

锂电池等静压机高压设备自动化机械设计研究

王少鹏

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要]近年固态电池普及与应用,在我国锂电池产业链逐渐成熟,固态电池的大量应用是接下来锂电池产业的未来趋势,所以固态电池的稳定性成为诸多课题里面的重中之重。为了解决固态电池固固界面耦合的技术问题,因为外部压力不均匀以及电池内部应力相互之间撕裂严重,造成界面之间高阻抗,高孔隙率,进而使得锂离子迁移困难,能力密度差。使用温等静压机对固态电池内部空隙进行挤压,解决电池内部正极材料、电解质材料、负极材料界面之间贴合不紧实,电池电阻值过大,有内部短路风险等问题,保证了稳定量产情况下固态电池的密度均匀性,每块与每块之间密度差值可控在合理范围内。为了克服以上客观问题对固态电池发展进程的阻碍,通过理论计算构建数学模型,对多条件系数交叉验算,参数拟合以及反复验算,完成部件精准尺寸定型、承压强度校核、形变验算,确保核心结构可适配极限高压高温工况。再通过 Ansys 仿真软件对上述等静压机数学模型进行仿真研究。文章重点研究了等静压机机械结构优化设计,自动化机械结构设计,利用理论计算、三维建模、有限元仿真计算、样机试验,进而实现温等静压机工艺过程对固态电池致密性有效提高的切实应用。

[关键词]锂电池; 固固界面耦合; 等静压机; 数学建模; Ansys 仿真

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20138

中图分类号: TH137

文献标识码: A

Research on the Automation Mechanical Design of High Voltage Equipment for Static Compression Machines such as Lithium Batteries

WANG Shaopeng

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: In recent years, the popularity and application of solid-state batteries have gradually matured in China's lithium battery industry chain. The widespread use of solid-state batteries is the future trend of the lithium battery industry, so the stability of solid-state batteries has become a top priority among many issues. In order to solve the technical problem of solid state interface coupling in solid-state batteries, which is caused by uneven external pressure and severe tearing between internal stresses of the battery, resulting in high impedance and porosity between interfaces, making it difficult for lithium ions to migrate and resulting in poor capacity density. The use of a isothermal static press machine to compress the internal gaps of solid-state batteries solves problems such as loose adhesion between the positive electrode material, electrolyte material, and negative electrode material interfaces, high battery resistance, and internal short circuit risks. This ensures the density uniformity of solid-state batteries under stable mass production conditions, and the density difference between each block can be controlled within a reasonable range. In order to overcome the obstacles to the development process of solid-state batteries caused by the objective problems mentioned above, a mathematical model is constructed through theoretical calculations. Multiple conditional coefficient cross checking, parameter fitting, and repeated checking are carried out to achieve accurate component size determination, compressive strength verification, and deformation verification, ensuring that the core structure can adapt to extreme high pressure and high temperature conditions. Further simulate and study the mathematical model of the isostatic press using Ansys simulation software. The article focuses on the optimization design of the mechanical structure of the isostatic press, the design of automated mechanical structures, and the practical application of the isothermal isostatic press process to effectively improve the density of solid-state batteries through theoretical calculations, 3D modeling, finite element simulation calculations, and prototype experiments.

Keywords: lithium battery; solid solid interface coupling; isostatic press machine; mathematical modeling; Ansys simulation

引言

为了研究锂电池温等静压机工序承压方式可行性,自动化辅助上料系统以及该工序对固态电池固固界面耦合性问题实现有效改善的可行性分析,使用 Ansys 软件对等静压机外部工况条件以及具体受力情况进行仿真模拟,主要针对等静压机主体承压部件的耐压性,自动化辅助上料结构的可实施性,以及等静压工艺流程整体的稳定性。

温等静压机由承受高压径向力的缸筒本体,承受高压轴向力的机架本体,自动化辅助上料系统,液压系统,增压系统,模温机系统,油冷机系统多模块组成。

根据物理学原理帕斯卡定律:在不可压缩的静止流体(液体或气体)中,任意一点受到外力,产生的压强增值会瞬间、等大地传递至流体的各个方向^[1]。

“等静压”一词的实际意义是对表面封闭的材料,从各个方向上同时施加相等的压力的一种状态。

锂电池温等静压机便是利用该原理,利用各向同性的高压强(通常大于 100MPa)液体,使固态电池内部发生热塑性变形和扩散颗粒重组,提升界面接触面积,形成连续电子传输网络,降低电池内部孔隙率和导电内阻,增强倍率性能,提高循环寿命。

利用数据分析拆解方法论为支撑,以材料性能参数为底层支撑数据,以外界环境条件和设备受力情况为分析条件,依次建立缸筒和机架数学模型,进行受力计算,以及结果校核计算,完成数学层面的研究,然后建立平面数模和立体数模,通过 ANSYS 软件进行仿真研究,进一步验证数学模型的准确性。

ANSYS Workbench 平台作为连接 ANSYS 旗下各类求解器功能的顶级接口,采用项目管理工具进行工程流程管理,将仿真分析流程紧密结合,通过工具窗口组件模块简单拖曳进行分析项目的搭建。ANSYS Workbench 平台具有强大的结构、流体、热、电场、磁场、声学以及耦合场分析能力,具有与主流 CAD 软件如 CREO、CATIA、NX、SOLIDWORKS 等的双向连通性,继承并整合了 ICEM CFD、TGrid、Gambit 等网格划分功能,文件存储管理性更强^[2]。

1 国内外研究现状

等静压技术广泛应用于粉末冶金、新能源领域、航空

航天领域,国外一直在高压精度和精密控制部分技术处于领先地位,国内则在固态电池量产化方向上取得多项突破进展,致力于将等静压机工艺量产化。

在国际等静压机领域,瑞典 Quintus Technologies 隶属于 Parker Hannifin 集团公司,应用普及高压工况下的 Frame Technologies 框架钢丝缠绕技术,并布局针对固态电池等静压工艺 QIB 系列温等静压机产品序列。韩国 Hana technology 提出温度与压力协同控制理论,并推出针对硫化物固态电池工艺需求的温等静压机设备。最高压力可达 700MPa,温度最高可达 200℃,避免硫化物电解质因为高温作用而发生化学组分间氧化分解。

在国内等静压机领域,利元亨已经完成从干法电机设备、等静压机、封装到化成成分容的固态电池全生产线,布局成功,中试线已经达到交钥匙水平。先导智能在 2025 年率先推出可量产的卧式等静压机设备,同时满足最高 600MPa,波动范围为±5%,温度最高可达 150℃,温度控制精度为±5℃,有效容积 500L;四川航空工业川西机器有限公司是国内早期进入等静压机行业的头部企业之一,累计交付等静压机设备一千七百多台,占该领域订单 50%的份额。

随着温等静压技术在高温耐火材料、陶瓷、硬质合金、稀土永磁、碳素材料、稀有金属粉末成型的广泛应用,必然推动等静压技术的不断提高,随着计算机控制系统技术,智能控制理论和信息采集技术的发展,温等静压机技术必然向着高精度、高稳定性、高安全可靠发展^[3]。

2 等静压机结构分析及工作原理

温等静压机由承受高压径向力的缸筒本体,承受高压轴向力的机架本体,自动化辅助上下料系统,给液压油缸提供动力的液压系统,用于对缸筒内打高压油的增压系统,模温机系统,油冷机系统多模块组成。

锂电池温等静压机机结构如图 1 所示,缸筒起始位置在上下料机架出口位置,通过上下料机架将上料工装推至缸筒内,缸筒移动至机架工作位,两侧缸盖将缸筒两端密封关闭,注入液体,然后升高压。保压完成后,缸筒两侧缸盖开启,缸筒内介质液体通过接油槽循环回油箱,缸筒移动至起始位置,上下料机架深入缸筒内,扣合上料工装,向外拉出至取料位置。

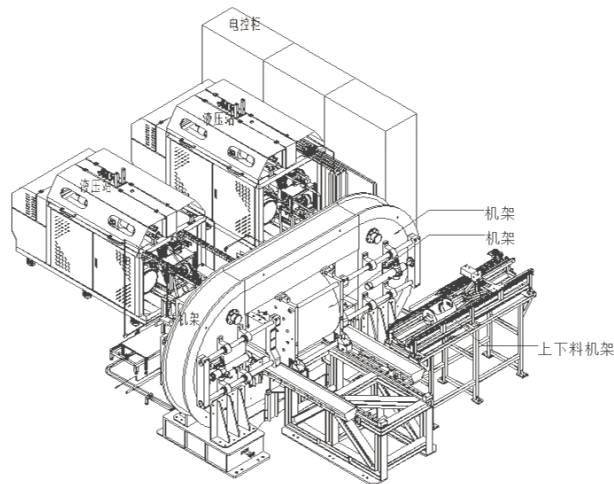


图1 锂电池温等静压机结构图

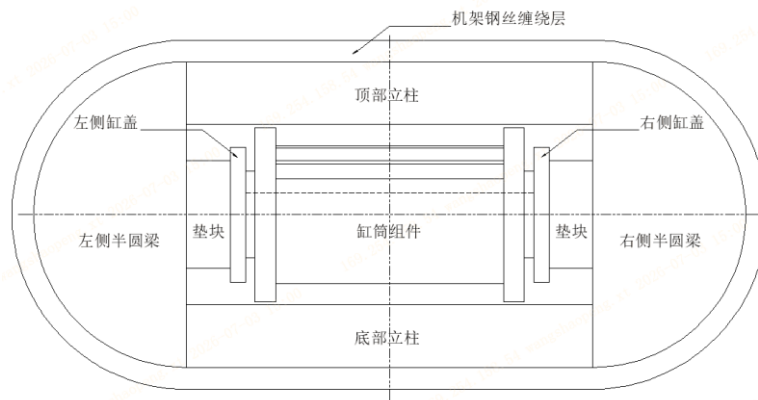


图2 等静压机主机结构图

设备工作原理:

- (1) 缸筒起始位置在上下料机架出口位置;
- (2) 工作人员向上料工装内放入待压缩的固态电池;
- (3) 通过上下料机架将上料工装推至缸筒内;
- (4) 缸筒移动至机架工作位, 首先到达减速接近开关处, 通过控制比例阀, 减慢油缸动作速度, 直至到达限定极限位置;
- (5) 两侧缸盖将缸筒两端密封关闭, 完全压紧缸筒两侧端口;
- (6) 模温机开启, 待导热油到达指定温度, 通过管道对缸筒内部进行充液;
- (7) 充液结束, 模温机停止工作。然后离心泵开始启动, 向增压器工作缸充液;
- (8) 同时, 增压器液压管路通过阀组控制开始工作, 通过增压器反复作动, 向缸筒内充高压介质液体;
- (9) 缸筒内部到达指定压力后, 压力上下浮动值为 $\pm 2\text{MPa}$, 通过温度传感器测定温度到达指定温度, 温度上

下浮动值为 $\pm 2^\circ\text{C}$, 然后开始保压至限定时间;

- (10) 到达保压时间, 缸筒内部导热油开始泄压, 直至达到完全零压力状态;
- (11) 缸筒两侧缸盖开启, 待缸盖完全撤离缸筒内径后再进行下一步动作;
- (12) 缸筒内介质液体通过接油槽循环回油箱;
- (13) 缸筒移动至起始位置, 开始向远离机架的位置移动, 到达减速接近开关后, 减速, 直至到达限定极限位置;
- (14) 上下料机架深入缸筒内, 扣合上料工装;
- (15) 上下料机架在伸缩油缸的驱动下, 向外拉出至取料位置;
- (16) 工作人员上前, 通过工装, 取出已经压缩完全的物料, 对物料分别进行目测和化学组织测量评定。

温等静压机主机结构由机架组件和缸筒组件两部分组成, 机架组件由左右两侧半圆梁和顶部底部立柱通过紧固件连接在一起, 外围进行钢丝缠绕, 将机架整体刚性提升上来。如图2所示。

缸筒组件前期由缸筒本体连接左右侧法兰,缸筒本体和左右侧法兰均为单层整锻式,左右法兰起两侧限位作用,设置好预定的预拉紧张力,开始对缸筒内侧筒体进行圆周向高强度钢丝缠绕,缠绕完成后在钢丝层最外侧涂抹防腐材料,再缠绕用于加热的电加热带,加热带外侧包

裹保温棉进行外部保温隔绝,为了避免钢丝被氧化腐蚀,在最外层安装外部保护层。由于钢丝层弹性收缩和预紧力作用,对内部缸筒本体筒芯施加压缩应力,从而使得缸筒整体强度得到有效提升,缸筒组件结构图如图3所示。

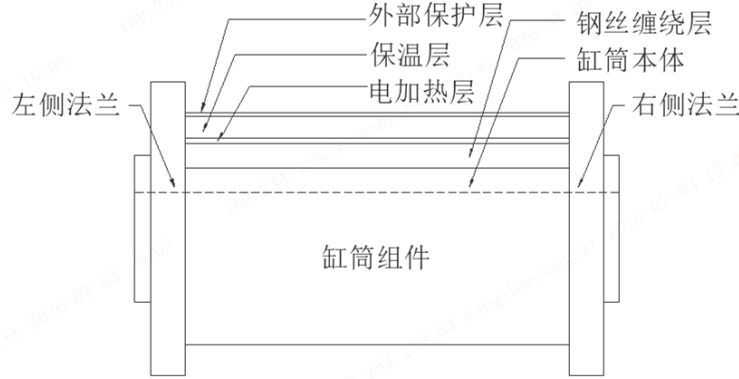


图3 缸筒组件结构图

3 等静压机数学模型

3.1 钢丝缠绕缸筒数学模型

在预应力状态下,缸筒内壁拉应力和外部钢丝缠绕层挤压应力同时作用,缸筒内部高压介质导致的内壁任意节点位置圆周向应力,使用 Lamé 公式进行计算:

$$K = \frac{R_j}{R_i} \text{ 或 } K_r = \frac{R}{R_i} \quad (1)$$

$$\sigma_{pt} = P_i \frac{1}{K^2 - 1} \left(1 + \frac{K^2}{K_r^2} \right) \quad (2)$$

式中: R_j —缸筒筒芯外径; R_i —缸筒筒芯内径; R —缸筒钢丝缠绕层外径; P_i —缸筒内壁介质压力。

预紧状态下,钢丝缠绕层对筒芯内壁的圆周向应力为:

$$|\sigma_{gti}| = \sigma_{grj} \left(\frac{2K_i^2}{K_i^2 - 1} \right) \quad (3)$$

式中: σ_{grj} —缸筒内芯外壁径向应力; 预紧系数^[4]为 η 缸筒筒芯预紧圆周向应力与缸筒内工作载荷所造成的圆周向应力比值,具体计算过程如下:

$$\eta = \frac{|\sigma_{gti}|}{\sigma_{pt}} \quad (4)$$

等剪应力的缠绕方式下,从钢丝缠绕层外半径 R 到缸筒筒芯半径 R_i ,保持钢丝缠绕层的平衡问题,具体计算过程如下:

$$P_i \frac{R_j^2 + R_i^2}{R_j^2 - R_i^2} + [\sigma]' \ln \frac{R_i}{R_o} \cdot \frac{2R_j^2}{R_j^2 - R_i^2} = \frac{1-\eta}{\eta} [\sigma] \quad (5)$$

$$\text{假设: } A = \frac{1}{2[\sigma]'} \left[P_i - \frac{1-\eta}{\eta} [\sigma] \right]$$

$$B = \frac{1}{2[\sigma]'} \left[P_i + \frac{1-\eta}{\eta} [\sigma] \right]$$

根据上述设元简化、整体带入,再由假设条件带入计算公式(5),计算过程如下:

$$A + \frac{B \cdot R_i^2}{R_j^2} = \ln \frac{R_o}{R_j} \quad (6)$$

式中: A —换元子计算式1; B —换元子计算式2; R —缸筒钢丝缠绕层外径; R_j —缸筒筒芯外径; R_i —缸筒筒芯内径。

由上述 Lamé 公式,推导关系列式如下:

$$\eta P_i \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \leq [\sigma]$$

$$R \geq R_i \sqrt{\frac{[\sigma] + \eta P_i}{[\sigma] - \eta P_i}} \quad (7)$$

式中: R —缸筒钢丝缠绕层外径; R_i —缸筒筒芯内径。

从而计算得到缸筒钢丝缠绕层外径 R 和缸筒筒芯外径 R_j 。

3.2 钢丝缠绕机架数学模型

通过预应力钢丝缠绕的机架,整体疲劳强度得到有效提高,改变了传统的受力方式,改拉为压,使得受力集中情况得到改善,使用两个半圆梁和两个立柱组成的牌坊结构形式,承受中心载荷,提高整体刚度、强度和稳定性。

立柱主要起到承上启下的作用,根据文献^[5]能够承受不同性质的载荷,在该牌坊式框架结构下,主要承受压应

力, 立柱截面为矩形实心结构, 是经过正火和回火的低合金铸钢, 静载荷安全系数取 1.3~1.6, 立柱横截面积 A_c 计算公式如下:

$$A_c = \frac{1.3\eta P}{i[\sigma]} \quad (8)$$

式中: A_c —立柱横截面积; i —表示立柱的个数; P —具体的工作载荷; 1.3—立柱材料弯曲应力的估算系数。

立柱矩形截面短边长度 a , 长边长度 b , 由 $\lambda = a/\omega$ 推导得出:

$$a = \lambda \omega \quad (9)$$

再因为 L 为框架窗口长度的一半, ω 为窗口宽度的一半,

$$\gamma = L/\omega \quad (10)$$

当 $4 < \gamma \leq 8$ 时, $\lambda = 1.0-1.3$;

当 $2 < \gamma \leq 4$ 时, $\lambda = 0.6-0.7$;

当 $\gamma \leq 2$ 时, $\lambda = 0.2-0.3$;

进而得到如下公式:

$$a = \frac{A_c}{b} \quad (11)$$

半圆梁的作用是连接两侧的立柱, 半圆梁外侧端面加工有安装导杠和油缸安装座的连接螺栓孔, 是钢丝缠绕工序的主要承压构件, 卧式等静压机两侧的半圆梁是对称件, 在共同构成的牌坊式框架结构中承受化解主体造成的压应力, 半圆梁截面为半圆实心结构, 和立柱一样, 材质也是经过正火和回火的低合金铸钢, 经过上述计算已经知道机架框架窗口尺寸, 半圆梁的槽底半径 R , 计算公式如下:

$$R = \omega + \lambda \omega \quad (12)$$

式中: R —半圆梁的槽底半径; λ —由 γ 推导出的系数; ω —机架窗口宽度的一半。

机架整体外部使用钢丝缠绕方式提高刚性和强度, 钢丝截面形状为矩形, 钢丝材质选用和缸筒钢丝缠绕相同的, 钢丝内部会存在拉应力造成截面形状弹性变形, 半圆梁和立柱对钢丝的弯曲应力, 参照文献^[6]已知钢丝缠绕方式分为等张力缠绕和变张力缠绕, 缠绕过程中对钢丝的张力值恒定不变的方式为等张力缠绕, 为了保证各层钢丝预应力相同, 对钢丝缠绕过程中的每层初张力进行调整的钢丝缠绕方式为变张力缠绕, 本论文讨论的是第二种钢丝缠绕方式, 即变张力钢丝缠绕方式, 根据 ξ_1 和 ξ_2 计算值对比, 判断机架适用于 A 型缠绕方式还是 B 型缠绕方式, 计算公式如下:

$$\xi_1 = \frac{\alpha \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right)}{\left(\frac{L}{R_1} + \alpha \right) \ln \left(\frac{\frac{L}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} + \alpha}{\frac{L}{R_1} + \alpha} \right)} \quad (13)$$

$$\xi_2 = \frac{\alpha \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right)}{\left(\frac{L}{R_1} + \alpha \frac{R_2}{R} \right) \ln \left(\frac{\frac{L}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} + \alpha}{\frac{L}{R_1} + \alpha} \right)} \quad (14)$$

式中: α —为钢丝不发生扭曲翻转的前提下, 钢丝面与水平方向的夹角值。

再利用钢丝截面面积等参数, 计算钢丝缠绕层数, 计算过程如下式:

$$z = \frac{2iP_c}{\left(\frac{p_0}{d} - 1 \right) \left(C \pm \sqrt{C^2 + 4DE} \right)} \quad (15)$$

3.3 上下料系统平衡方程

锂电池等静压机上下料系统, 采用气缸伸缩来回推动上料槽和固态电池, 完成上料和下料动作。

力学平衡方程为:

$$f \cdot (G_1 + G_2) = A_1 p_1 \quad (16)$$

$$f \cdot (G_1 + G_2) = A_2 p_2 \quad (17)$$

式中: f —运动过程中的摩擦系数; G_1 —上料槽重力; G_2 —固态电池重力; A_1 —气缸有杆侧活塞面积; A_2 —气缸无杆侧活塞面积; p_1 —气缸有杆侧气压; p_2 —气缸无杆侧气压。

3.4 位置传感器数学模型

在锂电池等静压机动作系统中必须实现位置闭环控制, 在缸筒移动导轨和上下料工装移动导轨位设置有位移传感器。具体使用过程中传感器响应时间, 将位移传感器转化为惯性环节模型来表示。

位移传感器传递函数

$$G_x(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (18)$$

式中: K_s —位置传感器放大系数 (V/m); T_s —位置传感器的时间常数。

4 仿真模型建立

4.1 钢丝缠绕缸筒仿真计算

根据上述计算数学模型列举的前期条件, 诸如环境温度, 缸筒本体铜芯内径、外径、钢丝缠绕外径等等。开始在综合钢丝缠绕前提下, 仿真计算缸筒内腔温升和加压情况的曲线变化结果。

从图 4 仿真曲线可以看出, 当缸筒内腔加高压时, 内腔形变最大 0.72mm, 在可接受范围之内。

4.2 钢丝缠绕机架仿真计算

根据机架钢丝缠绕情况,分别根据工况需求,对钢丝缠绕层和机架本体进行仿真计算。如图5所示,可以看到

其最大径向力650MPa和最大切向力791MPa均低于材料屈服强度值,主体机架强度和刚性满足载荷要求。

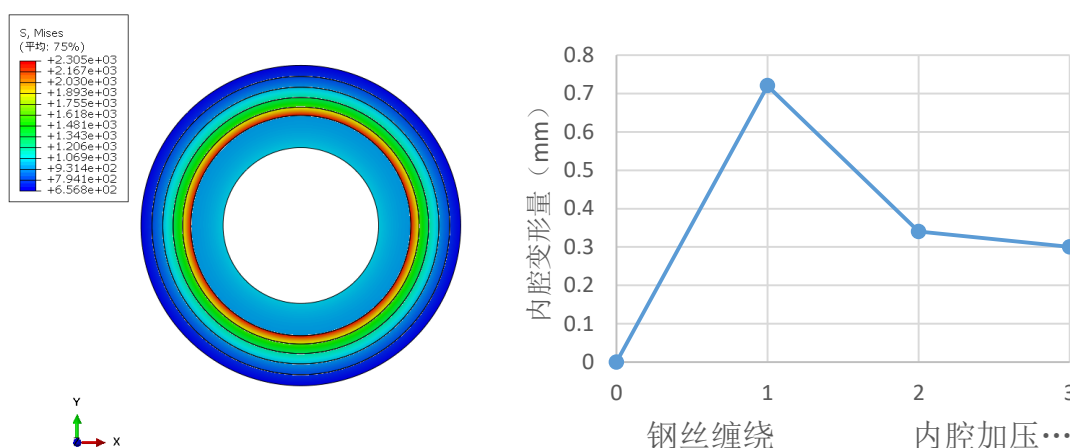


图4 加压状态下缸筒变形曲线

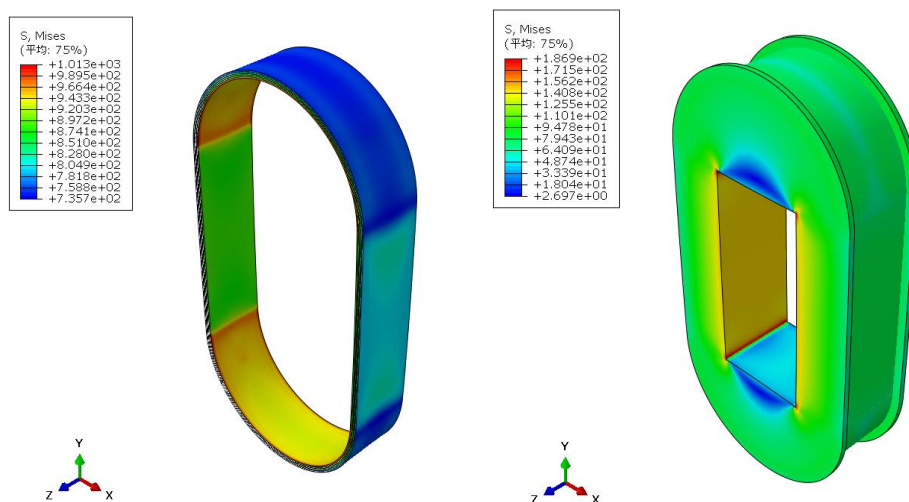


图5 加压状态下机架变形曲线

5 结语

通过对温等静压机的仿真分析,可得以下结论:

预紧力状态下,进行变张力钢丝缠绕的缸筒和机架,可以满足高压高温工况下的使用要求,形变值在可控范围之内,数学模型构建合理,符合工况要求。

【参考文献】

[1]王绍符、张喜荣.从静液压强的形成解读阿基米德原理和帕斯卡定律[N].物理通报,2011:8.
[2]付稣昇.结构动力学分析方法与 ANSYS Workbench 计算应用[M].北京:机械工业出版社,2024:2-3.

[3]马福康.等静压技术[M].北京:冶金工业出版社,1992:3:1-17.
[4]梁亚平.组合筒结构的最优化结构研究[J].中北大学学报:自然科学版,2007(5):94-97.
[5]王文斌.机械设计手册:第三册[C].北京:机械工业出版社,2004:953-963.
[6]颜永年,俞新陆.机械设计中的预应力结构[M].机械工业出版社,1989:22-27.
作者简介:王少鹏(1989—),男,河北邢台人,本科,中级工程师,研究方向为机电一体化自动化设备机械结构设计。