DOI:10.19666/j.rlfd.202605018

燃煤电站深度调峰过程过热器集箱温度场应力场演化规律研究

雷建国[1]，王奋勇[2]，于建明[3]，朱忠亮[4]，赵兼慰[4]

（1. 国能国源电力（北京）有限公司 北京 100033；
2. 昌吉回族自治州检验检测中心 昌吉 831100；3. 中国特种设备检测研究院 北京 100029；
4. 华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室 北京 102206）

［摘　　要］【目的】在我国大力推行“双碳”政策的背景下，火电需要承担调峰责任，频繁且深度的负荷波动会使机组各项热力参数发生变化，对高温承压部件温度场和应力场影响显著。本文旨在掌握火电机组末级过热器出口集箱在调峰过程中的应力分布和寿命损耗情况，提高火电机组在深度调峰时的安全性。【方法】以某电厂 1 000 MW 超超临界深度调峰机组为研究对象，通过仿真模拟并结合电厂 15%Pe~100%Pe 变负荷过程实际运行数据，研究机组在 40%Pe~100%Pe、100%Pe~40%Pe、15%Pe~40%Pe、40%Pe~15%Pe 共 4 个阶段调峰过程中的瞬态温度场和应力场变化规律。利用疲劳寿命模型对不同阶段的寿命损耗进行计算。【结果】模拟发现，在高于 40%Pe 的高负荷阶段，机械应力对总应力的影响占主导，而此时热应力对总应力的影响较小；在低于 40%Pe 的低负荷阶段，热应力对总应力的影响较大，且总应力的变化波动趋势也与热应力相近。在机组升负荷的大部分时间里，热应力与机械应力方向相反，对总应力产生负向影响；而在机组降负荷的大部分时间里，热应力与机械应力方向相同，对总应力产生正向影响。【结论】根据模拟和寿命分析，在 40%Pe~100%Pe、100%Pe~40%Pe、15%Pe~40%Pe、40%Pe~15%Pe 共 4 段调峰过程，机组的寿命损耗分别为 1.11×10^{-3}%、1.23×10^{-3}%、5.23×10^{-4}%、4.82×10^{-4}%，高负荷下的疲劳损伤大于低负荷工况。

［关　键　词］调峰；集箱；温度场；应力场；寿命

［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.

Research on evolution laws of temperature field and stress field in the superheater header during deep peak regulation of coal-fired power plants

Lei Jianguo[1], Wang Fenyong[2], Yu Jianming[3], Zhu Zhongliang[4], Zhao Jianwei[4]

(1. Guoneng Guoyuan Power (Beijing) Co., Ltd，Beijing 100033, China;
2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Changji Hui Autonomous Prefecture Inspection and Testing Center, Changji 831100, China;
3. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China;
4. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer, Conversion and System, ministry of education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] In the background of China’s national “dual carbon” (carbon peak and carbon neutrality) strategy, thermal power plants are increasingly tasked with providing flexible, deep-load-following services. Frequent and pronounced load variations induce substantial transients in key thermal parameters, such as steam temperature, pressure, and metal wall temperature, thereby perturbing the thermo-mechanical equilibrium of high-

收 稿 日 期：2026-05-09　修 回 日 期：2026-06-17　接 受 日 期：2026-06-23　网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：煤炭重大专项（2025ZD1701200）
Supported by: Coal-Major Project (2025ZD1701200)
第一作者简介：雷建国（1980），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为电厂智能智慧化，11170130@ceic.com。
通信作者简介：于建明（1979），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为电站锅炉检验与评价，13601113646@163.com。

temperature, pressure-bearing components, particularly thick-walled headers. To quantitatively characterize stress redistribution and cumulative fatigue damage in the final superheater outlet header under deep load regulation, and to enhance operational integrity during flexible dispatch, this study focuses on a 1000 MW ultra-supercritical unit capable of stable operation down to 15% of rated power (Pe) at a domestic power plant. The lowest peak-load reduction capacity of this power plant reached 15% of the peak load. The peak-load reduction process recorded the relevant thermal parameter changes. [Methods] Transient thermo-mechanical simulations rigorously calibrated against high-fidelity DCS-recorded operational data across the full 15%Pe~100%Pe load range are employed to resolve the spatiotemporal evolution of temperature and stress fields during four representative transient phases: 40%Pe~100%Pe (ramp-up), 100%Pe~40%Pe (ramp-down), 15%Pe~40%Pe (low-load recovery), and 40%Pe~15%Pe (deep ramp-down). The thesis mainly studied the transient temperature field changes during different load variations, as well as the stress field changes considering both thermal stress and mechanical stress. By extracting the characteristic temperatures and stresses in the transient temperature field and transient stress field during the variable load process, the relevant fatigue parameters are calculated. Life consumption in each phase is quantified using a fatigue model. [Results] Simulation results reveal a critical load-dependent transition in stress dominance: above 40%Pe, pressure-induced mechanical stress governs total equivalent stress, whereas below 40%Pe, thermally induced stress becomes predominant-exhibiting near-identical temporal variation with total stress. During ramp-up transients, thermal and mechanical stresses predominantly oppose one another, resulting in partial cancellation and reduced net stress amplitude; conversely, during ramp-down transients, both components generally act in concert, producing additive stress effects and higher cyclic loading severity. The 40%Pe~15%Pe transition exhibits the largest thermal gradient, highest stress rate, and most accelerated life depletion. The lifespan loss of the container can be calculated using the Manson-Coffin equation. [Conclusion] This work delivers stage-resolved, quantitative life consumption metrics for the final superheater outlet header under deep load regulation. Based on the degree of fatigue life loss in a single instance, the life loss during long-term operation can be calculated. The findings provide a technical foundation for condition-based life assessment, risk-informed inspection planning, and design optimization of thick-walled components in flexibly operated ultra-supercritical units.
Key words: peak regulation; header; temperature field; stress field; life

在大力推动“双碳”政策的背景下，我国的经济发展对电力的需求更加多元化，既要求稳定且充足的电力，又要求电源保持绿色清洁，为满足这些需求，以风光为主的新能源绿色电力大量装机并网，为提高我国对新能源电力的消纳能力，煤电机组必须具有快速且深度的调峰能力[1][5]。新一代煤电升级专项行动要求进一步提升煤电深度调峰、快速变负荷、宽负荷高效运行等能力，未来煤电的目标是要将以维持稳定运行的最小负荷改造至20%Pe-25%Pe。在机组进行调峰的过程中，各项热力参数也会随之发生波动性变化，这会使锅炉承压部件产生交变应力，导致疲劳损耗，进而加剧锅炉承压部件损伤，危害机组的安全稳定运行[6][8]。

寇天一以 1 000 MW 超超临界锅炉为对象，使用 Ansys 软件模拟不同变负荷速率下的温度场和应力场，分析了集箱的疲劳损伤规律[10]。项昱轩以某 350 MW 超临界循环流化床锅炉为研究对象，利用有限元模拟的方法研究了深度调峰过程中所引发的锅炉水冷壁热疲劳问题[11]。于涛通过数值模拟方法研究了某 660 MW 超超临界循环流化床锅炉在深度调峰工况下膜式水冷壁管的温度分布、变形量及热应力演化规律[12]。Hou 等人以某超临界燃煤发电机组厚壁部件为研究对象，研究了厚壁承压部件在频繁启停、变负荷工况下的安全与寿命问题，并提出利用外置电阻加热带来预热汽水分离器等关键部件的优化方案[13]。庞力平以某参与深度灵活调峰的 600 MW 超临界锅炉末级过热器出口汇集联箱为研究对象，采用 Ansys 有限元分析软件开展热应力、机械应力及总应力的瞬态分布分析，并结合疲劳–蠕变交互作用的累积损伤模型，定量评估其在灵活性运行下的寿命损耗[14]。李晨硕通过实验和 Ansys 软件，并基于第四强度理论研究了小型增压锅炉锅筒确定危险点位置及疲劳损耗，为锅炉的设计与安全运行提供参考[15]。

本文以国内某 1 000 MW 超超临界燃煤电站末级过热器出口集箱为研究对象，针对其 100%Pe 至 15%Pe 变负荷范围以及平均 2.5%Pe/min 变负荷速率的调峰工况，结合 Ansys 仿真模拟以及现场实时采集的相关热力参数数据，研究了机组末级过热器出口集箱变负荷过程瞬态温度场和考虑热应力和机械应力的瞬态应力场演变规律，并利用疲劳寿命模型计算了一次升降负荷调峰过程末级过热器集箱疲劳损耗程度，并给出了基于寿命损耗的调峰限制，为深度调峰过程厚壁集箱寿命评估提供数据支

撑。

1 几何模型、运行工况及边界条件设置

1.1 末级过热器出口集箱的概述

该 1 000 MW 超超临界机组锅炉的末级过热器出口集箱沿其外表面展开后如图 1 所示，垂直于中轴线的横截面图如图 2 所示，该末级过热器出口集箱的筒体长度约为 23 480 mm，筒体外径为 495.4 mm，内径为 270 mm，厚度为 112.7 mm。引入管外径为 48.3 mm，内径为 22.8 mm，厚度为 12.75 mm，且在末端有 35°的倒角。引入管分布在筒体下侧，并且呈轴对称分布，每根管相距角度为 20°，沿轴线方向分布有 88 组管屏，每组管屏有 2 个管组，其中一个 10 根引入管，一个 9 根，并且每个管组之间都沿轴线方向相距 240 mm，筒体与引入管的材料均为 P/T92 钢。建完后的几何模型如图 3 所示。

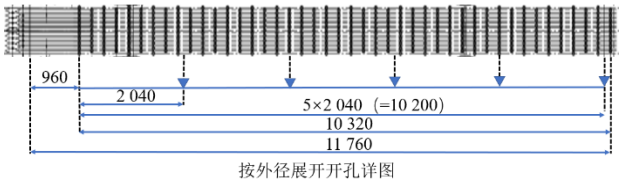


图 1 末级过热器出口集箱按外径展开开孔详图(单位：mm)

Fig.1 Detailed drawing of openings on the outlet header of the final superheater by outer diameter

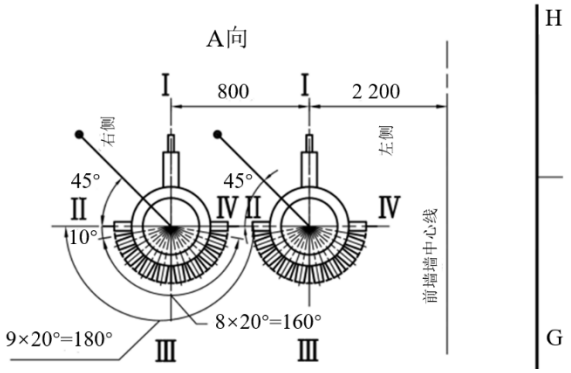


图 2 末级过热器出口集箱垂直于中轴线的横截面图（mm）

Fig.2 Cross-sectional view of the outlet header of the final superheater perpendicular to the central axis (mm)

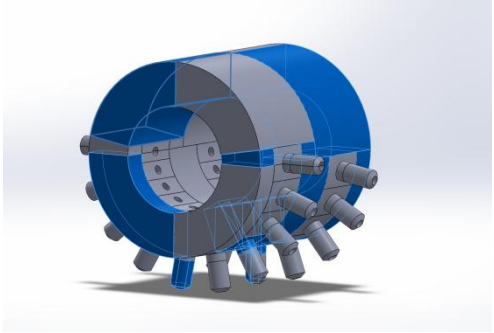


图 3 末级过热器出口集箱几何模型

Fig.3 Geometric model of the outlet header of the final stage superheater

1.2 热力参数数据及网格划分

该机组在调峰过程中最低出力可达 15%Pe，本机组所记录的调峰过程为 100%Pe~40%Pe、40%Pe~15%Pe、15%Pe~40%Pe 和 40%Pe~100%Pe 这 4 个变负荷阶段的参数变化情况，机组在调峰过程中，主蒸汽压力变化明显，而主蒸汽温度则是在 5~15 ℃的范围上下波动，变负荷调峰过程中参数随时间的变化情况如表 1—表 4 所示。

表 1 40%Pe~100%Pe 负荷段上升参数表格

Tab.1 Rising parameters of 40% Pe~100% Pe load range

时间/s	主蒸汽压力/MPa	时间/s	主蒸汽温度/℃
0	13	0	575.6
180	13	180	575.6
840	21.43	810	588.9
1 560	26.5	1 080	575.5
1 800	26.5	1 620	587.7
		1 800	587.7

表 2 100%Pe~40%Pe 负荷段下降参数表格

Tab.2 Decreasing parameters of 100% Pe~40% Pe load range

时间/s	主蒸汽压力/MPa	时间/s	主蒸汽温度/℃
0	27.4	0	576.6
180	27.4	180	576.6
1 065	18.18	495	568.2
1 065	12.74	720	576.9
1 800	12.74	1 005	562.4
		1 800	562.4

表 3 15%Pe~40%Pe 负荷段上升参数表格

Tab.3 Rising parameters of 15% Pe~40% Pe load range

时间/s	主蒸汽压力/MPa	时间/s	主蒸汽温度/℃
0	9.83	0	546.7
200	9.83	200	546.7
300	11.98	615	561.6
835	13.39	1 150	570.9
1 215	12.81	1 530	555.1
2 000	12.81	2 000	555.1

表 4 40%Pe~15%Pe 负荷段下降参数表格

Tab.4 Decreasing parameters of 40% Pe~15% Pe load range

时间/s	主蒸汽压力/MPa	时间/s	主蒸汽温度/℃
0	12.33	0	557.3
100	12.33	170	557.3
605	12.3	940	541
1 200	9.81	1 270	553.2
1 950	9.17	1 950	539.4

2 000	9.17	2 000	539.4

由于在调峰过程中，主蒸汽温度在发生波动性变化，主蒸汽压力也在随着负荷的波动而变化，因此在进行有限元分析时，需要同时考虑因温度而带来的热应力和主蒸汽压力带来的机械应力 2 个方面的影响，所以在进行有限元分析的过程中，需要对模型先进行瞬态热分析计算出调峰过程中的瞬态温度场，之后根据瞬态温度场数据和蒸汽压力载荷计算出集箱的总应力场。

在有限元分析前，需要对模型进行网格划分，本次温度场分析选用 Solid70 三维热分析单元，完成热分析后，将 Solid70 单元转换为 Solid185 三维结构单元以计算应力。对于末级过热器出口集箱的网格划分，由于筒体上半部分的圆柱结构形状规则且与多个结构接触，但应力梯度较小，故采用多区域的方式划分网格；对于筒体下半部分的圆柱结果，因为应力梯度也较小但接触的其它结构不多，采用扫掠的方式划分网格；对于引入管和其与筒体的连接部分，为重点分析的对象，所以采用四面体方式划分。本模型相对偏差<2%即可认为偏差在容许范围之内。通过网格无关性验证，节点数为 1 601 258 个，单元数为 986 844 个，网格划分效果如图 4 所示。

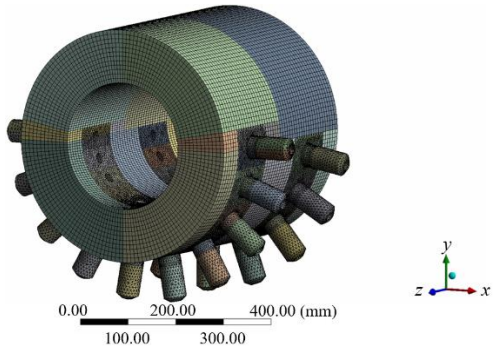


图 4 末级过热器出口集箱的网格划分
Fig.4 Grid division of the outlet header of the final stage superheater

1.3 边界条件的设置及集箱材料的物性

在模拟集箱温度场时，内壁与蒸汽通常会采用第三类边界条件，即设置内壁面与蒸汽的换热系数，集箱筒体和引入管外壁由于保温层的作用，通常将其视为理想绝热。但因为集箱内部蒸汽的流动较为复杂，在内壁与蒸汽的对流换热过程中难以确定，且根据研究发现，不同的换热系数对集箱的温度场分布产生的影响很小。所以本文在模拟集箱在机组调峰时的瞬态温度场时，将蒸汽温度直接加载在集箱筒体和引入管内壁面上，而蒸汽温度随时间的变化情况则通过机组在调峰运行时 DCS 系统所记录的数据得来。因为外壁面虽然设有保温层，外壁热通量很小，所以将外壁面设置为绝热。加载载荷的方式选择实体加载。在计算瞬态温度场时，在集箱筒体和引入管内壁加载温度，并在集箱筒体和引入管外壁面设置为绝热。

在模拟的过程中，简化后的集箱模型既会轴向膨胀，也会径向膨胀。所以在施加位移约束时，需要对模型在 *X*、*Y*、*Z* 方向上约束其位移，且还需模型不受实际受热膨胀的影响，在集箱模型垂直截面施加 *X* 方向的位移约束，在集箱的水平截面即施加远程位移约束，在轴向方向截面施加 *Z* 方向的位移约束。约束条件见图 5 所示。

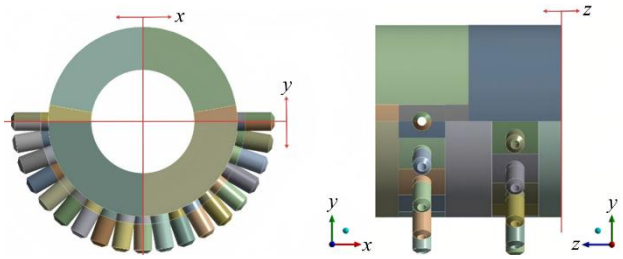


图 5 末级过热器出口集箱位移约束
Fig.5 Displacement constraints at the outlet header of the final superheater

集箱使用的材料为 P92 钢，其主要物性参数见表 5 所示，此外泊松比为 0.29，密度为 7 850 kg/m^3。

表 5 P92 物性参数
Tab.5 P92 material properties

温度 /℃	弹性模量 /GPa	导热系数 /(W·(m·K)$^{-1}$)	线膨胀系数 /(×10^{-6} K^{-1})	比热容 /(J·(kg·K)$^{-1}$)
100	184	28	11.4	430
200	184	28.2	11.8	460
300	173	28.1	12.1	480
400	162	28.5	12.6	510
500	152	29	12.9	580
550	126	28	13	600
600	98	27	13.1	630
650	79	28	13.1	640

1.4 传热模型简介

导热公式为：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q} \quad (1)$$

式中：$\dot{q}$为物体单位体积内热源所产生的热量；λ为物体材料的导热系数；c为物体的比热容；τ为传热时间；T为物体的温度；ρ为物体材料的密度。

若物体材料具有各同向性且内无热源时，可以将式(1)变化成如下公式：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2)$$

若外界流体和物体二者的边界条件为第三类边界条件时，传热公式为：

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial \mathrm{n}}\right)\Big|_{S_a}=h\left(t-t_f\right)_{S_a} \quad (3)$$

可在某一时间点 T_a 对某一单元进行积分处理，公式为：

$$\frac{\partial I^{(e)}}{\partial T_a}=\iiint_e\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial}{\partial T_a}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\frac{\partial}{\partial T_a}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\frac{\partial}{\partial T_a}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}\frac{\partial T}{\partial T_a}\right]dV+\iint_{S_3}h\left(T-T_f\right)\frac{\partial T}{\partial T_a}ds_3 \quad (4)$$

参数相同的某一单元内，温度表达公式为

$$T=\sum_{i-1}^{n}N_i\left(\xi,\eta,\xi\right)T_i \quad (5)$$

因此可以得出：$\frac{\partial T}{\partial T_a}=N_i$

公式可以变换为：

$$\frac{\partial}{\partial T_i}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial T}{\partial T_i}\right)=\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_i}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial T}{\partial T_i}\right)=\frac{\partial N_i}{\partial y} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_i}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial T}{\partial T_i}\right)=\frac{\partial N_i}{\partial z} \quad (8)$$

公式（4）变换为：

$$\frac{\partial I^{(e)}}{\partial T_i}=\iiint_e\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial N_i}{\partial x}+\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\frac{\partial N_i}{\partial y}+\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\frac{\partial N_i}{\partial z}\right]dV+\iiint_e\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}N_i dV+\iint_{S_3}h\left(T-T_f\right)N_i ds_3 \quad (9)$$

$$A_{aij}^{e}=\iiint_e\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial N_i}{\partial x}+\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\frac{\partial N_i}{\partial y}+\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\frac{\partial N_i}{\partial z}\right]dV \quad (10)$$

$$A_{bij}^{e}=\iint_{S_3}hN_i ds_3 \quad (11)$$

$$B_{bij}^{e}=\iiint_e\rho cN_i dV \quad (12)$$

$$f_i^e=\iint_{S_3}hT_f N_i ds_3 \quad (13)$$

经过变化以简化公式（2-10）为：

$$\frac{\partial I^{(e)}}{\partial T_i}=\sum_{j=1}^{n}\left[A_{aij}^{e}T_j+A_{bij}^{e}T_j+B_{ij}^{e}\frac{\partial T_j}{\partial \tau}\right]-f_i^e=\sum_{j=1}^{n}\left[A_{ij}T_j+B_{ij}^{e}\frac{\partial T_j}{\partial \tau}\right]-f_i^e \quad (14)$$

令$A_{ij}=A_{aij}^{e}+A_{bij}^{e}$，式（14）的矩阵表达公式为：

$$\frac{\partial I^{(e)}}{\partial T_i}=\left[A_{ai1}^{e}+A_{bi1}^{e}\cdots A_{ai2}^{e}+A_{bi2}^{e}\cdots A_{ain}^{e}+A_{bin}^{e}\right]\begin{bmatrix}T_1\\T_2\\\vdots\\T_{jn}\end{bmatrix}+\left[B_{i1}^{e}\cdots B_{i1}^{e}\cdots B_{in}^{e}\right]\begin{bmatrix}\frac{\partial T_1}{\partial \tau}\\\frac{\partial T_2}{\partial \tau}\\\vdots\\\frac{\partial T_n}{\partial \tau}\end{bmatrix}-f_i^e \quad (15)$$

可得$\frac{\partial I^{(e)}}{\partial T_i}=\left[A_{ij}\right]^{e}\left(T_j^e\right)+\left[B_{ij}\right]^{e}\left(T_j^e\right)-\left(f_j^e\right)$。

在一个物体内，任一一节点的变分为所有与该节点有关系的单元变分相加，可设$a,b,c,\cdots z$单元都与T_a有关，可以用公式表达为：

$$\frac{\partial I}{\partial T_i}=\frac{\partial I^a}{\partial T_i}+\frac{\partial I^b}{\partial T_i}+\cdots+\frac{\partial I^z}{\partial T_i} \quad (16)$$

当$\frac{\partial I}{\partial I_i}=0$时，通过量泛函极值条件，可得每个节点温度的计算公式为：

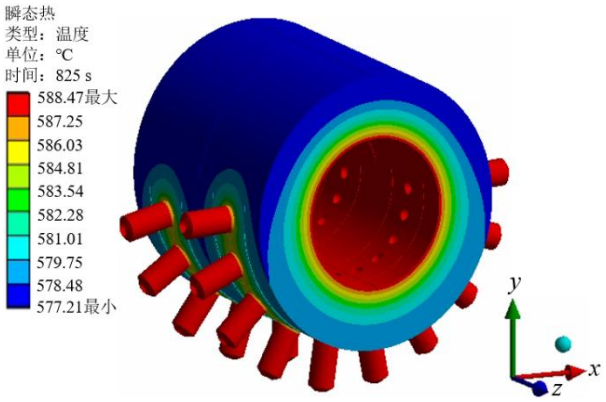
$$[A]\{T_i\}+[b]\left\{\frac{\partial T_j}{\partial \tau}\right\}=\{f_i\} \quad (17)$$

2 模拟结果分析

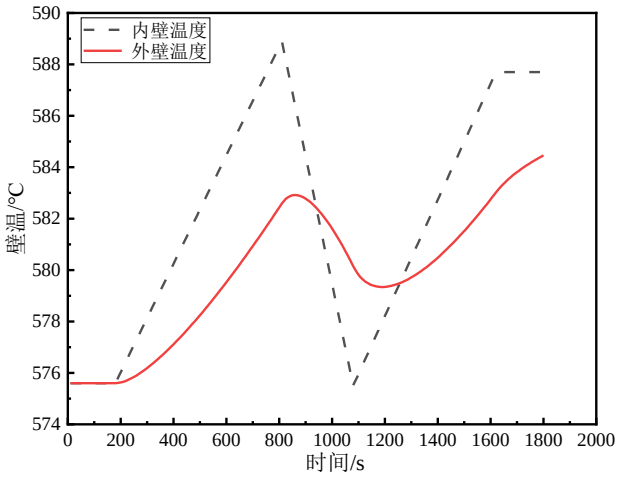
2.1 温度场分析

在 40%Pe~100%Pe 、 100%Pe~40%Pe 、 15%Pe~40%Pe 以及 40%Pe~15%Pe 的 4 个变负荷阶段中，温度场分布的共同特点是在集箱引入管区域温度分布均匀，在筒体区域的分布则是沿着壁面逐渐变化，见图 6a)、图 7a)、图 8a)以及图 9a)。集箱不同部分随蒸汽温度变化的速率也各有不同，变化最快的是内壁、引入管和筒体与引入管连接的部分，其次是集箱筒体的上半远离引入管的部分，变化速率最低的则是筒体下半部分。图 6b)、图 7b)、

图 8b)以及图 9b)展示了在 4 个变负荷过程中引入管与筒体连接部分的内外壁变化趋势。在 40%Pe~100%Pe 的变负荷过程中，内外壁温度先上升，后下降再上升，内外壁温差最大值出现在 782 s 时为 6.5 ℃。在 100%Pe~40%Pe 的过程中，内外壁温度先下降，后上升一小段时间再下降，内外壁温差最大值出现在 1 126 s 时约为 8 ℃。在 15%Pe~40%Pe 过程中，内外壁温度先上升后下降，内外壁温差最大值为 573 s 时约为 8 ℃；在 40%Pe~15%Pe 的过程中，内外壁温度先下降后上升再下降，内外壁温差的最大值则出现在 928 s 时的 7 ℃。



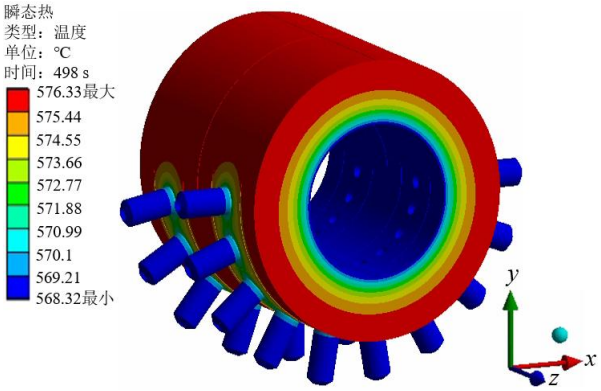
a) 40% Pe~100% Pe 过程中 825 s 时集箱的温度分布



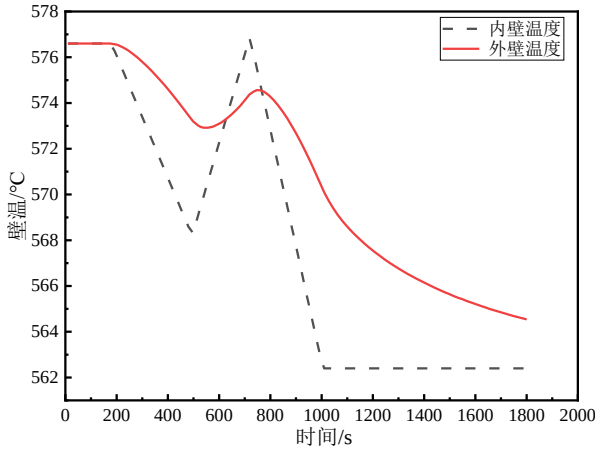
b) 40% Pe~100% Pe 过程中集箱内外壁温度变化

图 6 40% Pe~100% Pe 过程中集箱温度变化特征

Fig.6 Characteristics of the header temperature variation during the 40% Pe~100% Pe process



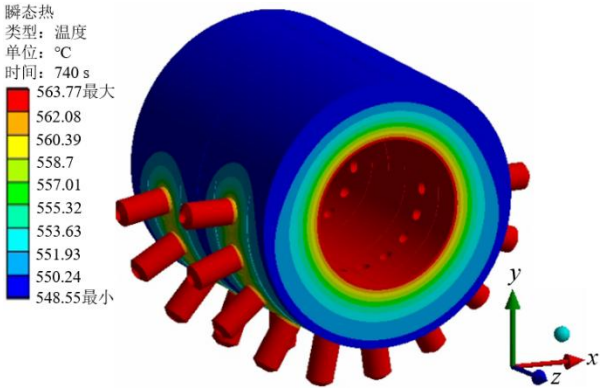
a) 100% Pe~40% Pe 过程中 498 s 时集箱的温度分布



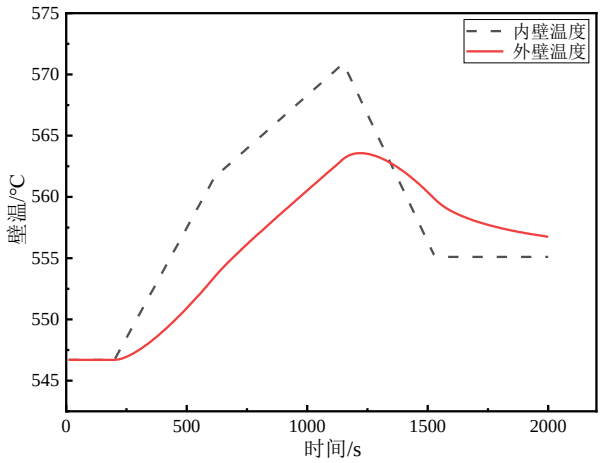
b) 100% Pe~40% Pe 过程中集箱内外壁温度变化

图 7 100% Pe~40% Pe 过程中集箱温度变化特征

Fig.7 Characteristics of the header temperature variation during the 100% Pe~40% Pe process

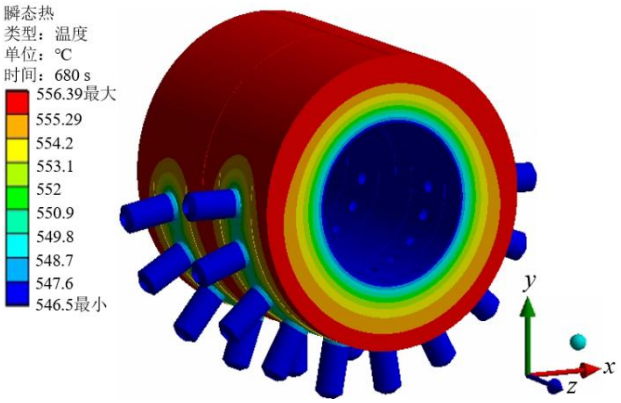


a) 15% Pe~40% Pe 过程中 740 s 时集箱的温度分布

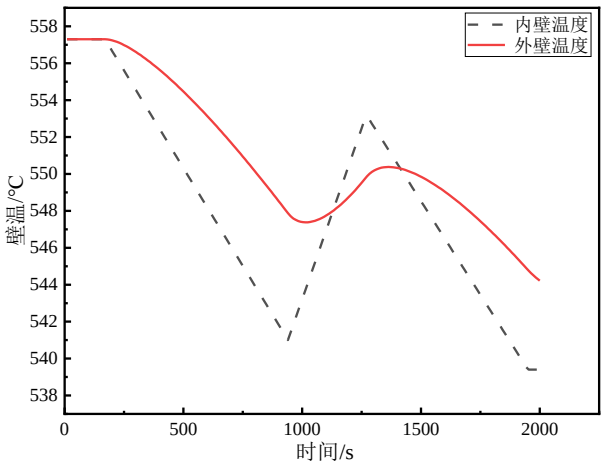


b) 15% Pe~40% Pe 过程中集箱内外壁温度变化

图 8 15% Pe~40% Pe 过程中集箱温度变化特征
Fig.8 Characteristics of the header temperature variation during the 15% Pe~40% Pe process



a) 40% Pe~15% Pe 过程中 680 s 时集箱的温度分布

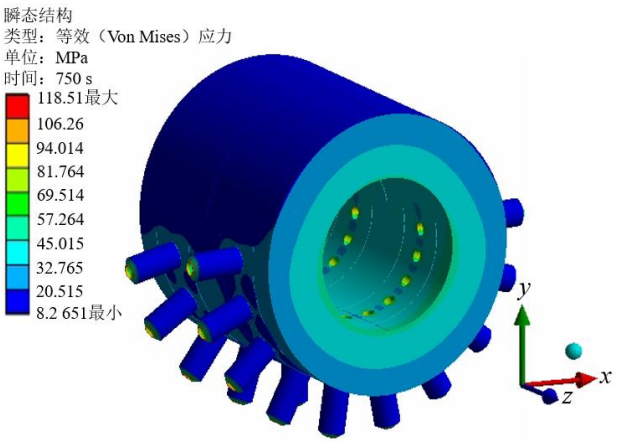


b) 40% Pe~15% Pe 过程中集箱内外壁温度变化

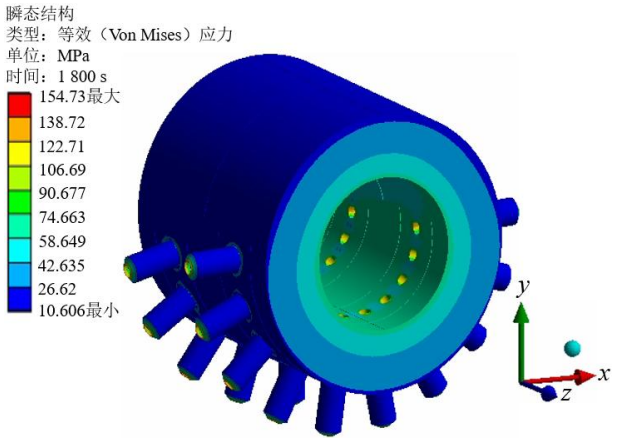
图 9 40% Pe~15% Pe 过程中集箱温度变化特征
Fig.9 Characteristics of the header temperature variation during the 40% Pe~15% Pe process

2.2 应力场分析

在 40%Pe~100%Pe 、100%Pe~40%Pe 、15%Pe~40%Pe 和 40%Pe~15%Pe 的 4 个变负荷阶段中，应力的分布情况有共同的特点，即集箱内壁的应力值大于外壁应力值，且应力值由内壁向外壁方向均匀减小，应力最大值出现在引入管与筒体的连接部分，如图 10 至图 13 所示。最大应力值在四个变负荷过程各有不同，图 14 展示了各负荷阶段中最大应力值的变化趋势，在 40%Pe~100%Pe 的升负荷过程中，最大应力值的大小和变化趋势与主蒸汽压力的变化趋势大体相同。在温差上升时，最大应力随主蒸汽压力变化的幅度有所下降，由此可以看出在 40%Pe~100%Pe 的升负荷阶段热应力对总应力产生的影响为负向影响，此阶段的应力最大值为 1 075 s 时的 151.21 MPa；在 100%Pe~40%Pe 的降负荷过程当中，最大应力值仍与主蒸汽压力大小的变化趋势大体相同，不同点是最大应力的波动趋势与内外壁温差的变化趋势相近，这表明在 100%Pe~40%Pe 的降负荷过程当中，热应力对总应力的影响为正向影响，此阶段的应力最大值为 465s 时的 161.12 MPa。在 15%Pe~40%Pe 的升负荷过程中，应力分布在一段时间内，外壁应力相较于内壁应力有所升高，而根据应力变化趋势可以看出，这一段时间的内外壁温差较大，最大应力值却下降了，且下降幅度较 40%Pe~100%Pe 的升负荷阶段更大，并且在整个阶段中，最大应力值也是随着温差的上升而减小，表明在此升负荷阶段中热应力对总应力的影响为负向影响且影响更大，此阶段的应力最大值为 1 535 s 时的 92.272 MPa；在 40%Pe~15%Pe 的降负荷阶段中，最大应力值随着温差的变化趋势相同，表明热应力在此降负荷阶段中对总应力的影响为正向影响，且影响程度较 100%Pe~40%Pe 降负荷过程更大，此阶段的应力最大值为 935s 时的 93.658 MPa。锅炉集箱的机械应力主要由内压引起，其最大方向沿着集箱的圆周方向。数值大小由内向外逐渐减小并随着蒸汽压力的变化。升负荷时机械应力增加，降负荷时机械应力降低。锅炉集箱的热应力其方向主要取决于温度梯度的方向。在锅炉升负荷时内壁温度高于外壁，降负荷时外壁温度高于内壁，进而形成径向温差。温差会产生轴向和环向的热应力，且沿壁厚分布不均并且受到变负荷速率的影响。Ansys 计算表明，总应力在集箱结构中呈现显著的不均匀分布。由于存在应力集中，总应力在连接管与筒体交界处达到峰值，是该部件最危险的位置。



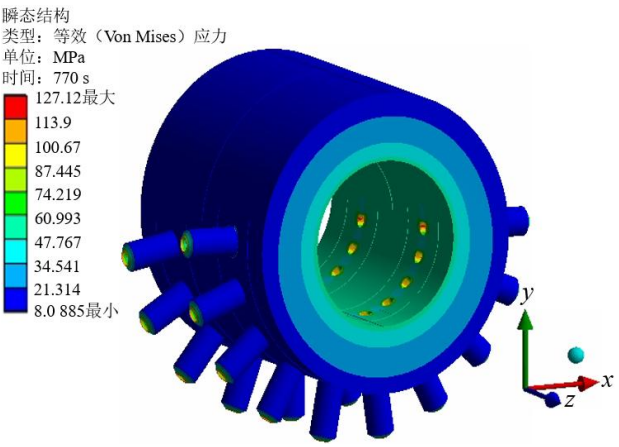
a) 40% Pe~100% Pe 过程 750 s 时集箱总应力分布



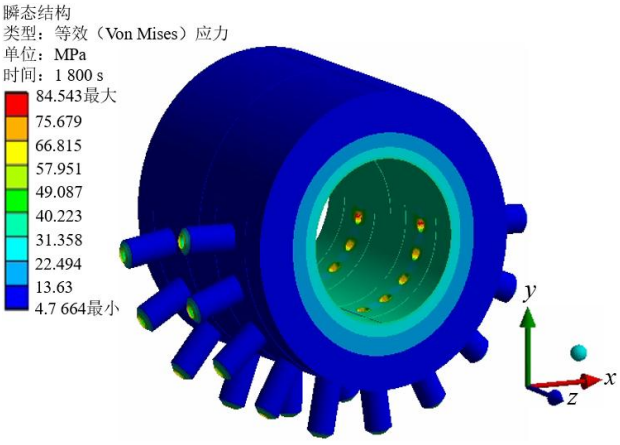
b) 40% Pe~100% Pe 过程 1 800 s 时集箱总应力分布

图 10 40% Pe~100% Pe 过程不同时刻集箱总应力分布

Fig.10 Distribution of total stress in the header at different time during the 40% Pe~100% Pe process



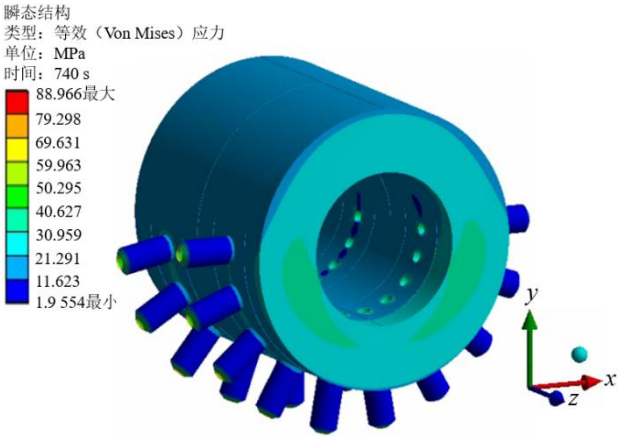
a) 100% Pe~40% Pe 过程 770 s 时集箱总应力分布



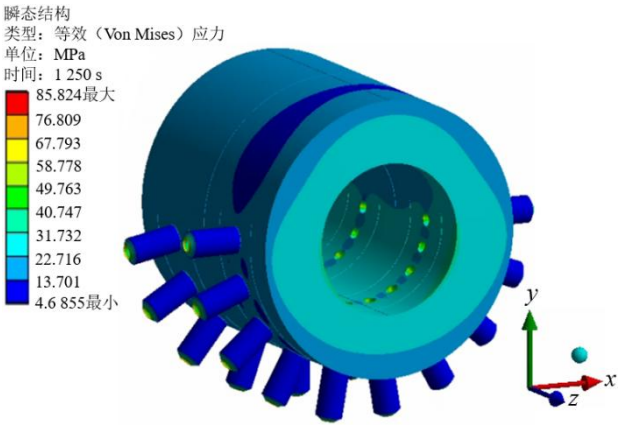
b) 100% Pe~40% Pe 过程 1 800 s 时集箱总应力分布

图 11 100% Pe~40% Pe 过程不同时刻集箱总应力分布

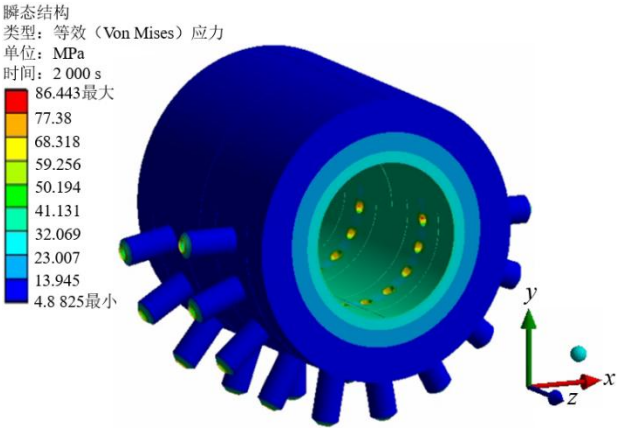
Fig.11 Distribution of total stress field in the header at different time during the 100% Pe~40% Pe process



a) 15% Pe~40% Pe 过程 740 s 时集箱总应力分布



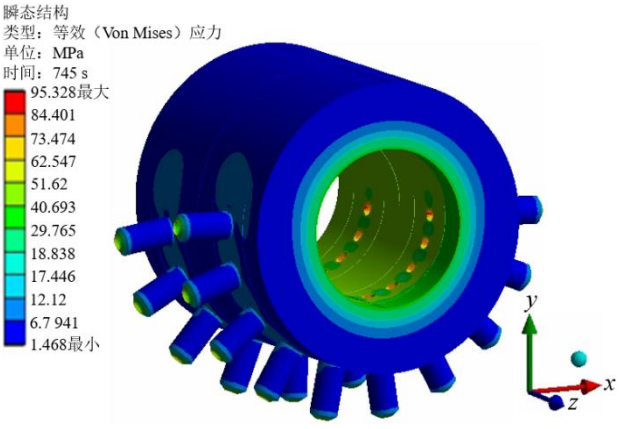
b) 15% Pe~40% Pe 过程 1 250 s 时集箱总应力分布



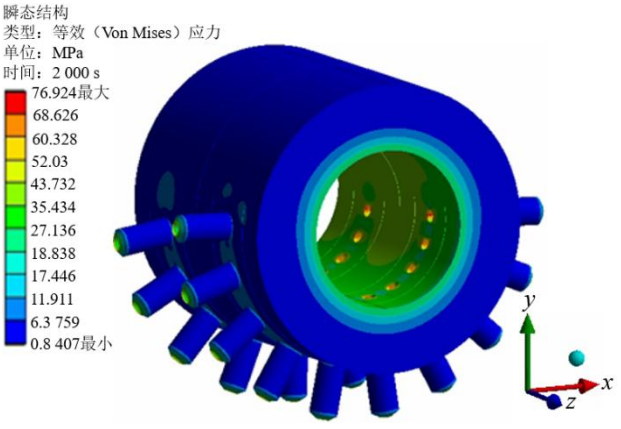
c) 15% Pe~40% Pe 过程 2 000 s 时集箱总应力分布

图 12 15% Pe~40% Pe 过程不同时刻集箱总应力分布

Fig.12 Distribution of total stress in the header at different time during the 15% Pe~40% Pe process



a) 40%Pe~15%Pe 过程 745 s 时集箱总应力分布



b) 40% Pe~15% Pe 过程 2 000 s 时集箱总应力分布

图 13 40% Pe~15% Pe 过程不同时刻集箱总应力分布

Fig.13 Distribution of total stress field in the header at different time during the 40% Pe~15% Pe process

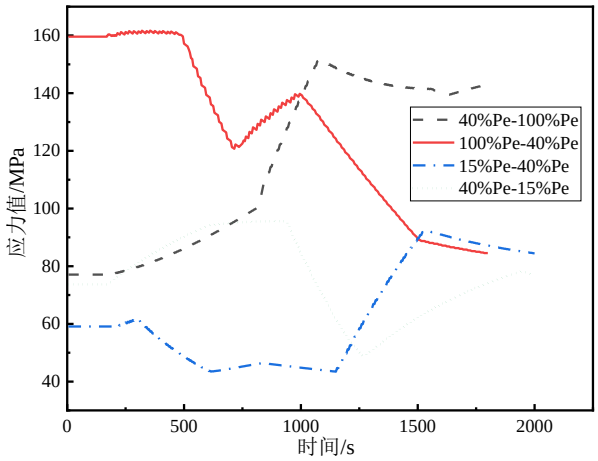


图 14 各负荷变动阶段中最大应力值的变化趋势

Fig.14 Trend of maximum stress values during various load variation stages

在 4 个变负荷过程中，末级过热器出口集箱的最大的应力值不超过 161.12 MPa。在计算寿命损耗时，先要算出设计疲劳的总应变范围，而设计疲劳总应变范围则是基于弹性应力分析的基础之上的，需要考虑应力松弛、蠕变应力及应变、泊松比等调整情况。单个循环周期的设计疲劳总应变范围为ε_t：

$$\varepsilon_t = K_v \Delta\varepsilon_{\mathrm{mod}} + K\Delta\varepsilon_c \tag{18}$$

$$K = \frac{\sigma_m + \sigma_b + \sigma_f}{\sigma_m + \sigma_b} \tag{19}$$

式中：$\Delta\varepsilon_{\mathrm{mod}}$为经过非线性修正的最大等效应变范围；$K_v$为塑性多轴和泊松比调整因子，本文取 1.06[16]；K为蠕变应力集中系数，本文取 1.180[17]；$\Delta\varepsilon_c$为蠕变增量；σ_m为膜应力；σ_b为弯曲应力，σ_f为峰值应力。

而$\Delta\varepsilon_{\mathrm{mod}}$的计算公式如下：

$$\Delta\varepsilon_{\mathrm{mod}} = K\Delta\varepsilon_{\max} \tag{20}$$

式中：$\Delta\varepsilon_{\max}$为最大等效应变范围，通过之前的模拟并分析了的结果，可以得出$\Delta\varepsilon_{\max}$在 40%Pe~100%Pe、100%Pe~40%Pe、15%Pe~40%Pe、40%Pe~15%Pe 的调负荷阶段分别为 0.067 4%、0.072 6%、0.037 2%、0.034 9%。

而$\Delta\varepsilon_c$则可用蠕变应力σ_c和应力应变曲线得到，通过之前的模拟分析结果和应力应变关系曲线，可以得出$\Delta\varepsilon_c$在 40%Pe~100%Pe、100%Pe~40%Pe、15%Pe~40%Pe、40%Pe~15%Pe 的调峰阶段分别为 0.000 072 8%、0.000 087 6%、0.000 055 2%、0.000 061 3%。

而通过以上可以得出设计疲劳总应变范围ε_t在 40%Pe~100%Pe、100%Pe~40%Pe、15%Pe~40%Pe、

40%Pe~15%Pe 阶段内分别为 0.084 4%、0.090 9%、0.046 6%、0.043 7%。

最后集箱的寿命损耗可由 Manson-Coffin 方程计算得出：

$$\frac{\left(\varepsilon_t-\Delta\varepsilon_{\max}\right)}{2}=1.049\left(2N_f\right)^{-0.779} \quad (21)$$

计算得出的疲劳周次 N_f为在 40%Pe~100%Pe、100%Pe~40%Pe、15%Pe~40%Pe、40%Pe~15%Pe 的调峰阶段分别为 89 430、81 202、191 144、207 380，相应地寿命损耗分别为 1.11×10^{-3}%、1.23×10^{-3}%、5.23×10^{-4}%、4.82×10^{-4}%。

由于疲劳损伤对集箱寿命影响是长时累积的结果。《火电厂汽轮机组运行寿命管理技术导则》（DB 52T 742—2012）规定了负荷阶跃 10%额定负荷疲劳引起的寿命分配占比。600 MW 超临界汽轮机寿命损耗累积上海汽轮机厂规定为 30%，哈尔滨汽轮机厂规定为 12%，而上海汽轮机厂规定为 24%。由于锅炉集箱目前尚缺少疲劳损伤引起的寿命占比。参照关于汽轮机疲劳损伤寿命占比，假定锅炉集箱变负荷引起的疲劳占比为 20%，按照机组 30 年运行年限，可以计算出论文中 4 种调峰过程每月的调节次数。表 6 计算了锅炉集箱按照 30 年运行年限且疲劳损伤寿命假定为 20%同变负荷工况调峰次数限定。

表 6 不同变负荷工况调峰次数限定计算

Tab.5 Calculation of peak regulation frequency limits under different variable load conditions

变负荷范围	单次疲劳寿命损耗/%	调峰次数限定/(次·月$^{-1}$)
40%Pe~100%Pe	1.11×10^{-3}	49.7
100%Pe~40%Pe	1.23×10^{-3}	45.1
15%Pe~40%Pe	5.23×10^{-4}	106.2
40%Pe~15%Pe	4.82×10^{-4}	115.2

3 结论

在机组进行变负荷的过程中，主蒸汽压力所产生的机械应力和集箱内外壁温差所产生的热应力都会影响集箱的总应力分布和大小变化情况，在高于 40%Pe 的高负荷阶段，总应力的变化趋势主要受机械应力的影响，受到热应力影响较小。在低于 40%Pe 的低负荷阶段，最大热应力对最大总应力大小和变化趋势的影响较大，且二者的变化规律相同。

热应力在对总应力的影响上，在升负荷的阶段的大部分时间里热应力与机械应力的方向相反，对总应力的影响为负向影响；而在降负荷阶段的大部分时间，热应力则是与机械应力方向相同，对总应力的影响为正向影响。

在 40%Pe~100%Pe 、100%Pe~40%Pe 、15%Pe~40%Pe、40%Pe~15%Pe 的 4 个负荷变动阶段中，最大总应力分别为 151.21、161.12、92.272、93.658 MPa，相应地单次变负荷寿命损耗为 1.11×10^{-3}%、1.23×10^{-3}%、5.23×10^{-4}%、4.82×10^{-4}%。锅炉集箱按照 30 年运行年限且疲劳损伤寿命假定为占比 20%时上述变负荷工况调峰次数限定分别为 49.7、45.1、106.2、115.2 次/月。

[参 考 文 献]

[1] 墨庆锋, 郭浩浩, 武明路, 等. 深度调峰背景下某电厂 300MW 锅炉制粉系统适应性优化研究[J]. 电气技术与经济, 2026, (01): 35-38.
Mo Q F, Guo H H, Wu M L, et al. Research on Adaptability Optimization of a 300MW Boiler Pulverizing System in a Power Plant under the Background of Deep Peak Shaving [J]. Electrical Technology and Economics, 2026, (1): 35-38

[2] 陈家伦, 卞韶帅, 黄新, 等. 热电联产机组耦合电锅炉运行模式下调峰经济性研究[J]. 发电设备, 2025, 39(06): 375-383+402.
Chen J L, Bian S S, Huang X, et al. Research on Peak Regulation Economy of Cogeneration Units Coupledwith Electric Boilers [J]. Power Generation Equipment, 2025, 39(6): 375-383+402.

[3] 蒋泽斌. 基于深度调峰运行的锅炉燃烧系统优化研究[J]. 锅炉制造, 2026, (2): 17-18.
Jiang Z B. Research on Optimization of Boiler Combustion System Based on Deep Peak Shaving Operation, 2026, (2): 17-18

[4] Yao G, Duan X, Tomanović I, et al. Research on the mechanism and energy efficiency of deep peak shaving in power station boilers[J]. Energy, 2026, 348: 140592.

[5] Xu J Y, Zhang Q C, Ye N N, et al. A review on flexible peak shaving development of coal-fired boilers in China under the carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 55: 103004.

[6] 马凯, 岳克伟, 何陆灿, 等. 超超临界二次再热机组汽温调节与灵活调峰技术研究进展[J]. 电力科技与环保, 2026, 42(01): 90-103.
Ma K, Yue K W, He L C, et al. Research progress on steam temperature regulation and flexible peak shaving technology of ultra-supercritical double reheat units [J].

Electric Power Technology and Environmental Protection, 2026, 42(01): 90-103.

[7] 王云鹤, 项学新, 孙佰仲. 电站锅炉深度调峰工况下水动力安全性研究[J]. 电力设备管理, 2026, (1): 49-51.
Wang Y H, Xiang X X, Sun B Z. Research on Hydrodynamic Safety under Deep Peak Shaving Conditions of Power Station Boilers [J]. Electric Power Equipment Management, 2026, (1): 49-51

[8] 马达夫, 马元礼, 林晓真, 等. 新一代煤电背景下机组最小出力与煤耗的分析研究[J]. 动力工程学报, 1-12 (预出版).
Ma D F, Ma Y L, Lin X Z, et al. Analytical Study of the Minimum Output and Coal Consumption of Units Under the Background of the Next-generation Coal-fired Power Generation [J]. Journal of Power Engineering, 1-12.

[9] 刘志强, 李建锋, 潘荔, 等.中国煤电机组改造升级效果分析与展望[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 1-11.
Liu Z Q, Li J F, Pan L, et al. Analysis and Prospect of Transformation and Upgrading Effects of Coal-fired Power Units in China [J]. China Electric Power, 2024, 57(7): 1-11.

[10] 寇天一, 陈辉, 方亚雄, 等. 深度调峰对锅炉高温再热器出口集箱应力及寿命耗损研究[J]. 电站系统工程, 2025, 41(5): 15-22.
Kou T Y, Chen H, Fang Y X, et al. Study on Stress and Life loss of Outlet Collector of High Temperature Reheater of Boiler by Depth Peak Regulation [J]. Power Station System Engineering, 2025, 41(5): 15-22.

[11] 项昱轩, 卫子钰 ,韩磊, 等. 灵活运行超临界循环流化床锅炉水冷壁热应力计算与疲劳寿命分析[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(6): 2269-2278.
Xiang Y X, Wei Z Y, Han L, et al. Thermal Stress Prediction and Its Fatigue Life Analysis of the Water Wall in a Flexible Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(6): 2269-2278.

[12] 于涛, 钱进, 王一桂, 等. 深度调峰运行下某 CFBB 水冷壁管热应力分析[J]. 贵州大学学报(自然), 2023, 40(1): 42-47.
Yu T, Qian J, Wang Y G, et al. Thermal - stress Analysis of Water Wall Tubes of a CFBB Under Deep Peak Shaving Operation [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2023, 40(1): 42-47.

[13] Hou Z W, Pang L P, Zhang B H, et al. Enhancing the flexibility and safety of electric-resistance heating on thick-walled pressure parts of utility boilers in coal-firedpower plants[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 67: 105828.

[14] 庞力平, 易思泽, 段立强, 等. 灵活性运行的锅炉联箱应力分析及寿命计算[J]. 动力工程学报, 2019, 39(12): 953-958.
Pang L P, Yi S Z, Duan L Q, et al. Stress Analysis and Lifetime Calculation of a Boiler Header in Flexible Operation [J]. Journal of Power Engineering, 2019, 39(12): 953-958.

[15] 李晨硕, 吴穷, 刘凤杰, 等. 间歇供汽工况下小型增压锅炉锅筒应力分析及疲劳寿命研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 147-155.
Li C S, Wu Q, Liu F J, et al. Stress Analysis and Fatigue Life Study of Small Supercharged Boiler Drum under Intermittent Steam Supply [J]. Thermal Power Engineering, 2023, 38(1): 147-155.

[16] 郑辉, 方志. 偏轴应变法测试预应力钢绞线拉力的修正[J]. 中国公路学报, 2014, 3: 80-85+91.
Zheng H, Fang Z. Correction for Tension Measurement of Prestressed Steel Strand with Slant Axial Strain Method [J]. China Journal of Highway and transport, 2014, 3: 80-85+91.

[17] Del' G D, Chebaevskii B P, Pronkin A F. Engineering method of calculating the stress concentration factor with consideration of ductility and creep[J]. Strength of Materials, 1971, 3(1): 80-83.

（责任编辑 XXX）