

“三改联动”下连排水的高质化利用及效能分析

文/余剑^{1, 2} 刘雅斌³

1. 中铝环保节能集团有限公司; 2. 中铝中央研究院环保节能研究所; 3. 中铝矿业有限公司

摘要: 针对连排水的特点以及当前火电行业“三改联动”的要求, 设计了一种连排高质化利用技术方案。该方案将连排水中的工质和热量全部转换为洁净的过热蒸汽, 提供给用户。通过对采用该技术后产生的节能量变化、经济效益、安全环保效益、锅炉水质和供汽品质等方面进行分析和计算, 说明高质化应用技术可以更有效地利用连排水中的工质和能量, 满足火电“三改联动”的节煤降耗要求, 具备较高的经济效益和环保效益。

关键词: 三改联动; 节能煤降耗; 连排水; 高质化利用; 过热蒸汽净化装置

2021年10月29日, 国家发展改革委、国家能源局印发《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》(发改运行〔2021〕1519号), 通知要求“全面梳理煤电机组供电煤耗水平, 结合不同煤耗水平煤电机组实际情况, 探索多种技术改造方式, 分类提出改造实施方案。”到2025年, 全国火电平均供电煤耗降至300 g标准煤/(kW·h)以下。主要实施节煤降耗改造、供热改造和灵活性改造。

通知要求发布以来, 全国各火电企业从自身角度出发进行了大量的技术尝试, 主要有切缸改造、高背压改造、尖峰冷却器、电极锅炉调峰、固体蓄热调峰、锅炉过热汽供汽、热再冷再供汽、控制系统优化、飞轮调频和化学电池调峰等。总体来讲, 各种技术在不同机组、不同需求中都得到了验证, 取得了良好的效果。经过努力, 300 MW级火电机组基本实现了自身30%能力的深度调峰, 结合电极水蓄锅炉等的调峰能力, 部分机组已经达到了“零”出力, 为国家新能源的发展做出了巨大的贡献。

近年来, 很多企业将连排水通过换热器用于以下用途: 生水加热; 加热除盐水、给水或凝结水;

采用表面式或直混式用于供暖系统; 采用溴化锂吸收式热泵用于制冷; 用于低压供汽; 用于送风加热; 用于移动式储热。分析上述技术, 除用于低压供汽外, 都是利用了连排水的部分热能和工质, 且转换后的热能品质低; 而低压供汽应用压力只有1.0 MPa, 和一般亚临界机组除氧器压力相当, 蒸汽品质较低, 且未考虑连排水质对蒸汽及原锅炉系统的影响。

调研一些300 MW以上机组, 很多机组由于连排水量小于设计最小流量、连排水位控制难度大、投入连排管道振动大、连排减压阀调节阀易损坏等原因, 实际并未正常投入连排系统。就实际分析, 即使正常投入了连排系统, 连排废水在连排扩容容器中闪蒸为饱和汽, 饱和汽通过除氧器再次进入系统, 由于饱和汽中含有杂质要远大于过热蒸汽, 造成对汽水系统的实际二次污染, 不可避免地增大了排污量; 连排闪蒸后的排水进入到定排后再次闪蒸, 该部分蒸汽通过定排对空排放到大气中, 冷凝后产生白雾现象, 冬季下落结冰, 从感官和实际都造成了一定的环境污染, 并带来一定的安全隐患。

按上述分析，本文提出连排水高质化利用方案，通过节能效益分析、有效能评价分析、机组水质变化分析、输出蒸汽品质分析和过热蒸汽净化装置评价等多角度进行定性、定量的分析，用以推动连排水在“三改联动”中发挥积极作用。

连排水高质利用方案

宁夏某火力发电厂为 2×330 MW亚临界水冷机组，受当前国家能源发展需求，先后进行了供暖改造和工业供汽改造。供暖汽源为四抽抽汽（0.470 7 MPa、257.49 ℃、2 978.6 kJ/kg）；中压工业供汽汽源为高过出口（BECR工况：18.29 MPa、543 ℃），通过减温（减温水为主蒸汽减温水：18.5 MPa、253 ℃）减压，提供中压（3.2 MPa、320 ℃、120 t/h）工业用汽；低压供汽汽源为高再出口（BECR工况：3.73 MPa、542 ℃），通过减温（减温水为再热减温水：18.5 MPa、176.64 ℃）减压，提供低压（2.3 MPa、296 ℃、100 t/h）工业供汽。连排系统未投入，两台炉合计连排流量3 t/h（18.29 MPa、358.3 ℃、1 744.66 kJ/kg）。

该厂炉水质量保持较好，两台炉连排流量合计为3 t/h，受流量小影响，实际连排未投运，连排水直接通过定排扩容后，蒸汽自扩容器对空排排放，排放蒸汽冷凝后产生白雾现象，冬季下落结冰，从感官和实际都造成了一定的环境污染，并带来一定的安全隐患；闪蒸气排入机组排水槽。为解决上述问题，充分利用连排水高温、高压特性，将其作为中压供汽或高压供汽的补充汽源，减少主蒸汽和热再蒸汽的用量，提高能效。方案如图1所示。

新系统利用连排水高压、高温的特点，将两台炉的连排水作为中压供汽的第一级减温，原主蒸汽减温水作为第二级减温；为确保对外供汽的品质，减温器出口设置过热蒸汽净化装置，装置为一用一备，并设置旁路系统。一级减温首先保证3 t/h的连排水用量，最终一、二级减温的利用量可以根据实际需要进行调配。混合了连排杂质的过热汽最终经过过热蒸汽净化装置净化，达到或超过蒸汽要求指标后提供给工业用户，实现了连排水的高品质转化，同步实现较高的经济效益和安全环保效益。

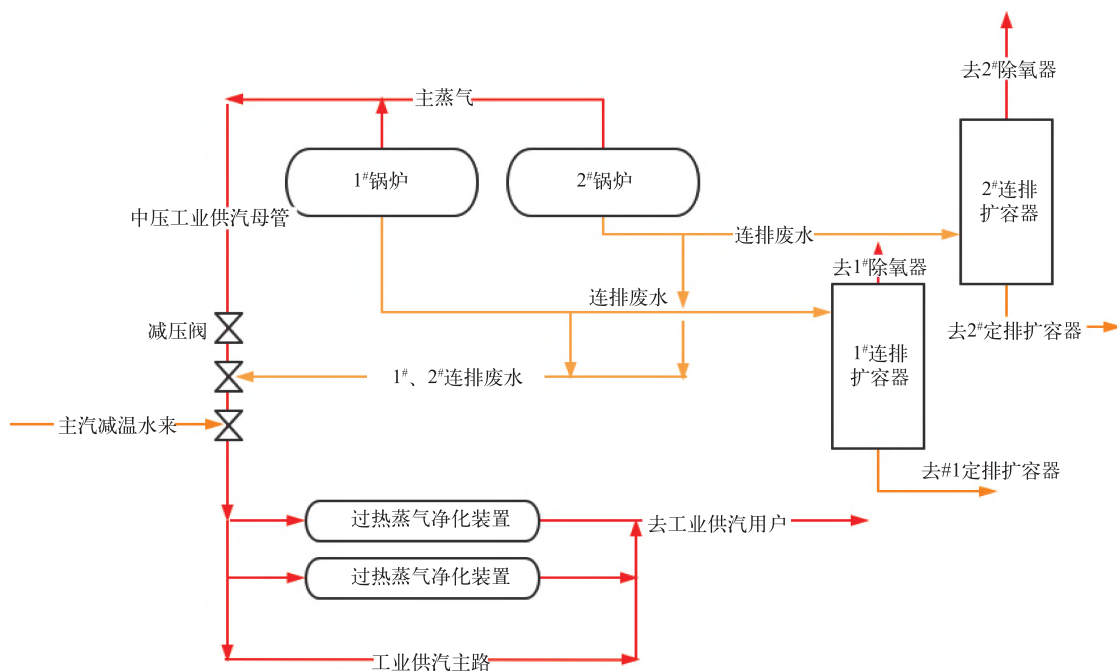


图1 连排水高质化利用系统示意图

连排水高质化应用分析

连排水的高质化应用技术，将高压饱和水转换

为高品质的工业用汽的同时，也将连排水中的磷酸盐等杂质代入到工业用汽中；工质的回收也引起整

个系统的水平衡及循环倍率变化。下面将从工质及热量的经济效益、有效能评价分析、机组水质变化分析、输出蒸汽品质分析、过热蒸汽净化装置评价等多维方面进行定性、定量的分析。

1. 工质及热量回收产生的效益分析

该厂连排系统未正常投运，所有工质及热量通过原定排系统直接闪蒸后排放，造成工质和热量的完全损失。按水平衡及能量平衡计算损失量如下：

工质损失=连排流量×年运行时长=3×8 000=2.4 (万t/h)

工质价值=工质损失×除盐水成本=2.4×10=24 (万元/a)

热量损失=连排流量×年运行时长×连排水焓值=3×8 000×1 744.66=4.19 (万GJ/a)

热量价值=热量损失×供热单耗×标煤单价=4.19×37×800=123.94 (万元/a)

合计：147.94 (万元/a)

年度节约燃煤=热量损失×供热煤耗=4.19×37=1 550.3 (t/a)

其中，连排流量3 t/h；连排水焓值 (18.29 MPa、354.7 ℃) 1 744.66 kJ/kg；年运行时长 8 000 h；除盐水成本 10元/t；供热煤耗 37 kg/GJ；标煤单价 800元/t。

2. 有效能变化引发的节能分析

采用主蒸汽或热再蒸汽经减温减压用于工业供汽，属于高质低用，其减温减压过程有显著的有效能损失。将“连排水”替代“减温水”减温，将引发“有效能”变化。

(1) 有效能计算

减温减压装置为典型的稳流体系，当体系由任意状态变至基态时，忽略其动能、位能变化，根据有效能的定义，则过程的有效能和理想功为：

某一状态有效能： $E_x=(H-H_0)-T(S-S_0)$

状态1到状态2的理想功： $W_{id}=(H_2-H_1)+T_0(S_2-S_1)$

式中， E_x 为某状态单位质量蒸汽有效能，kJ/kg； W_{id} 为状态1到状态2的理想功，kJ/kg； H 、 $-H_2$ 、 H_1 为蒸汽状态焓，kJ/kg； S 、 S_2 、 S_1 为蒸汽状态熵，kJ/(kg·K)； T_0 为基态温度 (取293K、1atm)； H_0 为基态焓，kJ/kg； S_0 为基态熵，kJ/(kg·K)。

(2) 减温水由“连排水”全部替代时的“流量”计算

两种减温水的比焓偏差很大，必然引起主蒸汽用量的变化，为充分分析替代后的主蒸汽流量、总有效能等的变化，采取全部替代进行计算和分析。

按热力学第一定律，有如下平衡

$$Q=Q_c+Q_1=Q'_c+Q_2$$

$$QH=Q_cH_c+Q_1H_1=Q'_cH_c+Q_2H_2$$

$$Q_c=Q\frac{H-H_1}{H_c-H_1}QC_1 \quad (1)$$

$$Q_1=Q\frac{H_c-H}{H_c-H_1}$$

$$Q'_c=Q\frac{H-H_2}{H_c-H_2}QC_2 \quad (2)$$

$$Q_2=Q\frac{H_c-H}{H_c-H_2}$$

式中， Q 为最终供汽流量，t/h； Q_1 为连排水减温流量，t/h； Q_2 为减温水减温流量，t/h； Q_c 为采用连排做减温水时过热蒸汽流量，t/h； Q'_c 为采用减温水减温时过热蒸汽流量，t/h； H 为最终供汽焓值，kJ/kg； H_c 为过热蒸汽焓值，kJ/kg； H_1 为连排水焓值，kJ/kg； H_2 为减温水焓值，kJ/kg； C_1 、 C_2 为中间常数。

按热平衡方程 (1) (2)，计算可得 (见表1)：

中压供汽流量=120 t/h时，采用“主蒸汽减温水减温”，需要减温水 $Q_2=20.48$ t/h；而采用“连排水”减温，需要连排水 $Q_1=28.49$ t/h。替代后，主蒸汽用量减少8.01 t/h。

低压供汽流量=100 t/h时，采用“主蒸汽减温水减温”，需要减温水 $Q_2=19.32$ t/h；而采用“连排水”减温，需要连排水 $Q_1=29.93$ t/h。替代后，主蒸汽用量减少10.61 t/h。

计算表明，当两个系统采用“连排水”减温后，主蒸汽或再热蒸汽的用汽量降低。该厂连排水单台机组设计流量20 t/h，总量可以满足一种工业供汽的“减温”需求。

(3) 减温水由“连排水”全部替代的“有效能”计算

根据有效能公式，不同分量的单位“有效能”分别为

抽汽单位质量有效能

$$E_c = (H_c - H_0) - T_0(S_c - S_0) \quad (3)$$

连排水单位质量有效能

$$E_1 = (H_1 - H_0) - T_0(S_1 - S_0) \quad (4)$$

减温水单位质量有效能

$$E_2 = (H_2 - H_0) - T_0(S_2 - S_0) \quad (5)$$

采用“连排水”作为减温水和采用“减温水”作为减温水的有效能（功）差值为

$$\Delta W = (Q_c E_c + Q_1 E_1) - (Q_c' E_c + Q_2 E_2) \quad (6)$$

将式（1）～式（5）代入式（6）可得

$$\Delta W = Q[E_c(C_1 - C_2) + E_1(1 - C_1) - E_2(1 - C_2)] \quad (7)$$

由式（7）可知，有效能差（ ΔW ）同最终供汽流量（ Q ）成正比关系。

代入相关参数后，计算数值见表1。

中压工业供汽采用“连排水”替代“过热减温水”减温后，有效能降低，按汽机效率90%、发电煤耗320 g/（kW·h）、年运行8 000 h、标准煤单价800元/t计算，年度收益47.4万元。

低压工业供汽采用“连排水”替代“过热减温水”减温后，有效能略增，按汽机效率90%、发电煤耗320 g/（kW·h）、年运行8 000 h、标准煤单价800元/t计算，年度收益-4.14万元。

表1 中、低压供汽采用“连排水”替代后流量及有效能计算

		单位有效能/（kJ/kg）	抽汽量（流量）/（t/h）	流量合计/（t/h）	有效能合计/（kJ/kg）	收益/（万元/a）
中压供汽有效能差计算	过热汽	1 528.99	91.51	120.00	157 106.85	47.40
	连排水	603.45	28.49			
	过热汽	1 528.99	99.52	120.00	158 032.65	
	过热减温水	286.66	20.48			
	有效能差（连排水－过热减温水）					
低压供汽有效能差计算	再热汽	1 421.52	70.07	100.00	117 663.56	-4.14
	连排水	603.45	29.93			
	再热汽	1 421.52	80.68	100.00	117 582.65	
	再热减温水	150.06	19.32			
	有效能差（连排水－过热减温水）					

计算表明：中压供汽采用连排水替代后，有益于效益的增加；而低压供汽采用连排水替代后相反。按绝对数值分析，采用连排水替代，可以将当前排放的连排水工质和热量全部高质化回收，是否需要增加连排水作为减温水需要根据实际需求进行。

按表1中数据，采用连排水替代，会减少过热蒸汽或再热蒸汽的用量，从而对机组顶峰能力有一些提高。

3. 采用“连排水”减温对机组汽水品质的影响

根据国标GB DL/T 12145—2016《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量标准》，对火电汽包锅炉汽水品质要求如下：蒸汽（SiO₂）标准为15 μg/kg；给水（SiO₂）标准为15 μg/kg；炉水（SiO₂）标准为100 μg/kg。

按增量物质的平衡，供汽排出硅+连排排污硅+吹灰等其他用汽硅=给水代入硅，为简化计算，按全厂补水130 t/h（7 t/h吹灰、3 t/h排污；120 t/h对

外供汽）、中压供汽120 t/h、锅炉排污3 t/h计算。

采用主蒸汽减温水减温时，供汽120 t/h，吹灰蒸汽7 t/h，连排排污3 t/h，计算补水硅：

$$\rho_{\text{补水硅}} = \{(99.52+7) \times 15 + 20.48 \times 15 + 3 \times 100\} / 130 = 16.96 \mu\text{g/kg}$$

替代为连排水减温时，供汽120 t/h，吹灰蒸汽7 t/h，锅炉补水（127 t/h，硅含量等于上式结果），最终到达新的平衡状态时的炉水硅：

$$\rho_{\text{炉水硅}} = (127 \times 16.96 - (91.51+7) \times 15) / 28.49 = 23.74 (\mu\text{g/kg}) \quad (\text{全部替代})$$

$$\rho_{\text{炉水硅}} = (127 \times 16.96 - (117+7) \times 15) / 3 = 98.04 (\mu\text{g/kg}) \quad (\text{仅替代3 t/h})$$

计算表明，当采用“连排水”作为“主蒸汽减温水”的全替代后，由于锅炉排污增大，炉水硅下降较大。仅替代3 t/h，由于进入的硅量减少，炉水硅也下降，但幅值较小。

分析测算仅利用了增量的物料平衡，且设定蒸汽指标不变，实际运行时，蒸汽指标会向好，炉水

指标在最优值和原值之间的数值，炉水指标总体向好。

分析是按该厂外供蒸汽不回收进行测算的，当部分或全部蒸汽凝结回收时，对炉水的影响需要根据实际情况进行评价。

4. 采用“连排水”减温对输出的工业蒸汽品质的影响

依据3.3的数据，采用“主蒸汽减温水”做减温水时，中压供汽含硅

$$\rho_{\text{中压蒸汽硅}} = (99.52 \times 15 + 20.48 \times 15) / 120 = 15 \text{ (}\mu\text{g/kg)}$$

采用“连排水”作为减温水时，中压供汽硅含量为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{中压蒸汽硅}} &= (91.51 \times 15 + 28.49 \times 23.74) / 120 \\ &= 17.08 \text{ (}\mu\text{g/kg)} \end{aligned}$$

计算表明，当采用“连排水”作为“主蒸汽减温水”的替代后，由于炉水硅下降，在达到最终稳态后，中压供汽的硅增加幅度很小。

分析技术仅利用了增量的物料平衡，且假设主蒸汽含硅不变，实际运行主蒸汽指标会向好，从而炉水硅会比上面的计算值高。

分析计算考虑蒸汽指标会优于原指标、炉水指标大于计算值形成的问题，从而最终中压工业供汽中含硅大于上述计算值。当供汽蒸汽指标超出外部要求时，需要采用过热蒸汽净化装置对过热蒸汽进行净化。

分析计算是按该厂外供蒸汽不回收进行测算的，当部分或全部蒸汽凝结回收，对炉水的影响需要根据实际情况进行评价。如实际工况提供的蒸汽指标超出外部要求，采用过热蒸汽净化装置对过热蒸汽进行净化。

分析测算未考虑连排水质含有磷酸盐等杂质，当外部蒸汽需求有这一方面的要求时，需要采用过热蒸汽净化装置对过热蒸汽进行净化处理。

5. 过热蒸汽净化装置

“过热蒸汽净化装置”分为三个主要部分：一是耐高温精密过滤器对连排水进行悬浮物过滤；二是通过超大扩容腔降低蒸汽流速，并在腔体设置拦阻装置阻止汽化析出物随蒸汽带出；三是高精纳米吸附滤芯过滤器。

第一部分对连排水进行初步过滤，除去悬浮杂质；第二部分将根据自身的物理特性和上游蒸汽充分混合，使连排废水得到供热蒸汽焓差补偿后，全部转换为满足供汽需求的过热蒸汽；第三部分采用金属合金纳米材料所制成的吸附滤芯对过热蒸汽进行过滤，去除过热汽中磷酸盐、钙镁离子沉积物、二氧化硅等杂质，使过热汽达到或超过原蒸汽指标。完成过滤-蒸发-再过滤的过热蒸汽最终供工业用户。

总体评价

连排水高质化应用仅消纳基本流量（3 t/h）的状况下，年度可以降低约150万元的生产成本，年度节约标准煤1 550 t，同步消除了定排对空排处冒汽现象以及冬季结冰造成的安全隐患。采用“连排水”替代后，蒸汽“有效能”损失减小，经济效益提高，机组汽水品质也得到了提高，可以为电厂提供一个调节汽水指标的手段。在全年内，采用“连排水”减温和“原减温水”减温对经济效益影响较小，用于替代“主蒸汽减温水”有正的经济效益，替代“再热减温水”基本持平。当外供蒸汽回收或外供蒸汽对蒸汽中的含硅、含磷酸盐有较高要求时需要设置过热蒸汽净化装置。连排水高质化应用，有益于机组顶峰能力的提高。

结论及展望

1) 基于连排水的特点以及当前火电行业“三改联动”的要求，当有对外供汽的实际需求时，连续排水高质化利用技术可将连续排水中的工质和热量全部回收，并通过过热蒸汽净化技术净化蒸汽，从而达到了节能减排、提高经济效益、保证蒸汽品质和实现本质安全的多重目的。

2) 伴随着“三改联动”的不断深入，越来越多的火电机组改造成为工业供汽机组，连排水高质利用技术为此提供了最优的连排废水利用路线。未来，需要进一步研究和完善该技术方案，以进一步提高其实际应用效果。同时，也应该倡导和推动更多的企业和机构采用节能减排技术，为可持续发展做出更大的贡献。EA