DOI: 10.19666/j.rlfd.202605089

燃煤电厂不可逆损失评价与余热利用方案研究

管洪军[1]，刘 勇[1]，高 明[2]，张政清[3]
（1.中国石化集团胜利石油管理局有限公司胜利发电厂，山东 东营 257001；
2.山东大学核科学与能源动力学院，高效储能与氢能利用山东省工程研究中心，山东 济南 250061；
3.山东交通学院汽车工程学院，山东 济南 250357）

［摘 要］【目的】针对燃煤电厂热力系统不可逆损失难以有效识别及余热利用效率偏低的问题，提出一种基于熵产与㶲损失分析的余热潜力评价方法。【方法】以660 MW和300 MW燃煤机组为对象，基于Ebsilon平台构建热力系统模型，结合变工况分析对不可逆损失分布及余热利用潜力进行定量评估。【结果】研究表明，不可逆损失主要集中于回热系统，其中660 MW机组以2号、3号高加及7号低加为主，300 MW机组以2号高加和7号低加为主，其主要原因均为汽水传热温差过大。在此基础上，提出“抽汽预热+烟气余热利用”的能量梯级利用方案。该方案在各工况下均能有效降低不可逆损失，使660 MW机组热效率最高提升1.88%、煤耗率最大降低2.50 g/(kW·h)；300 MW机组热效率最高提升0.47%、煤耗率最大降低1.31 g/(kW·h)。【结论】基于熵产与㶲损失分析的方法能够有效识别燃煤机组回热系统中的主要不可逆损失源，并为余热利用方案筛选提供热力学依据；本文所提出的余热利用方案具有较好的变工况适应性；本文研究内容可为燃煤电厂余热潜力挖掘与系统优化运行提供借鉴思路和有效指导。

［关 键 词］燃煤机组；余热利用；熵产分析；㶲损失分析

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电，年，卷(期): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation，年，卷(期): 起始页码-终止页码.

Evaluation of Irreversibility Losses and Waste Heat Utilization Strategies in Coal-Fired Power Plants

Guan Hongjun[1], Liu Yong[1], Gao Ming[2], Zhang Zhengqing[3]
(1 Shengli Power Plant, Sinopec Shengli Petroleum Administration Co., Ltd, Dongying, 257001, China;
2 Shandong Engineering Research Center for High-efficiency Energy Storage and Hydrogen Energy Utilization, School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, 250061, China; 3 School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan, 250357, China)

Abstract: 【Objective】The effective identification of irreversibility losses in the thermal systems of coal-fired power plants is important for improving energy efficiency and enhancing waste heat utilization. However, in practical operation, the distribution of irreversibility losses is difficult to determine accurately, and the utilization efficiency of waste heat is still relatively low. To address these problems, a waste heat potential evaluation method based on entropy generation and exergy loss analysis is proposed. The method aims to identify the weak links in the thermal system and provide a thermodynamic basis for waste heat utilization scheme selection. 【Methods】A 660 MW coal-fired power unit and a 300 MW coal-fired power unit are selected as the research objects. Based on the Ebsilon Professional platform, thermal system models of the two units are established according to their heat balance diagrams and operating parameters. The models are verified by comparing the calculated extraction steam

收 稿 日 期：2026-05-26 修回日期 2026-07-01 接收日期 2026-07-28 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家自然科学基金项目(51776111)
Supported by：National Natural Science Foundation of China (51776111)
第一作者简介：管洪军（1970），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为热力发电厂能效提升等，
通信作者简介：高明（1978），男，博士，教授，主要研究方向为高效节能与储能技术及装备，gm@sdu.edu.cn。

flow rates with the design values. Then, entropy generation analysis and exergy loss analysis are conducted for the main heat exchange equipment in the regenerative heating system. Combined with off-design condition analysis, the distribution of irreversibility losses and the potential for waste heat utilization are quantitatively evaluated. 【Results】The results show that the irreversibility losses of the two units are mainly concentrated in the regenerative heating system. For the 660 MW unit, the main loss sources are the #2 and #3 high-pressure heaters and the #7 low-pressure heater. For the 300 MW unit, the main loss sources are the #2 high-pressure heater and the #7 low-pressure heater. The main reason is the large heat transfer temperature difference between steam and water, which increases heat transfer irreversibility and exergy loss. Based on these results, an energy cascade utilization scheme combining extraction steam preheating and flue gas waste heat utilization is proposed. The scheme improves the temperature matching relationship in the regenerative heating system and reduces irreversibility losses under different operating conditions. For the 660 MW unit, the maximum thermal efficiency improvement is 1.88%, and the maximum reduction in coal consumption rate is 2.50 g/(kW·h). For the 300 MW unit, the maximum thermal efficiency improvement is 0.47%, and the maximum reduction in coal consumption rate is 1.31 g/(kW·h). 【Conclusion】The proposed method can effectively identify the main irreversibility loss sources in coal-fired power units and provide a thermodynamic basis for waste heat utilization scheme selection. The proposed scheme has good off-design adaptability and can provide guidance for waste heat potential exploration and system optimization in coal-fired power plants.

Key words: coal-fired power unit; waste heat utilization; entropy generation analysis; exergy loss analysis

全球能源危机和环境污染问题日益严峻，在减少二氧化碳排放的前提下提高能源利用效率，已成为各国政府和科研机构的重要研究课题[1-2]。尤其在我国，燃煤电厂依然是电力供应的主要来源，但其在生产过程中会产生大量的余热和能量损失[3-4]。因此，提高燃煤电厂的能源利用效率，合理回收和利用余热，能够有效降低能源消耗，实现节能降碳的目的[5-8]。

在燃煤电厂的运行过程中，机组的工作状态和工况变化直接影响热能的利用效率[9, 10]。传统的余热回收技术大多集中于单一的能量回收方式，忽视了系统熵产和㶲损失的综合影响[4, 11]。熵产和㶲损失分析作为热力学研究的重要手段，能够从微观和宏观两个层面揭示能源转化过程中的不可逆损失，为优化能源系统的结构提供理论依据[12]。熵产用于表征热力过程中由有限温差传热、流动阻力和工质混合等不可逆因素引起的熵增，㶲损失则用于表征不可逆过程的可用能损失。将两者结合，能够更加全面地评估系统的能源利用效率及余热潜力。

基于熵产和㶲损失分析的热力系统优化方法逐渐得到关注，并在一些领域取得了较好的应用效果。然而，针对燃煤电厂的余热回收利用，还缺乏系统性的分析与研究。尤其在变工况下，机组运行状态复杂多变，传统的余热利用方案往往未能充分考虑这些因素，导致回收效果和经济性不稳定。因此，如何综合考虑熵产与㶲损失的影响，提出适应不同工况的余热利用方案，是当前燃煤电厂节能减排领域亟待解决的问题[13-14]。

就某一具体节能技术或单一余热回收设备，作为余热利用改造对象，无法顾及全系统变化。单纯依靠经验确定余热利用方案，可能导致改造对象与系统主要不可逆损失位置不完全匹配。将熵产分析和㶲损失分析用于热力发电厂全系统余热利用方案筛选，从全系统角度综合识别余热潜力，为机组余热利用方案设计提供更加明确的热力学依据，是热力发电厂余热利用改造的有价值路径。

本研究以某 660 MW 和 300 MW 典型燃煤电厂为例，基于熵产与㶲损失分析方法，开展余热潜力评价与利用研究。通过构建机组的热力学计算模型，结合熵产与㶲损失的定量分析，评估了机组在不同工况下的余热分布与回收潜力。针对特定机组余热潜力特点，在系统层面提出了适应的余热回收利用方案，并通过仿真与分析，验证了方案在变工况下的效果与可行性。研究结果不仅为提升电厂能源利用效率提供了技术支持，还为推动绿色低碳能源体系的建设提供了理论依据。

1 热力系统模型构建及验证

1.1 热力系统模型构建

基于火电厂热平衡图构建热力系统模型是研究火电系统能效水平的常见方法[15]。如图 1 和图 2 所示，本文分别建立了 660 MW 和 300 MW 燃煤机组热力系统模型。模型主要包括锅炉、汽轮机、凝汽器、除氧器、各级高压加热器和低压加热器等主要设备。模型中各级抽汽参数、给水参数及凝结水参数均依据热平衡图和表 1 所列燃煤电厂系统基本

运行参数确定。在此基础上，开展不同负荷工况下的热力系统仿真计算。

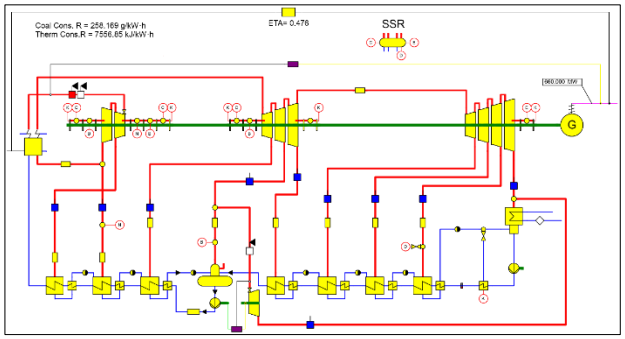


图 1 某 660 MW 燃煤机组热力系统模型

Fig.1 Thermal system model of the 660 MW coal-fired unit

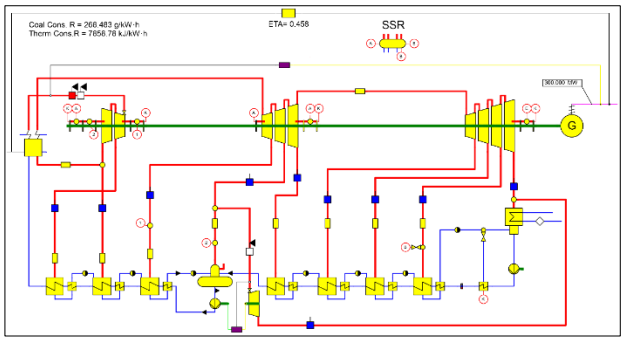


图 2 某 300 MW 燃煤机组热力系统模型

Fig.2 Thermal system model of the 300 MW coal-fired unit

表 1 660 MW 和 300 MW 燃煤机组主要设计参数

Tab.1 Main design parameters of the 660 MW and 300 MW coal-fired units

参数	660 MW 机组	300 MW 机组
额定功率/MW	660	300
主蒸汽压力/MPa	24.2	16.67
主蒸汽温度/℃	566	537
主蒸汽流量/(t•h^{-1})	1 840.9	900.9
再热蒸汽压力/MPa	3.93	3.179
再热蒸汽温度/℃	566	537
给水温度/℃	279.2	272.4
凝汽器压力/kPa	4.9	5.1

1.2 模型验证

为了验证模型在变工况下的准确性，采用热平衡图中提供的不同负荷运行数据进行模型验证。对比抽汽量的理论值与模拟值，验证模型的准确性。模型模拟数据与理论数据的对比如表 2 所示。

表 2 设计抽汽流量与仿真值对比

Tab.2 Comparisons between the design extraction steam flow values and the simulation results

位置	660 MW 机组			300 MW 机组		
	设计/(kg•h^{-1})	仿真/(kg•h^{-1})	误差/%	设计/(kg•h^{-1})	仿真/(kg•h^{-1})	误差/%
一抽	149 104	151 986	1.93	75 315	76 077.21	1.01
二抽	161202	164688	2.16	80077	80497.55	0.53
三抽	90125	85878	-4.71	23405	23364.46	-0.17
除氧器	201266	201110	-0.08	73562	73797.61	0.32
五抽	63790	63791	0.00	28060	28014.42	-0.16
六抽	57582	57443	-0.24	25344	25496.22	0.60
七抽	57132	56354	-1.36	25915	25601.27	-1.21
八抽	109326	109503	0.16	54870	55094.47	0.41

验证结果表明，在不同负荷工况下，模型计算的抽汽量与理论值的偏差小于 5%，各级抽汽流量的分布趋势与机组变工况运行特性相符。验证结果表明所建立的热力系统模型具有良好的准确性，可进行后续研究。

2 熵产和㶲损失分析

2.1 熵产分析

熵产是表征热力过程不可逆性损失的核心物理量。在一个复杂的、与外界存在物质和能量交换的热力系统研究中，可以针对系统中的特定控制体建立熵平衡方程。熵产计算如式(1)所示。

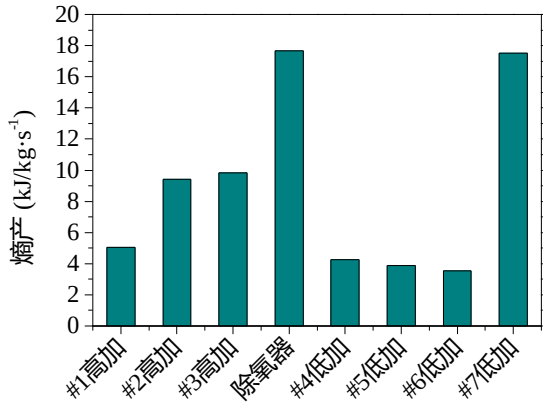
$$\Delta s_{\text{熵产}} = m \cdot \left(s_{\text{out}} - s_{\text{in}} \right) \tag{1}$$

式中：m 为工质流量，kg/s；s_{out} 和 s_{in} 分别为设备出口和进口的比熵，kJ/(kg·K)。

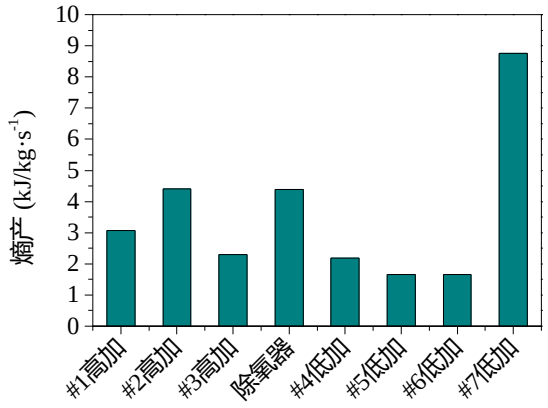
通过已构建的燃煤机组热力计算模型，可以精确获取流经各设备边界工质的熵值，进而计算得到系统在特定工况下各部件的熵产率。如图 3 所示为 660 MW 机组和 300 MW 机组关键换热设备熵产分析结果。

如图 3 所示，在额定工况下，各级回热加热器和除氧器是系统中熵产的主要来源。对 660 MW 机组而言，2 号高压加热器、3 号高压加热器以及 7 号低压加热器的熵产率显著高于同系列的其他加热器，表明这些加热器内部的传热不可逆性相对突出，为主要的不可逆损失源。对 300 MW 机组而言，2 号高加、7 号低加和除氧器是热力系统中熵产较大的设备。不可逆损失突出位置的根本原因在于设计或运行中汽水之间存在的较大传热温差。例如，因抽汽参数匹配欠佳或换热面积不足，导致在实现相同加热负荷时，需要更大的换热温差驱动，从而引发了更大的熵产。较高的熵产表明此处有更多的可用能被耗散，并存在余热回收或过程优化的空

间。



a) 660 MW 机组



b) 300 MW 机组

图 3 660 MW 和 300 MW 机组设备熵产分析结果

Fig.3 Entropy generation analysis results of the main heat exchange equipment

对于 2 号高加和 3 号高加，其抽汽具有较高的能量品位。高品位抽汽直接与温度相对较低的给水进行换热，冷热流体之间会形成较大损失。根据熵产理论，有限温差传热过程中的不可逆损失随传热温差增大而增加，因此 2 号高加和 3 号高加处较大的换热端差和温度匹配偏差是其熵产较高的重要原因。此外，虽然 7 号低加处于回热系统低温端，抽汽参数较低，但凝结水入口温度也较低。当低压抽汽凝结放热过程与凝结水升温过程之间匹配不充分时，低温端仍存在明显的不可逆性。同时，低压加热器中凝结水流量较大，在单位质量熵增不高的情况下，总熵产仍可能较大。因此，7 号低加成为主要不可逆损失源，并不单纯取决于抽汽品位，而是由抽汽参数、凝结水温度水平、端差和换热量共同决定的。

两类机组的换热器的熵产比例有所不同，包括除氧器和各级加热器，主要与机组容量、抽汽参数、凝结水流量、以及低温端换热温差有关。例如，除氧器属于混合式换热设备，其熵产不仅来源于传热温差，也与不同压力、温度工质混合过程中的不可逆性有关。7 号低加位于回热系统低温端，凝结水温度较低，当抽汽放热过程与凝结水吸热过程温度匹配较差时，容易形成较大的局部熵产。因此，不同机组中各换热器熵产比例差异，反映了两类机组回热系统低温端热匹配关系的差异。

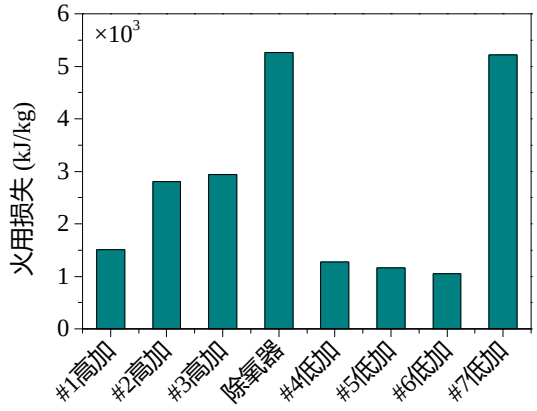
2.2 烟损失分析

对于一个稳定流动的开口系统，其烟损失可以通过吉布斯方程与熵产直接关联。因此，各部件的烟损失在数值上等于该部件的熵产与环境绝对温度的乘积，如式(2)所示。

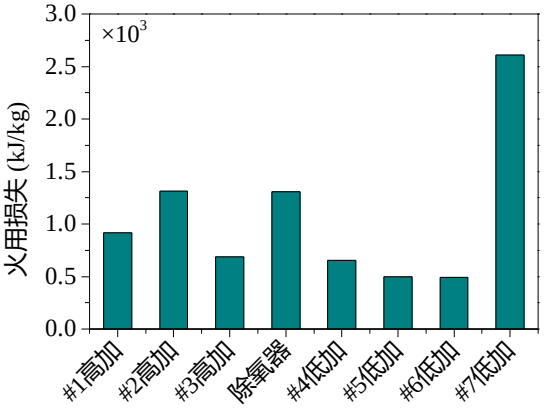
$$\Delta Q_{\text{损失}} = m \cdot \left(T_{\text{env}} - T_{\text{sys}} \right) \cdot \Delta s_{\text{熵产}} \tag{2}$$

式中：T_{env} 和 T_{sys} 分别为环境和系统的绝对温度，K。

本文系统性地计算出全厂各换热器的烟损失，为后续研究提供理论数据。如图 4 分别为 660 MW 和 300 MW 机组各换热器烟损失分析结果。



a) 660 MW 机组



b) 300 MW 机组

图 4 660 MW 和 300 MW 机组换热设备烟损失分析结果

Fig.4 Exergy loss analysis results of the main heat

exchangers

分析结果表明，全厂的㶲损分布呈现出与熵产分布相一致的趋势。对 660 MW 机组而言，2 号高压加热器、3 号高压加热器及 7 号低压加热器为㶲损失的集中位置；对 300 MW 机组而言，2 号高加、7 号低加和除氧器是热力系统中㶲损失较大的设备。相较于其他同级加热器，这些设备表现出异常高的㶲损失率。例如，在 660 MW 机组系统中，2 号和 3 号高加的㶲损失可能源于其较高的抽汽参数与给水之间仍存在优化空间的温差匹配。这些局部的高㶲损失不仅降低了该回热环节自身的效率，更从系统层面削弱了整个热力循环的㶲效率。从㶲损失角度看，高品位抽汽在较大温差下释放热量时，会造成较多可用能降级。2 号高加和 3 号高加中抽汽压力、温度较高，本应在较优温度匹配条件下用于提高给水温度，但实际上部分高品位热量未能得到充分梯级利用，导致㶲损失集中。此外，7 号低加虽然抽汽品位较低，但其位于回热系统低温端，凝结水入口温度较低，冷热流体温度曲线匹配不充分，且流量较大，因此其㶲损失也较为明显。上述分析表明，主要不可逆损失源的形成是由抽汽参数、端差、工质温度水平和换热量共同作用的结果。

3 余热利用方案及变工况研究

3.1 热力系统余热利用方案

如前所述，对 660 MW 机组而言，2 号高加、3 号高加和 7 号低加是不可逆损失显著的关键设备。其较高的㶲损失主要源于抽汽与给水之间存在的较大传热温差。另一方面，锅炉给水已经处于较高温度。因此，本项目提出利用 2 号抽汽、3 号抽汽首先加热锅炉给水再进入相应加热器的优化方案。为了降低 7 号低加循环水温过低的问题，利用温度接近的锅炉烟气加热循环水。系统余热利用方案如图 5 所示。此方案可缓解抽汽与换热器温差较大的问题。

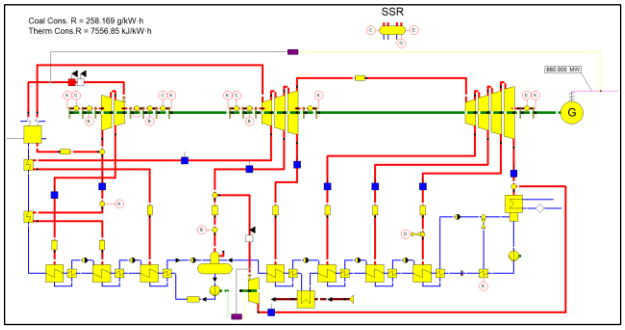


图 5 660 MW 机组余热利用方案

Fig.5 Scheme of extraction steam preheating combined with flue gas waste heat utilization

对 300 MW 机组而言，2 号高加和 7 号低加为不可逆损失的主要集中位置，其本质原因同样源于抽汽与工质之间较大的传热温差。针对这一问题，本文提出利用 2 号抽汽优先对锅炉给水进行预热后再进入高加，以降低汽水换热温差；同时，针对 7 号低加入口循环水温度偏低的问题，引入锅炉烟气余热对其进行加热，从而改善低温端热匹配关系。该方案通过强化热量梯级利用，有效降低系统不可逆损失，提高整体能效水平，其系统如图 6 所示。

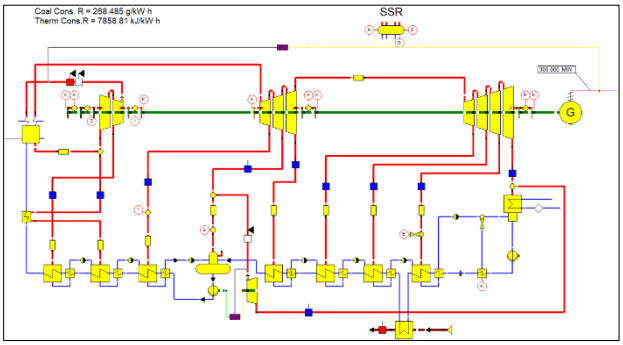


图 6 300 MW 机组余热利用方案

Fig.6 300 MW Unit Waste Heat Utilization Scheme

3.2 余热利用方案变工况分析

本文对提出的余热利用方案进行了变工况分析，分别研究了热效率和煤耗率在系统改造前后的变化规律。

如图 7 所示为 660 MW 机组改造前后热效率对比。余热利用方案的热效率在不同负荷条件下均有明显提升。在 VWO 工况下，改造前的热效率约为 0.479，改造后提高至 0.488，提升了 1.88%；在 100%THA 工况下，改造前的热效率为 0.476，改造后提升至 0.477，提升了 0.2%。在 75%THA 工况下，改造前热效率为 0.468，改造后提升至 0.471，提升了 0.64%；在 50%THA 工况下，改造前的热效率为 0.454，改造后提升至 0.459，提升了 1.1%。

如图 8 所示为 660 MW 机组改造前后热力系统煤耗率对比。在 VWO 工况下，改造前的煤耗率为 256.571 0 g/(kW·h)，改造后降至 255.780 5 g/(kW·h)，减少了约 0.79 g/(kW·h)；在 100%THA 工况下，煤耗率从 257.423 1 g/(kW·h)降至 257.423 1 g/(kW·h)。随着负荷的降低，煤耗率的下降更加明显。在 75%THA 工况下，煤耗率从 262.774 0 g/(kW·h)减至 260.762 9 g/(kW·h)，降幅为 2.01 g/(kW·h)；而负荷

将至 50%THA 工况时，煤耗率从 270.346 0 g/(kW·h)减少至 267.842 3 g/(kW·h)，降幅为 2.50 g/(kW·h)。

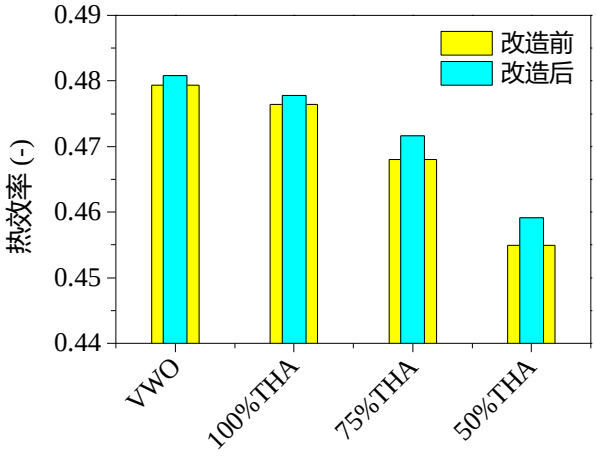


图 7 660 MW 机组改造前后热效率对比

Fig.7 Comparison of thermal efficiency before and after modification

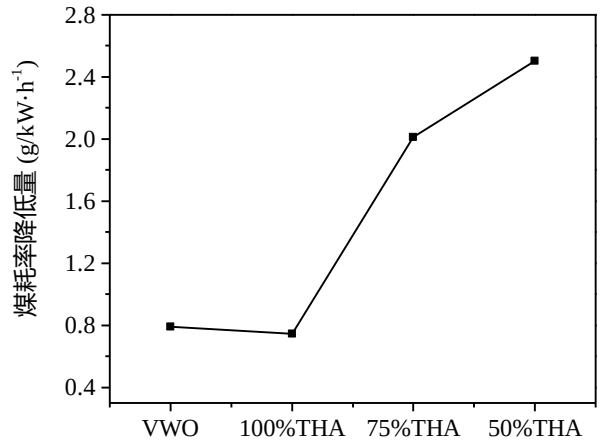


图 8 660 MW 机组改造后煤耗率降低量随负荷变化趋势

Fig.8 Reduction in coal consumption rate after modification

如图 9 所示，300 MW 机组在实施余热利用方案后，各负荷工况下热效率均得到提升。在研究工况下，热效率提升约 0.03 个百分点，整体提升幅度保持在 0.025 5～0.031 5 个百分点范围内。相比之下，低负荷工况下提升幅度略高，最大提升 0.47%，表明余热利用措施在低负荷条件下对降低传热不可逆损失更为有效。总体来看，该方案在全工况范围内均表现出稳定的热效率提升效果。

如图 10 所示，300 MW 机组改造后煤耗率在各工况下均有所降低。在 VWO、100%THA、75%THA 及 50%THA 工况下，煤耗率分别降低约 1.01、1.05、1.16 和 1.31 g/(kW·h)，整体降幅约为 1.01～1.31 g/(kW·h)。结果表明，该余热利用方案在不同负荷条件下均具有稳定的节煤效果，且在中低负荷工况下降幅略有增加，体现出较好的变工况适应性和节能潜力。

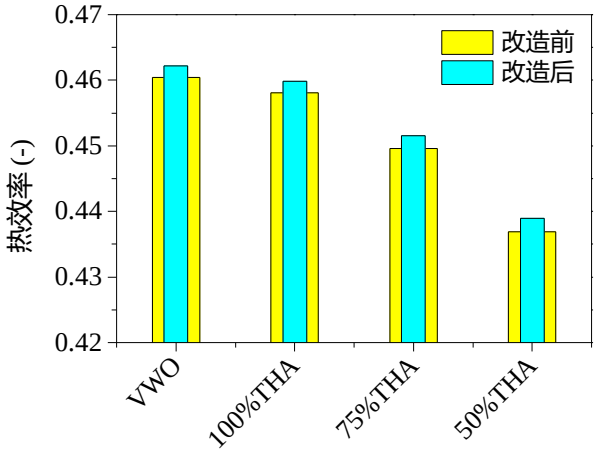


图 9 300 MW 机组改造前后热效率对比

Fig.9 300 MWcomparison of thermal efficiency before and after unit retrofit

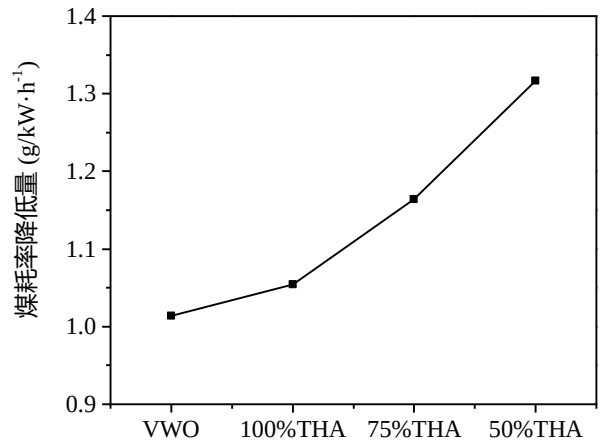


图 10 300 MW 机组改造后煤耗率降低量随负荷变化趋势

Fig.10 300 MW trend of coal consumption rate reduction after unit retrofit with load variation

4 结　论

本文基于熵产与㶲损失分析方法，对燃煤电厂热力系统不可逆损失及余热利用潜力进行了系统研究，得到以下结论：

1）熵产与㶲损失分析能够有效识别热力系统中不可逆损失的空间分布特征。结果表明，不可逆损失主要集中于回热加热系统，就本文研究对象为例，660 MW 机组以 2 号、3 号高加及 7 号低加为主要损失源，300 MW 机组以 2 号高加和 7 号低加为主，其根本原因在于汽水传热温差过大导致的能量品质损失。

2）基于不可逆损失分布特征，构建了“抽汽预

热+烟气余热利用”的余热梯级利用方案。该方案通过优化热量匹配关系，降低传热过程温差驱动，从机理上削弱系统不可逆性，实现㶲效率提升。

3）变工况仿真结果表明，所提出的方案在全负荷范围内均具有良好的节能效果。对 660 MW 机组而言，热效率最大提升 1.88%，煤耗率最大降低 2.50 g/(kW·h)，且低负荷工况下节能效果更为显著；对 300 MW 机组而言，热效率提升约 0.025 5～0.031 5 个百分点，煤耗率最大降低 1.31 g/(kW·h)，表现出良好的变工况适应性。

本文所提出的基于熵产与㶲损失的分析方法与余热利用路径，可为燃煤电厂余热潜力挖掘及系统节能优化提供理论依据和技术参考。未来研究可进一步结合实际运行数据，开展余热利用方案的经济性评价及动态优化控制研究，以提升工程应用价值。

［参 考 文 献］

[1] 董志坚, 叶学民, 宋睿哲, 等. 660 MW 燃煤发电机组的碳捕集系统余热利用和集成系统性能评估[J]. 太阳能学报, 2022. 43(07): 203-211.
Dong ZJ, Ye XM, Song RZ, et al. Carbon capture system waste heat utilization and intergrated system perfaromance evaluation of 660 MW coal-fired power units[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022. 43(07): 203-211.

[2] Song P, Mao X, Li Z, et al. Study on the optimal policy options for improving energy efficiency and Co-controlling carbon emission and local air pollutants in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 175: 113167.

[3] 李永田, 张欢, 王军, 等. 基于热泵技术的电厂余热利用研究[J]. 热科学与技术, 2022. 21(03): 297-303.
Li YT, Zhang H, Wang J, et al. Study on utilization of waste heat in power plant based on heat pump technology[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2022. 21(03): 297-303.

[4] 廖高良, 李杨, 周元祥, 等. 电站锅炉烟气余热利用研究综述[J]. 热能动力工程, 2017. 32(06): 1-6+129.
Miu GL, Li Y, Zhou YX, et al. An overview on study of flue gas waste heat recovery in utility boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017. 32(06): 1-6+129.

[5] 罗晴. 燃煤电厂烟气低温余热回收利用研究[J]. 热能动力工程, 2017. 32(08): 1-4+144.
Luo Q. A study on the recovery and utilization of low-temperature waste heat from flue gas in coal-fired power stations[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017. 32(08): 1-4+144.

[6] Yang M, Zhou Y, Yang J, et al. Performance analysis of an efficient waste heat utilization system in an ultra-supercritical coal-fired power plant[J]. Energy Reports, 2022, 8: 5871-5882.

[7] 王利猛, 王硕, 王娜, 等. 垃圾焚烧电厂-电转气协同运行下考虑余热利用的综合能源系统低碳优化调度[J]. 太阳能学报, 2025. 46(02): 299-308.
Wang LM, Wang S, Wang N, et al. Low carbon optimal scheduling of integrated energy system considering waster heat utilization under coordinated operation of incineration power plant and P2G[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025. 46(02): 299-308.

[8] 王润宇, 马欣强. 煤电二氧化碳捕集能量梯级利用与机组效率分析[J]. 洁净煤技术, 2024. 30(10): 41-48.
Wang RY, Ma XQ. Energy cascaded utilization and turbine efficiency of coal fired power plant with CO_2 capture[J]. Clean Coal Technology, 2024. 30(10): 41-48.

[9] 付文锋, 王金楹, 王蓝婧, 等. 基于燃机余热和地热能的联合发电系统优化设计及热力性能分析[J]. 动力工程学报, 2024. 44(02): 328-338.
Fu WF, Wang JY, Wang LQ, et al. Optimal design and thermal performance analysis of combined power generation system based on gas turbine waster heat and geothermal energy[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024. 44(02): 328-338.

[10] 张俊莲, 杨传燕, 张雪标, 等. 基于有机朗肯循环的新型燃煤发电系统热力性能[J]. 热力发电, 2025. 54(07): 144-152.
Zhang JL, Yang CY, Zhang XB, et al. Thermal performance of a new coal-fired power generation system based on organic Rankine cycle[J]. Thermal Power Generation, 2025. 54(07): 144-152.

[11] 雷霆, 梁友才, 朱雁, 等. 基于余热回收和液化天然气冷能利用的 NGCC 电厂燃烧后碳捕集工艺优化[J]. 热力发电, 2025. 54(06): 194-203.
Lei T, Liang YC, Zhu Y, et al. Process optimization of post-combustion carbon capture for NGCC power plantsbased on waste heat recovery and liquefied natural gas cold energy utilization[J]. Thermal Power Generation, 2025. 54(06): 194-203.

[12] Ordonez J C, Cavalcanti E J C, Carvalho M. Energy, exergy, entropy generation minimization, and exergoenvironmental analyses of energy systems-a mini-review[J]. Frontiers in Sustainability, 2022, 3: 902071.

[13] 王迅, 李宇曦, 李想, 等. 电厂燃煤锅炉烟气余热回收的优化利用[J]. 燃烧科学与技术, 2018. 24(01): 15-20.
Wang X, Li YX, Li X, et al. Optimized utilization of waste heat recovery from flue gas of coal-fired boiler in power plant[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2018. 24(01): 15-20.

[14] 闫敏, 李玉忠, 马春元. 基于机械蒸汽压缩的燃煤烟气余热及水回收系统[J]. 动力工程学报, 2018. 38(09): 755-762.
Yan M, Li YZ, Ma CY. A flue gas waste heat and water recovery system base on mechanical vapor recompression[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018. 38(09): 755-762.

[15] Khaleel O J, Ibrahim T K, Ismail F B, et al. Developing an analytical model to predict the energy and exergy based performances of a coal-fired thermal power plant[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101519.