 mm、510 mm×1 900 mm、510 mm×2 400 mm的板坯。

2006年东北大学为我国钢厂建成了世界上最大断面的板坯电渣炉,最大锭重40 t,断面尺寸为950 mm×2 000 mm。相较于传统电渣炉其具有的技术特点为:(1)低频电源控制。用1台三相整流变压器将35 kV降至满足工艺的二次电压,将三相交流逆变成0~5 Hz的单相低频交流电,保证了三相平衡的供电要求,可显著节省电能;(2)双极串联重熔。采用2支电极串联的重熔方式,可以实现减小短网感抗,提高功率因数;减少短网有功消耗,因此大幅度减低电耗;保证相同金属熔池深度的条件下,可提高熔化率;(3)结晶器移动式抽锭。采用底水箱固定、结晶器移动的抽锭方式,成功解决了大型钢锭重熔时的结晶器配置问题。

电渣炉自投产以来,已成功开发了厚度为640、760、960 mm三种规格的P20、WSM718R、980、2.25Cr1Mo、16MnR(HIC)共5个钢种。为提高产品质量,先后采用了冷却控制、结晶器锥度调整、渣系优化、干燥空气保护等先进工艺技术和措施。其主要经济技术指标为:(1)月产量能够达到650 t/台以上;(2)吨钢电耗1 000~1 200 kWh;(3)锭-材成材率85%;(4)通过对轧后板材的探伤,均符合

SEL072-1977 和 JB/T4730.3-2005 的 I 级标准;(5) 成分均匀,上下偏差小,性能指标特别是冲击韧性明显改善。

### 3 大型电渣重熔钢锭凝固偏析控制技术

东北大学开发了电渣重熔过程、凝固过程的数学模型,将工艺参数与电渣锭的凝固参数,如局部凝固时间和偏析系数等相结合,实现了数学模型的实际应用<sup>[14,15]</sup>。在此基础上,开发了递减功率凝固控制模型、电极插入位置自动控制技术(恒渣阻控制)、研制了智能化的电渣炉成套设备和工艺技术<sup>[16]</sup>。图 2(a)是 20 t 熔速控制同轴导电电渣炉的照片。实践证明,合理的熔化速度对于保证大型钢锭的凝固质量非常有效。

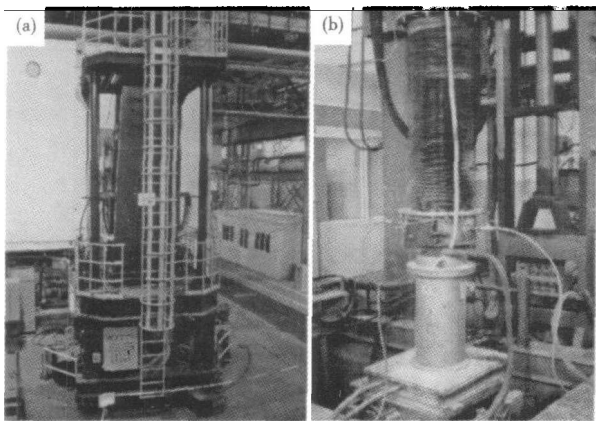


图 2 (a)20 t 熔速控制同轴导电电渣炉;(b)50 kg 保护气氛电渣重熔炉

Fig.2 (a) 20 t ESR unit with melting-rate control and same shaft conducting; (b) 50 kg shielding atmosphere ESR unit

### 4 可控气氛电渣炉

在过去的几十年中,通常采用往渣池中加入脱氧剂(Al、CaSi、FeSi 和 Mg 等)的方法对熔渣连续脱氧,但是这会导致熔渣组分改变,从而使重熔锭中的易氧化元素含量与自耗电极不一致。随着钢种的发展和要求的不断提高,出现可控制不同气氛的电渣炉。目前,可控气氛电渣炉主要形式有:

(1) 惰性气体(Ar、N<sub>2</sub>)保护电渣炉(图 2b);(2) 干燥空气保护电渣炉,适合于重熔对氢比较敏感的钢种,特别是大型钢锭;(3) 真空电渣炉,可以替代真空自耗炉生产大多数产品,且使钢锭的表面和内部质量更优于真空自耗炉;(4) 高压电渣炉,主要用于生产高氮钢,其压力可达 4.2 MPa,产品中氮含量可达 1.0% 以上。

目前,欧美发达国家新建的电渣炉大多具有保护气氛装置。宝钢特殊钢分公司采用 ALD 5 t 全封闭 Ar 气保护电渣重熔炉冶炼 GH4169 合金锭,分析结果表明,ESR(Ar)电渣锭氧、硫含量和锭头尾碳、铝、钛之差远低于一般 ESR 工艺;VIM(真空感应熔炼)+ESR(Ar)工艺冶炼合金中平均氧含量为  $6 \times 10^{-6}$ ,远低于 VIM+VAR(真空电弧重熔)工艺冶炼合金中平均氧含量  $13 \times 10^{-6}$ ,所以 ESR(Ar)工艺脱氧效果优于 VAR 工艺<sup>[17]</sup>。

东北大学采用 N<sub>2</sub> 保护电渣重熔高氮不锈钢。由表 1 可见,采用保护气氛电渣重熔可明显减少元素的烧损,降低钢锭中的氧含量,提高氮的收得率。

加压电渣炉目前只有德国和奥地利已工业化,最大吨位已达 20t。最近东北大学也研制成功了

表 1 N<sub>2</sub> 保护电渣重熔高氮不锈钢的冶金效果

Table 1 Metallurgical effect of ESR high nitrogen stainless steel under protective atmosphere of N<sub>2</sub>

炉号	气体保护	阶段	不锈钢成分/%									氮收得率/%	脱硫率/%	脱氧率/%	Mn 烧损/%	
			C	Si	Mn	P	S	Cr	N	O	Mo					Al
3021	无	重熔前	0.055	0.26	17.7	0.015	0.015	17.6	0.69	0.002 5	-	<0.03	81.2	40	-84.0	2.10
		重熔后	0.047	0.24	15.6	0.015	0.009	17.5	0.56	0.004 6	-	<0.03				
3022	N <sub>2</sub>	重熔前	0.058	0.20	18.53	0.021	0.015	19.93	0.83	0.003 6	-	<0.03	97.5	60	30.5	0.23
		重熔后	0.052	0.17	18.30	0.020	0.006	20.01	0.81	0.002 5	-	<0.03				
3023	N <sub>2</sub>	重熔前	0.048	0.45	18.19	0.020	0.015	19.10	0.71	0.007 1	2.23	<0.03	97.2	53	49.3	0.65
		重熔后	0.045	0.40	17.54	0.020	0.007	18.59	0.69	0.003 6	2.03	<0.03				

50 kg 加压电渣重熔炉。加压电渣炉的设计最高工作压力为 7.0 MPa,目前实验阶段的冶炼压力为 2 ~ 3.5 MPa。在电渣重熔过程中二次电压为 41 V,电流为 1 500 ~ 2 500 A,渣系选 ANF-6(70% CaF<sub>2</sub>-30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 或 (%) 63CaF<sub>2</sub>-17CaO-15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2SiO<sub>2</sub>-3MgO,渣量 3 ~ 3.5 kg,氮气采用 99% 工业氮气。表 2 是加

压电渣炉生产的高氮不锈钢钢锭的化学成分。

### 5 液态电渣浇注技术

电渣液态浇注法(ESS LM)是乌克兰首都基辅的 Elmet-Roll、巴顿电焊研究所的密多瓦尔教授及其团队于 20 世纪 90 年代发明,电渣液态浇注方法<sup>[18]</sup>

表2 加压电渣重熔高氮奥氏体不锈钢成分/%  
Table 2 Compositions of HSS produced by PESR /%

钢种	压力/ MPa	Cr	Mn	C	Si	S	P	Mo	Ni	N
Cr18Mn18N	2.0	20.13	16.51	0.10	0.54	0.012	0.020	-	-	1.00
Cr22Mn16N	2.1	21.22	15.92	0.12	0.49	0.003	0.023	-	-	1.21
18Cr18Mn2MoN	2.1~3.0	18.34	18.36	0.068	0.50	0.008	0.024	2.13	-	0.93
P2000	3.0	17.06	13.18	0.042	0.75	0.009	0.021	3.37	-	0.79
23Cr2MoNi4N	3.2	21.33	-	0.026	0.72	0.010	0.019	2.05	4.00	0.88

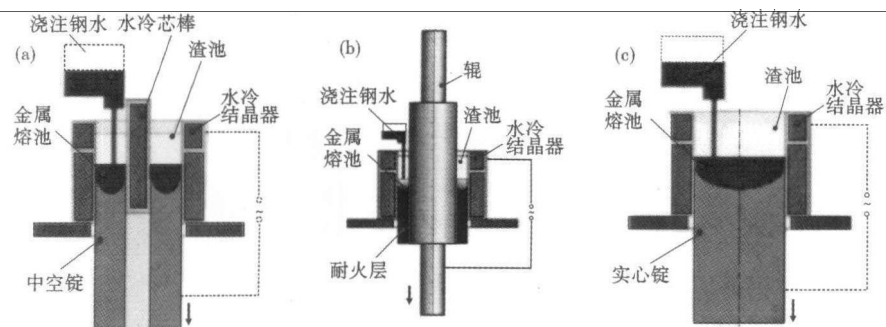


图3 电渣液态浇注技术示意图:(a)熔铸空心锭;(b)表面电渣镀层;(c)熔铸/精炼实心锭  
Fig.3 Schematic of electroslag casting technology with liquid metal: (a) casting hollow ingot; (b) electroslag surfacing by liquid metal; (c) electroslag remelting/refining by liquid metal for solid ingot

以省去电极制备的工序和成本。其核心是采用了导电结晶器技术。由于浇注速度很慢,所以采用了感应加热的中间包。由于凝固过程速度可控,钢锭的凝固质量与标准电渣重熔相一致。这种方法由于渣-金界面的过热度明显低于标准电渣重熔过程,而且结晶器导电方式的金属熔池更加浅平,其铸锭速度比传统电渣重熔速度提高3倍以上,因而效率显著提高。不仅可以生产实心锭,而且在生产空心锭和双金属复合轧辊方面具有明显的优势。

## 6 结语

电渣冶金技术虽已经历50年的发展,但电渣技术仍将具有强大的生命力。在新的

发展阶段电渣冶金技术

的主要原理如图3所示。

电渣液态浇注的特征是没有自耗电,这样可

将向高效、节能、环保以及满足更高质量的方向发展。

## 参考文献

- Saenko V Ya, Medovar Boris Israilevich-A Person, Scientist and Citizen. Medovar Memorial Symposium. Naukova Dumka, Kiev, 2001:5
- Лейбзон С А. Производство Стали Методом Электрошлакового Лепеплава. Метлургияздат, Москва, 1962:13
- Nafziger R H. Electroslag Melting Process. Bulletin. United States Bureau of Mines, 1976:1
- 李正邦. 电渣冶金在中国的发展. 中国金属学会第二届全国会议文集, 青岛, 1963
- 李正邦, 傅杰. 电渣重熔技术在中国的应用和发展. 特殊钢, 1999, 20(2):7
- 李正邦. 21世纪电渣冶金的展望. 炼钢, 2003, 19(2):6
- Holzgeber W, Holzgeber H. Development Trends in Electroslag Remelting. Medovar Memorial Symposium. Naukova Dumka, Kiev, 2001:71
- Alghisi D, Milano M, Pazienza L. From ESR to Continuous CC-ESRR Process: Development in Remelting Technology Towards Better Products and Productivity. La Metallurgia Italiana, 2005(1):21
- 臧喜民, 姜周华, 张天彪, 等. 电渣连铸技术的开发. 中国冶金, 2006, 16(3):10
- 臧喜民, 黄晓颖, 姜周华, 等. 电渣连铸小方坯表面质量的影响因素. 特殊钢, 2006, 27(5):49
- 臧喜民, 姜周华, 潘铁毅. 电渣连铸小方坯内部质量研究. 铸造, 2007, 56(9):930
- 臧喜民. 电渣连铸技术的开发及工艺研究:[博士学位论文], 沈阳:东北大学, 2007
- Zang Xi-min, Jiang Zhou-hua. Electroslag Continuous Casting of Billets of Alloyed Steels with Bifilar Mode. Proceedings of the 2007 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, 2007:101
- Dong Yanwu, Jiang Zhouhua, Li Zhengbang. Mathematical Model for Electroslag Remelting Process. Journal of Iron and Steel Research International, 2007, 14(5):7
- Jiang Zhouhua, Dong Yanwu. Solidification Model for Electroslag Remelting Process. Proceedings of the 2007 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, 2007:89
- 邓鑫, 姜周华, 董艳伍. 20t恒熔速保护气氛电渣炉的开发与应用. 2008全国电渣冶金年会论文集, 太原, 2008
- 陈国胜, 周奠华, 金鑫, 等. 全封闭Ar气保护电渣重熔GH4169合金. 特殊钢, 2004, 25(3):46
- Medovar L B, Tsykulenko A K, Saenko V Ya, et al. New Electroslag Technologies. Medovar Memorial Symposium, 2001:49

姜周华(1963-),男,博士,教授,《特殊钢》编委,特殊冶炼工艺理论研究。

李正邦(1934-),男,教授,中国工程院院士,《特殊钢》特邀编委,特种冶金和二次精炼、高温合金和特种钢研究。

收稿日期:2009-05-26