

· 工艺材料进展 ·

我国电弧炉炼钢技术的进展讨论

李士琦¹ 孙华^{1,2} 郁健¹ 裴芬¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 南京钢铁联合有限公司,南京 210035)

摘要 10年来我国电弧炉炼钢技术在产量、装备技术(大型化、高的技术经济指标)、高效化技术(超高功率供电、辅助能源、炉料多元化、减少非通电时间、废钢预热、连续化生产)和洁净化技术方面均取得了显著进展。但是废钢资源短缺、电力不足和能源结构不合理等因素制约了我国电弧炉炼钢的进一步发展。文中讨论了我国电弧炉炼钢发展的重点(炉料多样化、合理供电、能量多样化、余热利用和绿色环保)和前瞻(低碳经济洁净钢生产)。

关键词 我国电弧炉炼钢 技术 进展

A Discussion on Progress of Domestic Electric Arc Furnace Steelmaking Technology

Li Shiqi¹, Sun Hua^{1,2}, Yu Jian¹ and Pei Fen¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Nanjing Iron and Steel Corporation, Nanjing 210035)

Abstract Domestic electric arc furnace steelmaking technology including output, equipment technique (large-capacity, advanced economic and technical index), high efficiency technology (ultra-high power supply, auxiliary energy source, diversified charging, decreasing power off-time, scrap preheat and continuous smelting) and cleanliness technology have been gained obvious progress in last decade. But the factors such as shortage of scrap source, power in short supply and unreasonable energy structure restrict the further development of domestic electric arc furnace steelmaking. The focal points for development of domestic electric arc furnace steelmaking (diversified charging, reasonable power supply, energy multiplicity, residual heat utilization and green environmental protection) and forward progress (clean steel production for low carbon economic) have been discussed in article.

Material Index Domestic Electric Arc Furnace Steelmaking, Technology, Progress

现代钢铁工业诞生于19世纪中叶,中国炼钢历史可以追溯到1870年,福建福州船政局所属企业采用电弧炉开始炼钢工业生产。电弧炉炼钢使用先进的清洁能源-电能,是现代钢铁工业的主要生产方式之一。近年来,世界钢铁工业快速发展电弧炉炼钢应用了一系列新技术、新工艺、新装备、新材料;开发并生产了许多新产品,使之实现了高效、低耗、智能化、清洁化生产^[1,2]。以废钢为主要铁源,以电力为主要能源的电弧炉生产的粗钢已占全球粗钢产量的1/3左右。然而由于我国的废钢资源紧张、电力供应不足等因素限制了电弧炉炼钢的发展,电炉钢比例远远低于世界平均水平。

1 电炉钢产量

由图1可见,从1990年到2007年的18年间,全国电炉钢产量增长了4倍多,平均每年增加250万t钢;然而,由于钢的总产量增长非常快,电炉钢的比例逐年下降,现远远低于全世界的平均水平。

若全国电炉钢仍每年增长250万t,到2020年的10年间将增加2500万t,即达到年产电炉钢近

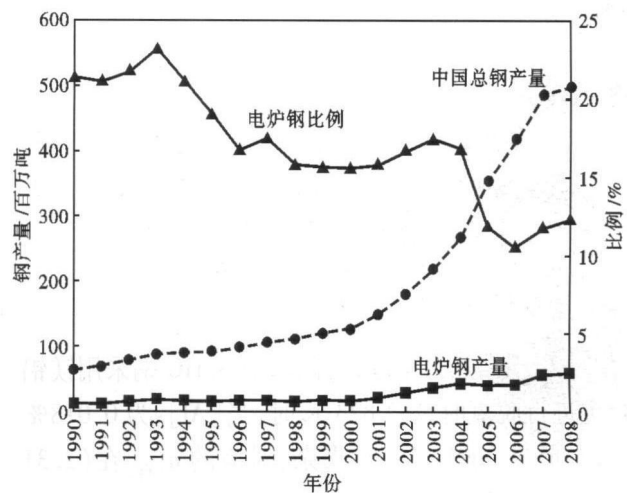


图1 中国总钢产量、电炉钢产量和电炉钢比例的发展变化
Fig.1 Development and change of total output of steel, output of arc furnace steel and proportion of arc furnace steel in China

8000万t,约为总钢产量5亿t之16%,照此估算,到2030年我国电炉钢产量将超过1亿t/年。

2 电弧炉技术装备

10余年来,我国在现代电弧炉流程与电弧炉工

程技术方面取得了长足进步,主要有:

(1)实现了电弧炉炉容大型化,形成了电弧炉冶炼-二次精炼-连铸或电弧炉冶炼-二次精炼-连铸-连轧的现代化电弧炉流程群体。表 1 列出了 2004 年至 2008 年我国 30 家重点大中型钢铁企业电弧炉装备情况。目前,我国有 60 ~ 150 t 的大电弧炉 36 台。大电弧炉采用先进的、集约的技术,可实现高电压、长弧、低电流操作,生产效率高、消耗低。

表 1 我国 30 家重点大中型钢铁企业电弧炉装备/台
Table 1 Arc furnace equipment of 30 medium and large steel producers in China /unit

年份	电弧炉吨位/t				合计
	≥100	50~99	11~49	≤10	
2004	12	28	79	45	164
2005	12	32	76	39	159
2006	17	36	70	29	152
2007	21	48	54	26	149
2008	24	52	46	20	142

(2)我国电弧炉炼钢生产的技术经济指标大幅度提高,不少钢厂在冶炼周期、电耗、利用系数、生产率等方面已经进入国际先进甚至国际领先行列。近两年来,我国电炉钢在废钢及电力资源紧缺、价格高、成本比转炉钢高等很多不利条件下,产量大幅度增长,电炉钢比例有所回升,电炉钢增长速率略高于总产钢量的增长速率。

(3)在消化引进的国外先进电弧炉冶炼技术的基础上有所创新,这些创新推动了我国现代电弧炉炼钢技术及电炉钢生产的快速发展。比如电弧冶炼的高效化、综合节能技术,电弧炉加炼钢废料结构合理化技术、余热利用技术,电弧炉冶炼强化供氧供能技术、电弧炉炼钢控制技术等等。

3 高效化技术

提高电弧炉炼钢的生产率、生产速率和能量利用效率是近 60 年来技术发展的主流方向,特点有:

(1)超高功率供电技术。20 世纪 60 年代,美国联合碳化物公司提出了超高功率电弧炉(UHP-EAF)的概念,超高功率电弧炉炼钢理念主导了近 60 年电弧炉炼钢生产技术的发展,其中心思想是最大的发挥主变压器能力,包括以下两个方面:①提高每吨钢配置的主变压器容量,由 200 ~ 300 kVA/t 提高至 500 ~ 600 kVA/t,20 世纪 70 年代以后,又提高至 800 ~ 1 000 kVA/t;②极大地提高最大功率供电时间的比例。

大型超高功率电弧炉主变压器容量很大,达到

60 ~ 120 MVA,为了提高炉子的工作效率,为使电极电流保持在 5 万 ~ 6 万安培的合理范围以内,电弧炉的供电和电气运行方式需发生改变,其技术是:高功率因数、高电压、合理电流操作^[3]。

大型超高功率电弧炉的操作区间的功率因数接近于电弧稳定燃烧上限的 0.866,如图 2 的阴影区域所示,而传统的小电弧炉大电流低功率因数操作制度、操作电抗接近短路电抗,不必考虑操作电抗的非线性,由于谐波的影响,冶炼过程的操作电抗不同于电路的短路电抗,操作电抗的非线性是大型电弧炉炼钢过程最重要的技术特征。近 20 年来,我国关于不同容量^[4]的电弧炉的电气运行技术进行了系统的研究,掌握了自行开发合理运行技术的经验;非线性电抗模型研究和许用工作点开发。

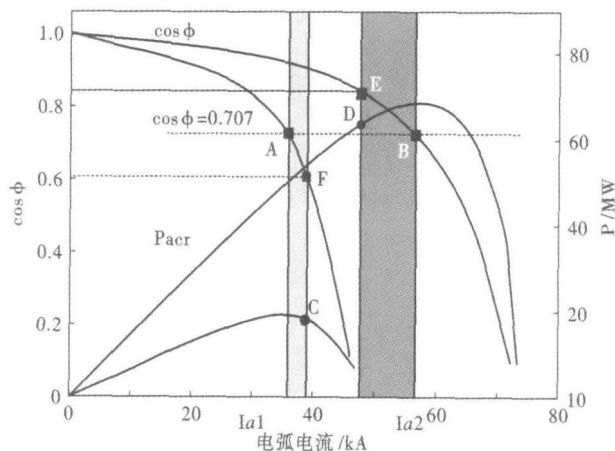


图 2 超高功率电弧炉与小电弧炉电气运行的比较
Fig. 2 Comparison of electrical characteristics between UHP arc furnace and small arc furnace

(2)辅助能源。20 世纪 80 年代,欧洲有 50% 的电弧炉、日本有 80% 的电弧炉采用氧-燃助熔辅助炼钢。20 世纪 90 年代,新投产的大型电弧炉几乎 100% 采用了氧-燃辅助能源技术,使用的燃料一般是天然气和轻柴油。国内在 20 世纪 80 年代开发了氧-煤助熔技术,然而由于煤发热值较低,后来也逐渐发展使用油或燃气作为助熔燃料。国内自主研发的氧-燃烧嘴单支的功率已达到 2 ~ 3 MW,技术水平可与国际先进烧嘴媲美,氧-燃辅助能源所供应的能量约占电弧炉炼钢总供应能量的 30% ~ 40%。

电弧炉炼钢过程用氧也氧化了多余的 C、Si、Mn、P 等杂质元素,生产经验表明,每吹入 1 m³ 的氧气,可替代约为 4 kWh 的电^[5]。

国内在 20 世纪 90 年代后电弧炉公称容量大型化的发展迅速,生产高效化、冶炼时间缩短,大量喷

入燃料、碳素、配加铁水,电弧炉冶炼所需的氧量大幅度提高(表2)。国内外各家开发了大型集束射流氧枪技术,单支氧枪的氧气额定供氧流量超过了 $3\,500\text{ m}^3/\text{h}^{[6]}$ 。

(3)原料多元化。电弧炉炉料主要是废钢和冷生铁,比例约为85:15;不少国家大量使用直接还原铁(DRI),我国近年来则较多配加热铁水。在近期一段时间内,电弧炉炼钢的原料结构仍将保持多元化。按国内废钢资源积累量(图3)的增加和电弧炉炼钢生产能力的增长,我国电炉钢的年产量、电炉钢比和冷废钢用量都将有所增长,估计到2020年以后,将有较大的增长。

①1949年至1999年的50年间,我国钢铁产量总计约为30亿t;而2000年至2009年的10年间,总产钢量也为30亿t;按年产钢5亿t计,2010年至2019年的总产钢量约为50亿t。亦即到2020年,我国废钢的总表观储量将超过100亿t,废钢储量和电炉钢年产量之比将超过100:1,废钢供应将大为好转,电弧炉炼钢仍将回归以冷炉料为主的工艺状况。

②电弧炉炼钢使用热铁水是我国特定情况下的资源利用。对于电弧炉炼钢而言,热铁水提供了大量的物理热和化学热,减少了装料次数,改善了电弧燃烧条件,特别是避免了使用社会废钢中残余金属杂质带来的污染,是电弧炉炼钢高效节能的首选条件。然而使用热铁水,增加了总能耗,加大了温室气体排放,使流程变长。

③各种非高炉、非焦炼铁技术在不断进步,当前我国已进入新的大力发展直接还原铁阶段。开发直接还原铁技术的特点更为理性化,各种煤基方法得到广泛的关注,期望在生产技术方面能有所突破。

(4)减少非通电时间。减少供电功率低、占时长的还原期时间,始终是电弧炉炼钢工作者的努力方向。20世纪80年代以后,二次精炼技术的发展和普及,首先的受益者就是电弧炉炼钢过程,其后底出钢技术使非通电时间所占比例显著减少。减少非通电时间比例方面主要有3点进步:①装备大型化、机械化和自动化水平提高;②炉料结构改善、装料次数由三次减至二次或一次;③管理水平提高,实现冶

表2 不同炉容量和原料条件下电弧炉炼钢的氧气需求量

Table 2 Oxygen supply demand for arc furnace steelmaking with varied capacity and raw material conditions

炉容量/ t	原料/%		配碳量/ %	用氧时间/ min	脱碳速度/ (%·min ⁻¹)	所需总氧气流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	所需供氧强度/ [m ³ ·(min·t) ⁻¹]
	废钢	生铁					
30	85	15	0.8	40	0.018	462	0.26
60	70	30	1.5	30	0.047	2 410	0.67
150	70	30	1.5	25	0.056	7 180	0.80

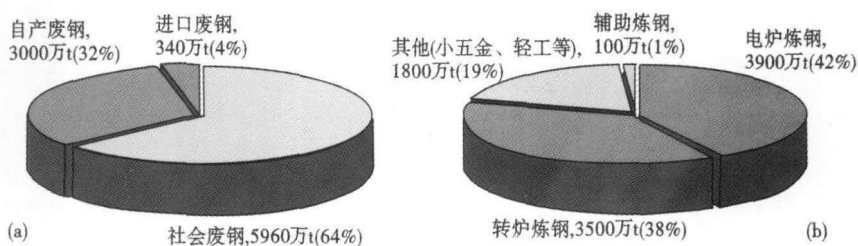


图3 2007年中国废钢资源构成(a)及消耗(b)

Fig. 3 Composition of scrap course structure (a) and consumption of scrap (b) in China 2007 year

炼-精炼-连铸全流程匹配顺行。

我国许多100t左右的电弧炉冶炼周期已降至40min,如南京钢铁集团电炉厂的100t电弧炉,全年出钢次数超过了10000次。

(5)废钢预热。电弧炉炼钢过程中真正的节能措施是电弧炉炉气带走的能量回收利用技术。电弧炉炼钢总能量中有10%~20%的能量随烟气而排放,利用这部分能量来预热废钢,可达到提高电弧炉炼钢节能、降耗、提高生产效率的目的。目前,各种废钢预热技术应用中,主要有3种:Fuchs竖炉-电弧炉;Consteel电弧炉;ECOARC电弧炉。

除废钢预热技术外,汽化冷却回收蒸汽发电或供真空精炼用蒸汽等技术,在国外应用已有20多年。

(6)连续化生产。炼钢过程仍然是至今钢铁生产流程中唯一间歇式操作的环节,钢铁生产的高效化进程,将促进连续化生产技术的诞生。例如电弧炉炼钢的高效化技术结构示意图于图4。

电弧炉炼钢过程实现连续化具有一系列优点:①电弧非常平稳,闪烁、谐波和噪音很低;②过程连续进行,减少非通电操作时间;③不必周期性加料,热损失和排放大大减少;④便于稳定控制生产过程和产品质量。

至2004年电弧炉炼钢过程连续化的Consteel技术在全世界建设了20套生产线,其中9套在中国。近来国内有几家企业^[7]已分别开发了国产的连续加料系统。可以期望,炼钢生产工艺连续化将在电弧炉炼钢取得突破。

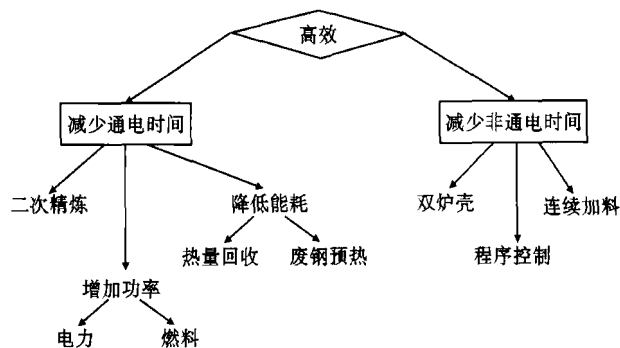


图 4 电弧炉炼钢连续化生产技术措施

Fig. 4 Technical measures for continuous production of arc furnace steelmaking

4 洁净化技术

洁净化技术包括提高钢质纯净度和减轻外部环境的负荷内外两方面。不消耗不可再生资源,使用最清洁的能源——电能,发展电弧炉炼钢本身就是发展洁净化生产。除此之外,电弧炉炼钢技术的洁净化发展是:

洁净钢生产:使用纯净的铁源;低氧冶炼,控制终点钢水 $[O] \leq 450 \times 10^{-6}$;炉渣改质;洁净钢精炼工艺;钢水保护浇注;电磁制动与大型夹杂控制技术。

减轻环境负荷:电弧炉炼钢使用清洁能源;采用脱 Si 工艺,减少渣量;推广煤气回收工艺技术;开发电弧炉废钢预热工艺;精炼渣炼钢返回利用技术;粉尘回收处理技术。

5 国内发展电炉钢面临的主要问题

(1)我国钢铁企业的高端、先进电弧炉设备,大都从国外引进。原因有:①我国在电弧炉设备的制造能力和电弧炉设备的自动化程度上,国内厂家与国外先进供应商确实存在一定的差距;②钢铁企业希望在较短时间内收回投资和盈利,不愿意进行风险投资,其结果是我国的电弧炉设计研发和制造单位很少能拿到钢铁企业用于电弧炉研制、开发的资金。这个问题的解决,要靠钢铁企业转变观念,但最终还是要靠企业自身研制能力的提高。

(2)我国电弧炉炼钢的综合能耗偏高,尚未达到国际先进水平。虽然我国目前电弧炉炼钢各方面的经济技术指标已经与国际先进水平相当,但如果按照全部采用冷装炉料的标准进行衡量,我国电弧炉炼钢的技术经济指标并不乐观。

(3)作为我国电炉钢原料之一的直接还原铁质量指标较差。因为我国天然气资源不足,直接还原铁大都采用煤基法生产,煤中灰分和硫含量较高,导

致直接还原铁的指标不是太好。

(4)我国在电弧炉炼钢的余热利用方面虽然取得一些进展,但仍需要进一步研究开发竖炉电弧炉和康思迪式电弧炉炼钢技术,以及电弧炉炼钢的化学热利用技术。在电弧炉炼钢生产过程中,碳与氧最终生成二氧化碳过程中产生的能量,有近2/3目前尚无较好的办法回收利用。

(5)我国还需要在电弧炉冶炼过程中,对电弧炉冶炼控制继续作深入研究,使冶炼过程更为精确。另外,对电弧炉冶炼中有害元素进行有效控制也是将来一个需要重视的课题。

资源和能源结构现状决定着我国电炉钢比例:

(1)废钢资源紧缺。无论从废钢的历史积累量还是从废钢的现实循环量上看,我国都远低于美国、日本和俄罗斯等国。据中国废钢铁应用协会统计数据,2004年我国重点钢铁企业自产废钢铁1 700万 t、社会采购废钢铁3 300万 t,以上两项共有废钢铁资源5 000万 t,扣除企业调出废次材边角余料 280 万 t、企业库存增加 40 万 t,可用作炼钢原料的废钢铁资源是4 680万 t。2004年冶金企业废钢铁消耗量为5 430万 t,也就是说电炉钢比例仅为10%的情况下,每年还有750万 t的废钢铁炉料缺口需由进口来补充,占进口废钢铁炉料总量(1 178万 t)的64%。

近10年来我国钢产量高居世界之首位,然而由于总的废钢积累量不足,废钢资源紧缺,废钢价格较高制约了电炉钢比的提高。可以预见这种状况还将持续一段相当长的时间,原因是:①我国是发展中国家,大量钢材用于建筑,回收周期长,废钢生成量较小。②钢铁生产总量增长迅速,其中转炉炼钢消耗掉大量的废钢。我国转炉产钢量特别大,所消耗的废钢量也相当大。③非理性消耗,我国还未形成先进合理的废钢回收、分类、管理机制,也影响了废钢资源的有效回收。

(2)电力紧张,发电能源结构不合理。由于中国发电技术构成不合理,火力发电所占比例很大,水力、风能、核能、光伏等清洁能源发电比例很低,电力供给能力不足,拉闸限电现象时常发生,加上昼夜时段电费存在差价,多数电弧炉炼钢生产必须采用错峰生产,生产开工不足,电弧炉利用效率低,再加上电费昂贵等,电炉钢生产企业的平均效益往往明显低于联合钢铁企业的平均效益水平。

6 今后我国电弧炉炼钢技术发展的重点及展望

我国电弧炉炼钢技术的发展重点有:

(1)原料多样化。相继采用铁水、DRI/HBI、碳化铁等作为电弧炉原料,不仅使电弧炉的适应性更强,更是稀释了废钢中的残余元素,提高了钢水质量,拓展了电炉钢产品范围。

(2)合理供电。从传统的交流炉向超高功率、高阻抗交流炉及直流炉发展,在降低电网污染的前提下实现低电流长弧操作,明显提高输入功率,缩短冶炼周期。直流炉的优势还在于对电网的污染小、电极消耗低、基本上可以无偏弧、噪音相对较小、对熔池有搅拌作用等。

(3)能量多元化。为降低电(能)耗,提高能量输入强度以缩短冶炼周期,多种形式的能量利用技术被采用,如机械式氧碳枪、二次燃烧、炉壁氧-燃烧嘴、底吹气等。

(4)余热利用。电弧炉炼钢技术发展的集中体现,是基于不同的解决方案,各种炉型的不断涌现,如竖炉、Consteel 炉、双炉壳、CONARC 炉、ECOARC 炉等形式的电弧炉。这些炉型的成功应用,均从不同方面推进了电弧炉炼钢余热利用技术的发展。

(5)绿色环保。三级除尘、综合利用电弧炉除尘粉、炉渣再利用等已成为常规的环保措施。众多电弧炉均重视全封闭冶炼,在控制烟尘放散方面采取了专门措施,特别是 ECOARC 炉,可将二恶英放散的可能性降至最低。

传统的电弧炉炼钢以回收废弃钢铁为铁源,其工艺过程的特点是由电弧提供高温热源,特别是还原精炼过程移至炉外以后,电弧炉炼钢工序的主要冶金任务进一步转化为能量的供应。由于电弧炉炼钢是以废钢为主要原料来源,直接体现了金属材料的循环利用,不直接使用铁矿和焦煤等不可再生资源,减轻了环境负荷。随着废钢积累量的增加,电弧炉炼钢将成为钢铁生产可持续发展的重要模式,有广阔的发展前景:

(1)基于连续生产技术集成的高效节约型生产流程。①生产品种的扩展,从起初的长材、扁平材到如今的板带材;②电弧炉容量及短流程生产规模不断扩大;③高化学能电弧炉的发展;④将各项先进技术综合建厂。

(2)以高纯铁源为基础的电弧炉炼钢洁净化生产平台。如前所述,电弧炉炼钢生产技术的发展受制于铁源的供应,中国使用铁水热装技术实为一种无奈的权宜之计。观察现在的各种流程,不难发现钢铁生产实际上是一种提纯铁金属的过程:精矿中铁的纯度为 65% ~ 67%,生铁中铁的纯度为 93% ~

95%,粗钢中铁的纯度提高到 99% 左右(不计碳等合金元素含量),而精炼得到的洁净钢纯度高达 99.9%。可以设想,随着直接还原制铁技术进一步发展和产能扩大,若能以适当价格提供 99.0% ~ 99.9% 纯度的含铁原料,将为电弧炉炼钢流程生产高性能洁净钢提供技术发展的平台。

(3)与清洁能源技术发展相匹配的低碳或非碳冶金钢厂。整体科学技术的发展都对钢铁技术进步有巨大的推动作用,而能源技术的确影响更为直接,历史上炼焦工业化生产是高炉炼铁技术出现的前提,大规模工业空气分离技术促进了氧气转炉的发展,强大的电力供应是电弧炉炼钢生产技术发展的保障。当前,电力工业正面临一个前所未有的技术进步,清洁能源的利用改变了 100 多年来的电力供应概念,诸如微电网、分布式供电等,可以预见,与之密切相关的电弧炉炼钢技术也将有重大的发展。直接利用光伏发电技术的无碳或低碳炼钢工艺将可能是一种未来的方向。

7 结语

电弧炉炼钢过程流程短、能耗低、环境负荷轻,是一种较为清洁的、先进的炼钢方法,应给予足够重视和发展。我国电弧炉炼钢的发展应该在引进、借鉴国外先进技术的基础上,围绕缩短冶炼周期、降低吨钢能耗这一核心课题,开发具有自主知识产权的现代电弧炉冶炼技术。面对我国废钢资源短缺、电力紧张的现实情况,进一步缩短电弧炉冶炼周期、提高电弧炉炼钢生产率,对于我国在新的条件下促进电弧炉炼钢的发展具有十分重要的指导意义。

参考文献

- 徐匡迪,洪新.电炉短流程回顾和发展中的若干问题.中国冶金,2005,15(7):1
- 殷瑞钰.当代电炉流程的工程进展评价.中国电炉流程与工程技术文集.北京:冶金工业出版社,2005
- 李士琦,林钢,陈煜,等.关于电炉炼钢能量问题的讨论.中国电炉流程与工程技术文集.北京:冶金工业出版社,2005
- 刘冰.100 MVA 交流电弧炉炼钢电气运行研究:[博士学位论文].北京:北京科技大学,2008
- 赵沛,蒋汉华.钢铁节能技术分析.北京:冶金工业出版社,1999
- 王成喜,刘骁.电弧炉炼钢提高生产率的技术进展.炼钢,2005,21(6):48
- 崔健,刘骁.电弧炉炼钢技术若干问题的实践与认识(1).钢铁,2006,41(2):1

李士琦(1942-),男,教授,《特殊钢》编委,电弧炉炼钢、特殊钢冶炼和精炼、冶金反应工程及过程控制研究。

收稿日期:2010-05-06