烧结余热发电和 SHRT 工艺能效与投资对比分析

李继淦[1]，李 靖[1,2]，王 磊[3]，王兆才[1,2]

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙，410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205；3. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司，湖南 长沙，410205)

摘要：烧结矿生产中 50% 以上热能被废气带走，提高余热回收率是烧结节能降耗的关键手段之一。本文对烧结余热发电和 SHRT 的系统组成和技术原理进行了详尽介绍，并针对不同工艺配置下两种方案的能源利用效率和固定投资进行对比分析。分析结果表明：当将风机能耗一并考虑时，尽管 SHRT 系统的能量转化率最高，但是整体能耗并不是最低。对于配套两台主抽风机的烧结机规模，综合能耗从低到高：余热发电 + 变频调速风机系统 < 余热发电 + 定速风机系统 < SHRT 系统；对于配套单台主抽风机的烧结机规模，综合能耗从低到高：余热发电 + 变频调速风机系统 < SHRT 系统 < 余热发电 + 定速风机系统。且所有模式中，余热发电 + 变频调速风机系统的节能降耗的效果更为显著。从投资来看，尽管余热发电 + 变频调速风机系统的投资最高，但是节省的电费能在短的时间内覆盖其高出的投资。

关键词：烧结；余热利用；余热发电；SHRT

中图分类号：X757；TF046.4；TK115　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－8764(2023)01－0015－09

doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.003

Comparative analysis of energy efficiency and investment of sintering waste heat power generation and SHRT process

LI Jigan[1]，**LI Jing**[1,2]，**WANG Lei**[3]，**Wang Zhaocai**[1,2]

(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co.*, *Ltd.*, *Changsha* 410205, *Hunan*, *China*; 2. *National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System*, *Changsha* 410205, *Hunan*, *China*; 3. *Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co.*, *Ltd.*, *Changsha* 410205, *Hunan*, *China*)

Abstract: More than 50% of heat energy is taken away by waste gas in sinter production, thus improving the recovery rate of waste heat is one of the key measures to save energy and reduce consumption in sintering. The system composition and technical principle of sintering waste heat power generation and SHRT are introduced in detail, and the energy utilization efficiency and fixed investment of these two schemes under different process configurations are compared and analyzed. The results show that when the energy consumption of fans is considered together, although the energy conversion rate of SHRT system is the highest, the overall energy consumption is not the lowest. For the scale of the sintering machine equipped with two main exhaust fans, the comprehensive energy consumption is from low to high: waste heat power generation + variable frequency speed control fan system < waste heat power generation + constant speed fan system < SHRT system. For the scale of the sintering machine equipped with a single main exhaust fan, the comprehensive energy consumption is from low to high: waste heat power generation + variable frequency speed control fan system < SHRT system < waste heat power generation + constant speed fan system. Moreover, in all modes, the effect of energy saving and consumption reduction of waste heat power generation + variable frequency speed

收稿日期：2022－06－13；**修回日期**：2022－09－07

基金项目：湖南省科技成果转化及产业化计划资助项目(2020GK4055)

作者简介：李继淦(1980—)，男，高级工程师，从事烧结球团节能减排工艺研究与设计。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

control fan system is more significant. From the perspective of investment, although the investment in waste heat power generation + variable frequency speed control fan system is the highest, the saved electricity can cover its higher investment in a short time.

Key words: sintering; utilization of waste heat; waste heat power generation; SHRT

目前，高炉炉料中烧结矿占比超 75%，烧结工序能耗约占钢铁企业总能耗的 11%~15%，仅次于炼铁工序，且未来很长一段时期内我国粗钢生产仍然以烧结、球团—高炉—转炉长流程工艺为主[1-3]。由于烧结生产过程中，有近 50% 的热能以烧结烟气和冷却废气的显热形式排入大气[4]，因此降低烧结矿工序能耗对长流程中的节能减耗具有重要的现实意义。当前，降低烧结矿工序能耗的两大途径是生产过程高效用能和末端余热回收利用，而余热回收利用技术主要包括利用热废气产蒸汽并网、余热发电和烧结余热能量回收与电机联合驱动烧结主抽风机(Sinter Blower Residual Heat Recovery Turbine，SHRT)(也称“汽拖”) 3 种方法。余热蒸汽并网是利用余热锅炉将废气显热转化为蒸汽热后并网。但一般钢铁企业只设 1 套或 2 套蒸汽管网系统，通常是将蒸汽减温减压后使用，这导致蒸汽系统不能按质用能，能效利用率低，同时系统中还有 18% 左右管网损失[5-6]。因此余热蒸汽并网的方式不是烧结余热经济高效回收的手段。烧结余热发电和 SHRT 工艺则各有优劣势，在工程中均有应用案例，但缺乏系统的比较[7-9]。同时，从工艺生产整体能耗的角度上考虑，新建烧结厂应该选择哪种余热回收工艺更有利，一直是困扰各大钢铁企业的问题。本文基于烧结工序能量流计算，分析余热分布和回收潜力，以单、双台主抽风机做功两种典型工艺配置的烧结机为例，分别对主抽风机工频和变频运行时，烧结余热发电和 SHRT 工艺的能源利用率进行对比分析，并进行投资估算，以期为烧结余热高效回收工艺的选择和利用提供指导。

1 烧结过程能量流分析

本文以国内某钢铁企业烧结项目为例，对烧结过程能量流进行计算，如图 1 所示。由图 1 可知：烧结工序最主要的热量来源是燃料的燃烧(包括点火煤气的燃烧和固体燃料的燃烧)，其占比达 84.05%。热量支出中，烧结饼带走的热量占比最高，为 45.42%；其次是烧结烟气带走的热量，占总热量支出的 27.07%；冷却环节中，高温废气带走的可回收热占烧结总热量的 19.07%；直接放散的中低温段废气带走的热占总热量的 14.30%；而冷却后烧结矿带走的热量

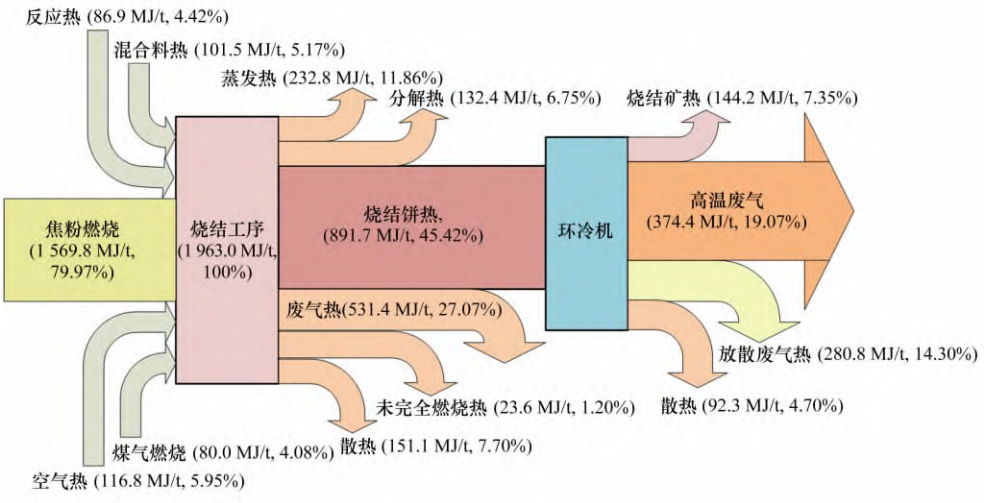


图 1 烧结—冷却环节热量流动

Fig. 1 Energy flow diagram of sinter-cooling process

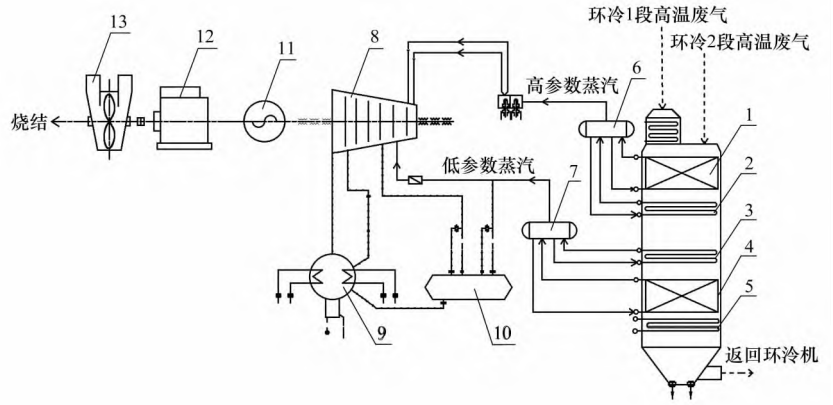
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

占烧结总热量的 7.35%。对于高温废气带走的热折算后相当于 12.8 kg 标煤，其高效回收对于降低烧结工序能耗具有重要意义。

2　烧结余热发电系统和 SHRT 系统工艺配置比较

烧结余热发电技术是把热废气引入余热锅炉产蒸汽，利用产出的蒸汽驱动汽轮机，再带动发电机组发电，发出的电并网，并网后的电力可用作驱动烧结主抽风机。烧结余热发电系统包括：锅炉系统(含循环风机) 、汽轮机系统、发电机系统，如图 2 所示。

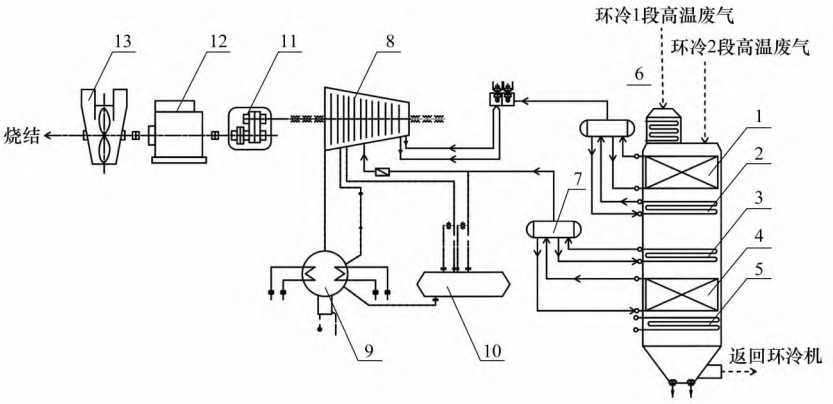
SHRT 技术是将汽轮机通过变速离合器与烧结主风机主轴连接，将汽轮机的出力通过变速装置直接输出到烧结主抽风机上，利用汽轮机和电机同步驱动风机，降低电动机的电流，从而降低烧结主抽的耗电量。SHRT 系统主要由余热锅炉(含循环风机) 、汽轮机、变速离合器、驱动电机、主抽风机组成，且汽轮机、驱动电机、主抽风机同轴布置，具体见图 3。



1—高参数蒸发器；2—高参数省煤器；3—低参数过热器；4—低参数蒸发器；5—凝结水加热器；6—高参数汽包；7—低参数汽包；8—汽轮机；9—凝汽器；10—疏水膨胀箱；11—发电机；12—主抽电机；13—主抽风机。

图 2　烧结余热发电系统示意

Fig. 2　Process diagram of sinter waste heat power generation system



1—高参数蒸发器；2—高参数省煤器；3—低参数过热器；4—低参数蒸发器；5—凝结水加热器；6—高参数汽包；7—低参数汽包；8—汽轮机；9—凝汽器；10—疏水膨胀箱；11—变速离合器；12—主抽电机；13—主抽风机。

图 3　SHRT 系统示意

Fig. 3　Process diagram of SHRT system

由图 2、3 可知，烧结余热发电系统和 SHRT 系统有基本相同的锅炉系统和汽轮机系统。其中，锅炉系统都是利用冷却机前两段或三段 280 ℃以上的热风通过双温双压锅炉产出蒸汽，换热后约 130 ℃废气再通过循环风机送回冷却机前段的风箱，进一步提升余热利用率。王毅等[10]结合烧结余热资源特性分析热力学有效能得出在烧结生产过程中最适合的汽轮机主

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

蒸汽压力为 1.6 MPa。考虑到管路的热损失，锅炉的产出蒸汽参数略高，目前一般烧结余热锅炉产出 1.8 MPa、360 ℃的高参数过热蒸汽和 0.4～0.6 MPa、180 ℃的低参数蒸汽。

烧结余热发电系统和 SHRT 系统不同配置：烧结余热发电系统配置发电机组，由汽轮机带动发电机组发电；而 SHRT 系统则是通过变速离合器将汽轮机与主抽风机电机直联，为主抽风机电机辅助出力，可降低主抽风机的电力消耗。相比较而言，烧结余热发电系统对于烧结主工艺是独立的辅助系统，其运行不影响主烧结工艺的生产。针对多台烧结机的厂区，可采用多台余热锅炉 +1 台汽轮机 +1 台发电机(多炉一机)的方案集合化利用废热资源，实现区域联合发电，主抽风机可采用工频定速运行，也可采用变频调速运行。但是余热发电系统的能量转换环节有发电机、电网、电动机的损失，且存在烧结生产上的波动，从而使余热发电存在一定的波动。SHRT 系统汽轮机直接用于拖动主抽风机，蒸汽热直接转化为机械能，少了蒸汽热转化为电能的中间过程，有较高的能量转化率。相对于余热发电系统，其减少了发电机组和配电设施，只增加了变速离合器。但是 SHRT 的汽轮机不能直接启动风机，仍需要搭配 1 台满负荷的电机用于系统启动。对于双主抽风机配置的烧结机，1 台锅炉的蒸汽需平均分配到 2 套 SHRT 系统中，而 SHRT 系统多为定速运行模式，当烧结工艺需要改变抽风量时，其只能通过调节风门开度来实现，相比变频运行的模式会有一部分的能源损失。

3 烧结余热发电系统和 SHRT 系统能效比较

本文能效比较涉及两种考虑：一是烧结机对应的主抽风机台数，本文以配置 1 台主抽风机的 180 m^2 烧结机方案和配置 2 台主抽风机的 360 m^2 烧结机方案作为典型示例分别讨论；二是风机的运行模式，采用电机直接驱动的风机可以有定速运行和变频运行两种配置模式，这两种模式的轴功率即电动机输出功率有较大差异。

3.1 主抽风机运行模式的区别

定速运行是指风机维持转速不变，通过调节风机入口风门大小来改变风系统阻力大小，从而调节风机的风量、压力和出力。变频运行是由变频器改变电源的频率来调整风机的转速从而调节风机的风量、压力和出力，这种方式节能效果显著。因为风机的特性决定了风机的转速、压力和功率分别满足公式(1)～(3)：

$$\frac{n_1}{n_2}=\frac{Q_1}{Q_2} \tag{1}$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2=\frac{P_1}{P_2} \tag{2}$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3=\frac{N_1}{N_2} \tag{3}$$

式中：n_1、n_2 为风机转速，r/min；Q_1、Q_2 为风机风量，m^3/min；P_1、P_2 为风机全压，Pa；N_1、N_2 为风机轴功率，kW。由以上公式可以看出，风机转速越低功耗越低，且功耗比等于转速比的三次方。

通常烧结主抽风机选型时均留有一定的富余，用作应对烧结漏风率的逐渐增大和物料透气性的恶化，实际生产中，风机风量一般在设计风量的75%～90%运行，因此需考察在风机定速运行和变频运行的模式下风量存在的能耗差异。

图 4 是一台设计风量为 25 500 m^3/min，设计全压为 18 500 Pa 的定速风机性能特性曲线。风门角度从0°到90°之间考虑了 6 个可能的工作点(分别对应 0°，10°，20°，30°，40°，50°，60°)。图 5 是这台风机分别在这 6 个工作点风量功率曲线，满载运行时风机功率为8 300 kW。

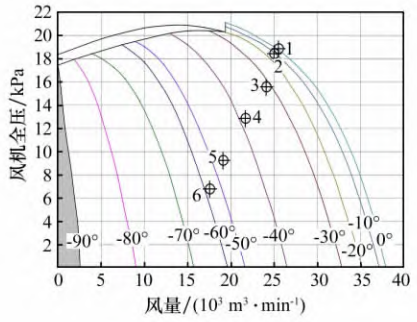


图 4 定速风机性能曲线

Fig. 4 Performance curve of speed fixed fan

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 4、5 中的工作点 4 风门角度为 -40°(即开度为 55%) 风量为 22 000 m^3/min，全压为 12 500 Pa，风量相当于满负荷风量的 86.27%(风量为 75%~90%，是比较常见的工况状态)，功率为 6 500 kW，功率相当于满载的 78.31%。

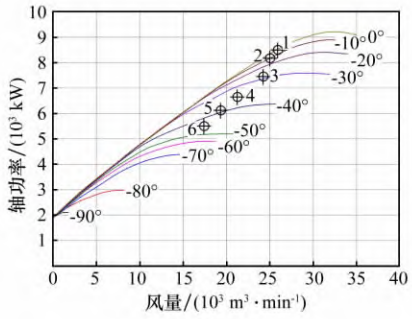


图 5　定速风机功率风量曲线

Fig. 5　Power/volume curve of speed fixed fan

图 6 是一台设计风量为 25 500 m^3/min，设计全压为 18 500 Pa 的变频调速风机性能特性曲线。在保持风门角度 0 °(开度为 100%) 的情况下，根据转速不同(600 ~990 r/min)，考虑了 6 个可能的工作点(分别对应 600、700、800、900、950、990 r/min)。图 7 是这台风机分别在这 6 个工作点的风量功率曲线，满载运行时风机转速为 990 r/min，功率与定速风机同为 8 300 kW。图 6、7 中的工作点 4 的风机转速为 800 r/min，风量为 22 000 m^3/min，全压为 12 500 Pa，风量相当于满负荷风量的 86.27%(风量为 75%~90%，是比较常见的工况状态)，功率为 5 300 kW，功率相当于满载的 63.86%。

通过以上比较可以看出，在风机风量同为满载 86% 运行时，定速与变频调速的风机轴功率分别为满载时的 78.31% 和 63.86%。

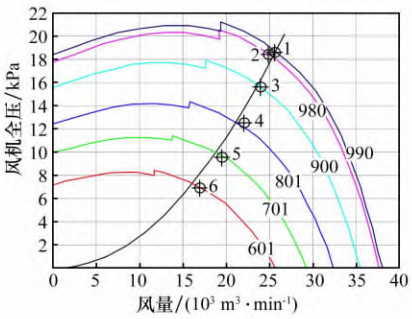


图 6　变频调速风机性能曲线

Fig. 6　Performance curve of frequency variable fan

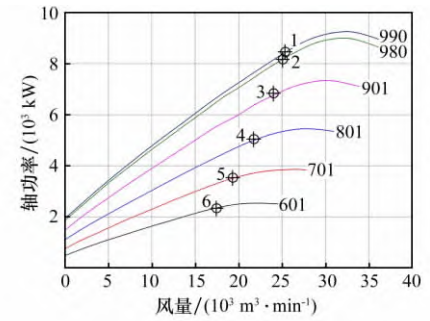


图 7　变频调速风机功率风量曲线

Fig. 7　Power/volume curve of frequency variable fan

3.2　360 m^2 烧结机项目方案比较(2 台主抽风机)

对于 360 m^2 烧结机需配置 2 台主抽风机，以每台风机的风量为 18 000 m^3/min，全压为 17 500 Pa，功率为 6 500 kW，转速为 1 000 r/min，烧结机利用系数为 1.35 t/(m^2·h)，烧结矿产量为 486 t/h 进行计算。风机的运行工况均考虑在满载时的 86.27%，烧结机单位面积风量为 86 m^3/(min·m^2)，可以得出两种方式的电机能耗：① 定速度运行的模式，风门的开度一般为 55% 左右，电机功率按满载时的 78.31% 计算，单台风机约为 5 100 kW；② 变频运行模式下每台主抽风机的实际轴功率(即电动机输出功率) 按满载时的 63.86% 计算，单台风机约为 4 150 kW。

余热发电配置方案：烧结机配套的冷却机高温一段平均温度为 410 ℃，热废气约为 320 000 m^3/h，高温二段平均温度为 310 ℃，热废气约为 320 000 m^3/h，配置 1 台双压余热锅炉，来自高温一段的热废气进入高压过热器，排气与来自高温二段热废气混合，依次经过中压蒸发器、低压过热器、中压省煤器、低压蒸发器、凝结水加热器，产生 1.8 MPa，360 ℃高压过热蒸汽 41 t/h 和 0.4 MPa，180 ℃的低压过热蒸汽 17 t/h，锅炉排气温度为 131 ℃。系统采用 10 MW 补气凝气式汽轮机组，主蒸汽参数为 1.6 MPa，340 ℃，补汽参数为 0.3 MPa，170 ℃，排气压力为 0.007 MPa。发电机效率不小于 97.8%，额定电压为 10.5 kV，额定功率为 10 MW，每吨烧结矿额定发电量为 20.58 kW·h。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

SHRT 系统配置方案：配套的余热锅炉系统与余热发电一致，但因为配套 2 台主抽风机，锅炉的蒸汽一分为二供应给 2 台汽轮机。经计算，用作发电的汽轮机排气压力低至 7 ~ 8 kPa，内效率最高可达 80.71%，机械效率为 98.5%。SHRT 汽轮机排气压力为 10 kPa 左右，内效率最高可为 77.33%，机械效率为 98.0%。即 SHRT 汽轮机效率相当于余热发电汽轮机效率的 95%(汽轮机效率 = 内效率 × 机械效率)。因此 SHRT 系统配套汽轮机为 2 台 4 750 kW 补汽凝汽式汽轮机，转速度为 5 600 r/min，配套变速离合器速比为 5 600∶1 000。

因为采用相同的冷却机热源和相同蒸汽参数的余热回收锅炉，所以两个系统的比较只要对比从锅炉后的汽轮机到烧结主抽风机的能耗即可。其中，SHRT 汽轮机效率为余热发电的 95%，变速离合器效率损失约为 2% ~ 3%，发电机效率损失约为 2% ~ 4%，并网线路损失为 1% ~ 3%，变频器损耗为 2% ~ 5%(取 3.5%)，纯电驱动负载损耗约为 1% ~ 3%(取 2%)，SHRT 驱动负载损耗约为 6% ~ 8%(取 7%)。经计算，余热发电 + 定速风机、余热发电 + 变频调速风机、SHRT + 定速风机三种方案下各环节功率和系统总体电耗如表 1 所示。

表 1 360 m² 烧结机余热发电和 SHRT 系统电耗参数对比

Table1 Power consumption comparison of 360 m² sinter machine waste heat generation and SHRT

序号	项目	功率/kW			备注
		余热发电 + 定速风机	余热发电 + 变频调速风机	SHRT + 定速风机	
①	汽轮机轴功率	1 × 10 000	1 × 10 000	2 × 4 750	Q_{SHRT} = 余热发电 × 95%(SHRT 汽轮机效率为余热发电的 95%)
②	变速离合器	—	—	190	② = ① × 2%(变速离合器效率损失约为 2% ~ 3%)
③	发电机损失	300	300	—	③ = ① × 3%(发电机效率损失约为 2% ~ 4%)
④	电网损失	200	200	—	④ = ① × 2%(并网线路损失为 1% ~ 3%)
⑤	电动机输出功率	2 × 5 100	2 × 4 150	2 × 445	Q_{SHRT} = 2 × 5 100 − ① + ②(定速风机功耗为 5 100 kW,变频调速风机功耗为 4 150 kW)
⑥	风机形式功率差	2 × 950	—	2 × 950	5 100 − 4 150 = 950(工频与变频调速风机功耗差,kW)
⑦	变频器损耗	—	290.50	—	⑦ = ⑤ × 3.5%(变频器损耗为 2% ~ 5%,取 3.5%)
⑧	电动机功率损失	204.00	166.00	62.30	⑧ = ⑤ × 损耗率(纯电驱动负载高损耗低,约为 1% ~ 3%,取 2% SHRT 驱动负载低损耗高,约为 6% ~ 8%,取 7%)
⑨	到主抽风机上的功率	9 296.00	9 043.50	9 248.00	⑨ = ① − ② − ③ − ④ − ⑦ − ⑧
⑩	系统能量转化率	92.96%	90.44%	92.48%	⑩ = ⑨/10 000
⑪	系统对外网电耗	904.00	−743.50	952.30	余热发电 = ⑤ − ⑨; Q_{SHRT} = ⑤ + ⑧

注: Q_{SHRT} 为 SHRT 系统功率,kW。

由表 1 可看出，余热发电 + 定速风机系统能源转化率最高。SHRT 系统虽然可减少能源的转化次数，有较高的能源转化率，但因为系统蒸汽要以一分为二供应给 2 台汽轮机而存在效率损失，总体效率不是最高。从系统对外网的电耗来看，采用 SHRT 系统实际电耗量最高；采用余热发电 + 变频调速风机系统最为节能，余热发电量除了满足主抽风机的用电外还有盈余，比余热发电 + 定速风机每小时节约电耗 1 647.5 kW·h，比 SHRT 系统每小时节约电耗 1 695.8 kW·h，这主要是因为采用变频运行的风机能耗更低。

综上，对于配套两台主抽风机的 360 m² 烧结机，能量转化率从低到高：余热发电 + 变频

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

调速风机系统 < SHRT 系统 < 余热发电 + 定速风机系统；能耗从低到高：余热发电 + 变频调速风机系统 < 余热发电 + 定速风机系统 < SHRT 系统。

3.3　180 m^2 烧结机项目方案比较(1 台主抽风机)

对于 180 m^2 烧结机只需配置 1 台主抽风机即可，风机规格参数与 360 m^2 烧结机的单台风机相同，烧结矿产量减半，为 243 t/h。余热发电配置方案与 360 m^2 烧结机的基本一致，只是双压余热锅炉和汽轮机组规格减半，吨矿的蒸汽量和额定发电量不变。SHRT 系统锅炉的蒸汽只需供应给单台汽轮机，此时汽轮机轴功率与余热发电系统汽轮机轴功率相同，均为 5 000 kW。经计算，余热发电 + 定速风机、余热发电 + 变频调速风机、SHRT + 定速风机 3 种方案下各环节功率和系统总体电耗如表 2 所示。

表 2　180 m^2 烧结机余热发电和 SHRT 系统电耗参数对比

Table 2　Power consumption comparison of 180 m^2 sinter machine waste heat generation and SHRT

序号	项目	功率/kW			备注
		余热发电 + 定速风机	余热发电 + 变频调速风机	SHRT + 定速风机	
①	汽轮机轴功率	1 × 5 000	1 × 5 000	1 × 5 000	Q_{SHRT} = 余热发电
②	变速离合器	—	—	100	② = ① × 2%(变速离合器效率损失约为 2%~3%)
③	发电机损失	150	150	—	③ = ① × 3%(发电机效率损失约为 2%~4%)
④	电网损失	100	100	—	④ = ① × 2%(并网线路损失为 1%~3%)
⑤	电动机输出功率	1 × 5 100	1 × 4 150	1 × 200	Q_{SHRT} = 5 100 − ① + ②(定速风机功耗为 5 100 kW,变频调速风机功耗为 4 150 kW)
⑥	风机形式功率差	1 × 950	—	1 × 950	5 100 − 4 150 = 950(工频与变频调速风机功耗差,kW)
⑦	变频器损耗	—	145.25	—	⑦ = ⑤ × 3.5%(变频器损耗为 2%~5%,取 3.5%)
⑧	电动机功率损失	102	83	14	⑧ = ⑤ × 损耗率(纯电驱动负载高损耗低,约为 1%~3%,取 2% SHRT 驱动负载低损耗高,约为 6%~8%,取 7%)
⑨	到主抽风机上的功率	4 648.00	4 521.75	4 886.00	⑨ = ① − ② − ③ − ④ − ⑦ − ⑧
⑩	系统能量转化率	92.96%	90.44%	97.72%	⑩ = ⑨/5 000
⑪	系统对外网电耗	452.00	−371.75	214.00	余热发电 = ⑤ − ⑨; Q_{SHRT} = ⑤ + ⑧

由表 2 可看出，对于 180 m^2 烧结机，SHRT 系统的能源转化率进一步提高，为 3 种方案中最高，这主要是由于蒸汽只供应给单台汽轮机，轴功率得到提升。从系统对外网的电耗来看，采用余热发电 + 定速风机系统实际电耗量最高。而采用余热发电 + 变频调速风机系统仍最为节能，所发电量除了满足主抽风机的用电外还有盈余，比 SHRT 系统每小时节约电耗 585.75 kW·h,比余热发电 + 变频调速风机系统每小时节约电耗 823.75 kW·h。

综上，对于配套单台主抽风机的 180 m^2 烧结机，能量转化率从低到高：余热发电 + 变频调速风机系统 < 余热发电 + 定速风机系统 < SHRT 系统；综合能耗从低到高：余热发电 + 变频调速风机系统 < SHRT 系统 < 余热发电 + 定速风机系统。

4　烧结余热发电系统和 SHRT 系统投资比较

4.1　360 m^2 烧结机工程投资比较(2 台主抽风机)

烧结余热发电系统 + 主抽风机系统核心设

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

备包括锅炉1套、汽轮机1套、发电机1套、系统电力/仪电系统1套、辅机系统1套、主抽风机2台、主抽电机2台、主抽变频系统2套或软启动器2套。SHRT系统核心设备包括锅炉1套、汽轮机2套、系统仪电系统1套、辅机系统2套、主抽风机2台、主抽电机2台、软启动器2套。厂房投资上，SHRT虽然节省了发电车间，总体上节省了投资，但是主抽风机房对应加大，所以节省的投资有限。两套不同方案的投资具体见表3。

表3 360 m² 烧结机余热发电和SHRT系统设备投资对比

Table 3 Investment comparison of 360 m² sinter machine waste heat generation and SHRT

序号	余热发电+主抽风机系统核心设备	数量/台(套)	投资/万元	SHRT系统核心设备	数量/台(套)	投资/万元
①	风机	2	370	风机	2	370
②	电机	2	300	电机	2	300
③	软启动(定速运行)	2	150	软启动(定速运行)	2	150
④	变频器(变频运行)	2	800	变频器(变频运行)	—	—
⑤	余热锅炉系统	1	1 800	余热锅炉系统	1	1 800
⑥	汽轮机	1	500	汽轮机	2	800
⑦	发电机	1	300	变速离合器	2	500
⑧	电力/控制系统	1	600	控制系统	1	400
⑨	辅机系统	1	250	辅机系统	2	300
⑩	厂房及施工(含风机房)	1	3 900	厂房及施工(含风机房)	1	3 700
⑪	余热发电+定速运行系统的投资 ⑪=①+②+③+⑤+⑥+⑦+⑧+⑨+⑩		8 170	SHRT系统的投资 ⑪=①+②+③+⑤+⑥+⑦+⑧+⑨+⑩		8 320
⑫	余热发电+变频运行系统的投资 ⑫=①+②+④+⑤+⑥+⑦+⑧+⑨+⑩		8 820			

注：主抽风机、电机、汽轮机、按国产品牌设备档次考虑；软起动器、变频器按西门子、施耐德同等品牌设备档次考虑。

由表3可见，系统投资由高到低的排序：余热发电+变频调速风机系统>SHRT系统>余热发电+定速风机系统。

结合表1，余热发电+变频调速风机系统比SHRT系统投资高500万元，但每小时可节省电量1 695.8 kW·h，按电价0.45元/(kW·h)计算，10个月即可回收高出的投资。余热发电+变频调速风机系统比余热发电+定速风机系统投资高650万元，但每小时可节省电量1 647.5 kW·h，按电价0.45元/(kW·h)计算，13个月即可回收高出的投资。3个方案的其它生产运行成本如消耗品和生产维护等费用相差不大，SHRT系统比其它高12万元/年左右。

4.2 180 m² 烧结机工程投资比较(1台主抽风机)

核心设备与360 m²烧结机工程一样，仅有数量和规模的差别，相关投资见表4。

由表4可见，系统投资由高到低的排序：余热发电+变频调速风机系统>余热发电+定速风机系统>SHRT系统。结合表2，余热发电+变频调速风机系统比余热发电+定速风机系统投资高325万元，但每小时可节省电量823.75 kW·h，按电价0.45元/(kW·h)计算，13个月即可回收高出的投资。余热发电+变频调速风机系统比SHRT系统投资高395万元，但每小时可节省电量585.75 kW·h，按电价0.45元/(kW·h)计算，21个月即可回收高出的投资。3个方案的其它生产运行成本如消耗品和生产维护等费用相差不大，SHRT系统比其它高10万元/年左右。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　180 m² 烧结机余热发电设备投资和 SHRT 投资

Table 4　Investment comparison of 180 m² sinter machine waste heat generation and SHRT

序号	余热发电 + 主抽风机系统核心设备	数量/台(套)	投资/万元	SHRT 系统核心设备	数量/台(套)	投资/万元
①	风机	1	185	风机	1	185
②	电机	1	150	电机	1	150
③	软启动(定速运行)	1	75	软启动(定速运行)	1	75
④	变频器(变频运行)	1	400	变频器(变频运行)	—	—
⑤	余热锅炉系统	1	1 170	余热锅炉系统	1	1 170
⑥	汽轮机	1	325	汽轮机	2	400
⑦	发电机	1	195	变速离合器	2	250
⑧	电力/控制系统	1	390	控制系统	1	260
⑨	辅机系统	1	165	辅机系统	1	195
⑩	厂房及施工(含风机房)	1	1 800	厂房及施工(含风机房)	1	1 700
⑪	余热发电 + 定速运行系统的投资 ⑪ = ① + ② + ③ + ⑤ + ⑥ + ⑦ + ⑧ + ⑨ + ⑩		4 455	SHRT 系统的投资 ⑪ = ① + ② + ③ + ⑤ + ⑥ + ⑦ + ⑧ + ⑨ + ⑩		4 385
⑫	余热发电 + 变频运行系统的投资 ⑫ = ① + ② + ④ + ⑤ + ⑥ + ⑦ + ⑧ + ⑨ + ⑩		4 780			

注：主抽风机、电机、汽轮机、按国产品牌设备档次考虑；软起动器、变频器按西门子、施耐德同等品牌设备档次考虑。

5　结　论

(1) SHRT 系统是将蒸汽热直接转化为机械能，减少了能源转化的次数，有较高的能量转化率。但是把风机的工艺纳入系统考虑后，SHRT 系统的能耗不是最低。

(2) 对于配套两台主抽风机的烧结机(以 360 m² 烧结机为例)，综合能耗从低到高的排序：余热发电 + 变频调速风机系统 < 余热发电 + 定速风机系统 < SHRT 系统。

(3) 对于配套单台主抽风机的烧结机(以 180 m² 烧结机为例)，综合能耗从低到高的排序：余热发电 + 变频调速风机系统 < SHRT 系统 < 余热发电 + 定速风机系统。

(4) 所有配置方案中，余热发电 + 变频调速风机系统的综合能耗最低。虽然投资最高，但能在短时间内通过节省的电费覆盖高出的投资，因此新建烧结厂时，建议该方案作为首选。

参考文献：

[1] 刘臣，叶恒棣，魏进超，等. 钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析[J]. 烧结球团，2021，46(6)：1－7；26.
LIU Chen，YE Hengdi，WEI Jinchao，et al. An analysis on green low carbon technology of ironmaking process in the steel industry[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：1－7；26.

[2] ZHANG Qi，XU Jin，WANG Yujie，et al. Comprehensive assessment of energy conservation and CO_2 emissions mitigation in China's iron and steel industry based on dynamic material flow[J]. Applied Energy，2018，209：251－265.

[3] 蔡九菊，王建军，陈春霞，等. 钢铁企业余热资源的回收与利用[J]. 钢铁，2007，42(6)：1－7.
CAI Jiuju，WANG Jianjun，CHEN Chunxia，et al. Recovery of residual-heat integrated steelworks[J]. Iron and Steel，2007，42(6)：1－7.

[4] 徐国群. 烧结余热回收利用现状与发展[J]. 世界钢铁，2009，9(5)：27－31.
XU Guoqun. Current status and development of waste heat recovery at sintering plants[J]. World Iron & Steel，2009，9(5)：27－31.

(下转第 105 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZAHNG Chunwei. Research on recovery of iron minerals from tailings of meishan iron ore [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.

[9] 刘伟，陈铁军，展仁礼．酒钢尾矿铁及重晶石综合回收试验研究[J]．矿产综合利用，2020(5)：120－124.
LIU Wei, CHEN Tiejun, ZHAN Renli. Experimental study on comprehensive recovery of iron and barite from tailings of jiugang [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(5): 120－124.

[10] 庄骏，陈铁军，展仁礼，等．酒钢镜铁矿尾矿再选试验[J]．钢铁钒钛，2017，38(1)：83－90.
ZHAUNG Jun, CHEN Tiejun, ZHAN Renli. Researches on reconcentration of a specularite tailing from JISCO [J]. Iorn steel vanadium titanium, 2017, 38(1): 83－90.

[11] 余建文，欧杨，曲孔辉，等．鞍钢东部铁尾矿悬浮磁化焙烧—磁选试验[J]．钢铁，2021，56(7)：25－30.
YU Jianwen, OU Yang, QU Konghui, et al. Study on suspension magnetization roasting-magnetic separation of iron tailings from eastern anshan iron and steel [J]. Iron & Steel, 2021, 56(7): 25－30.

(上接第 23 页)

[5] 张卫亮，马忠民，周海平，等．烧结工艺余热回收利用技术研究[J]．有色冶金节能，2011 (1)：47－50.
ZHANG Weiliang, MA Zhongmin, ZHOU Haimin, et al. Discussion on waste heat recovery technology of sintering process [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallergy, 2011 (1): 47－50.

[6] 杨明华．钢铁厂蒸汽利用现状及发展方向[C]//2011 年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会论文集．唐山：中国金属学会，2011：110－118.
YANG Minghua. Present situation and development direction of steam utilization in iron and steel works [C]//2011 National metallurgical energy conservation and emission reduction and low-carbon technology development symposium proceedings. Tangshan: The Chinese Society for Metals, 2011: 110－118.

[7] 高光星．烧结余热发电技术应用及改进[J]．宝钢技术，2019(2)：23－28.
GAO Guangxing. Application and improvement of power generation technology using sintering waste [J]. Baosteel Technolgoy, 2019(2): 23－28.

[8] 肖衍党，李晨飞，韩涛．烧结余热发电技术及系统的优化分析[J]．烧结球团，2011，36(3)：47－53.
XIAO Yandang, LI Chenfei, HAN Tao. Sintering waste heat power generation technology and optimization and analysis of its system [J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(3): 47－53.

[9] 王正，戴立明．烧结余热与电动机联合驱动主抽风机技术[J]．科技创新与应用，2018(34)：160－163.
WANG Zheng, DAI Liming. Sinter blower residual heat recovery turbine [J]. Technology Innovation and Application, 2018(34): 160－163.

[10] 王毅，何张陈，颜学宏．烧结冷却余热发电系统的热力学模型及主蒸汽参数的优化选择[J]．烧结球团，2011，36(3)：54－58.
WANG Yi, HE Zhangchen, YAN Xuehong. Thermodynamic model of sintering waste heat power generation and optimization of main steam parameters [J]. Information network of Sintering and Pelletizing, 2011, 36(3): 54－58.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net