



电弧炉炼钢生产效率调查与分析

缪亮¹, 陈煜²

(1 中信泰富特钢集团股份有限公司发展部, 江阴 214400; 2 中国金属学会, 北京 100081)

摘要: 中国进入新的经济发展阶段, 同时面临“双碳”发展战略, 发展全废钢电弧炉流程是中国钢铁工业进行钢铁生产流程结构调整的必然选择。长期以来, 电弧炉炼钢生产效率低于转炉炼钢是制约其发展的关键因素之一, 探究影响电弧炉炼钢生产效率的关键因素有利于电弧炉炼钢生产的健康发展; 通过建立电弧炉炼钢生产效率计算公式, 分析影响电弧炉炼钢生产效率的关键因素, 再与实际生产统计数据相印证, 结果表明, 我国现代电弧炉炼钢生产效率有了长足进步。通过设备大型化和高效化冶炼的技术手段, 可以使电弧炉炼钢生产效率达到与同吨位转炉炼钢生产效率相当的水平(200 t/h), 影响电弧炉炼钢生产效率的决定性因素是电弧炉炼钢过程的能量供应功率, 在提高物质转化的推动力方面, 仅提高电弧炉炼钢过程总能量供给不能直接提高其生产率, 只有提高电弧炉炼钢过程中的能量供应功率, 才能将输入能量转化为提高物质转化的推动力。

关键词: 电弧炉炼钢; 生产率; 因素分析; 能量功率

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00226 **中图分类号:** TF087

Investigation and Analysis of the Production Efficiency of Electric Furnace Steelmaking

Miao Liang¹, Chen Yu²

(1 Development Department, CITIC Pacific Special Steel Group Co., Ltd., Jiangyin 214400, China;
2 The Chinese Society for Metals, Beijing 100081, China)

Abstract: China has entered a new stage of economic development while facing the “double carbon” development strategy, the development of full waste steel electric arc furnace steelmaking is China’s iron and steel industry to carry out structural adjustment of steel production process is an inevitable choice, For a long time the production efficiency of electric arc steelmaking is lower than that of converter steelmaking is a key constraint on the development of its key factors, exploring the key factors affecting the production efficiency of electric arc furnace steelmaking is conducive to the healthy development of electric arc furnace steelmaking production; By establishing the calculation formula of the production efficiency of electric arc furnace, analyzing the key factors affecting the production efficiency of electric arc furnace steel production, and then confirming with the actual production of statistical data corroboration, the result show that, China’s modern electric arc furnace steel production efficiency has made great progress. Through equipment large-scale and efficient smelting technology, it can make the electric arc furnace steelmaking production efficiency with the same tonnage converter steelmaking production efficiency (200 t/h). The decisive factor affecting the production efficiency of electric arc furnace steelmaking is the electric arc furnace steelmaking process of energy supply power. In the impetus of material conversion, only improve the electric arc furnace steelmaking process total energy supply can not directly improve its productivity, only to improve the electric arc furnace in the process of energy supply power, can input energy into improve the impetus of material conversion.

Key Words: Electric Arc Furnace Steelmaking; Productivity; Factors Analysis; Energy Power

电弧炉炼钢相较于转炉炼钢生产在“碳排放”方面有明显的优势^[1-3], 发展电弧炉炼钢是中国在“双碳”战略压力下进行钢铁生产流程结构调整的必然选择^[4-6]。但电弧炉炼钢生产效率长期低于转炉炼钢是制约其发展的关键因素^[7-9]。工业生产中人们主要关注生产效率, 以考量产品的市场竞争力^[10-11], 生产效率是炼钢生产过程的一种宏观体现

指标, 表明过程中物质转化随时间的指征^[12], 炼钢生产中的生产效率通常以单位时间内生产出的合格产品来衡量, 单位时间可以为一个小时, 也可以为年。在某一流程属性的钢铁流程中, 单一生产单元的效率决定了整个流程的连续性和效率^[13-14]。电弧炉炼钢过程的生产效率实质上体现了能量转化效率推动物质转化的效率^[15], 是在单位时间内由炼

作者简介: 缪亮(1984—), 男, 硕士, 工程师; **E-mail:** miaoliang@citicsteel.com; **收稿日期:** 2024-09-20

通信作者: 陈煜(1973—), 男, 博士, 正高级工程师; **E-mail:** chenyu_1973@163.com

钢单元系统外将以电能为主的能量输入到反应单元中,完成物料由固态向液态的转变,获得有一定热焓(目标温度)成分合格的液态钢水^[16]。

1 电弧炉炼钢生产效率的理论分析

电弧炉炼钢生产效率 P_R ,通常可以定义为单位小时生产的粗钢量^[17],可以用出钢量 G_A 与出钢到出钢时间 t_T 的比值来计算,其中,出钢到出钢的时间 t_T 由通电时间 t_S 与非通电时间 t_N 组成,电弧炉炼钢生产效率 P_R 表达式如式(1)。

$$P_R = \frac{G_A}{t_S + t_N} \quad (1)$$

式中, P_R 为生产效率,t/h; G_A 为出钢量,t;通电时间 t_S ,h;非通电时间 t_N ,h;

按照电弧炉生产过程的能量平衡^[18-19],电弧炉生产的粗钢中能量来自冶炼过程中的电能供给和化学能供给,其能量可以表示为吨粗钢能耗 W_E 与出钢量 G_A 的乘积为 $W_E \times G_A$;能量供给可以表示为电能的平均供给功率 P_E 与通电时间 t_S 以及电能效率 η_E 的乘积为 $P_E \times t_S \times \eta_E$,和化学能的平均供给功率 P_{Ch} 与通电时间 t_S 以及化学能效率 η_{Ch} 的乘积为 $P_{Ch} \times t_S \times \eta_{Ch}$ ^[20]。由能量平衡原理可知,粗钢含有的能量=输入总能量,如式(2)。

$$W_E \cdot G_A = P_E \cdot t_S \cdot \eta_E + P_{Ch} \cdot t_S \cdot \eta_{Ch} \quad (2)$$

式中, W_E 为吨粗钢能耗,kWh/t; P_E 为电能的平均供给功率,kW; η_E 为电能效率; P_{Ch} 为化学能的平均供给功率,kW; η_{Ch} 为化学能效率。

电弧炉炼钢通电时间可以按式(3)计算。

$$t_S = \frac{W_E \cdot G_A}{\eta_E \cdot P_E + \eta_{Ch} \cdot P_{Ch}} = \frac{W_E}{\eta_E \cdot (P_E/G_A) + \eta_{Ch} \cdot (P_{Ch}/G_A)} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,吨粗钢的能耗 W_E 为一常数,通常记为385 kWh/t,因此,电弧炉炼钢通电时间 t_S 与吨钢电能供给功率 P_E 和吨钢化学能供给功率 P_{Ch} 成反比,吨钢电能供给功率 P_E 和吨钢化学能供给功率 P_{Ch} 越大,电弧炉炼钢过程的通电时间 t_S 越短。

在全废钢仅有电能为输入能量的条件下式(3)可以简化为式(4)。

$$t_S = \frac{W_E \cdot G_A}{\eta_E \cdot P_E} = \frac{W_E}{\eta_E \cdot (P_E/G_A)} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,吨粗钢的能耗 W_E 为一常数,通常记为385 kWh/t,因此,电弧炉炼钢通电时间 t_S 与吨钢电能供给功率 P_E 成反比,吨钢电能供给功率

P_E 越大通电时间 t_S 越短。

因此,生产效率可以列为式(5),由式(5)可以推演出式(6)。

$$P_R = \frac{G_A}{\frac{W_E}{\eta_E \cdot (P_E/G_A) + \eta_{Ch} \cdot (P_{Ch}/G_A)} + t_N} \quad (5)$$

$$P_R = \frac{1}{\frac{W_E}{\eta_E \cdot P_E + \eta_{Ch} \cdot P_{Ch}} + \frac{t_N}{G_A}} \quad (6)$$

令, $\eta_E \cdot P_E + \eta_{Ch} \cdot P_{Ch} = \Sigma P$,为总能量有效供给功率,则得到式(7)和式(8)。

$$P_R = \frac{1}{\frac{W_E}{\Sigma P} + \frac{t_N}{G_A}} \quad (7)$$

$$P_R = \frac{\Sigma P \cdot G_A}{W_E \cdot G_A + \Sigma P \cdot t_N} = \frac{G_A}{W_E \cdot G_A / \Sigma P + t_N} \quad (8)$$

从式(7)和(8)可以看出,电弧炉炼钢生产效率与吨粗钢能耗 W_E 、出钢量 G_A 、总能量有效供给功率以及非通电时间 t_N 有关,吨粗钢的能耗 W_E 为一常数,通常记为385 kWh/t,从关系上看,电弧炉炼钢生产效率与出钢量 G_A 、总能量有效供给功率呈正相关关系,与非通电时间 t_N 呈负相关关系,通过式(6)可以看到总能量有效供给功率取决于供能功率与能源效率有关。

全废钢仅有电能供给的条件下式(5)可以简化为式(9)并可以推演出式(10)。

$$P_R = \frac{G_A}{\frac{W_E}{\eta_E \cdot (P_E/G_A)} + t_N} \quad (9)$$

$$P_R = \frac{1}{\frac{W_E}{\eta_E \cdot P_E} + \frac{t_N}{G_A}} \quad (10)$$

在全废钢原料时,仅供电能条件下总能量有效供给功率为有效供电功率,在有化学能供应条件下总能量有效供给功率为有效电能与化学能供应功率;生产操作中增加输入能量功率有利于提高电弧炉炼钢生产率,冶炼周期中非通电时间的增加会降低电弧炉炼钢的生产率,增大公称容量或出钢量有利于提高电弧炉炼钢的生产率。

根据公式(10)做一系列测算见表1,在电弧炉炼钢为全废钢仅有电能供给的条件下,出钢量仅为30 t,以出钢量 $G_A=30$ t计,常规全废钢电炉非通电时间包括三次开盖加料15 min和出钢时间5 min,共计 $t_N=0.3$ h,如果通电时间 t_S 按50 min计,则通电时间 $t_S=0.83$ h,电弧炉炼钢生产效率 $P_R=26.54$ t/h。当操作

条件不变时,提高电弧炉公称容量,例如出钢量 G_A 提高到50 t,在相同冶炼周期条件下,电弧炉炼钢生产效率 $P_R=44.25$ t/h;出钢量 G_A 提高到100 t,则电弧炉炼钢生产效率 $P_R=88.49$ t/h,通过增加出钢量也就是通过提高公称容量,能显著提高电弧炉炼钢生产的效率。若将常规电弧炉改为连续加料形式,可以将非通电时间缩短到 $t_N=5/60=0.083$ h,在出钢量 G_A 为100 t,则电弧炉炼钢生产效率 $P_R=109.52$ t/h,电弧炉炼钢的生产效率从88.49 t/h提高109.52 t/h,提高程度有限。

由式(3)和式(4)可以看出,不同炉型供能功率与能量效率影响生产效率测算,见表2,如果想减少通电时间,可以通过增加能量供给功率实现,在全废钢条件下,仅增加电能吨钢供给功率即可,通过技术进步将电弧炉变压器的额定吨钢功率从高功率级别500 kVA,提高到700 kVA,电弧炉炼钢通电时间 t_s 会从1.54 h,减少到1.1 h(默认电能效率 $\eta_E=0.5$),生产效率从54.35 t/h增加到71.43 t/h;极限条件下,将电弧炉变压器的额定吨钢功率提高到1 000 kVA,通电时间 t_s 为0.77 h,生产效率从71.43 t/h增加到93.46 t/h;这时,通过供电技术和操作改进可以将电能效率 η_E 从0.5提高到0.65,则电弧炉炼钢通电时间 t_s 为0.59 h,生产效率为112.36 t/h,与较早的 t_s 为1.54 h,生产效率为54.35 t/h相比有了长足的进步。

在电弧炉炼钢过程中,吨粗钢的熔化能耗 W_E 为一常数,通常记为385 kWh/t,在有废钢预热条件下吨粗钢的熔化能耗 W_E 与预热吸收的能耗有关,如式(11)。

$$W_E=385-\Delta W_{PR} \quad (11)$$

式中, ΔW_{PR} 为废钢平均预热能耗,单位kWh/t,随着预热效果变好,预热能耗增大,能减少废钢熔化所需的能耗,减少通电时间,提高生产率,废钢预热效果与能量效率影响生产效率测算见表3。

根据公开资料,连续加料炉型平均废钢平均预热能耗为50 kWh/t,在出钢量100 t,电弧炉变压器的额定吨钢功率1 000 kVA条件下通电时间 t_s 为0.67 h,生产效率为132.28 t/h,将电能效率 η_E 从0.5提高到0.65,则电弧炉炼钢通电时间 t_s 为0.515 h,生产效率为166.39 t/h;竖炉炉型平均废钢平均预热能耗为100 kWh/t,在出钢量100 t,电弧炉变压器的额定吨钢功率1 000 kVA条件下通电时间 t_s 为0.57 h,生产效率为152.44 t/h,将电能效率 η_E 从0.5提高到0.65,则电弧炉炼钢通电时间 t_s (h)为0.438 h,生产效率为190.84 t/h,不同炉型废钢预热效果与能量效率影响生产效率测算结果见表3。

2 实际统计电弧炉炼钢生产效率

电弧炉炼钢在高效生产方面这几年有长足进步,根据中国金属学会2022年的电弧炉生产统计数据[21],从图1(a)可以看出,工序小时产量最高可以达到200 t/h,与同吨位的转炉工序小时产量相当,查阅统计数据可知,该炉座为引进的水平连续加料电弧炉,公称容量130 t,平均出钢量136 t,变压器额定功率100 MV·A,炉料为全废钢,生产品种为普碳钢。根据式(4)可以计算,通电时间 t_s 0.58 h,其中,平均能量效率为0.68,总能量供给功率为131 MV·A(电能平均供给功率为84 MV·A,化学能平均供给功率为47 MV·A(炉料中配加了100 kg/t生铁,过程中喷吹了22 kg/t的碳粉),根据式(1)可

表1 电弧炉公称容量影响生产效率测算表

Table 1 Measurement of the impact of EAF nominal capacity on productivity

炉型	G_A/t	$\sum P/(kVA \cdot t^{-1})$	$W_E/(kWh \cdot t^{-1})$	$\Delta W_{PR}/(kWh \cdot t^{-1})$	$\sum \eta$	t_s/h	t_N/h	$P_R/(t \cdot h^{-1})$
常规	30	927	385	0	0.5	0.83	0.300	26.54
常规	50	927	385	0	0.5	0.83	0.300	44.25
常规	100	927	385	0	0.5	0.83	0.300	88.49
连续	100	927	385	0	0.5	0.83	0.083	109.52

表2 供能功率与能量效率影响生产效率测算表

Table 2 Measurement of power supply and energy efficiency affecting production efficiency

炉型	G_A/t	$P_E/(kVA \cdot t^{-1})$	$W_E/(kWh \cdot t^{-1})$	$\Delta W_{PR}/(kWh \cdot t^{-1})$	η_E	t_s/h	t_N/h	$P_R/(t \cdot h^{-1})$
常规	100	500	385	0	0.50	1.54	0.30	54.35
常规	100	700	385	0	0.50	1.10	0.30	71.43
常规	100	1 000	385	0	0.50	0.77	0.30	93.46
常规	100	1 000	385	0	0.65	0.59	0.30	112.36

表 3 废钢预热效果与能量效率影响生产效率测算表

Table 3 Measurement table of scrap preheating effect and energy efficiency affecting production efficiency

炉型	G_A/t	$P_E/(kVA \cdot t^{-1})$	$W_E/(kWh \cdot t^{-1})$	$\Delta W_{PR}/(kWh \cdot t^{-1})$	η_E	t_S/h	t_N/h	$P_R/(t \cdot h^{-1})$
常规	100	1 000	385	0	0.50	0.770	0.300	93.46
连续	100	1 000	385	50	0.50	0.670	0.086	132.28
连续	100	1 000	385	50	0.65	0.515	0.086	166.39
竖炉	100	1 000	385	100	0.50	0.570	0.086	152.44
竖炉	100	1 000	385	100	0.65	0.438	0.086	190.84

以计算出电弧炉炼钢生产效率 P_R 为 205.1 t/h。在统计数据中可以看到电弧炉炼钢工序小时产量最低的也仅有 10 t/h 左右的,这与特钢冶炼的特殊性有关。

结合图 1(a)和图 1(b)按不同炉型可以看出,竖炉炉型的小时产钢量平均水平较常规炉型和水平加料炉型高,而且比较稳定。

常规炉型与水平加料炉型的平均小时产钢量相当,主要是由于常规炉型大多采用配加热铁水,减少装料次数,减少金属熔化量,增加化学能比例;作为常规炉型全废钢生产的巴登钢厂,其电弧炉小时产钢量已经超过了统计的所有常规炉型和竖炉炉型,说明操作水平、产线布局等也是影响小时产

量的关键因素,国内电弧炉炼钢操作水平与其还有很大差距。

根据电弧炉炼钢生产效率式(1)可知,电弧炉炼钢生产效率与公称容量和冶炼周期有直接关系。通过统计数据也可看出,从整体看小时产量与公称容量成正比关系,表明随着公称容量增大,小时产量增加,如图 2(a)所示,装备大型化是电弧炉炼钢生产高效化的主要手段。考察影响生产效率指标的其他因素时发现,小时产量与冶炼周期呈指数型反比关系,随着冶炼周期增大,小时产量减小,生产率降低,如图 2(b)所示。

3 能量供给对生产效率的影响分析

从能量供给角度考察对生产效率的影响看,总

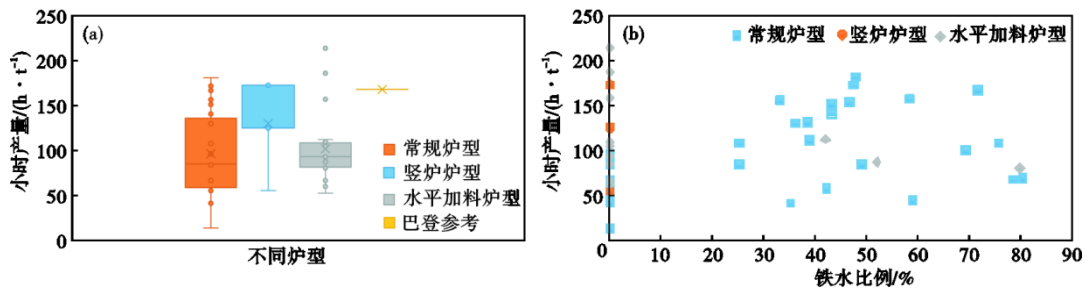


图 1 不同炉型电弧炉小时产量统计图(a)与配加铁水比例关系图(b)

Fig. 1 Statistical chart of different types of electric arc furnaces of hourly output (a) and the relationship chart of adding molten iron ratio (b)

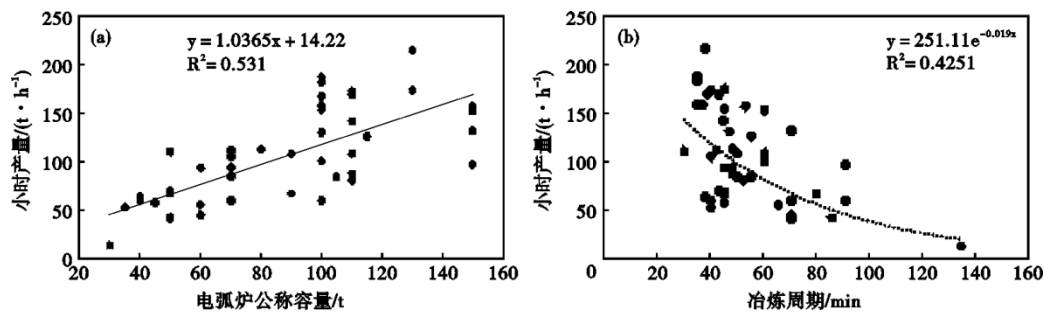


图 2 小时产量与电弧炉公称容量关系图(a)和与冶炼周期关系图(b)

Fig. 2 Relationship between hourly output and nominal capacity of electric arc furnace (a) and relationship diagram with smelting cycle (b)

体趋势是随着电弧炉炼钢生产能量(电能和化学能)供应能力与效率的提高,冶炼周期是有减少的趋势,对提高生产效率有正向作用,从式(3)可以看出这种理论上的数学关系。调查统计中电弧炉炼钢供电能力(单位公称容量变压器的容量)与实际冶炼周期没有显著的相关关系,如图3所示,这是因为除了提高单位公称容量的电能供应能力以外,例如,提高原料中的铁水配入比例或者化学能供能比例等也是影响电弧炉炼钢冶炼周期的重要因素。

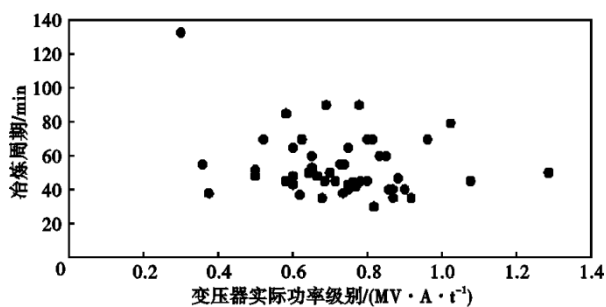


图3 电弧炉炼钢供电能力与冶炼周期的关系

Fig. 3 Relationship between power supply capacity of electric furnace and smelting cycle

在电弧炉炼钢生产中,原料中的铁水是不用能量进行熔化冶炼的,为了比较的一致性,将变压器的额定功率折算到纯废钢比例部分的实际变压器功率水平,这样便于统一比较。

电弧炉炼钢冶炼周期内通电时间的比例体现了冶炼过程中整个冶炼周期内的电能输入时间比例,如图4所示,从统计数据看,与小时产量(生产率)没有明显的相关关系。

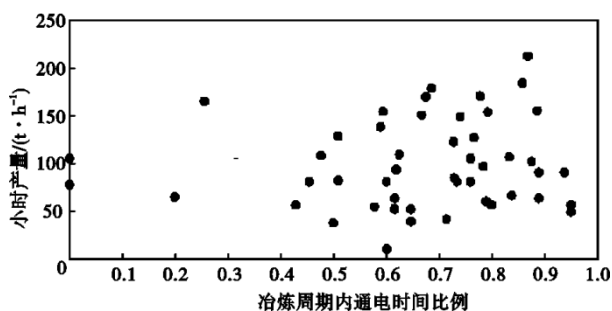


图4 冶炼周期内通电时间比例与小时产量关系

Fig. 4 Relationship between proportion of time energized during the smelting cycle and hourly output

在中国电弧炉炼钢生产中,有通过在炉料结构中添加热铁水来提高化学能和物理热的输入以提高生产效率的情况,通过统计数据如图1(b),看出

炉料结构中配加铁水比例与小时产量没有明显的相关关系,说明电弧炉炼钢生产过程在炉料结构中配加热铁水的经济价值大于生产效率价值。

从电弧炉炼钢过程中总能量供给考察对生产效率(小时产量)的影响看,由式(8)可以看出,提高有效能量供给功率可以提高生产效率,提高总能量供给不一定能够提高生产效率,这里面还有一个能量效率的问题,它决定了将供给总能量转化为有效能量的问题,如图5所示,统计数据也显示没有明显的相关关系,根据生产数据的统计说明,在电弧炉生产过程中,提高总能量供给不能直接提高生产效率(小时产量),也就是说在提高物质转化的推动力方面,仅提高电弧炉炼钢过程总能量供给不能直接提高其生产率。

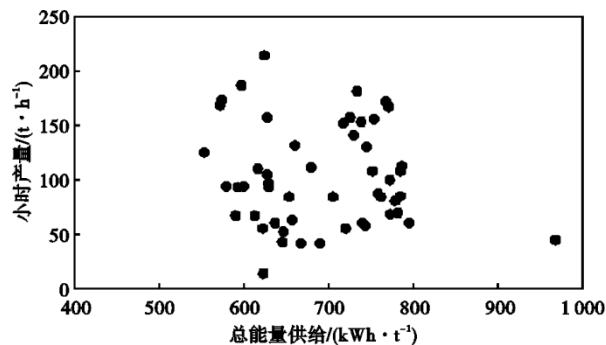


图5 总能量供给与小时产量关系图

Fig. 5 Plot of total energy supply versus hourly output

定义通电时间内的能量供给速率为过程供能功率,从式(6)和式(7)中可以看出,过程供能功率应该与生产效率有正相关的数学关系,通过统计数据如图6所示,发现电弧炉炼钢过程供能功率与小时产量有明显的正相关关系,相关性非常强,说明电弧炉炼钢过程中物质转换过程的能量供给速率能够直接影响物质转换速率,也即电弧炉炼钢生产效率。

根据统计数据如图7所示,从炉型角度看,常规炉型的过程供能功率较其他炉型的高一些,主要和炉料结构中配加大量铁水有关,参考巴登的电弧炉炼钢生产数据可以看到,巴登电弧炉炼钢是全废钢条件冶炼,它的过程供能功率高于竖炉炉型也高于全废钢的水平加料炉型,小时产量高于其他配加铁水和没有配加铁水的常规炉型电炉,说明巴登钢厂电弧炉炼钢生产操作控制水平非常高,能够在全废钢的条件下快速将能量提供到物料中并完成能

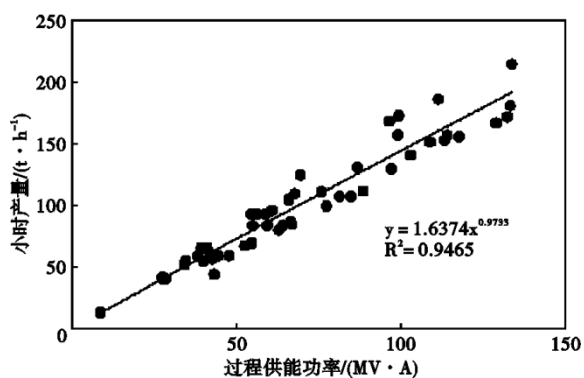


图 6 过程供能功率与小时产量的关系图

Fig. 6 Plot of process supply power versus hourly output

量转化,同时推动了物质的转化速率。

4 结论

(1)我国电弧炉炼钢生产效率最好水平达到与同吨位转炉炼钢生产效率相当的水平 200 t/h,主要是通过提高电弧炉公称容量和吨钢供能功率来实现,从理论分析中也可以得出这是提高电弧炉炼钢生产效率的主要攻关方向,从实际统计分析看,电弧炉炼钢生产在电弧炉容量和变压器供电能力方面的进步对提高生产效率起了重要的作用;

(2)在原料中配加铁水是一种变相提高电弧炉炼钢冶炼过程供能功率的手段,通过统计数分看,

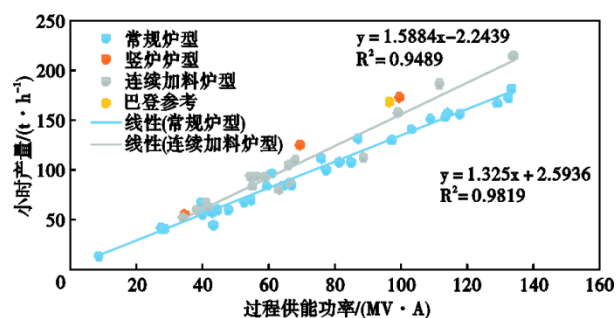


图 7 不同炉型过程供能功率与小时产量关系图

Fig. 7 Plot of process energy supply power versus hourly output for different furnace types

这种手段可以达到一定的提高生产效率的目的,但实际的经济价值远大于提高生产效率的价值;

(3)电弧炉炼钢生产过程采用连续加料工艺缩短了冶炼过程的非通电时间,对提高电弧炉炼钢生产效率的作用有一定促进作用,而且比较容易实现;

(4)通过增加化学能的有效供给功率同样能够达到提高生产效率的作用;

(5)在提高物质转化的推动力方面,仅提高电弧炉炼钢过程总能量供给并不能直接提高其生产率,只有提高电弧炉炼钢过程中的能量供应功率,才能将输入能量转化为提高物质转化的推动力。

参考文献

- [1] 崔志峰,徐安军,上官方钦. 国内外钢铁行业低碳发展策略分析[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1496-1506.
- [2] 上官方钦,刘正东,殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 15-20.
- [3] 邢奕,崔永康,田京雷,等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 801-811.
- [4] 崔志峰,上官方钦,王方杰,等. 2022—2060年中国废钢资源量分析预测[J]. 钢铁, 2023, 58(6): 126-133.
- [5] 上官方钦,殷瑞钰,李煜,等. 论中国发展全废钢电炉流程的战略意义[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 86-92.
- [6] 吕明,薛魁,郭红民,等. 转炉炼钢废钢质量控制及结构优化[J]. 钢铁, 2023, 58(5): 51-58.
- [7] 朱荣,魏光升,张洪金. 近零碳排放电弧炉炼钢工艺技术研究及展望[J]. 钢铁, 2022, 57(10): 1-9.
- [8] 李新创,李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 224-231.
- [9] 邵远敬,徐蕾,刘校平,等. 中国钢铁生产“碳中和”解决方案探讨[J]. 中国冶金, 2022, 32(4): 1-8.
- [10] 李艳明. 钢铁企业提升劳动生产效率的探索——以宝钢湛江钢铁有限公司为例[J]. 武汉冶金管理干部学院学报, 2022, 32(1): 3-5.
- [11] 徐二明,高怀. 中国钢铁企业竞争力评价及其动态演变规律分析[J]. 中国工业经济, 2004(11): 40-46.
- [12] 白雪洁,张东威. 决策、激励与生产效率——对中国钢铁行业上市公司影响的实证分析[J]. 财经论丛, 2009(3): 86-91.
- [13] 鱼洋洋. 短流程炼钢车间的生产线工艺优化研究[J]. 中国金属通报, 2021, (2): 96-97.
- [14] 王新江. 中国电炉炼钢的技术进步[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 1-8.
- [15] 李士琦,林钢,李京社,等. 以系统优化的观点看电弧炉炼钢技术的进步[J]. 钢铁, 1996, 31(1): 70-74.
- [16] 李士琦,张汉东,陈煜,等. 电弧炉炼钢流程的能量状况[J]. 钢铁, 2006, 41(8): 24-27.
- [17] 李士琦,孙开明,郁健,等. 150 t交流电弧炉炼钢高效化节电[J]. 过程工程学报, 2008, 8(增刊1): 166-170.
- [18] 李士琦,陈煜,刘润藻,等. 现代电弧炉炼钢技术进展[J]. 中国冶金, 2005, 15(6): 8-13+20.
- [19] 李士琦,武骏,李京社,等. 关于电炉炼钢流程发展的几点认识[J]. 钢铁, 1997, 32(7): 72-75.
- [20] 陈煜,赵瑞敏,魏光升. 电弧炉炼钢过程的系统工程思考[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 74-79.
- [21] 陈煜,高怀,王新江. 中国电弧炉炼钢生产情况调研[J]. 中国冶金, 2023, 33(12): 18-23.