

# 神华 1750 t/a 褐煤提质干燥器的强度校核计算

李君, 顾金, 郭屹

(北京低碳清洁能源研究所, 北京 102211)

**摘要:**为判断神华呼伦贝尔 1750 t/a 褐煤提质关键设备干燥器的安全可靠,根据干燥器工作状况及工艺条件,分析了褐煤提质设备干燥器的受力特点,研究干燥器在设备自重、水平地震载荷、外部机械载荷、设备所处高温状况及煤粉重力载荷作用下的应力分布及变形状况,确定关键部位的弯曲应力及薄膜应力。结果表明,干燥器的结构变形主要由热膨胀引起,温度载荷引起的应力较严重,机械载荷引起的变形只占结构变形的极小部分。干燥器一次总体薄膜应力为 61.70 MPa,一次总体最大薄膜应力和一次弯曲应力总和为 260.40 MPa,满足材料的强度设计许用要求,证明了设计方案的可行性。确定干燥器轴向及径向的最大位移量分别为 44.60 和 29.50 mm,设计时需考虑水封槽的宽度,导流板、刮板与鱼鳞板的距离,并控制刮板高度。

**关键词:**褐煤提质;干燥器;强度校核;结构变形

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)05-0014-05

## Strength analysis of dryer of Shenhua 1750 t/a lignite upgrading equipment

LI Jun, GU Qian, GUO Yi

(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

**Abstract:** Based on Shenhua Hulunbeier 1750 t/a low rank coal upgrading process package development project, the strength of dryer, the critical equipment, was analyzed. According to the operation and process conditions, the load of the dryer was analyzed, and the stress and displacement distribution under itself gravity, horizontal seism load, external mechanical load, high temperature condition and coal gravity were studied. The bending stress and film stress of key location of the dryer were calculated and determined the safety factor of the critical equipment. The results showed that thermal expansion led to structure deformation, the stress caused by temperature load was maximal, while the influence of mechanical load was minimal. The primary general membrane stress of dry was 61.70 MPa, the sum of primary general membrane stress and primary bending stress was 260.40 MPa. The design scheme met the material allowable requirements and the design scheme was feasibility. The max axial and radial displacement of the dryer was 44.60, 29.50 mm. The width of water seal tank, guide plate, scraper height, distance between scraper and cowl flap should be considered at designtime.

**Key words:** lignite upgrading; dryer; strength check; structure deformation

## 0 引 言

褐煤具有高水分、高挥发分、活性强、易自燃、发热量低等特征,难以长途运输或储存,需就地加工提质<sup>[1-4]</sup>。褐煤提质技术是针对褐煤特征开发的相关工艺,主要包括脱水、热分解、冷却、钝化等步骤,提质后煤的组成和结构发生显著变化,水分明显降低,

孔结构发生变化,发热量大幅度提高,既可防止煤炭自燃,便于运输和贮存,又有利于发电、造气、化工等使用<sup>[5-6]</sup>。褐煤提质技术是低阶煤利用的热点和难点问题。褐煤提质过程涉及到大量机械设备,干燥器是褐煤提质过程中的第一个关键设备。若干燥器的设计达不到工艺和机械要求,会影响到整个褐煤提质工艺,而其中干燥器的强度校核设计又是整个

收稿日期:2014-10-09;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.05.003

基金项目:神华集团科技创新基金资助项目(ST930012SH01)

作者简介:李君(1980—),男,江苏大丰人,高级工程师,博士,从事褐煤提质、煤气化及甲烷化等方面研究工作。E-mail:lijun@nicenergy.com

引用格式:李君,顾金,郭屹.神华 1750 t/a 褐煤提质干燥器的强度校核计算[J].洁净煤技术,2015,21(5):14-18.

LI Jun, GU Qian, GUO Yi. Strength analysis of dryer of Shenhua 1750 t/a lignite upgrading equipment[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 14-18.

设备设计中的重中之重<sup>[7]</sup>。高家驹<sup>[8]</sup>指出对于高压干燥器既可采用抗爆准则进行开发设计,也可采用泄爆准则进行开发设计。王兰生等<sup>[9]</sup>通过简化建立理论模型研究了 DN1200 圆盘干燥器的强度及功率等。随着有限元技术及计算机的发展,人们开始运用有限元对相关设备进行强度校核和设计,张智亮等<sup>[10]</sup>采用有限单元法基于 ANSYS 软件对加氢反应器裙座支撑区的应力进行评定,并优化了结构形式。笔者根据褐煤提质关键设备干燥器的工程设计,建立相关的有限元分析模型,根据工况要求进行相关强度校核计算,确定干燥器的轴向及径向位移,为水封槽及导流板的设计提供基础。

## 1 模型简化

干燥器是褐煤的干燥装置。原料仓中的褐煤通过进料管进入干燥器。干燥器旋转托盘安装在反应器内部,在驱动装置的驱动下保持匀速旋转,褐煤随旋转托盘旋转。褐煤经过固定在壳体上的导流板后向旋转托盘内环移动,褐煤从位于旋转托盘外环的进料口移至中心下料口排出。

褐煤在高温气体中被干燥,因此干燥器内部始终保持高温状态。旋转托盘是用耐高温钢材制作的钢结构桁架,能够在高温工况下长期工作;干燥器壳体内壁上有耐火材料,起到保温和隔热的作用。旋转托盘的支承采用中心回转轴承的形式。整套驱动装置安装在反应器外,旋转托盘与干燥器固定壳体之间通过水封槽进行密封,防止反应高温气体从反应器中泄漏。

整个干燥器忽略进料装置、出气口、水封、外部支撑桁架、干燥器顶棚、回转轴承等结构,运用 Solidworks 三维绘图软件建立相关三维模型,进而导入 ABAQUS 有限元分析软件进行有限元分析计算,简化后的几何模型如图 1 所示。

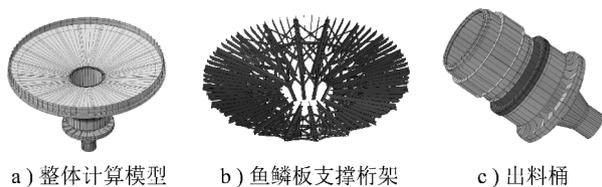


图 1 干燥器几何模型

为了简化计算步骤,直接采用温度-位移耦合算法,使用 Thermal-Displacement couple 载荷步进行计算,有限元模型中网格也采用热力耦合单元。

整个干燥器结构由多个原构件组装而成,分别

对各个原构件进行网格划分,采用 C3D8RT、C3D6T2 种实体单元及 S4RT 壳单元。(对于中间桁架部分由于其温度为给定边界条件,不考虑厚度方向的热传导,故简化为壳单元以减小计算量,周围筒体、内环及外环等部件由于需要考虑对流及厚度方向热传导,故使用实体单元)。网格划分时,对于实体部分运用结构化 structure 方式用 C3DR8T 单元进行网格划分,特别复杂部件采用 C3D6T 单元进行扫描 sweep 划分。壳模型采用四边形单元为主体的自由方式划分,划分后的网格模型如图 2 所示。

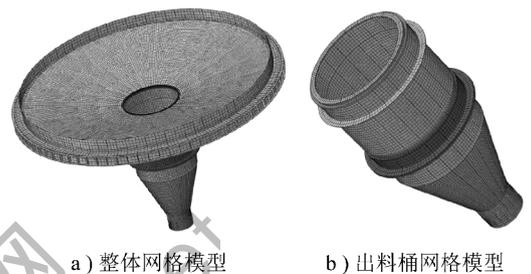


图 2 有限元网格模型

## 2 材料参数及边界条件

### 2.1 材料属性

所有材料均选用 304(0Cr18Ni9) 不锈钢,密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比为 0.3。金属材料属性见表 1,耐火材料的热属性<sup>[11]</sup>见表 2。

表 1 金属材料属性

温度/ ℃	弹性模 量/GPa	温度/ ℃	导热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	温度/ ℃	线膨胀系 数/ $10^{-6}$
20	204	20	13.8	20~100	16.54
93	197	93	14.7	200	17.25
204	191	204	16.7	300	17.61
316	183	427	20.9	400	17.99
482	163	649	24.7	500	18.34

表 2 耐火材料的热属性

温度/℃	导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	
	浇注料	耐火毡
20	1.22	0.16
1500	1.63	0.16

### 2.2 边界条件

几何边界条件:整个干燥器的外环约束,仅允许径向膨胀。温度边界条件:结构件整体初始温度  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ,工作时干燥器下部锥体外侧暴露在  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  热空气

中,筒体内部的固体物料温度为 121 ℃,干燥器进气温度及鱼鳞板上部的气体温度均为 368 ℃。

干燥器的处理能力为 1750 t/a,运行时间按 7200 h/a 计算。干燥器正常运转时鱼鳞板上物料质量为 38 t,均匀分布在鱼鳞板表面。重力加速度  $g$  为  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,水平地震载荷为  $0.04 \text{ g}$ 。干燥器运转过程中,驱动装置传递的扭矩为  $1.28 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 计算工况

整个计算过程分 2 步进行。工况 1:计算整个设备在机械载荷作用下的受力状况和变形;工况 2:考虑温度载荷作用下引起的应力及变形。

1) 工况 1。施加重力加速度;施加水平地震波;施加扭矩,通过干燥器外环的 5 个驱动装置施加扭矩。鱼鳞板外侧约束,模拟卡死工况,即在鱼鳞板外侧任意位置限制其转动自由度,具体如图 3 所示。

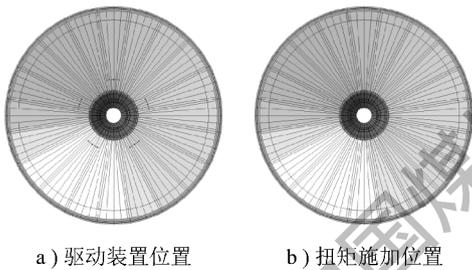


图3 扭矩加载示意

2) 工况 2。根据工艺方案,温度分布为:初始结构温度 23 ℃,下部锥体外侧气体温度 40 ℃,对流换热系数  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;冷却水温度 40 ℃,对流系数  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;炉体内部气体温度 121 ℃,对流系数  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;其他区域气体温度 368 ℃,对流系数  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

#### 3.2 计算结果

##### 1) 工况 1 计算结果

工况 1 下  $x, z$  方向 ( $U_x, U_z$ ) 的位移分布和应力分布分别如图 4、图 5 所示。

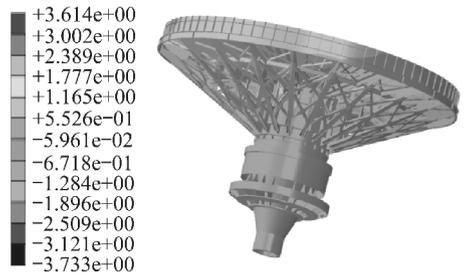
按照 ASME VIII Division 2<sup>[12]</sup> 的计算步骤,对出料桶在重力、水平地震及扭矩作用下进行应力线性化分析:

$$P_L = 47.20 \text{ MPa} < S_m$$

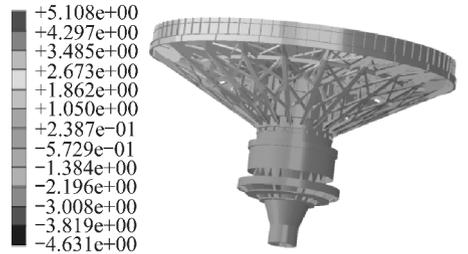
$$P_L + P_b = 76.44 \text{ MPa} < 1.5S_m$$

$$P_m = 31.40 \text{ MPa} < S_m$$

$$P_m + P_b = 68.64 \text{ MPa} < 1.5S_m$$

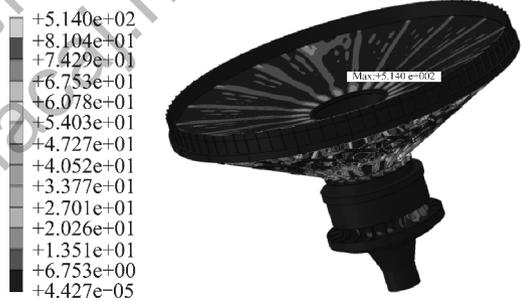


a)  $U_x$  径向位移分布(最大位移 3.7 mm)

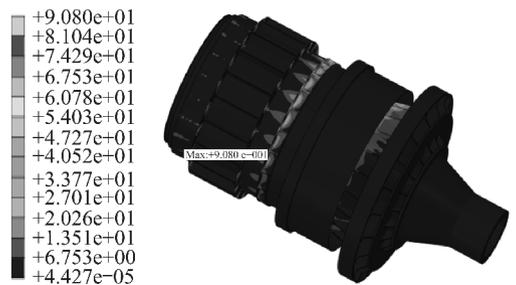


b)  $U_z$  轴向位移分布(最大位移 5.1 mm)

图4 工况 1 下的位移分布



a) Tresca 应力分布



b) 出料桶 Tresca 应力分布

图5 工况 1 下的应力分布

式中,  $P_L$  为出料桶局部一次最大薄膜应力, MPa;  $S_m$  为材料的许用应力, 为 81.04 MPa;  $P_b$  为一次弯曲应力, MPa;  $P_m$  为出料桶一次总体最大薄膜应力, MPa。

##### 2) 工况 2 计算结果

干燥器温度分布云图如图 6 所示。工况 2 下的位移分布和应力分布分别如图 7、图 8 所示。

按照 ASME VIII Division 2<sup>[12]</sup> 对出料桶在重力、

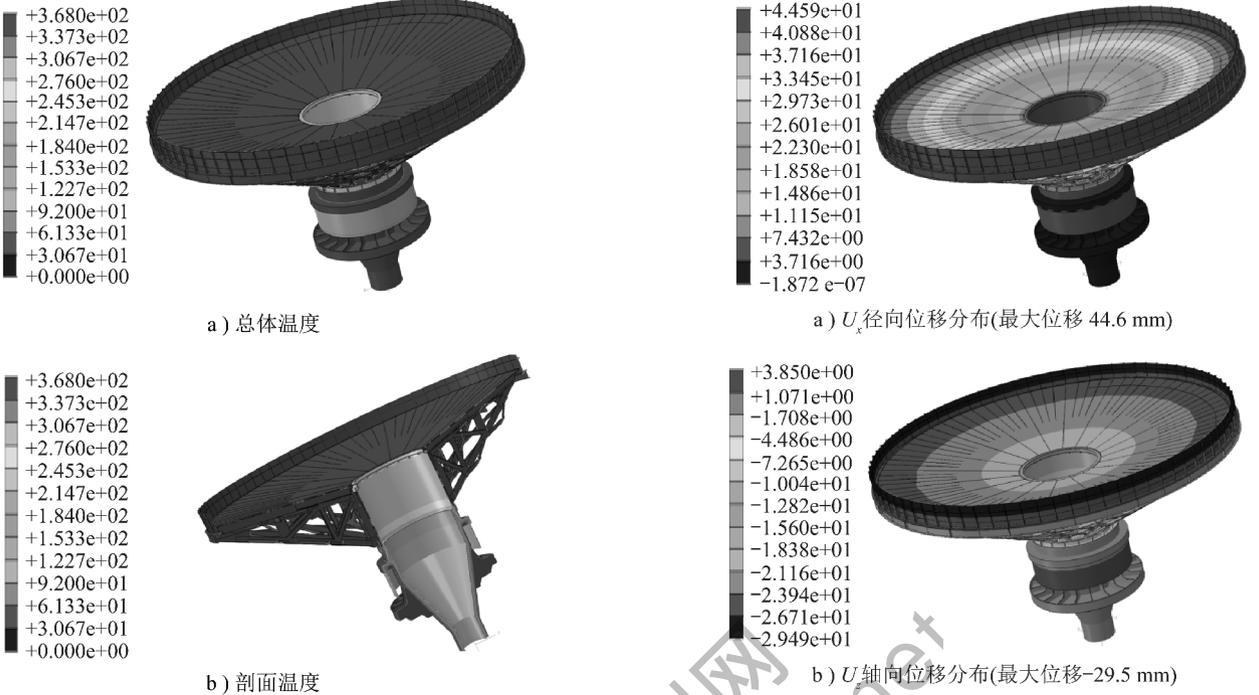


图 6 干燥器温度分布云图

图 7 工况 2 下的位移分布



图 8 工况 2 下的应力分布

水平地震、扭矩及温度载荷作用下进行应力线性化分析:

$$P_m = 61.70 \text{ MPa} < S_m$$

$$P_m + P_b = 260.40 \text{ MPa} > 1.5 S_m$$

从计算结果看,不考虑局部应力集中,温度载荷

主要是筒体水封处温度梯度较大,由于几何限制及热膨胀不均匀而产生较大应力,如需减少筒体应力,应优化结构使得此处区域温度过渡尽量平缓,从而降低应力水平。出料桶水封处应力计算云图如图 9 所示。

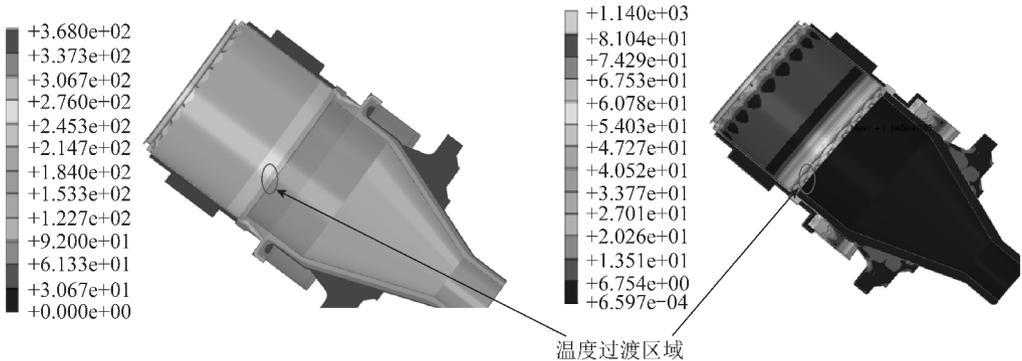


图 9 出料桶水封处应力计算云图

干燥器受机械载荷和温度载荷作用下的位移及应力见表3。由表3可知,结构的变形主要由热膨

胀引起,温度载荷引起的应力较严重,机械载荷引起的变形只占结构变形的极小部分。

表3 干燥器各种工况下的位移和应力

项目	$U_x/\text{mm}$	$U_z/\text{mm}$	$P_L/\text{MPa}$	$(P_L+P_b)/\text{MPa}$	$P_m/\text{MPa}$	$(P_m+P_b)/\text{MPa}$
机械载荷	3.70	5.10	47.20	76.44	31.40	68.64
温度+机械载荷	44.60	29.50	—	—	61.70	260.40

## 4 结 论

1)由神华呼伦贝尔1750 t/a干燥器的计算结果可以看出,结构变形及应力主要是由于热膨胀所引起。干燥器筒体部分水封处应力集中严重,但这部分并不承受载荷,强度校核时可忽略,其余区域一次应力满足强度要求,二次应力不满足强度要求。但是水封处的出料桶的应力较严重,需要优化此处结构,降低温度梯度。

2)神华呼伦贝尔1750 t/a干燥器的径向位移最大达到44.6 mm,设计时需考虑水封槽的宽度,避免由于热膨胀导致水封刀和水封槽发生干涉。干燥器的轴向位移最大达到29.5 mm,设计时需考虑导流板和鱼鳞板的距离,并控制刮板高度,避免由于热膨胀导致导流板和鱼鳞板发生干涉,并考虑刮板和鱼鳞板的距离,避免影响料层的厚度从而影响整个工艺性能。

### 参考文献:

[1] 邵俊杰. 褐煤提质技术现状及我国褐煤提质技术发展趋势初

探[J]. 神华科技,2009,7(2):17-22.

- [2] 夏浩,刘全润,马名杰. 褐煤提质技术现状[J]. 洁净煤技术,2010,16(4):56-58.
- [3] 白中华,赵玉冰,黄海东. 中国褐煤提质技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术,2013,19(6):25-29.
- [4] 田忠坤. 褐煤干选、干燥、成型一体化工艺技术开发研究[J]. 选煤技术,2011(2):20-23.
- [5] 金国森. 干燥设备[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [6] 戴和武,谢可玉. 褐煤利用技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.
- [7] John BHarrell, Pittsburgh Pa. Method of treating materials on a rotary hearth; United States Patent, 3998703[P]. 1976-12-21.
- [8] 高家驹. 高压干燥器的强度设计评述[J]. 化工装备技术,1990,11(4):23-26.
- [9] 王兰生,赵晋平. 圆盘干燥器的设计计算[J]. 化工设备设计,1996,33(4):20-24.
- [10] 张智亮,王勇. 加氢反应器裙座支撑区有限元分析及优化设计[J]. 炼油技术与工程,2008,38(3):40-43.
- [11] 中国机械工程学会. 中国材料工程大典[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [12] ASME VIII Division1—2007, Boiler and pressure vessel code an international code[S].

(上接第13页)

效果优于煤油浮选精煤;煤油浮选精煤对方解石和煤粒的分离效果优于复合浮选药剂,但复合浮选药剂精煤对高岭石、白云母和煤粒的分离效果比煤油浮选精煤差。红外光谱分析表明,仲辛醇吸附在煤粒表面形成醚,说明在浮选过程中,不仅发生了物理吸附还发生了化学吸附。

### 参考文献:

- [1] 康文泽,刘松阳,张亚革. AO捕收剂浮选稀缺难浮煤实验[J]. 黑龙江科技学院学报,2011,21(2):85-88.
- [2] 徐初阳,聂容春,唐明康. 高效复合选煤浮选药剂的研究[J]. 煤炭科学技术,2003,31(6):11-13.
- [3] 刘述忠,李晓阳,徐晓军,等. 捕收剂组合使用的研究概况[J]. 云南冶金,2002,31(4):17-20.
- [4] 李哲,朱玉,武英刚. 煤泥复合捕收剂的研究[J]. 洁净煤

技术,2008,14(6):14-16.

- [5] 陈衍庆. TDS捕收剂在兴隆庄煤矿选煤厂的应用[J]. 选煤技术,1999(1):25-26.
- [6] 解维伟,朱书全,吴晓华,等. ZFC型乳化浮选药剂在煤泥浮选中的应用[J]. 洁净煤技术,2007,13(5):10-12.
- [7] 黄波,解维伟,赵银荣. 新型高效煤泥浮选药剂的研究[J]. 选煤技术,2007(4):50-52.
- [8] Zhu Shuquan, Bai Yana, Xie Weiwei, et al. Research and application of a new emulsified collector on flotation[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1):724-730.
- [9] Zhang Yude, Kang Xiaojuan, Tan Jinlong, et al. Influence of calcination and acidification on structural characterization of anyang anthracites[J]. Energy Fuels, 2013, 27(11):7191-7197.
- [10] Zhang Yude, Kang Xiaojuan, Tan Jinlong, et al. Structural characterization of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidized and HF acidified anthracites by XRD, FTIR and Raman spectra[J]. Applied Spectroscopy, 2014, 68(7):749-757.