

# 团 体 标 准

T/TMAC ×××—202X

## 熔盐储热耦合燃煤机组灵活高效运行技术指南

Guidelines for flexible and efficient operation technology of molten salt thermal storage coupled coal fired units

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中国技术市场协会 发布



中国技术市场协会（TMAC）是科技领域内国家一级社团，以宣传和促进科技创新，推动科技成果转化，规范交易行为，维护技术市场运行秩序为使命。为满足市场需要，做大做强科技服务业，依据《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，中国技术市场协会有序开展标准化工作。本团体成员和相关领域组织及个人，均可提出修订 TMAC 标准的建议并参与有关工作。

TMAC 标准按《中国技术市场协会团体标准管理办法》《中国技术市场协会团体标准工作程序》制定和管理。

TMAC 标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议多数专家、成员的同意，方可予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料反馈至中国技术市场协会，以便修订时参考。

本文件著作权归中国技术市场协会所有。除了用于国家法律或事先得到

中国技术市场协会正式授权或许可外，不许以任何形式复制本文件。

中国技术市场协会地址：北京市丰台区万丰路 68 号银座和谐广场 1101B

邮政编码：100036 电话：010-68270506 传真：010-68270453

网址：[www.ctm.org.cn](http://www.ctm.org.cn) 电子信箱：[1361620447@qq.com](mailto:1361620447@qq.com)



## 目 次

前 言 .....	1
引 言 .....	错误! 未定义书签。
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 灵活高效运行 .....	错误! 未定义书签。
4.1 机组灵活调峰能力 .....	4
4.1.1 机组最小技术出力 .....	4
4.1.2 机组负荷响应时间 .....	4
4.1.3 机组调频调峰性能 .....	4
4.2 耦合熔盐储热形式及性能评价 .....	7
4.2.1 蒸汽加热形式 .....	7
4.2.2 电加热形式 .....	7
4.2.3 烟气加热形式 .....	8
附录 A .....	错误! 未定义书签。
(××性) .....	错误! 未定义书签。
××× .....	错误! 未定义书签。
参 考 文 献 .....	10







# 熔盐储热耦合燃煤机组灵活高效运行技术指南

## 1 范围

本文件提供了熔盐储热耦合燃煤机组灵活高效运行的基本概念、功能与性能等技术要求。

本标准适用于熔盐储热耦合燃煤机组灵活高效运行的规划、设计、调试、验收、维护与评估等。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 8117.2-2008 汽轮机热力性能验收试验规程

GB/T 10184-2015 电站锅炉性能试验规程

GB/T 30370-2013 火力发电机组一次调频试验及性能验收导则

GB/T 31464 电网运行准则

GB/T 39288—2020 蓄热型电加热装置

GBT 40595-2021 并网电源一次调频技术规定及试验导则

DL/T 1210 火力发电厂自动发电控制性能测试验收规程

DL/T 1616-2016 火力发电机组性能试验导则

DL/T 1870 电力系统网源协调技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**燃煤机组智能控制** intelligent control for coal-fired units

应用于燃煤机组中，用以实现机组安全、经济、高效、环保运行，具有智能信息处理、智能信息反馈和智能控制决策的控制方式。

### 3.2

**燃煤机组灵活性运行** flexible operation for coal-fired units

### 3.3

**灵活控制** flexible control

通过改变燃煤机组内部各设备的输入和输出信息，以实现燃煤机组负荷灵活变化的控制。

### 3.4

## T/TMAC XXX—202X

### 机组额定功率 rated capacity of unit

制造厂给定的汽轮发电机组输出功率, 机组在规定的终端参数, 且不超过规定的寿命条件下无限期地运行, 调节汽门不一定全部开启。额定功率也称额定出力或额定负荷(调节系统试验时的额定负荷是指在设计背压下的考核工况)。

### 3.5

#### 机组出力 unit output

机组发电机出口输出的有功功率。

### 3.6

#### 深度调峰 deep peak shaving

机组出力在50%额定功率以下的运行工况。

### 3.7

#### 机组最小技术出力 minimum technical output of unit

在保证发电设备运行安全、环保排放合格、满足约定的供热量、兼顾涉网性能条件下, 发电机组可持续稳定输出的最小电功率。

注: 配备储能(不独立接受电网调度)、电锅炉等灵活性辅助设备的机组, 最小电功率为发电机出口电功率扣除其配套灵活性辅助设备吸收的电功率。

[来源: T/TMAC 085—2024, 3.3]

### 3.8

#### 自动发电控制 automatic generation control; AGC

通过自动控制程序, 实现对控制区内各发电机组有功出力的自动重新调节分配, 来维持系统频率、联络线交换功率在计划目标范围内的控制过程。

注: AGC通常由主站自动控制程序、信息传输通道、信息接收装置(远方终端)、发电机组协调控制系统、执行装置、发电机组自动化装置等环节组成。

[来源: GB/T 26863—2022, 7.29.8]

### 3.9

#### 响应时间 response time

自动发电控制系统发出AGC指令之后, 机组出力在原出力点的基础上, 可靠地跨出与调节方向一致的机组调节死区所用的时间。

[来源: T/TMAC 085—2024, 3.8]

### 3.10

#### 调节速率 regulation speed

机组响应负荷指令的速率。

[来源: T/TMAC 085—2024, 3.9]

### 3.11

#### 调节精度 regulation precision

机组最后稳定时有功输出与AGC指令值之间的差值。

[来源: T/TMAC 085—2024, 3.10]

### 3.12

**蒸汽加热熔盐 steam heated molten salts**

在火电机组正常运行的同时抽取部分主蒸汽/再热蒸汽进入熔盐储能模块实现蓄热。

## 3.13

**烟气加热熔盐 flue gas heated molten salts**

通过抽取锅炉部分烟气加热熔盐，并在释放热量后回到锅炉本体，冷盐吸收热量后转变为热盐，实现热量从锅炉烟气到熔盐系统的转移。

## 3.14

**电加热熔盐 electrical heated molten salts**

以电为加热源将低温熔盐加热为高温熔盐，储存在高温熔盐罐中。

## 3.15

**混合加热熔盐 mixed heat source heating molten salts**

集成多种热源将低温熔盐加热为高温熔盐。

## 3.16

**调峰容量 peak shaving capacity**

机组在加入熔盐储热系统后的输出功率高于或低于原工况输出功率的大小。

## 3.17

**调峰深度 peak shaving depth**

机组调峰容量占额定输出功率的百分比。

## 3.18

**全程热效率 whole process energy efficiency**

储热、释热全过程耦合熔盐储热系统机组的输出功率占煤炭热能的百分比。

## 3.19

**全程焓效率 whole process exergy efficiency**

储热、释热全过程耦合熔盐储热系统机组的输出功率占煤炭焓的百分比。

## 3.20

**循环效率 cycle efficiency**

释热调峰容量占储热调峰容量的百分比。

## 3.21

**供电煤耗率 coal consumption rate of power supply**

机组在单位时间发电所消耗的煤炭质量。

## 3.22

**平准化度电成本 levelized cost of energy**

耦合熔盐储热机组生命周期内的所有成本和发电量进行平准化处理后得到的单位电力成本。

## 3.23

净现值 net present value

耦合熔盐储热机组在生命周期内可获得的净收益。

#### 4 机组灵活调峰能力

##### 4.1 机组最小技术出力

纯凝机组最小技术出力的一般化要求宜为35%额定负荷，采暖热电机组在供热期运行时要通过热电解耦力争实现单日6h最小技术出力宜达到40%额定负荷的调峰能力。

##### 4.2 机组负荷响应时间

机组从50%额定容量调整至最小技术出力所用时间不宜超过1.5h；机组从最小技术出力恢复至50%额定容量的时间不宜超过1.0h。储热过程预期缩短降负荷时间600s，释热过程预期缩短升负荷时间1800s。

##### 4.3 机组调频调峰性能

机组负荷响应时间宜小于75s，调节精度宜小于机组额定功率的1.25%，负荷调节精度偏差宜小于2%Pe。燃煤机组耦合熔盐储热系统后，宜在机组原有变负荷速率的基础上提升20%以上，宜在机组原有一次调频合格率基础上提升5%以上。机组跟踪AGC调频性能宜在现有基础上提高1.5倍。火电机组耦合熔盐储热系统后，释热时实现机组100%顶峰运行，储热时实现在30%额定负荷下运行。

#### 5 熔盐储热耦合燃煤机组热力性能指标

##### 5.1 调峰容量

调峰容量表征系统在指定时段内宜提供的最大负荷调节空间，是评价煤电-储热耦合系统灵活性的关键指标，蒸汽储热调峰容量按公式（1）计算。

$$\Delta P_{\text{stm}} = P_0 - P_{\text{stm}} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

$\Delta P_{\text{stm}}$ ——蒸汽储热调峰容量，MW；

$P_0$ ——原机组输出功率，MW；

$P_c$ ——蒸汽储热耦合机组输出功率，MW。

##### 5.2 调峰深度

机组调峰容量占额定输出功率的百分比，耦合熔盐储热机组储热时最大调峰深度宜高于10%。反映耦合系统的调峰能力，调峰深度按公式（2）计算。

$$\lambda_{\text{stm}} = \Delta P_{\text{stm}} / P_c \times 100\% \dots \dots \dots (2)$$

式中：

$\Delta P_{\text{stm}}$ ——调峰容量，MW；

$P_e$ ——机组额定输出功率，MW；

$\lambda_{\text{stm}}$ ——调峰深度，%。

### 5.3 全程热效率

储热、释热全过程耦合熔盐储热系统机组的输出功率占煤炭热能的百分比不宜低于 30%，反映耦合系统全过程的热能利用情况。全程热效率按公式（3）计算。

$$\eta_{\text{Th,q}} = \frac{1000P_c t_c + 1000P_s t_s}{m_{\text{coal,c}} t_c \cdot LHV + m_{\text{coal,s}} t_s \cdot LHV} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$\eta_{\text{Th,q}}$ ——全程热效率，%；

$P_c$ ——储热阶段机组实际输出功率，MW；

$P_s$ ——释热阶段机组实际输出功率，MW；

$t_c$ ——储热时长，h；

$t_s$ ——释热时长，h；

$m_{\text{coal,c}}$ ——储热阶段的煤耗量，kg/s；

$m_{\text{coal,s}}$ ——释热阶段的煤耗量，kg/s；

$LHV$ ——表示煤炭低位发热量，kJ/kg。

### 5.4 全程焓效率

储热、释热全过程耦合熔盐储热系统机组的输出功率占煤炭焓的百分比 30%，反映耦合系统全过程的能量有效利用程度。全程焓效率按公式（4）计算。

$$\eta_{\text{Ex,q}} = \frac{1000P_c t_c + 1000P_s t_s}{E_{\text{coal,c}} t_c + E_{\text{coal,s}} t_s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\eta_{\text{Ex,q}}$ ——全程焓效率，%；

$E_{\text{coal,c}}$ ——储热过程所消耗的煤炭焓，kW

$E_{\text{coal,s}}$ ——释热过程所消耗的煤炭焓，kW。

### 5.5 储热热效率

补充储热热效率的定义热效率指系统所输出的电能和热能与输入锅炉热能的比值，是衡量耦合系统经济性的重要指标。储热热效率按公式（5）计算。

$$\eta_{\text{Th,c}} = \frac{1000P_c t_c + Q_{\text{ms}}}{m_{\text{coal,c}} t_c \cdot LHV} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$Q_{ms}$ ——熔盐储热量, kJ。

### 5.6 储热焓效率

补充储热焓效率定义焓效率从热力学第二定律出发, 衡量系统在能量转换和传递过程中, 有效能被有效利用的程度, 可以用来衡量系统产生不可逆损失的程度, 从能量利用合理性的角度对系统进行评价。储热焓效率按公式 (6) 计算。

$$\eta_{Ex,c} = \frac{1000P_c t_c + \Delta E_{ms} t_c}{E_{coal,c} t_c} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$\Delta E_{ms}$ ——熔盐焓的变化量, kW。

### 5.7 循环效率

释热调峰容量占储热调峰容量的百分比, 不同耦合方案对循环效率的影响较大, 一般不宜低于 40%。反映熔盐储存热量再利用的情况。循环效率按公式 (7) 计算。

$$\eta_{Cy} = \frac{\Delta P_s t_s}{\Delta P_c t_c} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$\eta_{Cy}$ ——循环效率, %;

$\Delta P_c$ ——储热阶段的调峰容量, MW。

$\Delta P_s$ ——释热阶段的调峰容量, MW

### 5.8 供电煤耗率

供电煤耗率见表 1, 指机组在单位时间发电所消耗的煤炭质量, 反映机组的能源利用情况。

表 1 供电煤耗率

机组类型	容量级别/MW	能耗限额等级		
		1 级	2 级	3 级
		供电煤耗率/gce·kWh <sup>-1</sup>		
超超临界	1000	≤ 268	≤ 276	≤ 283
	600	≤ 275	≤ 282	≤ 291
超临界	600	≤ 286	≤ 285	≤ 299
	300	≤ 290		≤ 308
亚临界	600	≤ 303		≤ 312
	300	≤ 309		≤ 321

煤耗量按公式 (8) 计算。

$$m_{coal} = \frac{D_{st} \times (h_{st} - h_{fw}) + (D_{st} - D_1 - D_2) \times \sigma}{LHV \times \eta_b \times \eta_{gd}} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$m_{coal}$ ——煤耗量, kg/s;

$D_{st}$ ——主蒸汽流量, kg/s;

- $h_{st}$ ——主蒸汽焓, kJ/kg;  
 $h_{fw}$ ——给水焓, kJ/kg;  
 $D_1$ ——第一级抽汽流量, kg/s;  
 $D_2$ ——第二级抽汽流量, kg/s;  
 $\sigma$ ——单位再热蒸汽吸热量, kJ/kg;  
 $\eta_b$ ——锅炉效率, %;  
 $\eta_{gd}$ ——锅炉效率、管道效率, %。

## 6 耦合熔盐储热形式及控制方案

### 6.1 蒸汽加热形式

#### 6.1.1 工作原理

蒸汽加热熔盐系统见图 1, 系统由两个熔盐换热器、一个冷盐罐、一个热盐罐和两个熔盐泵组成。储热阶段过程中, 用户负荷低时, 维持机组处于低负荷运行状态, 抽取部分主蒸汽或再热蒸汽或机组其它位置的蒸汽与低温熔盐换热, 低温熔盐吸收蒸汽能量变成高温熔盐储存在热盐罐中, 而蒸汽换热后返回机组。释热阶段过程中, 抽取部分回热系统凝结水、给水或低温蒸汽与热熔盐在熔盐换热器中换热, 使得在汽轮机中做功的蒸汽流量增多, 从而实现机组输出功率的增加。

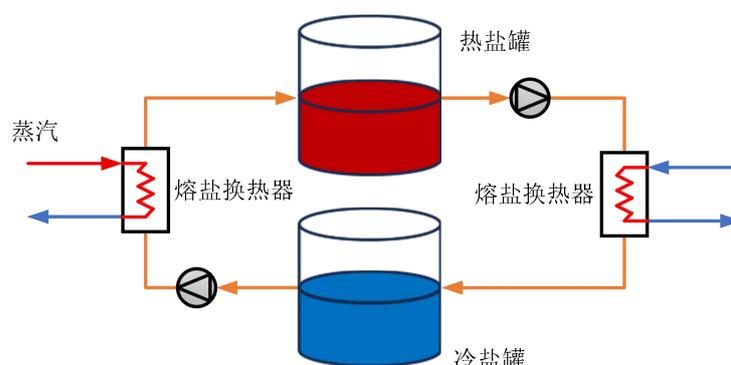


图 1 蒸汽加热熔盐工艺流程

#### 6.1.2 运行控制方式

利用熔盐的调峰容量在一定范围内代替火电机组变负荷动作, 当负荷偏差指令超出调峰容量时, 利用机组控制燃料量和阀门开度进行超出部分负荷指令的跟踪, 当负荷偏差指令小于调峰容量时, 由熔盐控制抽汽、水量进行负荷指令跟踪, 以实现大范围变负荷工况下耦合熔盐储热的火电机组安全、灵活调峰控制。

### 6.2 电加热形式

#### 6.2.1 工作原理

电制热熔盐储热系统如图 2 所示, 系统由一个电加热器、一个冷盐罐、一个热盐罐、两个熔盐泵和

一个熔盐换热器组成。当发电量多于用户负荷时，将冗余电量存储在熔盐中，在用电高峰时释放热量用于发电。储热过程期间，冷盐罐中的低温熔盐流向电制热器，富裕电力通过电制热器制热加热低温熔盐，冷熔盐吸热变为高温熔盐后储存在热盐罐中。释热过程期间，部分回热系统凝结水、给水或低温蒸汽与热熔盐在熔盐换热器中换热，使得在汽轮机中做功的蒸汽流量增多，从而实现机组输出功率的增加。

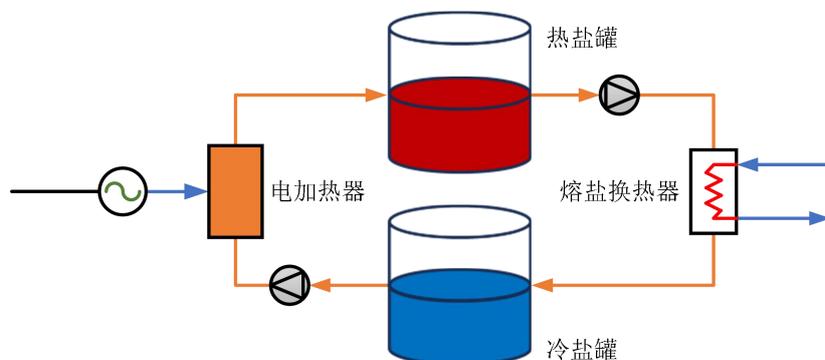


图 2 电加热熔盐工艺流程

采用新能源（光伏或风电等）冗余电能加热熔盐，待新能源发电无法满足负荷要求时，将存储在熔盐内的能量释放加热火电机组凝结水、给水或蒸汽。

在用电低谷期间，维持燃煤电厂内锅炉处于低负荷稳定状态，富裕电力通过电加热装置制热，存储于熔盐中。在用电高峰期间，将储热系统中存储的热能释放，增加系统电功率输出，降低电厂供电煤耗。

### 6.2.2 运行控制方式

系统采用基于电网需求与电价信号的功率动态分配方法，将总发电和储热需求分解为燃煤机组发电指令与熔盐电加热储热指令，通过调节电加热功率分配比与机组出力实现多时间尺度协同控制。同时通过熔盐泵变频控制与电加热器分级投切保障熔盐温度稳定性，主蒸汽压力通过汽轮机调门开度与锅炉燃烧协同调节实现动态平衡。

## 6.3 烟气加热形式

### 6.3.1 工作原理

烟气加热熔盐系统如图 3 所示，其工作原理为：抽取锅炉部分烟气送至储热换热器中，与从冷罐中泵出的冷熔盐进行换热，换热后的低温烟气送至空气预热器入口，利用烟气余热加热进入锅炉的空气实现能量梯级利用，被加热的熔盐送至热熔盐罐中进行存储。

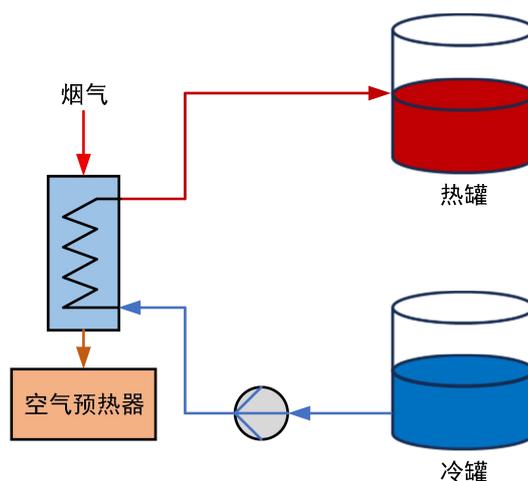


图 3 烟气加热熔盐工艺流程

### 6.3.2 运行控制方式

火储耦合系统采用基于机组负荷指令的功率动态分配方法，将总负荷需求分解为燃煤机组负荷指令与熔盐储热系统负荷指令，通过调节烟气分流比与燃煤量跟踪负荷指令变化，同时通过调节熔盐泵转速控制送往热罐的熔盐温度。主蒸汽压力通过主蒸汽阀门开度控制。

参 考 文 献

- [1] GB/T 10184-2015 电站锅炉性能试验规程
  - [2] GB/T 8117.2-2008汽轮机热力性能验收试验规程
  - [3] GB/T 30370-2013 火力发电机组一次调频试验及性能验收导则
  - [4] GB/T 31464 电网运行准则
  - [5] GB/T 39288—2020 蓄热型电加热装置
  - [6] GBT 40595-2021 并网电源一次调频技术规定及试验导则
  - [7] DL/T 1210 火力发电厂自动发电控制性能测试验收规程
  - [8] DL/T 1870 电力系统网源协调技术规范
  - [9] DL/T 1616-2016 火力发电机组性能试验导则
  - [10] T/SDPEA 0009-2018 燃煤发电机组深度调峰能力试验导则
  - [11] T/CEEMA-001-2002 煤电机组汽轮机节能、供热和灵活性改造技术导则
  - [12] 国家发展改革委、国家能源局《全国煤电机组改造升级实施方案》
-