

30 ~ 40MW 等级超高压一次再热汽轮机设计

董洪潮 俞冠民 朱恒

(杭州中能透平机械装备股份有限公司 浙江 杭州 310018)

摘要: 随着我国经济和社会的快速发展, 节能减排、绿色环保的发展政策越来越受到重视。行业内的工厂也对汽轮机提出更高的要求, 传统的高温高压汽轮机已很难满足现在的需求。因此, 针对日趋严格的环保要求, 本文根据大功率发电汽轮机的超高压再热的设计思路, 采用先进的热力计算、通流设计及有限元分析等技术手段, 对本体结构、回热系统、通流设计进行优化设计, 开发出效率更高、热耗更低的 30 ~ 40MW 等级的超高压一次再热汽轮机, 适用于钢铁余热利用、生物质燃烧发电、垃圾焚烧发电等行业, 从而满足市场需求。

关键词: 30 ~ 40MW 汽轮机; 超高压再热; 热力计算; 通流设计; 结构优化

1 汽轮机总体方案

本系列机组采用一次中间再热、单缸单轴单排汽、6 级回热系统、冲动式、凝汽式汽轮机组, 配汽方式为提板式调阀, 转速为 3000r/min, 与发电机刚性直连。型号为 N30(-40)-13.24 MPa/535℃ /535℃。

本系列机组结构特点如下:

(1) 汽轮机为单缸, 再热温度同主汽温度, 为了避免热应力过大, 舍弃传统的机头进汽机尾排汽的结构, 采用中间进汽、两头排汽的结构, 蒸汽流向示意图如图 1 所示。

(2) 为了避免接缸处漏气, 汽缸只分前、后缸, 取消中缸结构, 接缸处在机尾位置, 缸内压力接近大气压。

(3) 进汽主汽门和调阀做成一体式结构, 焊接在汽缸上; 再热速关阀和调阀也是一体式阀体, 放置于汽轮机前部, 再热蒸汽通过再热联合阀组后通过管

道从汽缸底部进入汽缸做功。

(4) 汽轮机轴系为双支点方式, 单根整锻转子, 推力轴承和前径向轴承安装在前轴承座内, 后径向轴承安装于后轴承座内。

综上所述, 本系列机组结构简单、紧凑。汽轮机跨距为 5.6 ~ 6.0m, 占地面积小, 外形布置图如图 2 所示。

2 热力系统设计

热力系统根据超高压再热机组特点进行了优化, 兼顾了高温部件强度以及再热压力与给水温度、排汽温度、排汽湿度、容积流量的影响, 保证热力系统成熟可靠、高效运行。

2.1 回热系统

本系列机组回热系统设计为 6 级: 2 级高压加热器 + 1 级高压除氧器 + 3 级低压加热器, 给水温度 240℃, 2 级高加分别从高压段中部和高压段排汽抽汽, 除氧和低加全部从低压段抽汽。高加、除氧和三段低加在抽汽管道上都设有速关和逆止功能的阀门。

2.2 再热压力

再热压力的确定是影响热力循环的关键因素之一。目前对一次再热机组的最优再热压力的选取已经有较为成熟的结论, 在再热温度等于主汽温度的前提下, 最佳再热压力约为主汽压力的 18% ~ 26%, 当再热前有回热抽汽时, 取 18% ~ 22%; 当再热前无回热抽汽时, 取 22% ~ 26%。本系列机组再热前有回热抽汽, 因此取 18% ~ 22%, 即 2.38MPa(a) ~ 2.91MPa(a)。

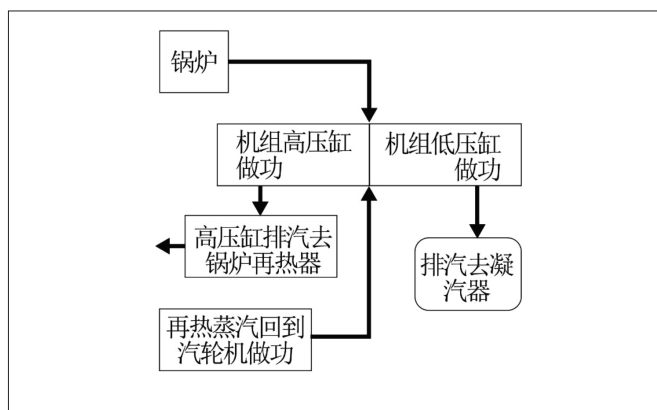


图 1 蒸汽流向示意图

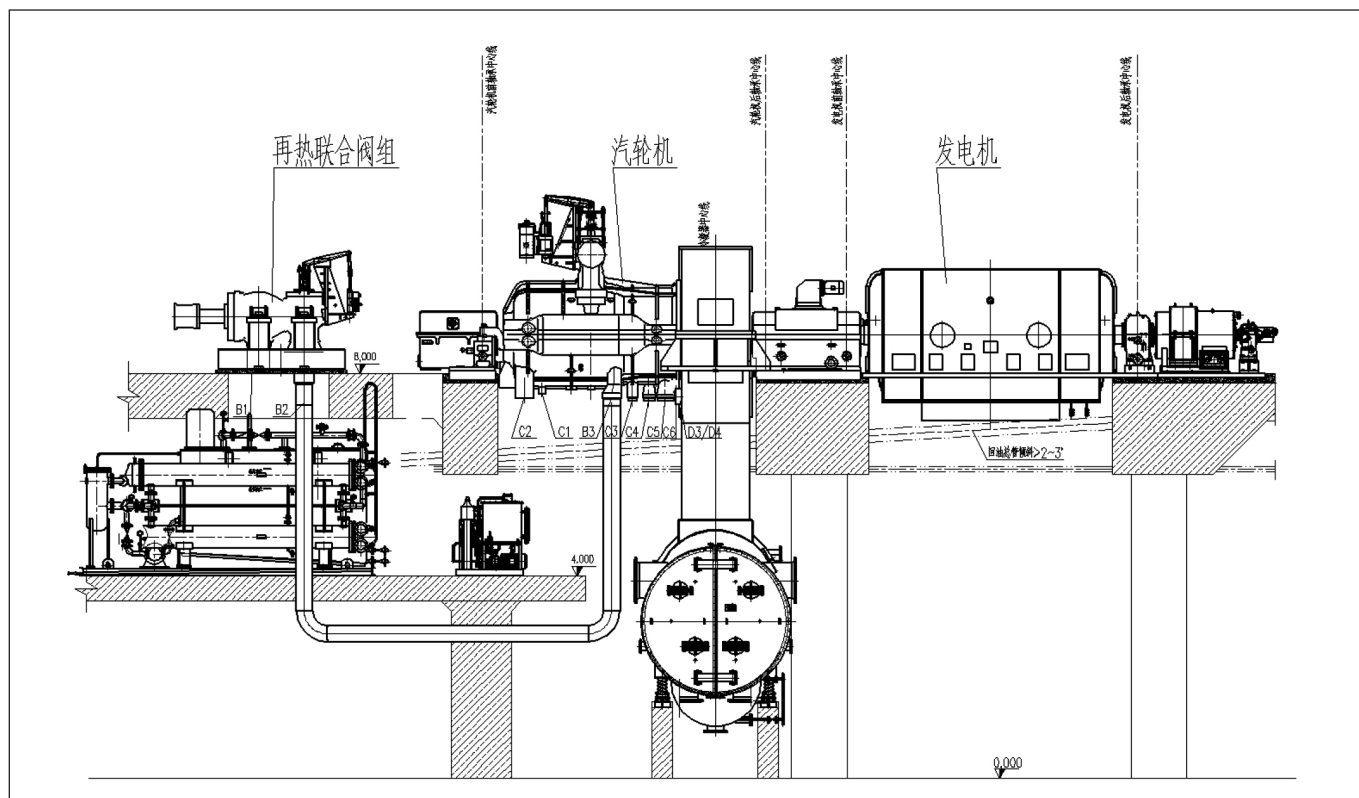


图2 外形布置图

2.3 蒸汽旁路系统

本系列机组设有2段蒸汽旁路系统。一段旁路为主汽至高压段排汽管的旁路，中间设一级减温减压装置；二段旁路为再热蒸汽管道至冷凝器的旁路，中间设两级减温减压装置。蒸汽旁路作用如下：

(1) 紧急停机时，及时疏通主汽至冷凝器，避免危险发生；回收冷凝水，同时能停机不停炉。

(2) 开机时，可通过一段旁路将主汽减压后送至再热锅炉，避免再热锅炉干烧过热。同时对蒸汽达到稳压的作用。

3 通流设计

本系列机组汽轮机通流设计^[1]中，通过提高通流部件的热力效率和降低通流部分损失来提高级内效率。

提高通流部件的热力效率有如下几种措施：

- (1) 优化速比、反动度；
- (2) 采用小根径、多级数；
- (3) 采用高效平衡叶型和尾部加载叶型，可提高级效率，不同叶型的效率对比如图3所示；
- (4) 三元流场设计弯扭联合成型技术、斜置动静叶技术、可控涡流技术、子午通道优化设计。

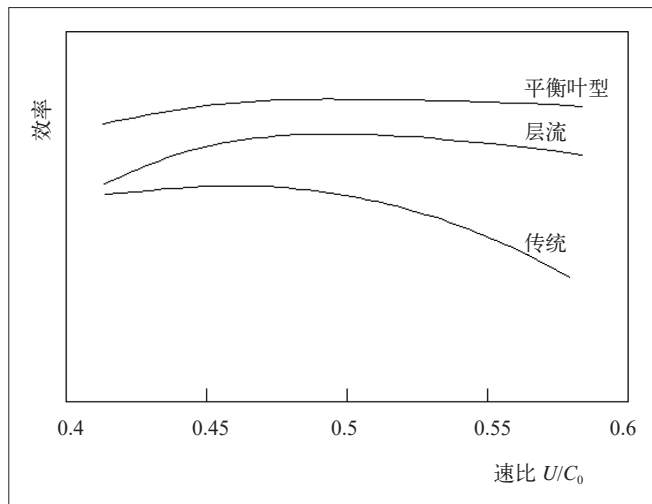


图3 不同叶型的效率对比

三维通流设计如图4所示。

通流部分损失包括叶型损失、叶高损失（端部损失）、扇形损失、叶轮摩擦损失、部分进汽损失、漏气损失、余速损失、湿气损失、其他损失。

根据设计和实验统计，现有汽轮机的各种损失占比如表1和表2所示。

从表1、表2可以看出，叶型损失、端部损失、漏气损失占总损失的80%~90%，因此减少叶型损失、

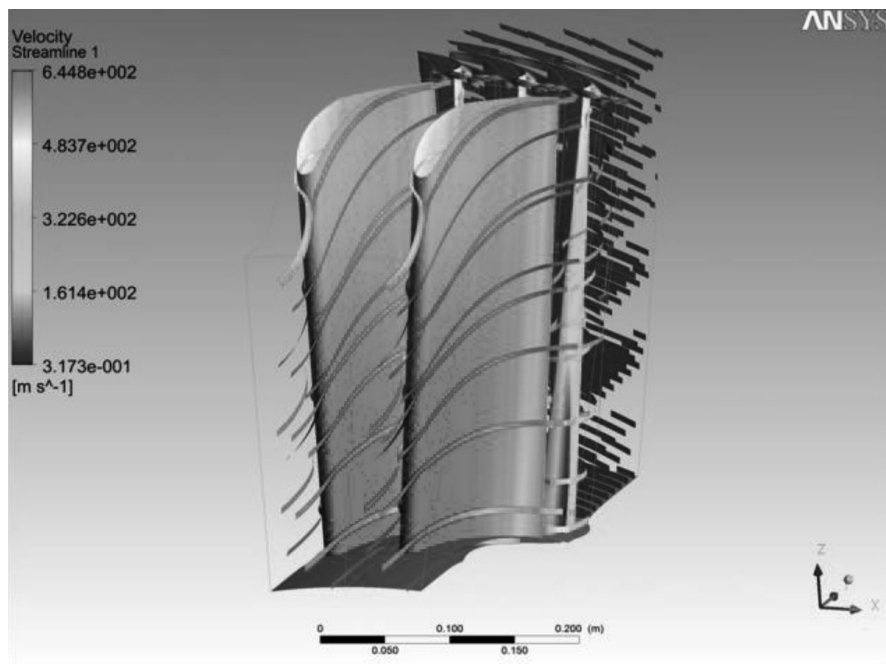


图4 三维通流设计

表1 高压级典型级内损失分类及比例

损失分类	漏气损失	动叶端部损失	静叶端部损失	动叶型线损失	静叶型线损失	鼓风摩擦损失	其他损失	扇形损失	湿气损失
比例 (%)	20	18	18	15	15	7	5	2	0

表2 低压级典型级内损失分类及比例

损失分类	漏气损失	动叶端部损失	静叶端部损失	动叶型线损失	静叶型线损失	鼓风摩擦损失	其他损失	扇形损失	湿气损失
比例 (%)	24	14	14	17	17	1	4	1	8

端部损失、漏气损失可有效提高级效率，对应措施有：

- (1) 采用高效平衡叶型和尾部加载叶型。
- (2) 适当提高绝对叶高和相对叶高，叶高高于相对极限高度时，可有效降低端部损失。
- (3) 采用斜通流流道设计，契合蒸汽膨胀的流道。
- (4) 因为考虑到机组启动时，汽缸和转子间膨胀量不同，并且需要不发生干涉，所以隔板和动叶间隙会较大，但在本文中，将两者的轴向间隙转换成径向间隙考虑，即动叶叶顶和隔板汽封环间隙、隔板出口下端和转子凸台间隙，单级通流剖视图如图5所示，将上述间隙减小至0.9 ~ 1.1mm，可减少漏气损失。
- (5) 高压段隔板汽封采用双蜂窝式汽封环，蜂窝结构的汽封封汽效果显著好于迷宫式汽封，能极大

减少级间漏气损失。

(6) 优化各级叶轮平衡孔，减少漏气的同时减少对主汽的扰动。

(7) 中间进汽两侧排汽的结构可使前汽封的工作压力大大降低，即前汽封的工作压力 < 3MPa(a)，再加上优化后的汽封封汽系统、汽封结构，使得前汽封漏气量极大减少。

4 本体设计

机组的纵剖面如图6所示。

4.1 汽缸

本系列汽缸为单缸结构，缸体中间上部进主蒸汽，下部进再热后蒸汽，机头为高压段排汽，机尾下排汽进入冷凝器。汽缸由水平剖分的前、后缸两部分组成为双层内外缸结构，具有以下优点：

- (1) 前汽封处蒸汽压力大大减小，减少前汽封结构长度，大大减少了出现漏气的风险；
- (2) 避免再热蒸汽进汽处缸体存在较大热应力；
- (3) 蒸汽压力逐级分层，减少各腔室间的压力差，增强汽缸密封性；
- (4) 结构紧凑，同时兼顾回热抽汽口铸造的便利性。

4.2 调节汽阀

调节汽阀进汽室与前汽缸分别铸造，通过焊接成为一体，进汽室是一个横向筒形腔室，位于前汽缸上部，汽轮机的速关阀（也称主汽门）位于进汽室的两侧（单侧进汽时为左侧或右侧）。进汽室的上端联接蒸汽室盖，汽轮机的调节汽阀连杆固定在蒸汽室盖上。调节汽阀所用的油动机，固定在进汽室前端。新蒸汽通过速关阀后，进入调节汽阀进汽室，再通过由油动机作为动力的提板式调节汽阀配套的各个阀碟和阀座孔，分别进入各个蒸汽腔室，而这些相互隔离的蒸汽腔室（也就是喷嘴室）外壁用螺栓固定着对应的喷嘴组。

4.3 转子

本机采用整锻+套装的组合式转子，末4级叶轮及联轴器按照合适的过盈值在热态时套装在转子上。

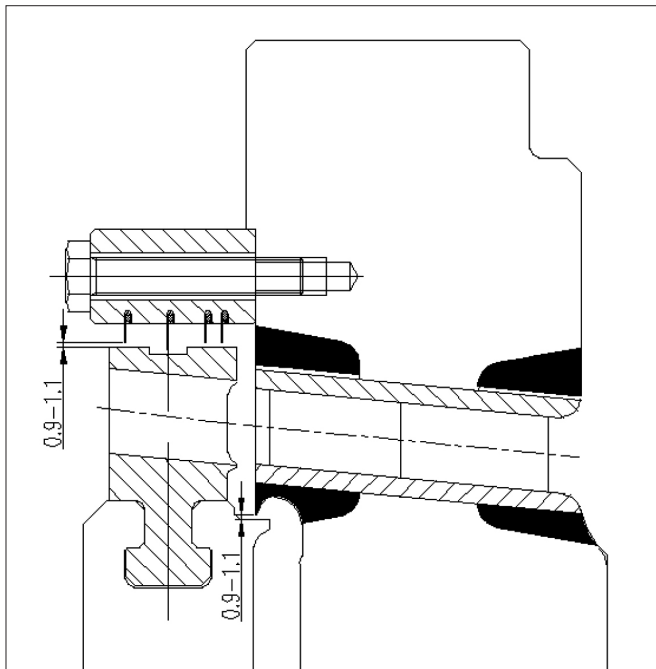


图5 单级通流剖视图

本机型共有1个单列调节级与22个压力级，其末级叶片还通过在适当的区域通过镀硬铬或者激光处理来防止湿蒸汽的水蚀。转子通过刚性联轴器与发电机转子连接。

由于结构特殊，高压段通流部分顺汽流方向为逆时针旋转，低压段通流为顺时针。

转子前端装有危急保安器、主油泵叶轮等部套。在安装合适的监测探头后，可以在前轴承座内监测转子的轴位移，在后轴承座内监测转子的相对膨胀。同时，可以分别在前、后轴承座上监测前、后轴承的瓦温及轴振动。

5 有限元分析

5.1 内缸有限元分析

本体部件工作在高温、超高压的严酷环境，因此汽缸的气密性需要重点考虑。这里选取工作环境最恶劣的内缸进行有限元气密性分析^[2,3]，如图7~图10所示。

通过多组数据的分析和比对，通过优化内缸结构布置、筋板位置、中分面螺栓布置、汽封槽位置、中分面泄压孔布置等措施，内缸的气密性满足规范要求，满足额定压力1.5倍的水压试验要求。

5.2 排缸有限元分析

汽缸模型与排汽缸总变形有限元分析图如图11、图12所示。

通过有限元分析可以表明：

- (1) 排缸总变形量较小，满足设计要求；
- (2) 排缸垂直方向变形量较小，满足设计要求
- (3) 排缸和座驾接触状态较好，接触应力较小，

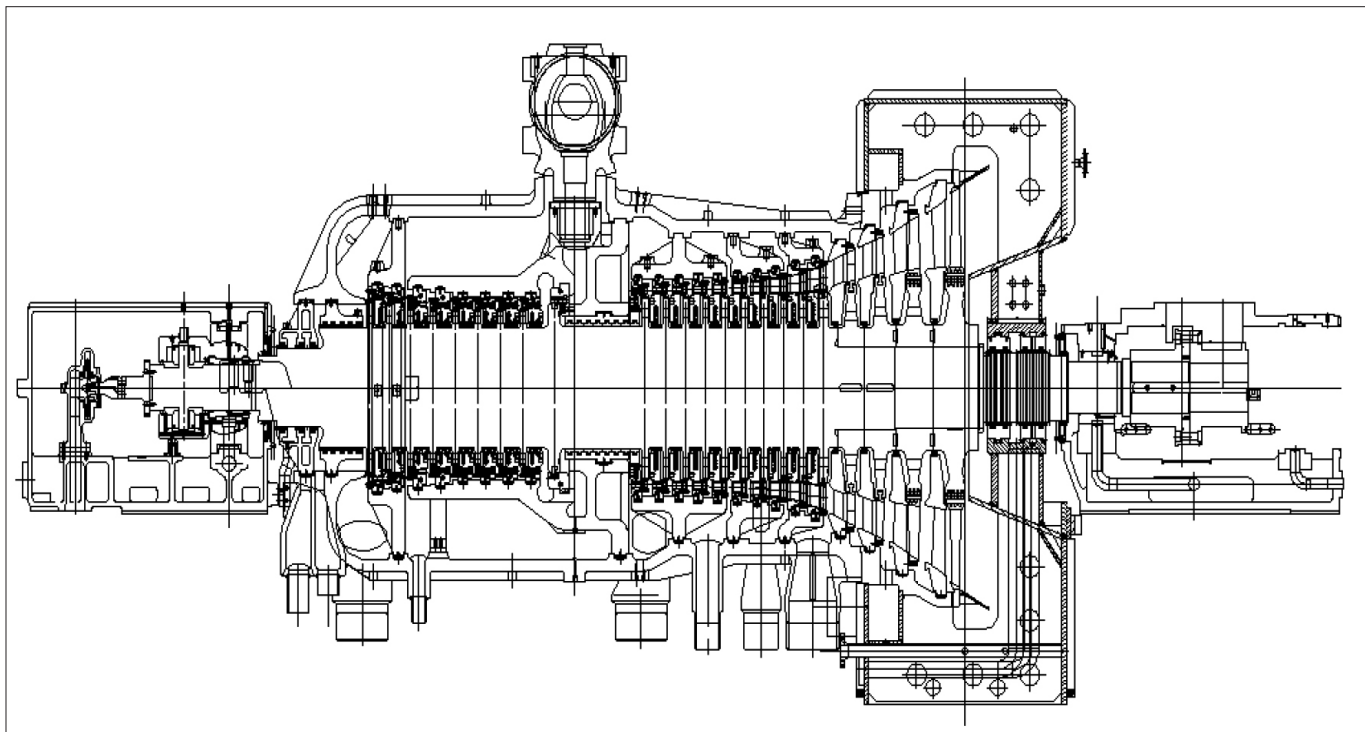


图6 机组纵剖图

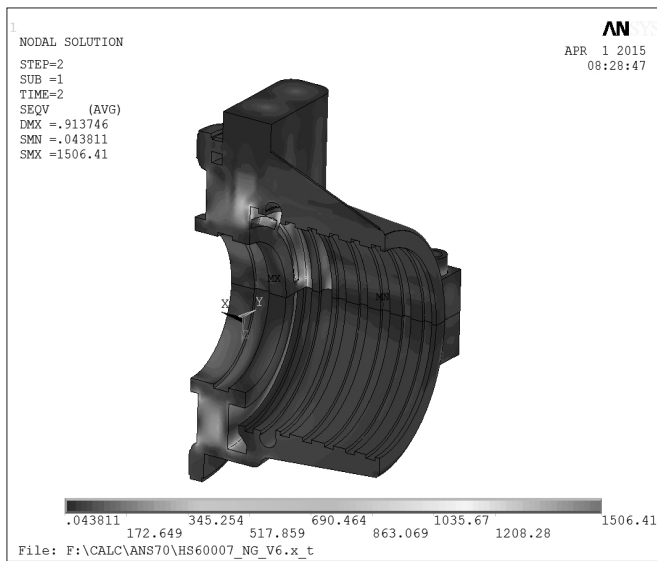


图7 前汽缸模型

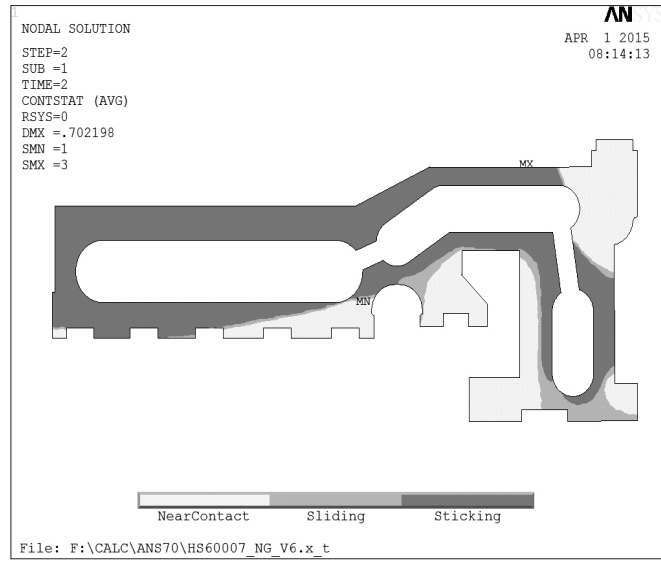


图10 前汽缸中分面接触状态

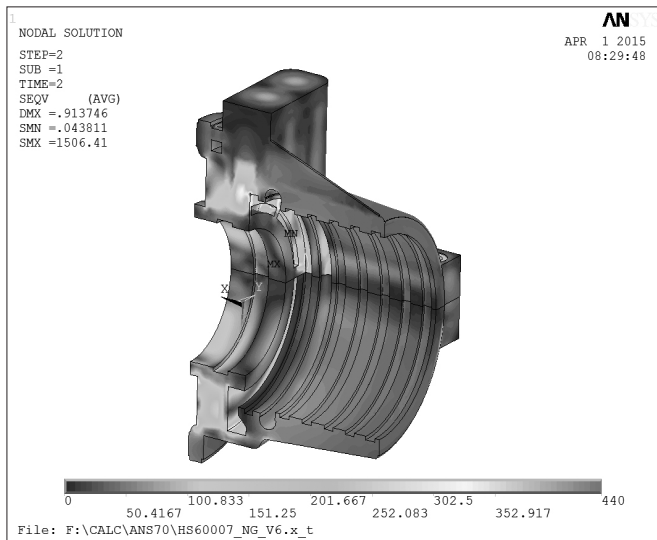


图8 前汽缸变形程度

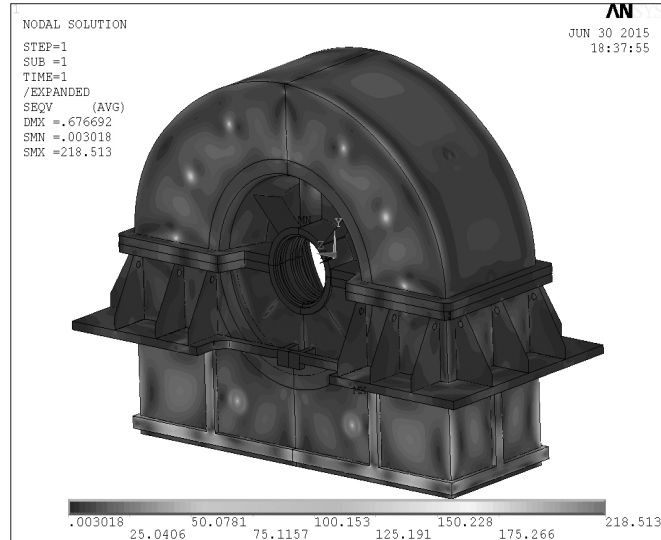


图11 排汽缸模型

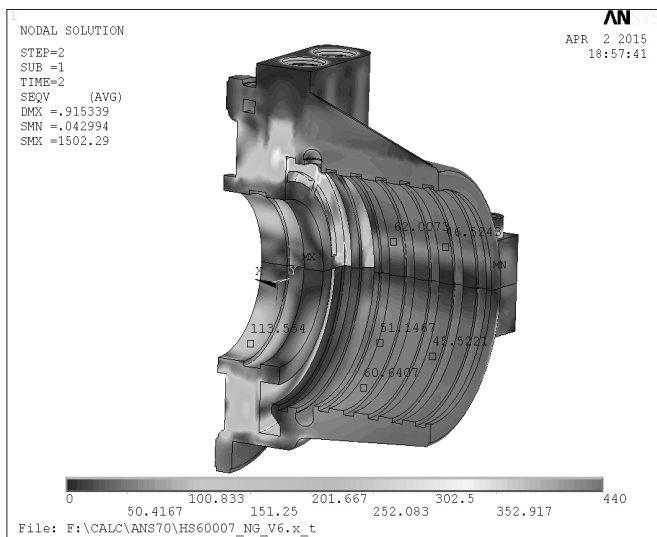


图9 去除水压阀板下的变形程度

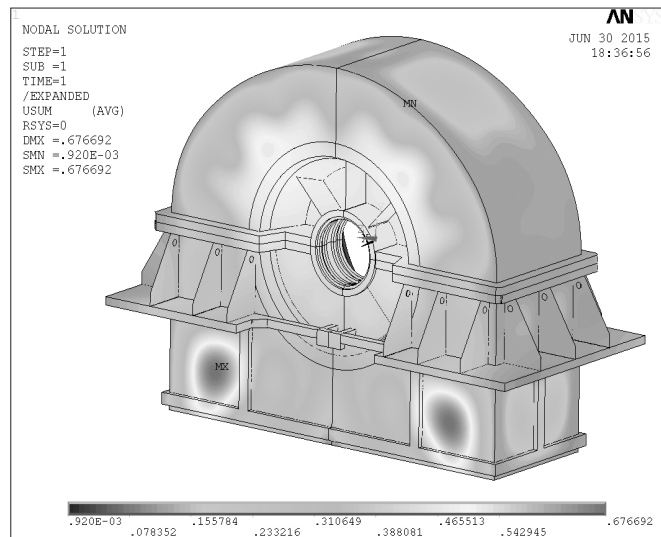


图12 排汽缸总变形

满足设计要求。

6 结语

综上所述,新开发的超高压一次再热机组采用先进的技术手段,应用最新研究成果,对热力系统、通流技术、本体结构等进行了研究,与传统高温高压机组相比,热耗减少9%~12%。系统简单,结构紧凑,满足工业对汽机更高效率的要求。

当前,该机型已成功投运的项目有:山东某生物质35MW发电项目、河北某钢铁50MW煤气发电项目、吉林辽源某钢铁65MW发电项目等,现场机组

运行良好,热耗满足设计要求。

参考文献:

- [1] 翦天聪. 汽轮机原理 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 224-321, 390-395.
- [2] 丁有宇. 汽轮机强度计算手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 王勛成, 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.

作者简介: 董洪潮 (1966.10-), 男, 汉族, 浙江杭州人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 机械设计。

