

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2025.06.007

# 烧结炉螺栓连接与卡箍快开连接的密封性能对比研究

王俊奇, 董金善\*, 孟繁龙

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

**摘要:**为探究实际工况下烧结炉主要密封结构的应力分布规律及密封性能,课题组使用有限元法构建了螺栓连接和卡箍快开连接的简化模型,分析了2种密封结构分别在设计压力下和热力耦合下的等效应力分布规律,采用控制变量法对比了2种密封结构下橡胶密封圈的变形及接触情况,以此得出2种结构的密封性能。结果表明:在相同的压力和温度下,螺栓连接结构中的螺栓内、外表面路径应力变化趋势相反且内表面显著高于外表面;而卡箍快开连接结构中卡箍上接触面路径应力比下接触面路径应力变化更剧烈,并且在热力耦合下卡箍接触面路径应力的变化趋势与设计压力下的变化趋势一致;卡箍连接结构中橡胶圈上、下表面的接触压力均小于螺栓连接结构,而橡胶圈受挤压变形部分的接触压力比螺栓连接结构的大。该研究证明了同样条件下卡箍快开连接的密封结构更容易发生泄漏,为烧结炉密封连接结构的设计和选取提供了参考。

**关键词:**烧结炉;螺栓连接结构;卡箍快开结构;应力分析;密封性能;ANSYS软件

中图分类号:TH136 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2025)06-0047-07

## Comparison of Sealing Performance between Bolted Connection and Clamp Quick-Opening Connection in Sintering Furnaces

WANG Junqi, DONG Jinshan\*, MENG Fanlong

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** In order to investigate the stress distribution law and sealing performance of the main sealing structures in sintering furnaces in actual working conditions, the research team employed the finite element method to establish simplified models of bolted connections and clamp quick-opening connections. The equivalent stress distribution of the two sealing structures under design pressure and thermal-mechanical coupling was analyzed. The deformation and contact behavior of the rubber sealing ring under the two sealing configurations were compared by the control variable method, thereby the sealing performance of the two structures was obtained. The results indicate that under identical pressure and temperature conditions, the path stress variation trends on the inner and outer surfaces of the bolted connection structure are opposite, meanwhile the inner surface being significantly higher than the outer surface. In the clamp quick-opening connection structure, the path stress of the upper contact surface of the clamp changes more dramatically than that of the lower contact surface, and the change trend of the path stress of the clamp contact surface under the thermal-mechanical coupling is consistent with the change trend under the design pressure. The contact pressure of the upper and lower surfaces of rubber ring in the clamp connection structure is smaller than that in the bolt connection structure, and the contact pressure of the rubber ring subjected to extrusion deformation is larger than that in the bolt connection structure. This study demonstrates that the sealing structure of the clamp quick-opening connection is more prone to leakage under identical conditions, providing a valuable reference for the design and selection of sealing connection structures in

收稿日期:2025-08-26;修回日期:2025-10-29

第一作者简介:王俊奇(2002),男,硕士研究生,主要研究方向为过程装备现代设计方法。通信作者:董金善(1964),男,工学博士,教授,主要研究方向为过程装备现代设计方法。E-mail:djs@njut.edu.cn

sintering furnaces.

**Keywords:** sintering furnace; bolt connection structure; clamping quick opening structure; stress analysis; sealing performance; ANSYS

烧结技术是粉末冶金、陶瓷制造、电子元件与特种合金材料加工的关键技术之一,在航空航天、汽车制造、半导体和医疗器械等高科技领域具有重要的作用<sup>[1-3]</sup>。烧结炉作为烧结工艺的核心设备,常面临高温、特定气氛及长时间连续运行等复杂工况,其密封性能不仅关乎炉内气氛稳定性,更直接影响产品质量和能耗水平与生产安全。在烧结炉的设计中,炉门需要频繁开启和关闭,存在操作繁琐和耗时较长的问题,为了解决这一问题,快开结构<sup>[4-5]</sup>逐渐被引入烧结炉的设计中,成为现代烧结炉发展的重要方向之一。相较于传统螺栓连接结构,快开连接结构通过优化力学设计和采用高效锁紧机制,能够在确保密封性的同时大幅提升操作效率。但快开连接烧结炉服役条件苛刻,对密封结构的研发与制造等环节提出了更高的要求。因此针对快开连接烧结炉密封结构进行静力学及热力耦合分析就尤为重要。

课题组采用 ANSYS 有限元分析技术,对烧结炉法兰螺栓连接密封结构和卡箍连接快开密封结构进行数值模拟分析,研究在设计压力下和热力耦合作用下 2 种结构的密封性能及结构强度,以及应用超弹性体本构模型模拟在 2 种密封结构下橡胶密封圈的密封性能,以此来评定整个烧结炉的密封性能,为烧结炉的密封设计提供一定的参考。

## 1 数值模型与计算方法

### 1.1 烧结炉结构

本课题的研究对象为烧结炉,其结构简图如图 1 所示。该设备为耳座支撑的立式容器,核心结构包括端盖、冷却水夹套、筒体、卡箍、螺栓、筒体法兰及支座。端盖分为上端盖和下端盖,与筒体间形成密封面,其中,上端盖与筒体法兰通过螺栓连接实现密封,而下端盖与筒体法兰则采用卡箍连接密封。为保护设备免受高温损伤,筒体法兰和端盖均内置冷却水槽,通过循环冷却水对壁面进行降温。烧结炉筒体的内径为 1 700 mm,筒体高度为 1 935 mm;冷却水夹套的内径为 1 900 mm,夹套高度为 2 145 mm。

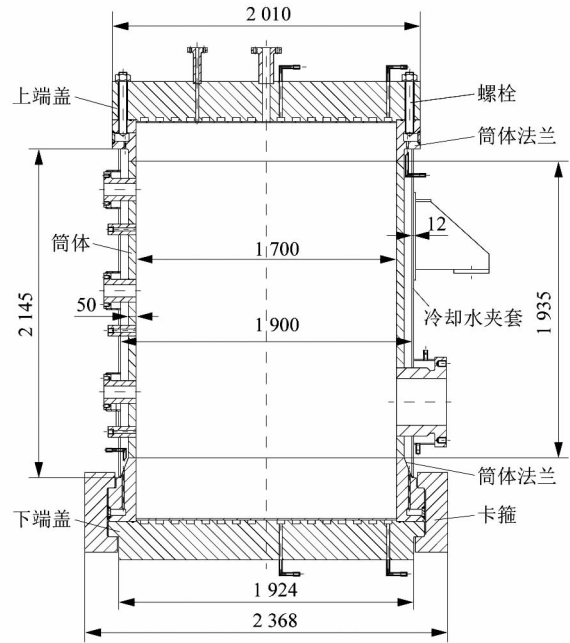


图 1 烧结炉结构

Figure 1 Sintering furnace structure

### 1.2 设计参数及材料性能参数

烧结炉在进行工作时,炉壳内部主要以高压氮气作为保护性气氛,用外侧夹套及各部位冷却水槽为炉壳降温;设备正常工作开启、关闭设备时存在压力波动,压力波动范围为 0.0 ~ 6.0 MPa,设备设计使用年限为 10 a。烧结炉基本设计参数如表 1 所示。

表 1 烧结炉设计参数

Table 1 Design parameters of sintering furnace

	工作压 力/MPa	设计压 力/MPa	工作温 度/℃	设计温 度/℃	介质
筒体	0.0 ~ 6.0	7.0	≤200	220	氮气
夹套	0.4	0.5	20	50	冷却水

烧结炉的筒体及冷却水夹套筒体为 Q345R 板材,上、下端盖、卡箍及筒体法兰均为 16MnIII 锻件,炉门平盖上的螺栓紧固件材料分别为 35CrMoA 和 30CrMo。O 形密封圈材料为丁腈橡胶。通过查阅 GB/T 4732.2—2024<sup>[6]</sup>,选取了温度为 20 ~ 250 ℃ 的材料性能参数用于仿真计算。

O 形圈橡胶材料可以简化为一种超弹性材料<sup>[7]</sup>。采用 2 参数 Mooney-Rivlin 超弹性体本构模型<sup>[8-9]</sup>,其形式为应变势能,表达式为:

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (1)$$

式中: $W$  为应变势能, $c_{10}$ 和 $c_{01}$ 为表征材料变形的材料常数, $\bar{I}_1$ 和 $\bar{I}_2$ 分别为第一和第二偏应变不变量, $J$ 为压缩体积比, $d$ 为材料不可压缩参数。

$d$ 的表达式为:

$$d = (1 - 2\mu) / (c_{10} + c_{01}) \quad (2)$$

式中, $\mu$ 为泊松比。

本研究中, $c_{10}$ 和 $c_{01}$ 分别取 1.87 MPa 和 0.47 MPa<sup>[10]</sup>,泊松比 $\mu$ 取 0.499,则根据式(2)可得 $d$ 为 $8.547 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。

### 1.3 网格划分及接触设置

考虑到实际模型的复杂性,对结构进行适当简化以提高计算效率,模型的尺寸、压力及边界条件均按轴对称处理。螺栓法兰密封结构跨中心轴均布 48 个螺栓紧固件,简化建立 1/96 模型进行分析;卡箍连接结构沿轴线方向轴对称,筒体法兰和卡箍均布 24 个卡箍齿,简化建立 1/48 模型进行分析。并做出如下假设:①除橡胶圈外的材料均为各向同性;②局部密封结构未建立筒体四周接管及结构连接处的圆角倒角;③对螺纹进行简化,建立不带螺纹的实体螺栓。在有限元分析中采用实体单元建立模型,模型网格划分均采用六面体网格划分。通过加载求解进行了网格无关性验证,最终确定有限元网格划分如图 2 所示。

在螺栓法兰连接结构中,端盖与螺母之间、筒体法兰与端盖之间均建立摩擦接触关系,采用广义拉格朗日算法描述接触行为,摩擦因数取 0.15。其余部分则采用绑定连接。在卡箍连接部分,卡箍齿与端盖之间、端盖与筒体法兰之间也设置为摩擦接触,同样使用广义拉格朗日算法,摩擦因数为 0.15。此外,橡胶密封圈与周边密封槽之间定义为摩擦接触,摩擦因数为 0.15,并通过过盈配合模拟橡胶圈的装配过程及预压缩状态。

### 1.4 边界条件及压力施加

力学约束:①建立以筒体中心轴线为 $Z$ 轴的圆柱坐标系,其中 $X$ 方向为径向, $Y$ 方向为周向, $Z$ 方向为

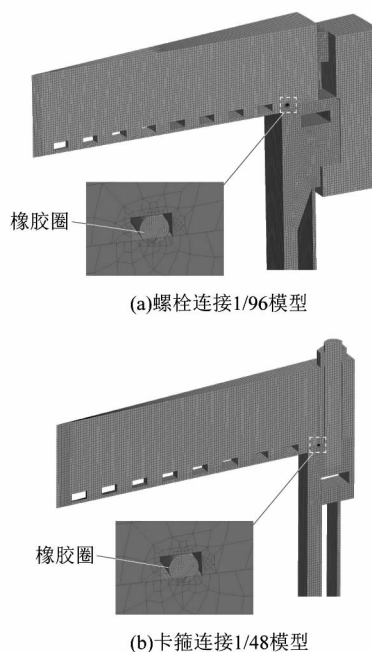


图 2 烧结炉有限元网格划分  
Figure 2 Finite element mesh division of sintering furnace

轴向,限制 $Z$ 轴和 $Y$ 轴的自由度,释放 $X$ 轴自由度,允许结构在温度或压力载荷下自由膨胀或收缩;②在对称面施加对称约束。

热边界条件:①在炉内与气体接触的表面施加对流换热条件,换热系数为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^2$ ,介质温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;②在冷却水流过的表面施加对流换热条件,换热系数为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ ,介质温度为冷却水进、出口的对数平均温度,设定为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

螺栓连接结构压力施加步骤:第 1 步,施加螺栓预紧力,并在后续压力步中锁定;第 2 步,在筒体内表面施加 7.0 MPa 压力,在筒体外表面、冷却水夹套内部及端盖冷却水槽施加 0.5 MPa 夹套压力,在端盖与筒体法兰到密封圈张开段施加 7.0 MPa 介质压力,在橡胶圈内压接触面施加 7.0 MPa 流体渗透压力;第 3 步,施加温度场。卡箍连接结构的压力施加步骤中没有第 1 步螺栓预紧力的施加,仅仅施加后 2 个压力步骤。

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 螺栓连接密封结构分析

设计压力以及热力耦合作用下螺栓连接结构的等效力云图如图 3 所示。由图 3(a)可知:在设计压力

工况下,螺栓等效应力最大值为 415.270 00 MPa,等效应力最大区域在螺栓与筒体法兰连接位置的内侧区域,施加压力后,端盖和筒体法兰发生偏转导致螺栓内、外两侧受力不同,内侧所受压应力大于外侧所受拉应力。图 3(b)为热力耦合下螺栓等效应力分布图,螺栓等效应力最大值位于螺栓与端盖上端接触位置,最大等效应力为 405.540 00 MPa,施加温度场后应力变化更为复杂,总的等效应力中叠加了由热膨胀和热应力引起的附加应力,所以螺栓的等效应力最大值反而减小了。图 4(a)为设计压力下的螺栓路径应力,由图可知:在螺栓远端内、外表面变化趋势相同,螺栓内、外表面应力在 80 ~ 310 mm 位置呈现相反变化趋势。由于内压作用下螺栓内表面靠近筒体法兰连接处受到法向和径向双重约束,导致局部应力大幅升高;外表面则更多受拉伸力作用,因此应力水平较低,呈现出内表面应力逐渐增大,外表面应力逐渐减小的趋势。图 4(b)为热力耦合下螺栓路径应力,由图可知:施加温度场后,螺栓内、外表面路径应力变化趋势不一致,内表面应力较高,并且在与螺母连接位置的应力峰值更为显著。

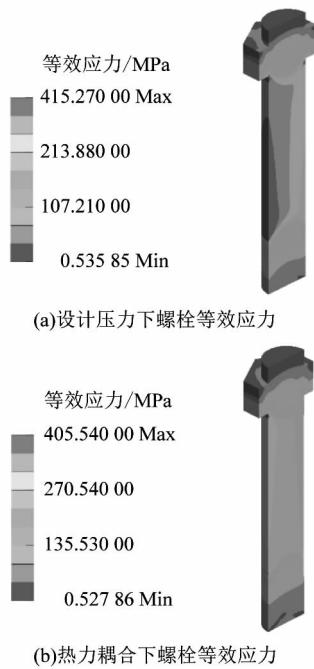


图 3 螺栓等效应力云图

Figure 3 Equivalent stress cloud chart of bolt

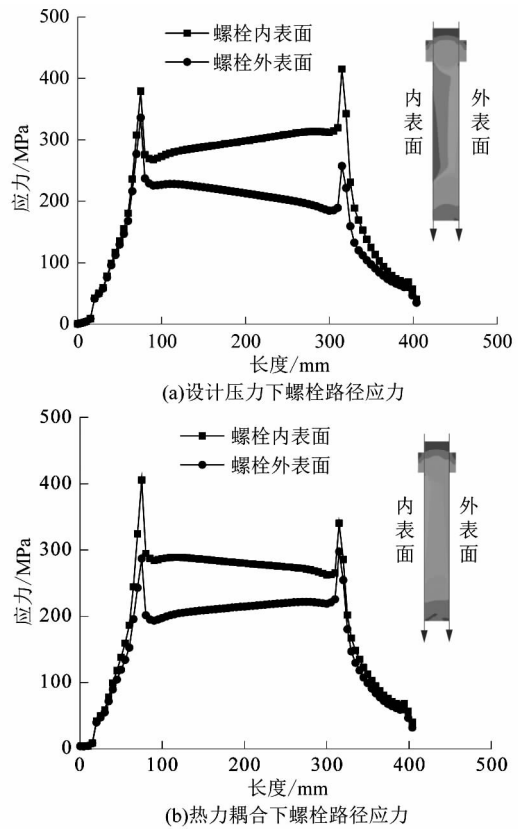


图 4 螺栓路径应力

Figure 4 Path stress of bolt

### 2.2 卡箍连接密封结构分析

设计压力以及热力耦合作用下卡箍连接结构的等效应力云图如图 5 所示。卡箍连接结构的等效应力主要分布在接触表面且接触表面边缘位置等效应力较为集中,热力耦合下卡箍等效应力最大值增大。图 6 为卡箍路径应力。热力耦合下卡箍路径应力与设计压力下的路径应力变化趋势基本一致,但应力峰值有小幅增加;卡箍下接触面承受的应力比上接触面小,且应力分布变化相对平缓;上接触面的卡箍齿面处的应力剧烈变化,可能导致接触面材料发生磨损或塑性变形,降低接触效果从而影响密封性能。

### 2.3 2 种连接结构的密封性能分析

为了对比研究 2 种连接结构的密封性能,课题组采用相同橡胶圈模拟 2 种连接结构在实际工作条件下的运行情况。根据 Von Mises 应力分布,可以预测应力集中位置,通常也是密封件潜在失效的位置,从而尽可能地通过产品设计提前避免密封件失效<sup>[11]</sup>。橡胶圈等效应力云图如图 7 所示。

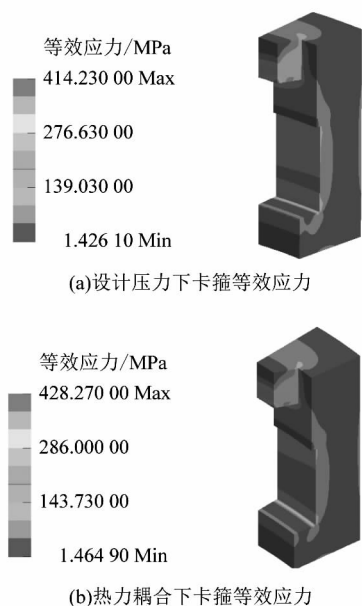
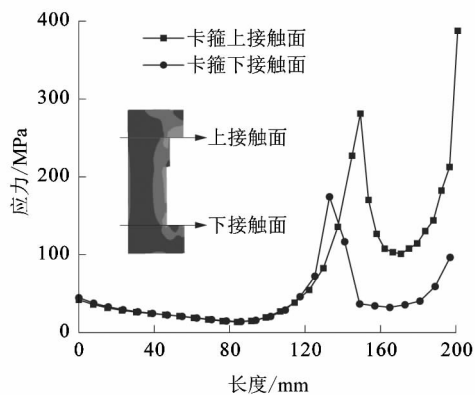
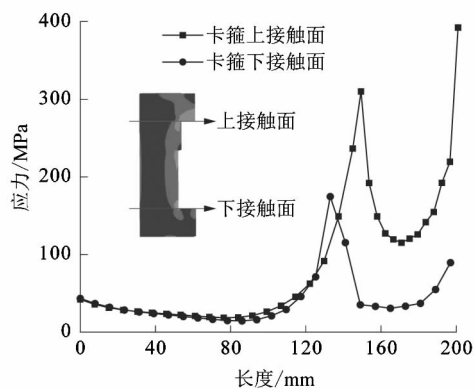


图5 卡箍等效应力云图

Figure 5 Equivalent stress cloud chart of clamp



(a)设计压力下卡箍路径应力



(b)热力耦合下卡箍路径应力

图6 卡箍路径应力

Figure 6 Path stress of clamp



图7 橡胶圈等效应力云图

Figure 7 Equivalent stress cloud chart of rubber ring

由图7可知,螺栓连接预紧压缩阶段等效应力主要集中在橡胶圈中心区域,表现为局部高应力;螺栓连接在设计压力下橡胶圈整体等效应力显著增加,尤其在密封面与槽壁接触处形成高应力区,施加压力虽加强了密封但也增大了橡胶圈局部应力;螺栓连接在热胀耦合作用下,热膨胀加剧了橡胶圈形变使密封更紧,接触部位应力进一步升高。相比之下,施加压力载荷

时卡箍连接的橡胶圈受压部位出现的应力集中主要是在边缘和尖角处,最大值达 7.611 70 MPa,卡箍连接整体结构产生的轴向位移导致缝隙使得橡胶圈被挤入端盖和筒体法兰间隙,从而产生挤压效应;卡箍连接在热耦合作用下,等效应力最大值略升至 7.676 80 MPa。显著的橡胶圈挤压效应可能引发动态工况下的高局部应力及咬合情况,从图 7 中对比可以得到,在相同压力和温度下,卡箍快开连接结构的等效应力最大值均大于螺栓连接结构,因此,卡箍快开结构最终可能会先导致密封失效。

最大静接触压力在工程应用中被广泛用于初步判断密封件是否满足静密封特性的要求,最大静接触压力应不小于密封压力。此外,接触宽度表征了密封件流体的泄漏距离,普遍认为较大的接触宽度有利于防止泄漏<sup>[12]</sup>。从图 7 可以看到橡胶圈在方形密封槽中受到挤压产生变形,橡胶圈与上侧结构接触的挤压面为上表面,被侧边结构挤压变形的面为侧面,与下侧结构接触的挤压面为下表面。如图 8 所示为 2 种连接结构下橡胶圈的接触压力和接触宽度分布。图 8 中每个阶段上方的封闭圈表示橡胶圈形状。

图 8(a)和图 8(b)为螺栓连接结构时橡胶圈接触压力和接触宽度分布图,在螺栓预紧阶段由于只是简单的装配,橡胶圈上、下表面之间的接触压力差异较小;设计压力下,密封结构产生变形,橡胶圈与侧面密封槽接触,接触压力明显增加;橡胶圈侧面与密封槽侧面贴合导致橡胶圈侧面的密封接触宽度明显增加,橡胶圈上、下表面由于流体载荷渗透作用导致边缘接触区域减少,从而其接触宽度下降;热耦合作用下,接触压力和接触宽度略有增加,变化幅度较小;在设计压力下和热耦合作用下橡胶圈接触压力均大于设备运行压力,满足设备密封要求。

图 8(c)和图 8(d)为卡箍连接结构时橡胶圈的接触压力和接触宽度分布,由于密封槽结构相同,装配阶段橡胶圈的接触压力和接触宽度主要在上、下表面,这与螺栓连接结构的相似;在设计压力下与热耦合作用下,由于卡箍连接结构橡胶圈肩部区域突出,使得橡胶圈侧面接触压力和接触宽度有明显增大;热耦合作用下橡胶圈侧面接触压力增加到 22.7 MPa,侧面接触宽

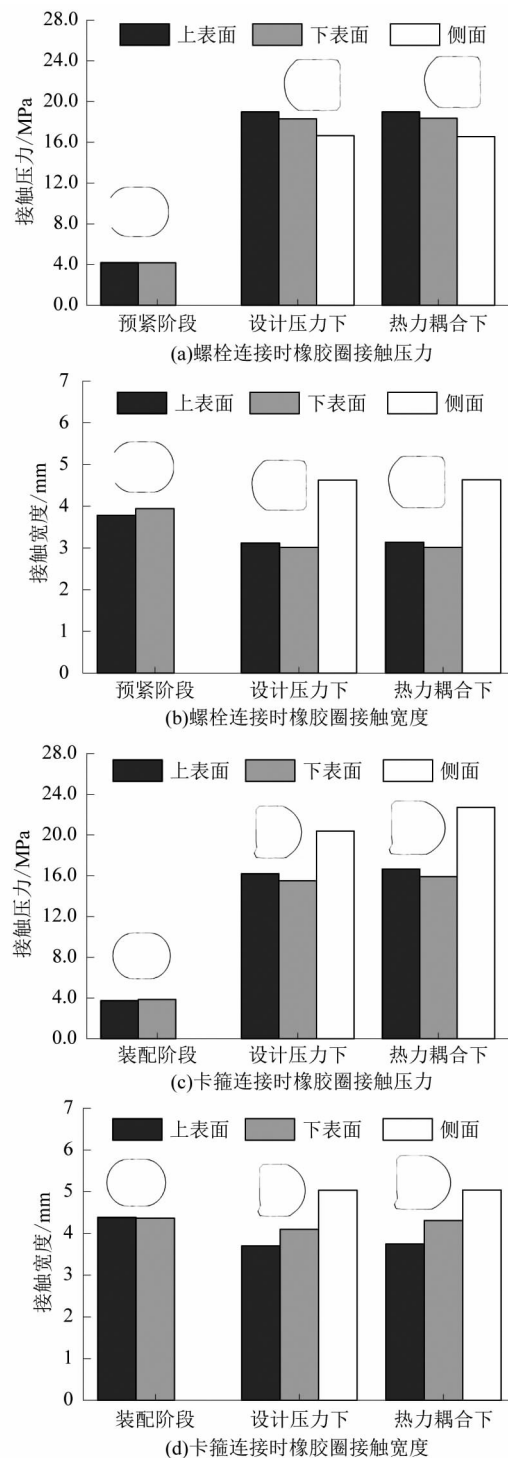


图 8 橡胶圈接触压力和接触宽度

Figure 8 Contact pressure and contact width of rubber ring

度与螺栓连接热耦合作用下的基本一致;接触压力均大于设备运行压力,满足密封要求。

对于 2 种连接结构,装配阶段橡胶圈接触压力较

小,因侧面还未产生接触,接触宽度也较小;在设计压力下,2种结构橡胶圈的接触压力均大幅提升,接触宽度变化较大,此时侧面接触开始出现;热力耦合作用下,螺栓连接结构密封性能基本保持一致,卡箍快开连接由于存在突出区域,橡胶圈接触压力和接触宽度进一步上升,侧面区域接触压力增加较为明显。

### 3 结论

为探究实际工况下烧结炉主要密封结构的应力分布规律及密封性能,课题组通过数值模拟和控制变量的方法对比分析了螺栓连接和卡箍快开连接的结构模型的密封性能,具体结论如下:

1) 在相同的压力和温度下,得到了静力学和热力耦合的等效应力分布规律。从等效应力分布来看,螺栓连接结构是通过螺杆的受力影响整体结构的密封性能;而卡箍快开连接结构则是通过齿面的受力来影响结构密封。

2) 保持相同工作条件,螺栓连接由于预紧力作用密封性能更好,同时螺栓连接中橡胶圈挤出部分较为平整,而卡箍连接结构中橡胶圈发生明显挤压效应,挤出部分应力较大,且上、下表面接触压力均小于螺栓连接,容易发生泄漏使其结构密封失效。

当前国内针对烧结炉密封连接结构的研究较少,课题组的研究为烧结炉的密封设计和选取提供一定的参考。但课题组仅对比了2种连接结构的密封,未来的研究可以探索更多类型的连接密封方式,提高烧结炉密封性能及生产效率。

### 参考文献:

- [1] CHEN Y Q, WANG Y X, ZHANG F, et al. Preparation of special ceramics by microwave heating: a review [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2022, 37(8): 841 - 852.
- [2] YI M, WANG W X, XUE M, et al. Modeling and simulation of sintering process across scales [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(5): 3325 - 3358.
- [3] 谭展华,赵项. 冶金烧结技术研究进展的可视化分析[J]. *江西冶金*, 2024, 44(3): 157 - 165.
- [4] 邓超,孟祥宇,庄严,等. 齿啮式卡箍快开结构热力耦合应力分析[J]. *当代化工*, 2018, 47(6): 1216 - 1219.
- [5] 何壮壮. 基于 Ansys 高压烧结炉卡箍快开结构优化与分析研究[J]. *当代化工研究*, 2020(5): 137 - 139.
- [6] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 压力容器分析设计: 第2部分 材料: GB/T 4732. 2—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [7] 谭娅. 一种井下湿接头 O 形圈的密封失效形式和材料选择分析[J]. *今日制造与升级*, 2024(8): 198 - 201.
- [8] MOONEY M. A theory of large elastic deformation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, 11(9): 582 - 592.
- [9] WU J B, LI L. Influence of ambient pressure on sealing performance of O-ring in deep-sea hydraulic system [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110440.
- [10] LI J X, LIU P F, WANG S B, et al. Finite element analysis of O-ring sealing performance of manned submersible viewports [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2020, 20: 1628 - 1637.
- [11] 董杰,常佩琛,谢禹钧. 新型虫形密封圈密封性能研究及优化[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2020, 40(1): 66 - 71.
- [12] LIN Z H, YU L J, HUA T F, et al. Seal contact performance analysis of soft seals on high-pressure hydrogen charge valves [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2022, 23(4): 247 - 256.



www.QCtester.com  
 因为专业, 所以权威  
 因为用心, 所以收获更多

扫一扫 加入我们