

5. “球阀”技术报告之一

球阀流固耦合模拟资料计算报告

温州市标准化科学研究院



温州市标准化科学研究院
温州大学机电工程学院

目录

1 球阀流固耦合仿真分析.....	3
1.1 球阀的仿真任务要求	3
1.2 流体计算部分的几何定义与网格划分	3
1.3 结构计算部分的几何定义与网格划分	5
1.4 结构计算部分的几何定义与网格划分	6
1.5 球阀（进口压强 0.3 MPA）的流场图.....	7
1.6 球阀（进口压强 0.3MPA）的曲线图	12
1.7 球阀（进口压强 1.5MPA）的流场图	14
1.8 球阀（进口压强 1.5MPA）的曲线图	19
1.9 球阀（进口压强 5 MPA）的流场图	20
1.10 球阀（进口压强 5MPA）的曲线图	25
1.11 结论.....	26
2 球阀的静力学分析.....	28
2.1 球阀的仿真任务要求	28
2.2 网格划分及边界条件	28
2.3 静力学结果分析	29

1 球阀流固耦合仿真分析

1.1 球阀的仿真任务要求

针对保一集团提供的阀门模型，在单一流动介质条件下进行其静力学分析、流动动态过程计算、流固耦合分析，了解阀门设计的流通能力、流阻系数和结构强度。具体为：针对指定的球阀模型，同时考虑流场造成的球阀结构变形（拟采用 ABAQUS 软件）及球阀变形对球阀内流场（拟采用 StarCCM+软件）的影响。

1.2 流体计算部分的几何定义与网格划分

针对 1.1 节中提出的任务要求，本仿真拟采用 StarCCM+软件计算球阀的流场。StarCCM+软件是由 CD-ADAPCO 公司（2016 年被西门子收购）开发的新一代通用计算流体力学（CFD）分析软件，与 ANSYS，CFX 等软件齐名。该软件在汽车工业应用广泛（原叫 STARCD），后拓展功能后改为 StarCCM+，开始在其他领域大力推广。该软件相比 ANSYS 等软件具有很强的网格生成能力，可以自动生成包括多面体网格、六面体核心网格、十二面体核心网格、四面体网格在内的多种体网格。并且还能完成复杂形状数据输入、表面准备——包面（保持形状、简化几何、自动补洞、防止部件接触、检查泄露等功能）、表面网格重构等。

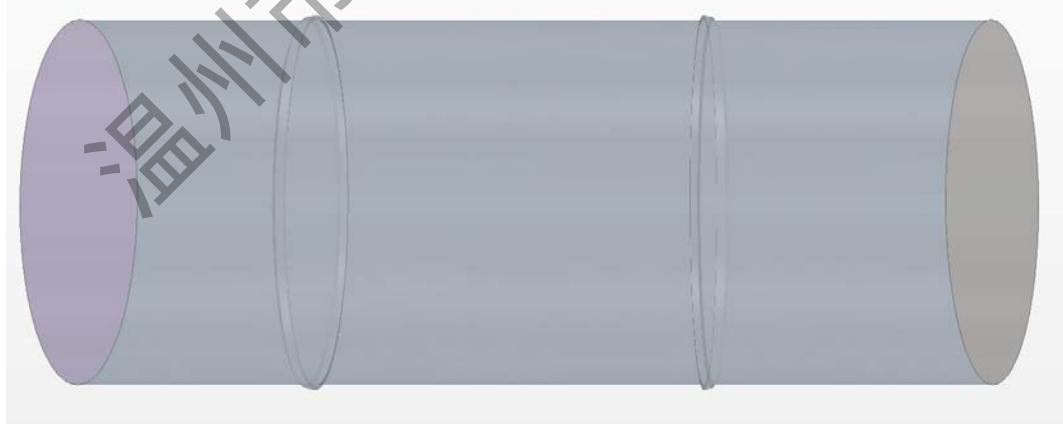


图 1.1 球阀壳体内壁的 StarCCM+几何图



图 1.2 球阀壳体内壁的网格划分

图 1.3 压力入口和出口定义

如图 1.2 所示, 在对球阀的流场仿真中, 流体计算域只包含了与管道内流动直接接触的表面(即内壁, 下称流固耦合交界面)。其余球阀结构因不与流动介质(水, 1000kg/m^3 , 不可压流体)直接接触, 不需要在流场仿真中出现。计算域为球阀壳体内壁包络体以内的部分, 接近于圆柱形(由球阀外壳、球体和密封塞的包络形状决定)。在本仿真中假定球阀的前端连接一段高压流体, 具体压强如后续小节所述, 球阀的后端假定连接大气, 压强为 0.1MPa (大气压强)。本流体仿真拟采用多面体网格模拟球阀的流场。多面体网格的最大的优点是它有很多邻居单元(通常为 10), 所以能更精确地计算控制体的梯度(采用线性分布和利用最近的邻居单元即可)。甚至在边部和角部, 多面体网格通常也会有多个邻居单元, 这样可以正常计算梯度和局部流动分布。当然邻居控制体越多, 需要内存和每个网格上计算量越大, 这些可在精度上得到补偿。

首先, 多面体网格对拉伸不像四面体网格那样敏感。智能的网格生成和优化技术提供很多实现手段: 通过引入点, 线和面, 控制体能自动合并、分割、修改。确实, 未来网格质量的显著提高, 会带来求解器速度和精度的提高。另外, 以前基于四面体网格求解器中需要特殊处理的, 采用多面体网格后不再需要特殊处理了, 例如基于局部网格加密, 滑移网格分界面, 循环边界可能需要特殊的多面体处理, 但是对求解器本身是完全相同的。多面体网格尤其适用于处理回流问题。测试表明在顶盖驱动流要达到一定精度, 需要的多面体网格数量甚至比六面体网格还少。

经过计算, 得到流体对球阀壳体内壁造成的压强数据, 并将压强从

STARCCM+的内壁映射到 ABAQUS 的内壁,求解球阀整体结构的变形。如图 1.4 所示, STARCCM+与 ABAQUS 软件之间存在内置接口, 只是需要两个软件的版本匹配。其中, ABAQUS 的版本可以略高于图 1.4 中打勾的部分。本次仿真采用 STARCCM+12.04 和 ABAQUS19.0。

STAR-CCM+ version	Qualified Abaqus version									
	6.10	6.10EF	6.11	6.12	6.13	6.14	2016x	2017x	2018x	2019x
11.02						✓	✓			
12.04							✓	✓		
12.06								✓		
13.06								✓	✓	✓

图 1.4 STARCCM+与 ABAQUS 自带数据传递接口的版本匹配

1.3 结构计算部分的几何定义与网格划分

ABAQUS 是一套功能强大的工程模拟的有限元软件, 其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库。并拥有各种类型的材料模型库, 可以模拟典型工程材料的性能, 其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料, 作为通用的模拟工具, ABAQUS 除了能解决大量结构(应力/位移)问题, 还可以模拟其他工程领域的许多问题, 例如热传导、质量扩散、热电耦合分析、声学分析、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及压电介质分析。

ABAQUS 被广泛地认为是功能最强的有限元软件, 可以分析复杂的固体力学结构力学系统, 特别是能够驾驭非常庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析, 同时还可以做系统级的分析和研究。ABAQUS 的系统级分析的特点相对于其他的分析软件来说是独一无二的。由于 ABAQUS 优秀的分析能力和模拟复杂系统的可靠性使得 ABAQUS 被各国的工业和研究中所广泛的采用。ABAQUS 产品在大量的高科技产品研究中都发挥着巨大的作用。

在 1.1 节描述的球阀仿真任务要求及 1.2 节描述的球阀流体计算的基础上, 还需要求解球阀结构的变形, 并提取球阀壳体内壁与内流场交界面(下称流固耦

合交界面)的变形,将变形后的内壁映射到 STARCCM+软件。STARCCM+软件会根据变形后的内壁计算新时刻的流场。如此循环往复,STARCCM+计算流场,ABAQUS 软件计算变形,迭代前进,实现流固双向耦合。

如图 1.5 所示,球阀经过简化后主要考虑橡胶塞、球体和球阀外壳结构。其中,密封塞为聚四氟乙烯 PTFE,阀门球体为不锈钢 410SS 材料,球阀壳体为碳钢材料。图 1.6 给出了球阀的结构对称面上的网格剖面图,球阀结构左右两端为固定边界条件(假定左侧连接至上级水管,右侧连接固定的空气管道)。球体、橡胶塞和球阀外壳之间的接触面采用共节点处理,从而使接触面粘接在一起。

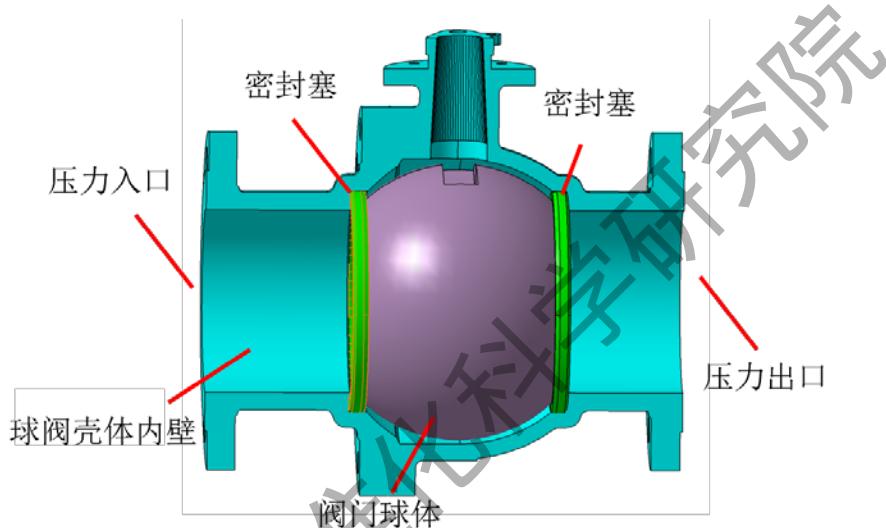


图 1.5 球阀结构几何剖面图

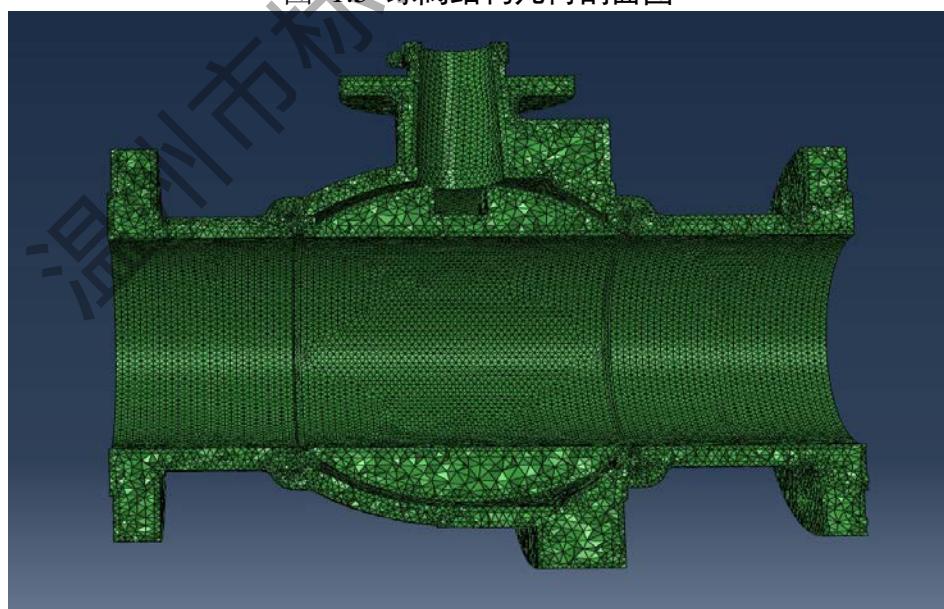


图 1.6 球阀结构网格剖面图

1.4 结构计算部分的几何定义与网格划分

本节根据球阀的仿真任务要求，需要求解阀门的流通能力，流阻系数和结构强度等信息，首先按照如图 1.7 所示，分割两个特征截面。

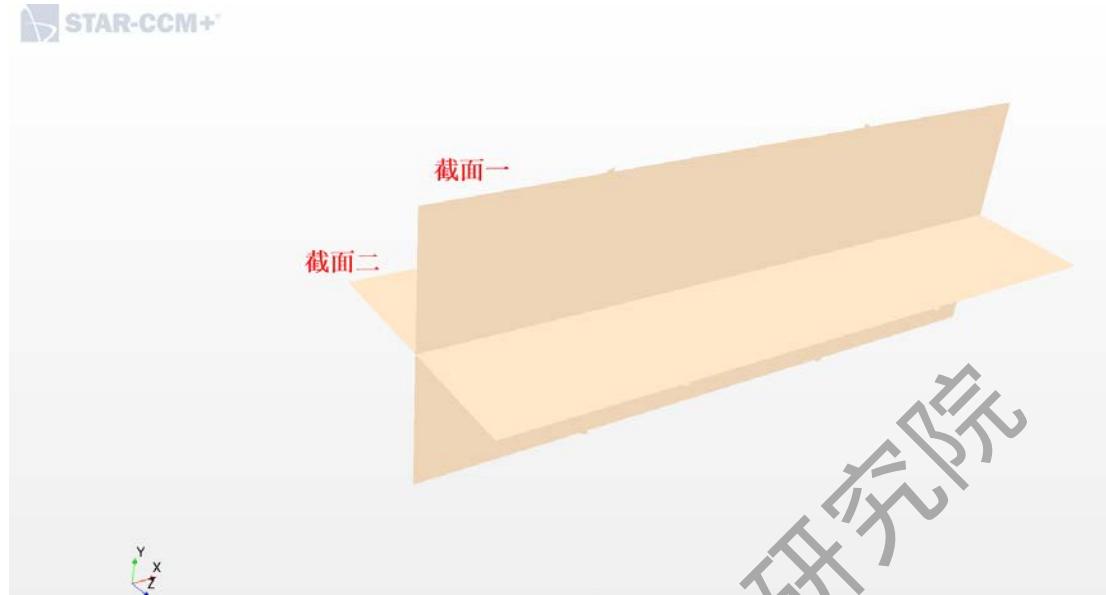
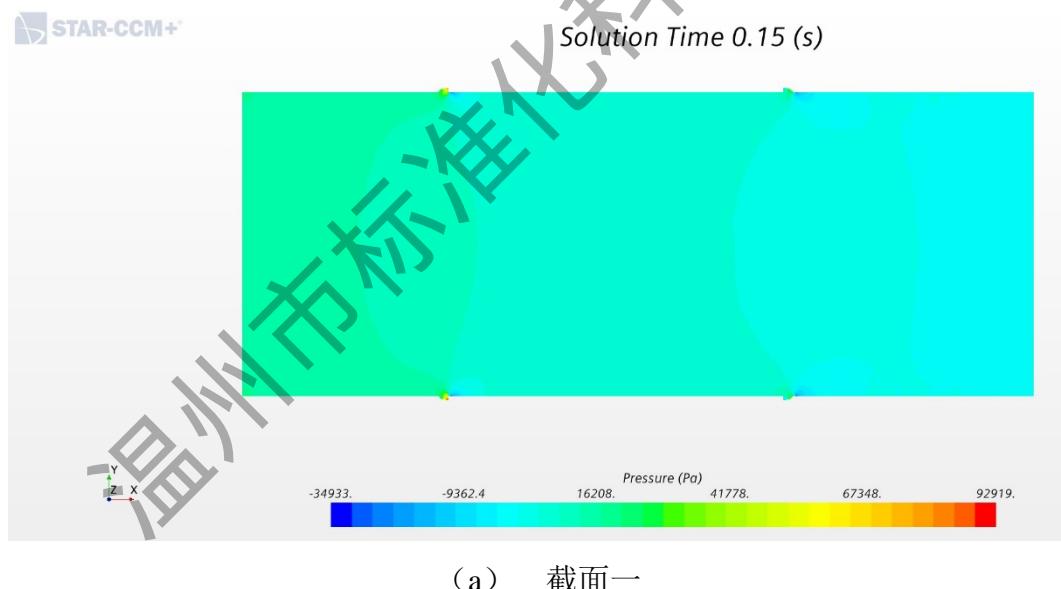


图 1.7 特征截面定义

1.5 球阀（进口压强 0.3 MPa）的流场图

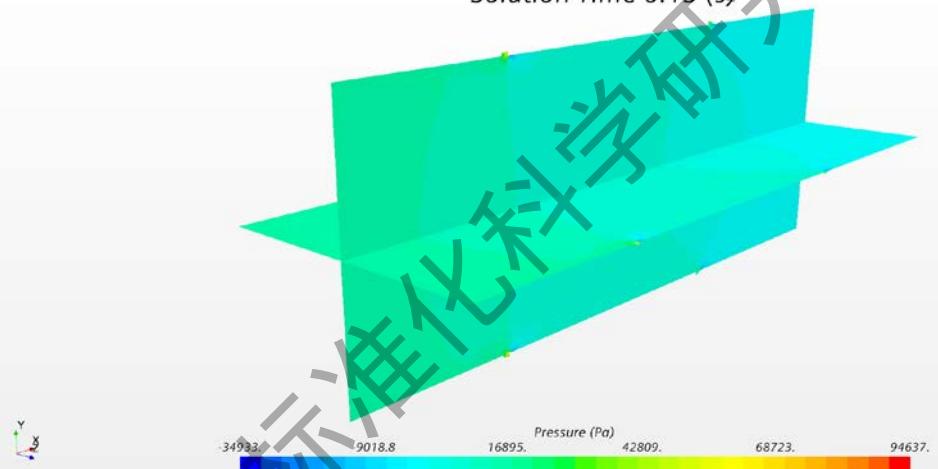


Solution Time 0.15 (s)



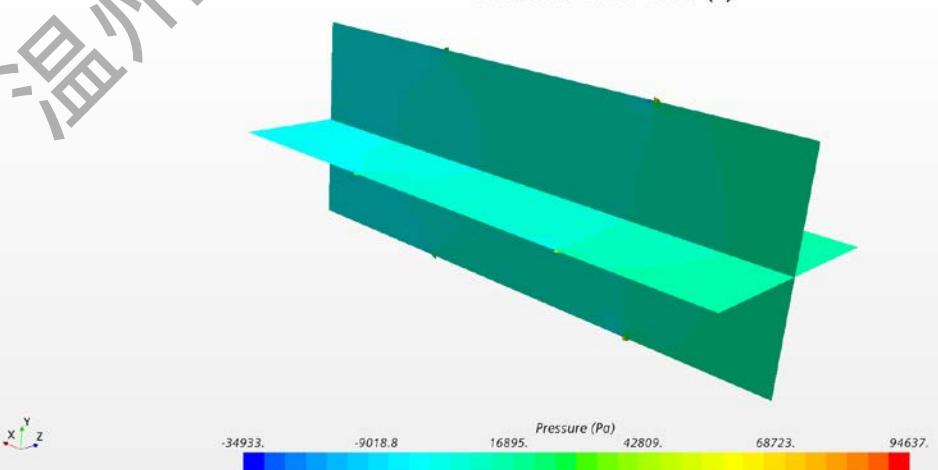
(b) 截面二

Solution Time 0.15 (s)



(c) 视角一

Solution Time 0.15 (s)



(d) 视角二

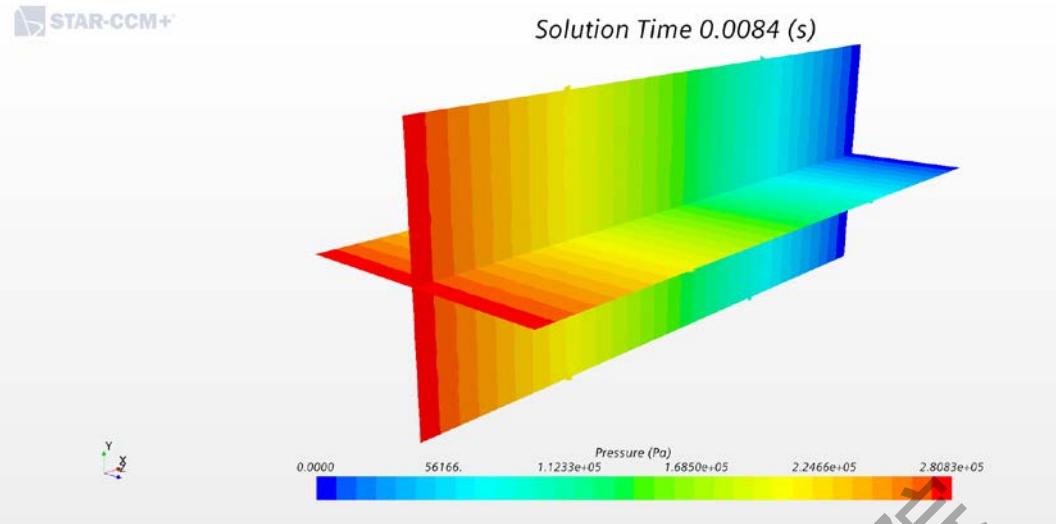
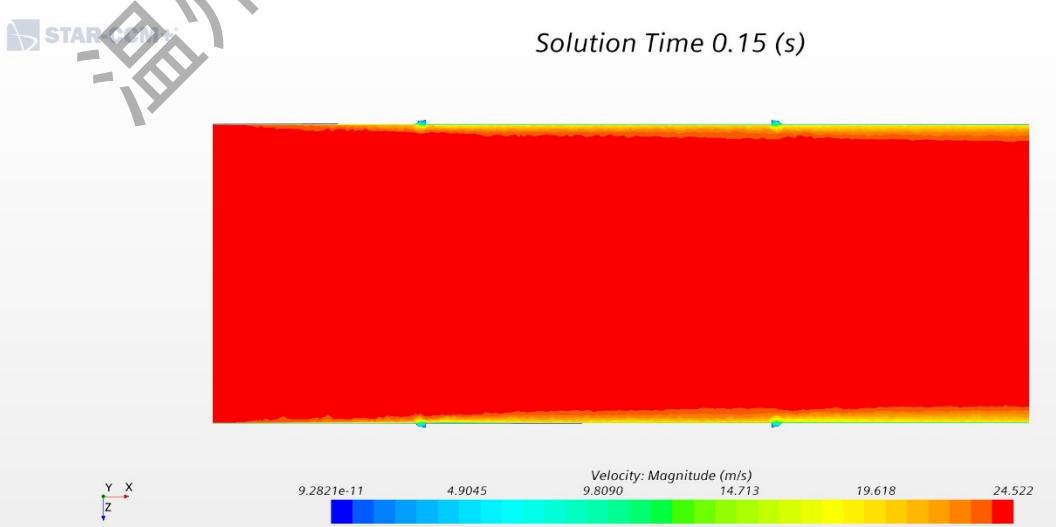
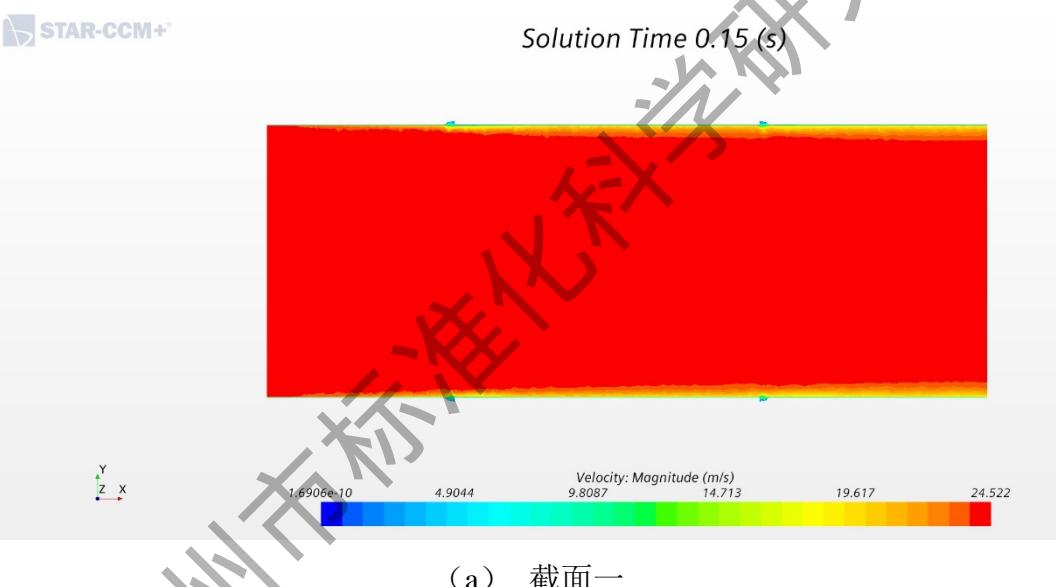
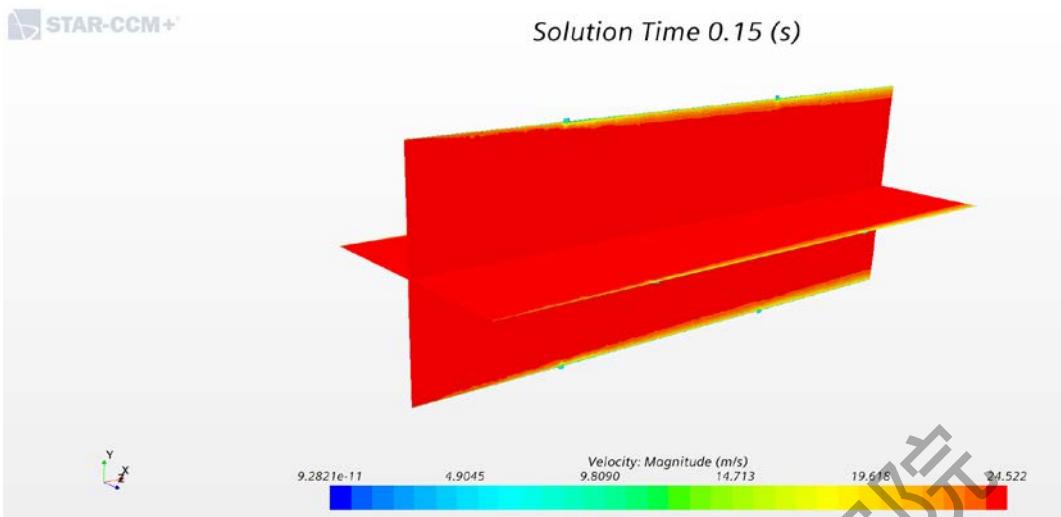


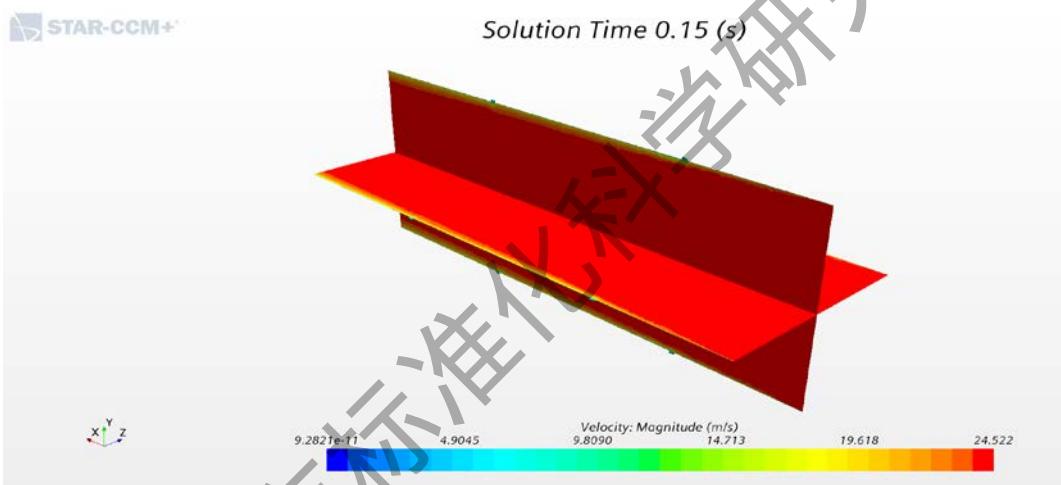
图 1.8 球阀（进口压强 0.3 MPa）的压力分布



(b) 截面二

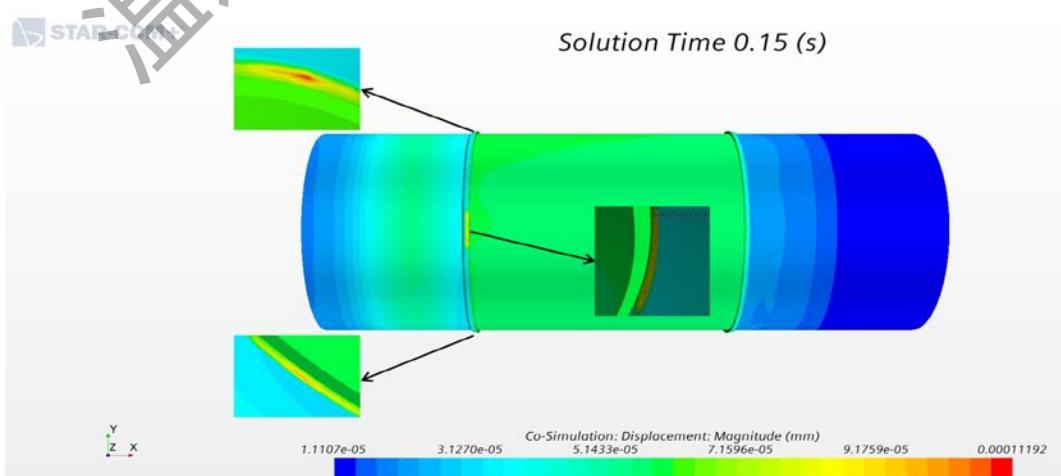


(c) 视角一

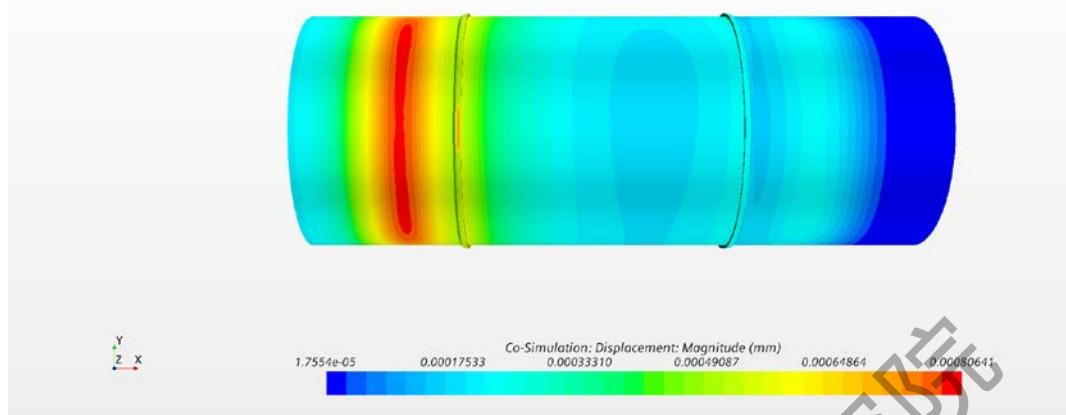


(d) 视角二

图 1.9 球阀（进口压强 0.3 MPa）的流速分布



(a) 多视角变形分布



(b) 历史最大变形量

图 1.10 球阀（进口压强 0.3 MPa）的变形分布

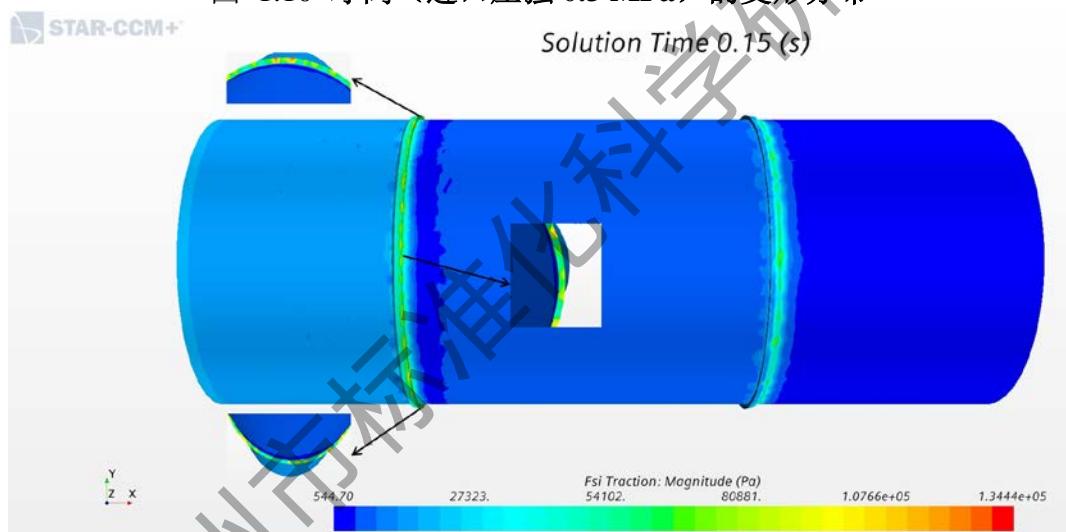


图 1.11 球阀（进口压强 0.3MPa）的多视角流固耦合面压强分布

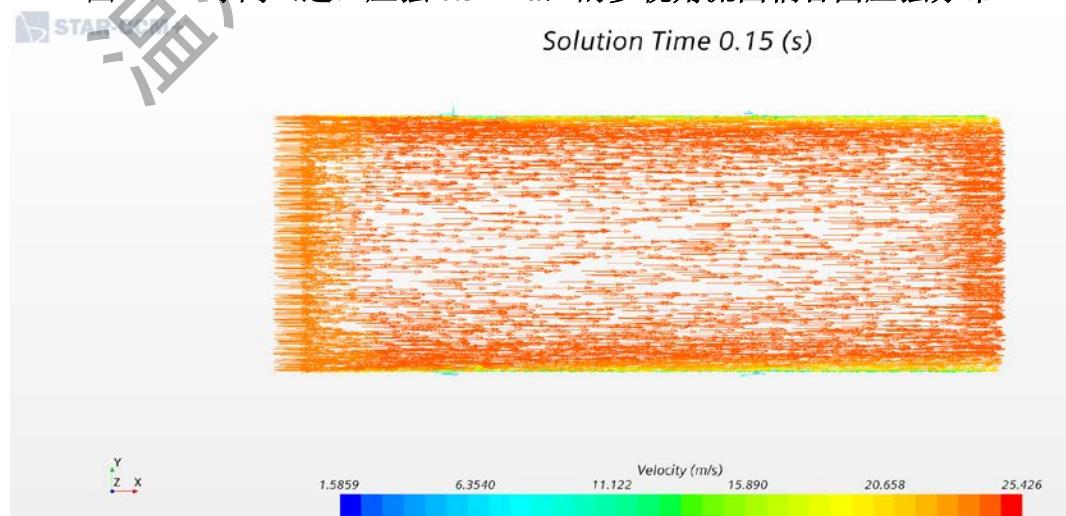


图 1.12 球阀（进口压强 0.3 MPa）的流速矢量分布

经过计算，球阀壳体内壁的变形呈现先变大后变小最后趋于稳定的趋势（见附件视频）。如图 1.8~图 1.12 所示，0.15s 时流固耦合计算的流场已经达到稳定，此时，最大变形达到 $1.1192e-4$ mm(压强可达到 $9.4637e4$ Pa)，在此之前 $0.0084s$ 时达到历史最大变形 $8.0641e-4$ mm（压强达到 $2.8083e5$ Pa），最大变形集中在球性阀体和密封塞交界处。球阀内的流速基本一致，除了靠近壁面处流速有所降低。

1.6 球阀（进口压强 0.3MPa）的曲线图

根据仿真任务要求，需要了解球阀的流通能力，流阻系数和结构强度，因此报告根据流量系数，流阻系数，压力曲线图来具体分析球阀的各项指标。流量系数，流阻系数，压力曲线具体定义如下：

$$C = Q \sqrt{\frac{\rho \times 100000}{\rho_{\text{水}} \times \Delta p}}$$

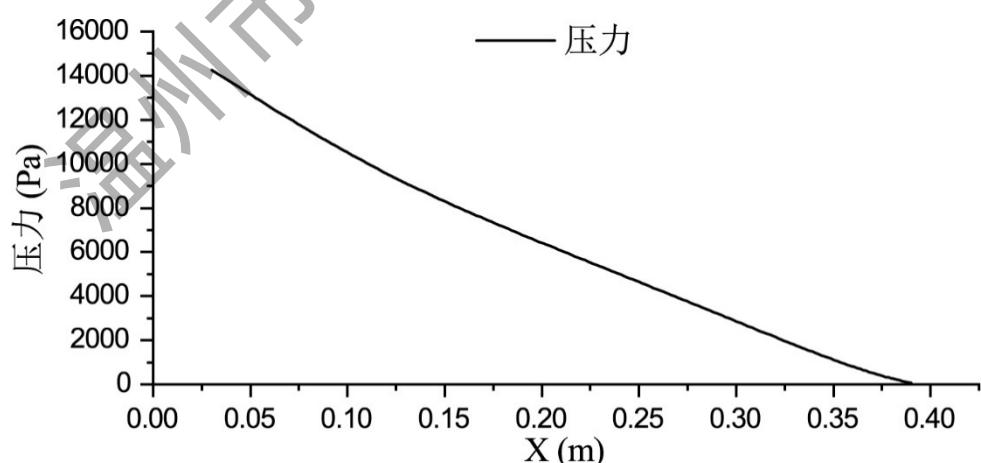
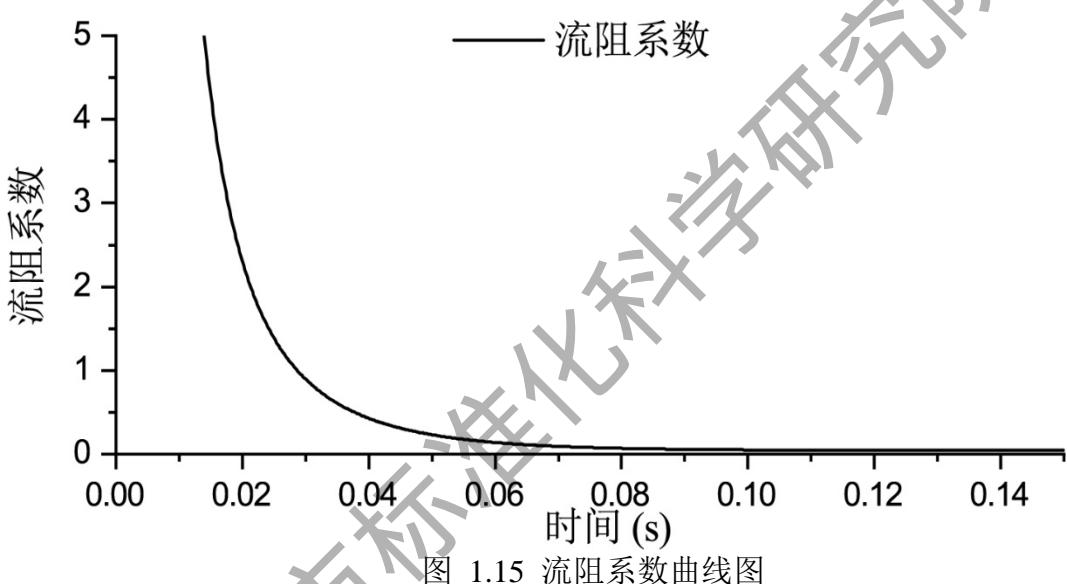
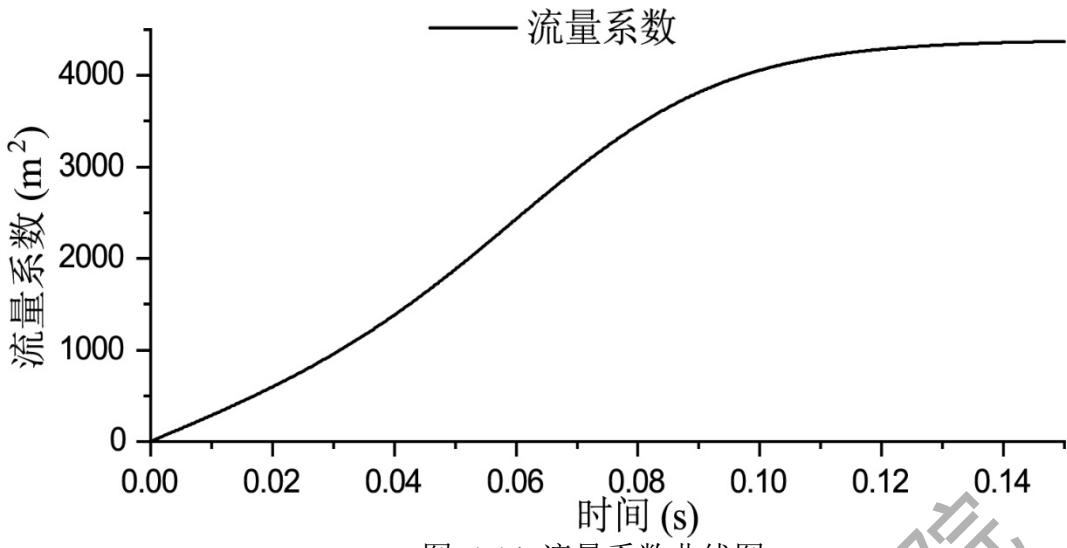
其中， C 是流量系数， Q 是体积流量，单位 m^3/h ; ρ 是介质相对于水的密度，仿真中考虑 ρ 为水，则比值为 1; Δp 是压力损失，单位 pa。

$$K = 2\Delta p / (\rho v^2)$$

其中， K 是流阻系数， v 是流体速度，单位 m/s 。



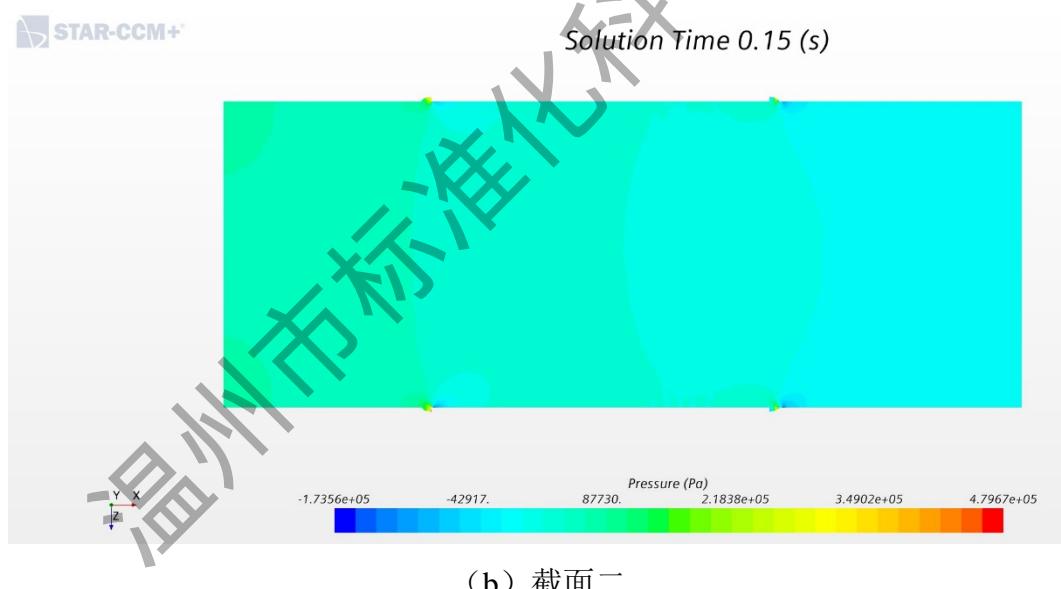
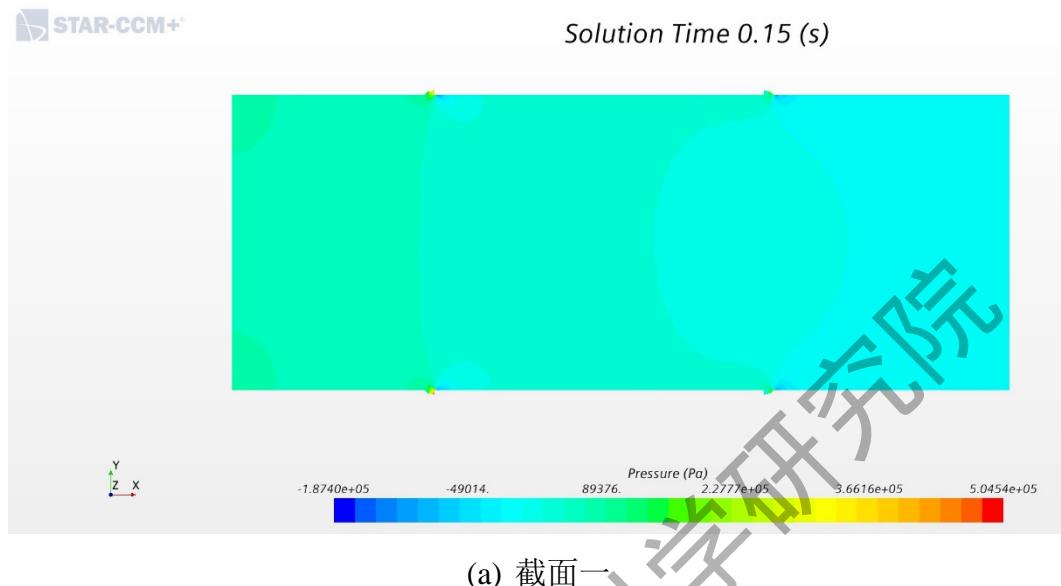
图 1.13 压力分布提取点图

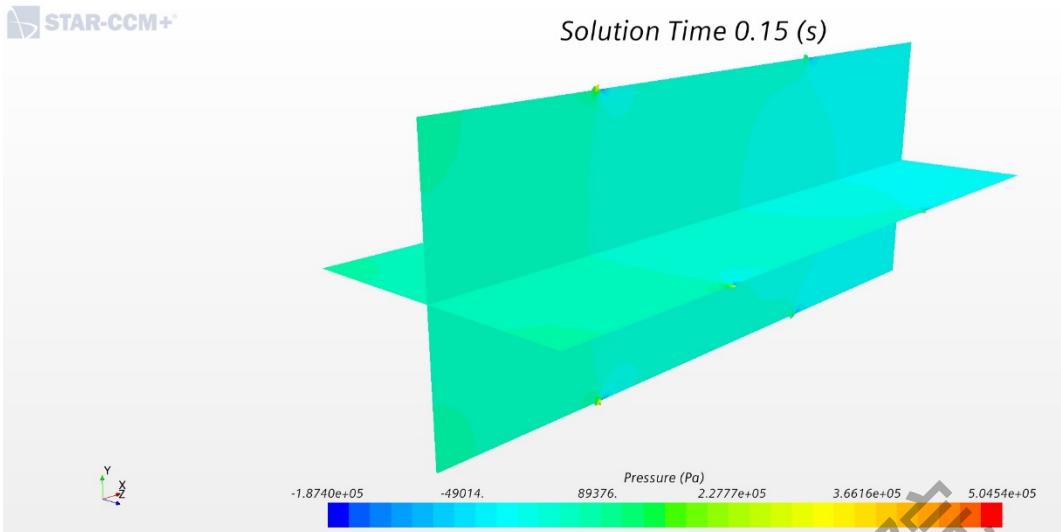


经过计算,球阀的的流量系数,流阻系数和压力系数如图 1.14-图 1.16 所示,流量系数曲线先增速明显再缓慢递增,最后趋于稳定达到 4370m^2 ; 流阻系数随着时间的增加大幅度降低,逐渐趋于平缓,稳定后最终达到 0.042; 如图 1.13 所

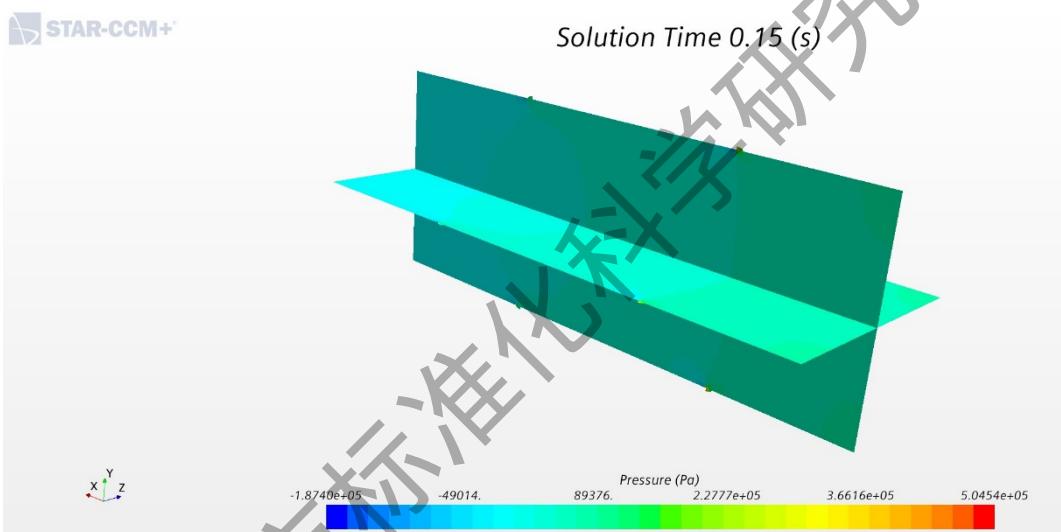
示, 压力曲线图通过在截面中的一端到另一端选取 9 个点分别在仿真计算中计算压力值, 构成压力曲线, 曲线呈现出从进口到出口逐渐减小的趋势。

1.7 球阀（进口压强 1.5MPa）的流场图

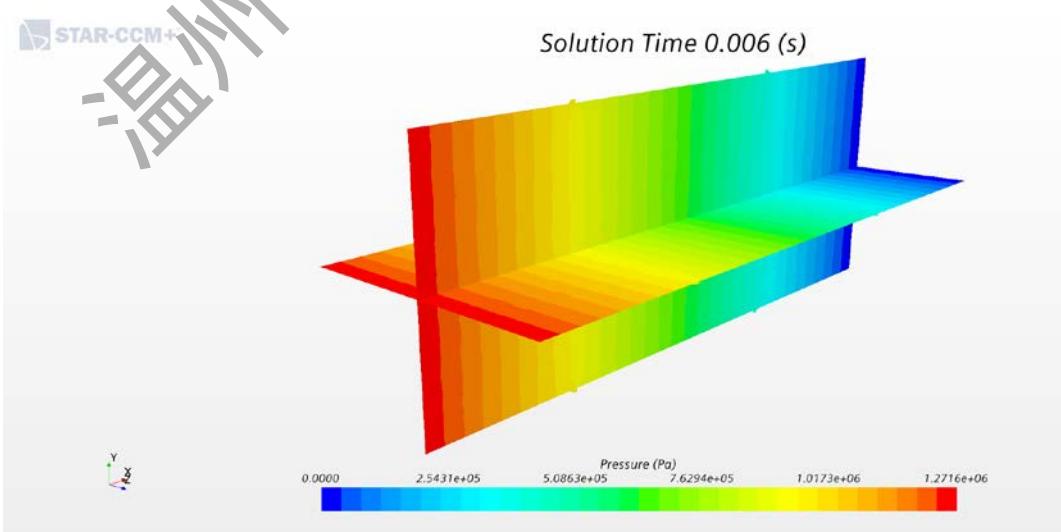




(c) 视角一



(d) 视角二



(e) 历史最大压力图

图 1.17 球阀（进口压强 1.5 MPa）的压力分布

STAR-CCM+

Solution Time 0.15 (s)



(a) 截面一

STAR-CCM+

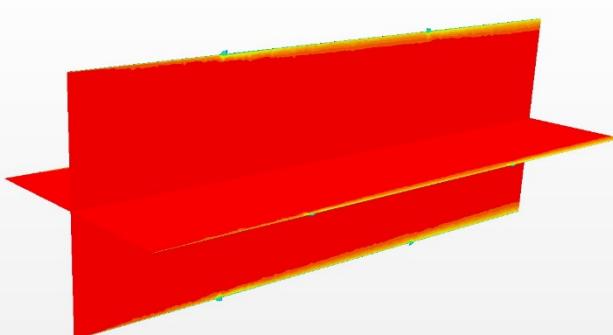
Solution Time 0.15 (s)



(b) 截面二

STAR-CCM+

Solution Time 0.15 (s)



(c) 视角一

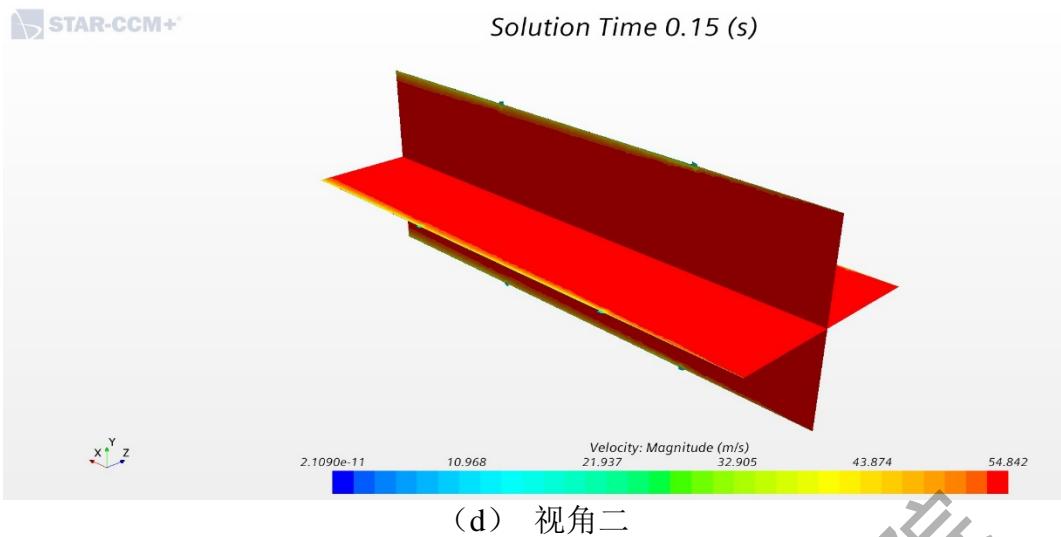


图 1.18 球阀（进口压强 1.5 MPa）的流速分布

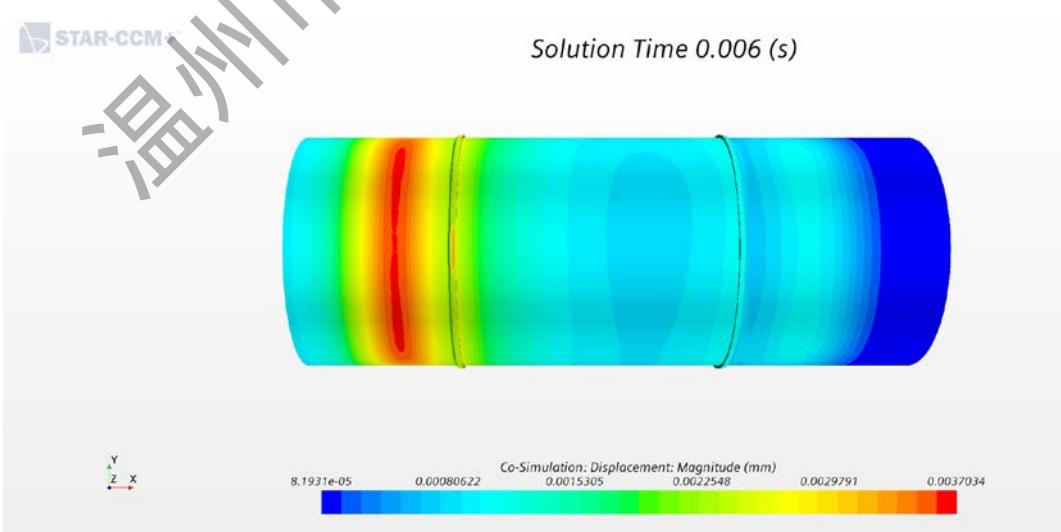
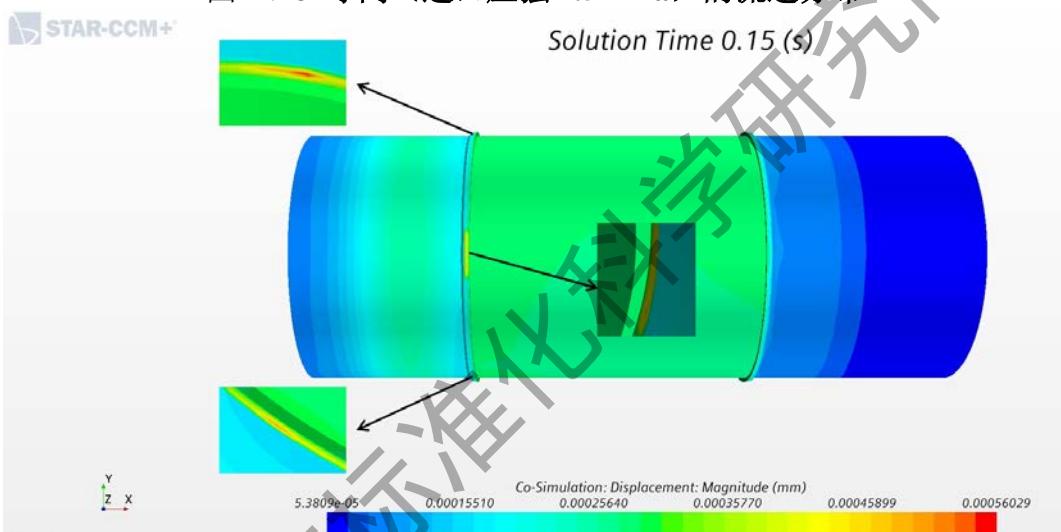


图 1.19 球阀（进口压强 1.5 MPa）的变形分布

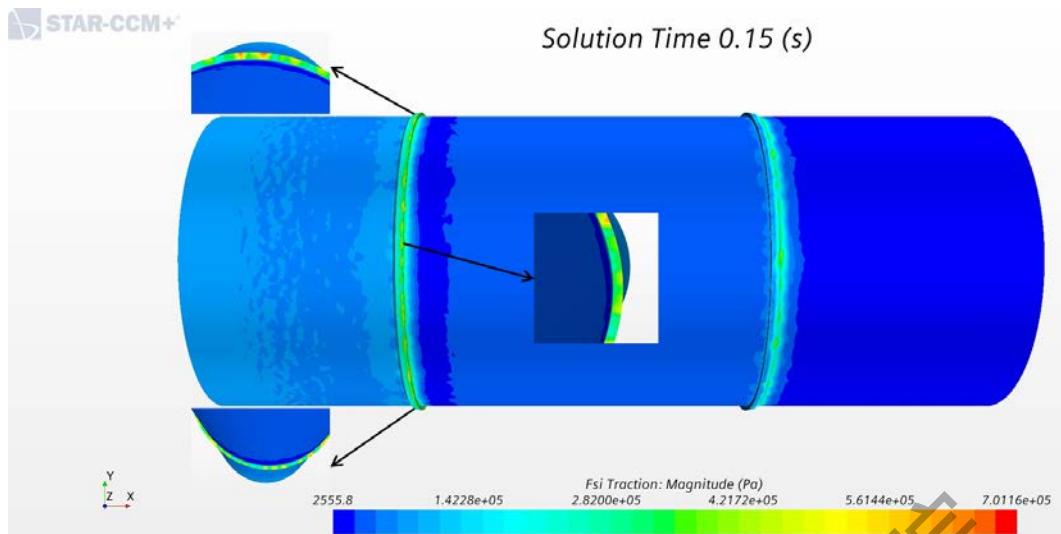


图 1.20 球阀（进口压强 1.5 MPa）的多视角流固耦合面压强分布

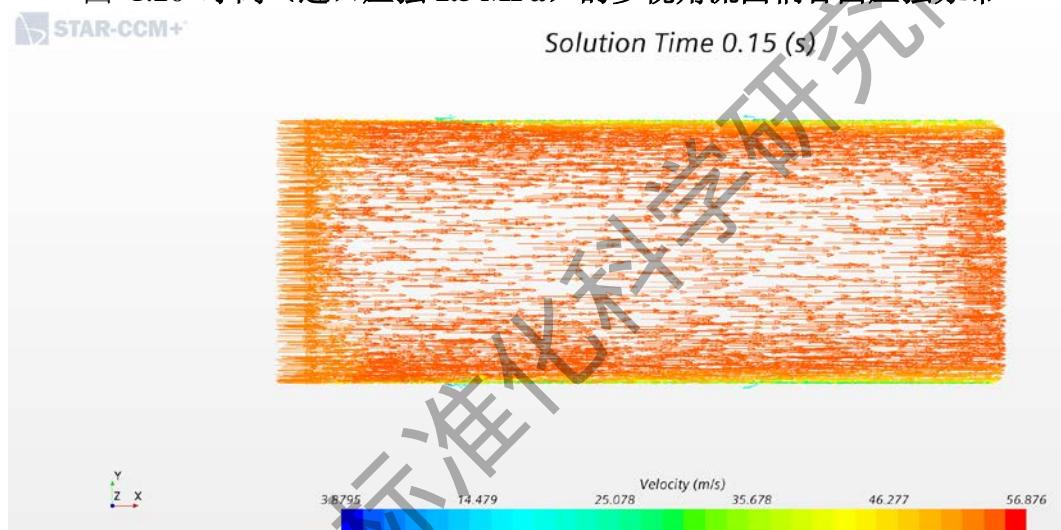


图 1.21 球阀（进口压强 1.5 MPa）的流速矢量分布

经过计算，球阀壳体内壁的变形呈现先变大后变小最后趋于稳定的趋势（见附件视频）。如图 1.17~图 1.21 所示，经过计算，0.15s 时流固耦合计算的流场已经达到稳定，此时，最大变形达到 $5.6029e-4$ mm（压强可达到 $5.0454e5$ Pa），在此之前 $0.006s$ 时达到历史最大变形 $3.7034e-3$ mm（压强可达到 $1.2716e6$ Pa），最大变形集中在球性阀体和密封塞交界处。球阀内的流速基本一致，除了靠近壁面处流速有所降低。

1.8 球阀（进口压强 1.5MPa）的曲线图

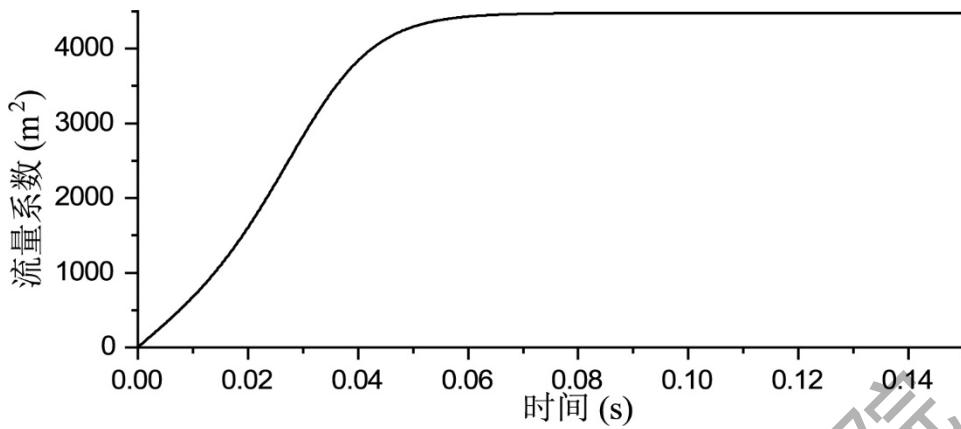


图 1.22 流量系数曲线图

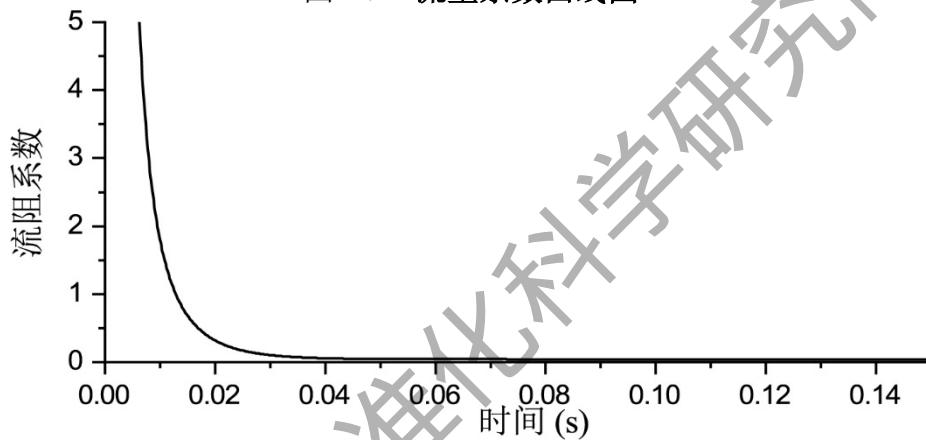


图 1.23 流阻系数曲线图

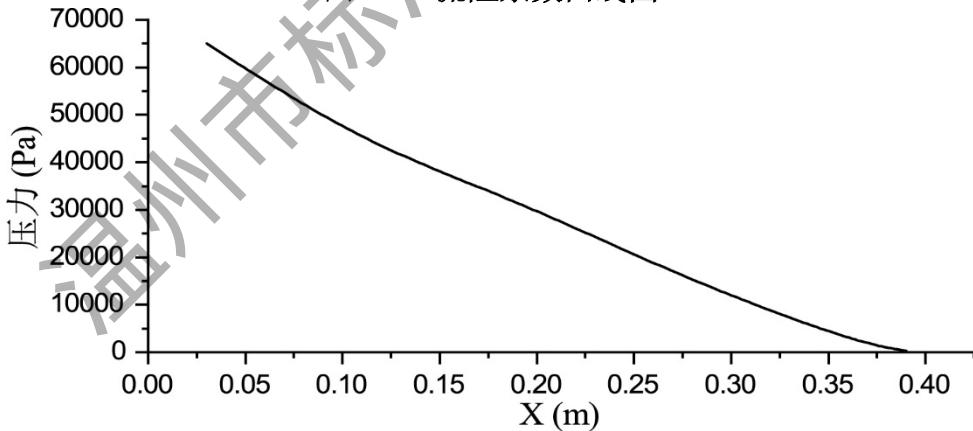
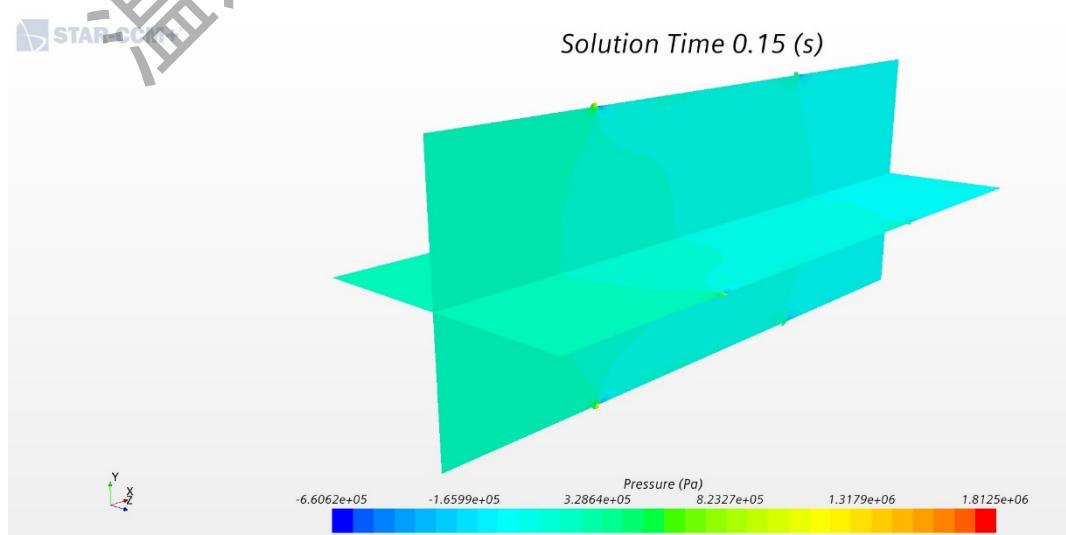
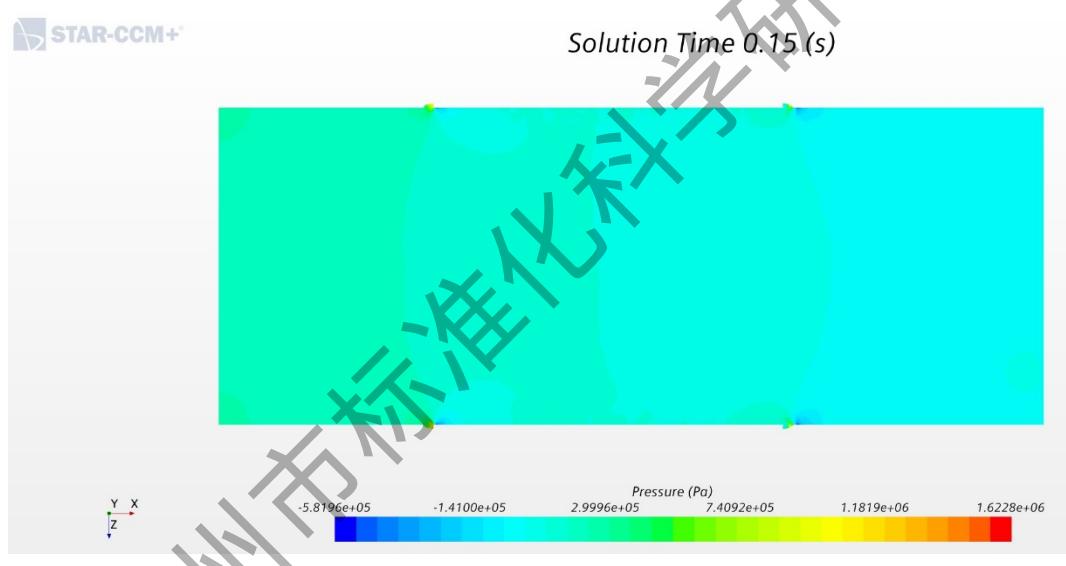
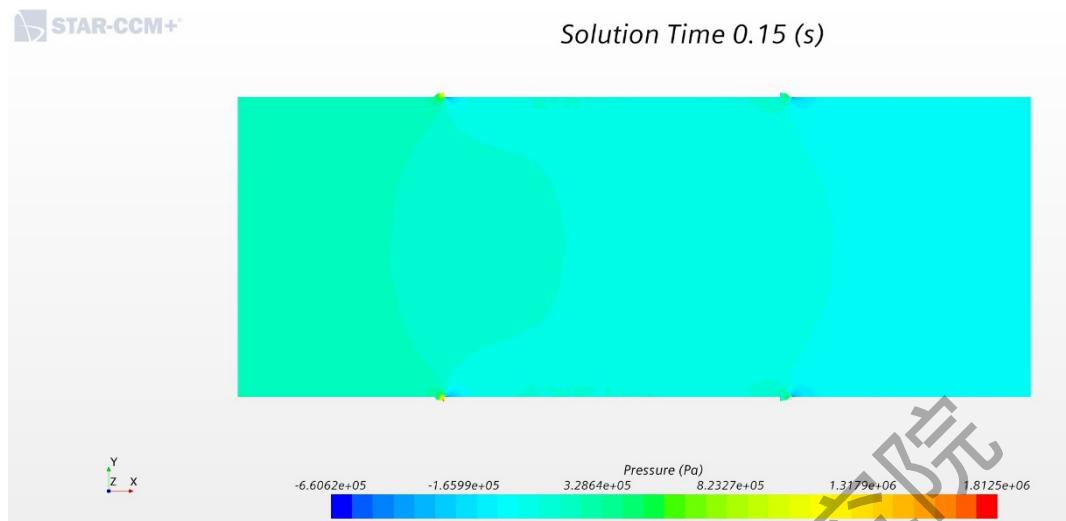


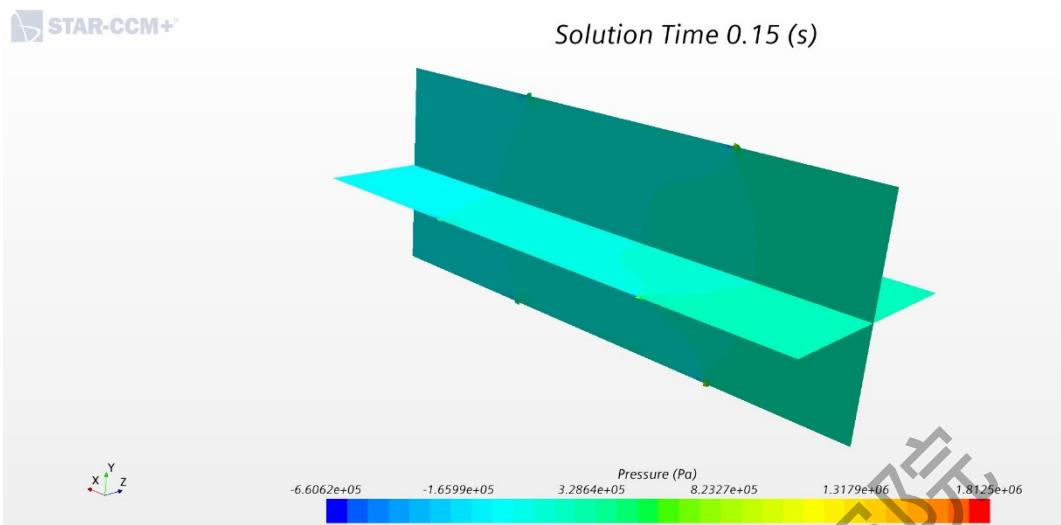
图 1.24 压力分布曲线图

经过计算，球阀的流量系数、流阻系数和压力系数如图 1.22-图 1.24 所示，流量系数曲线先增速明显再缓慢递增，最后趋于稳定达到 $4476.04 m^2$ ；流阻系数随着时间的增加大幅度降低，逐渐趋于平缓，稳定后最终达到 0.040；如图 1.13 所示，压力曲线图通过在截面中的一端到另一端选取 9 个点分别在仿真计算中计算压力值，构成压力曲线，曲线呈现出从进口到出口逐渐减小的趋势。

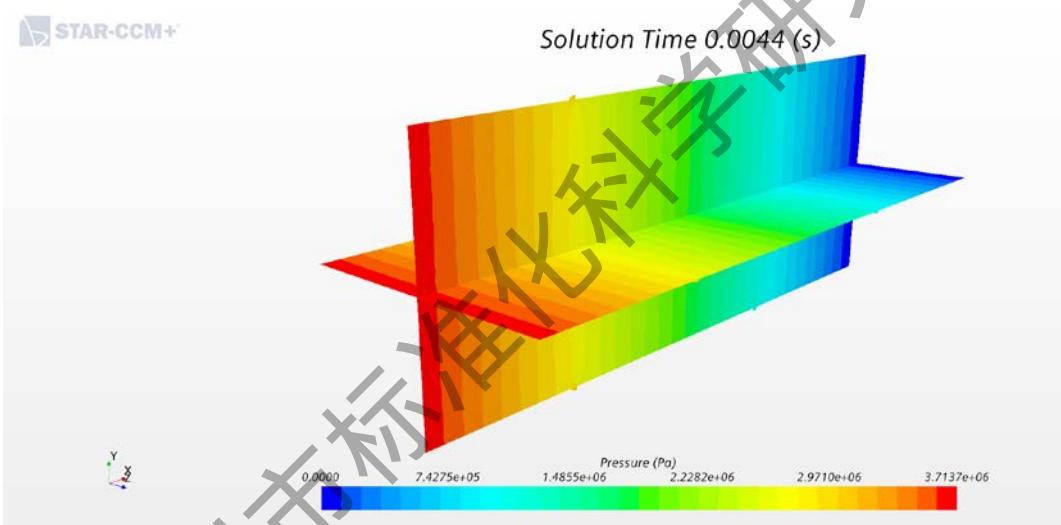
1.9 球阀（进口压强 5 MPa）的流场图



(c) 视角一



(d) 视角二



(e) 历史最大压强图

图 1.25 球阀（进口压强 5 MPa）的压力分布

Solution Time 0.15 (s)



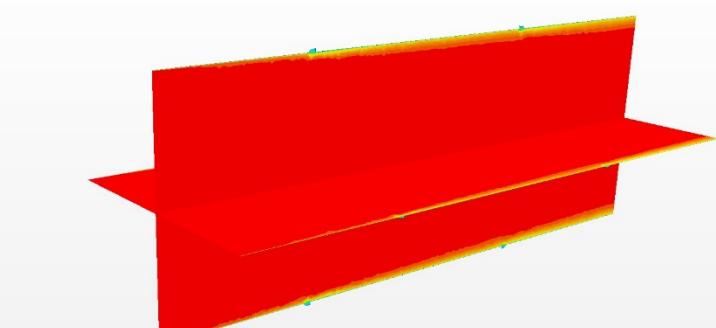
(a) 截面一

Solution Time 0.15 (s)



(b) 截面二

Solution Time 0.15 (s)



(c) 视角一

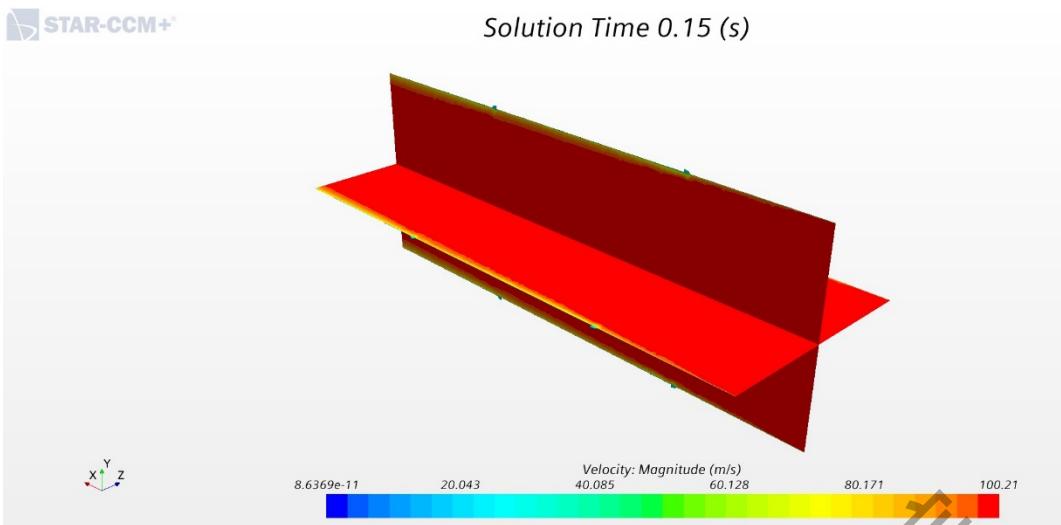


图 1.26 球阀（进口压强 5 MPa）的流速分布

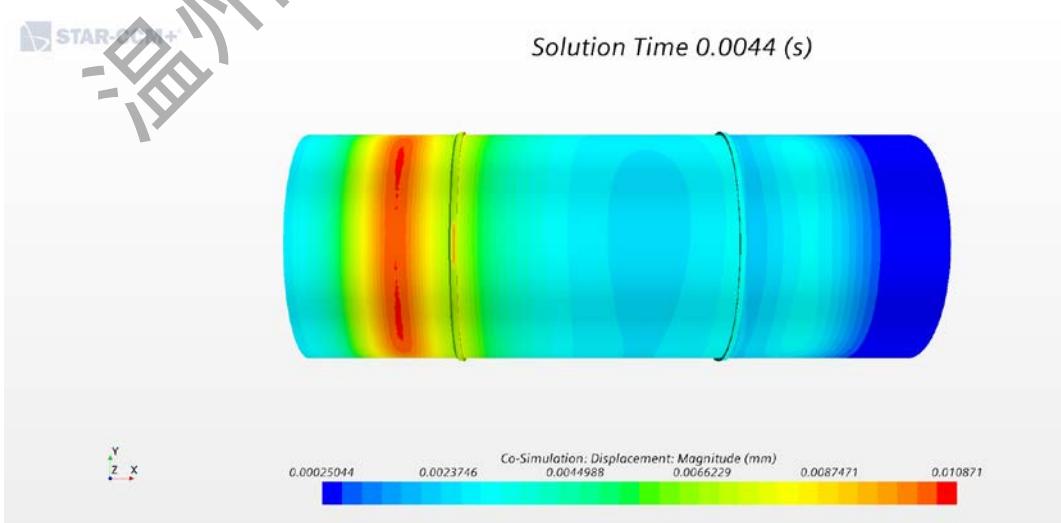
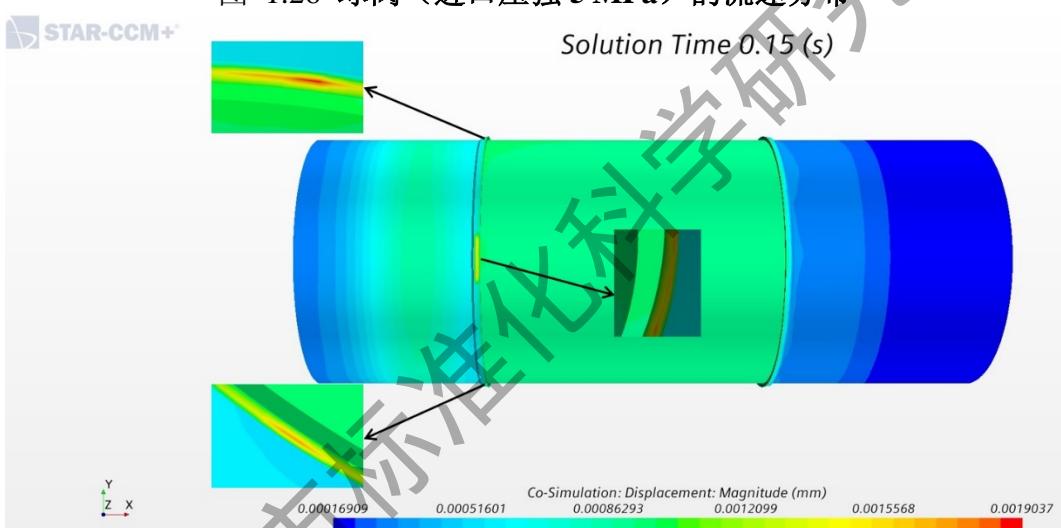


图 1.27 球阀（进口压强 5 MPa）的变形分布

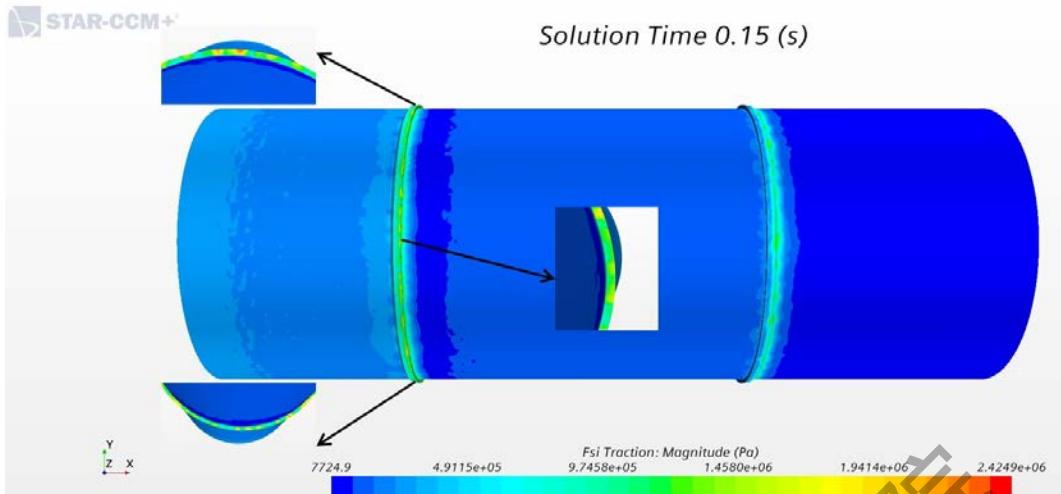


图 1.28 球阀（进口压强 5 MPa）的多视角流固耦合面压强分布

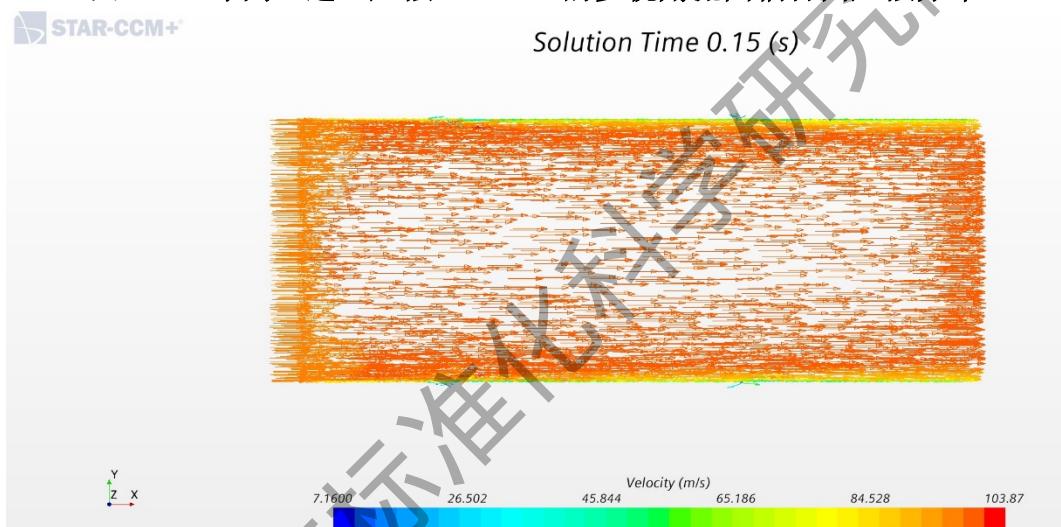


图 1.29 球阀（进口压强 5 MPa）的流速矢量分布

经过计算，球阀壳体内壁的变形呈现先变大后变小最后趋于稳定的趋势（见附件视频）。如图 1.25~图 1.29 所示，经过计算，0.1452s 时流固耦合计算的流场已经达到稳定，此时，最大变形达到 $1.9037e-3$ mm（压强可达到 $1.8125e6$ Pa），在此之前 $0.0044s$ 时达到历史最大变形 $1.0871e-2$ mm（压强达到 $3.7137e6$ Pa），最大变形集中在球性阀体和密封塞交界处。球阀内的流速基本一致，除了靠近壁面处流速有所降低。

1.10 球阀（进口压强 5MPa）的曲线图

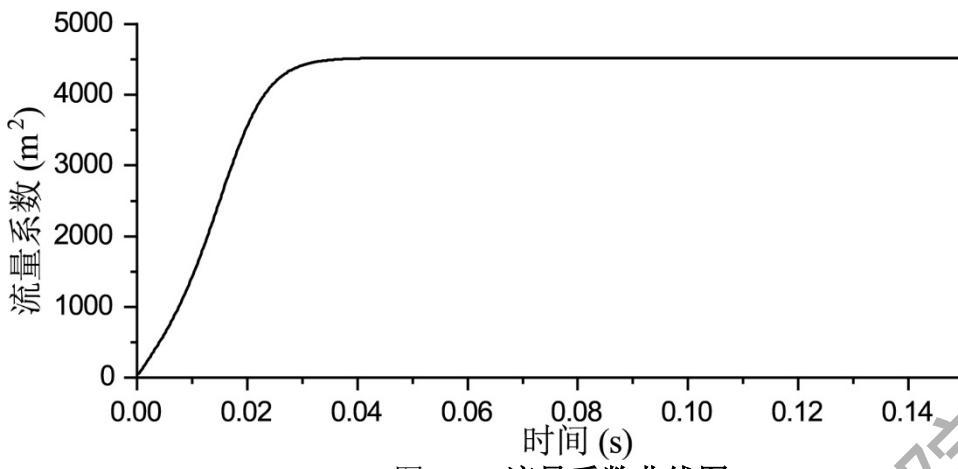


图 1.30 流量系数曲线图

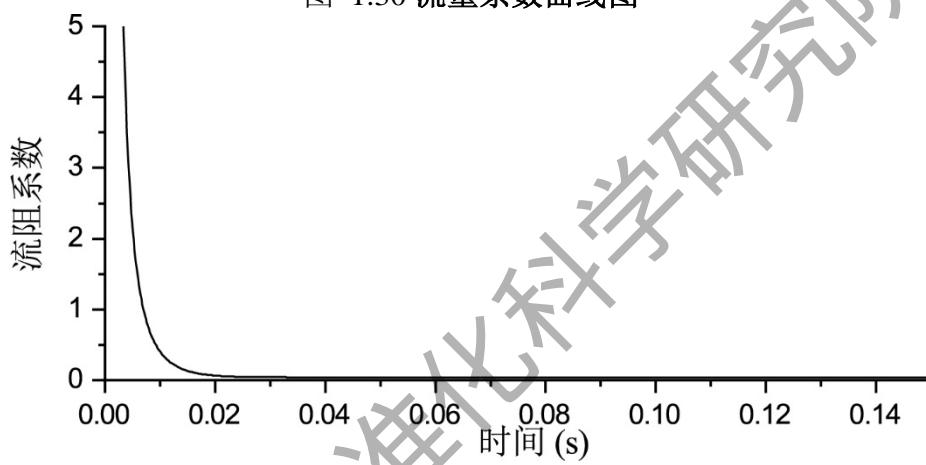


图 1.31 流阻系数曲线图

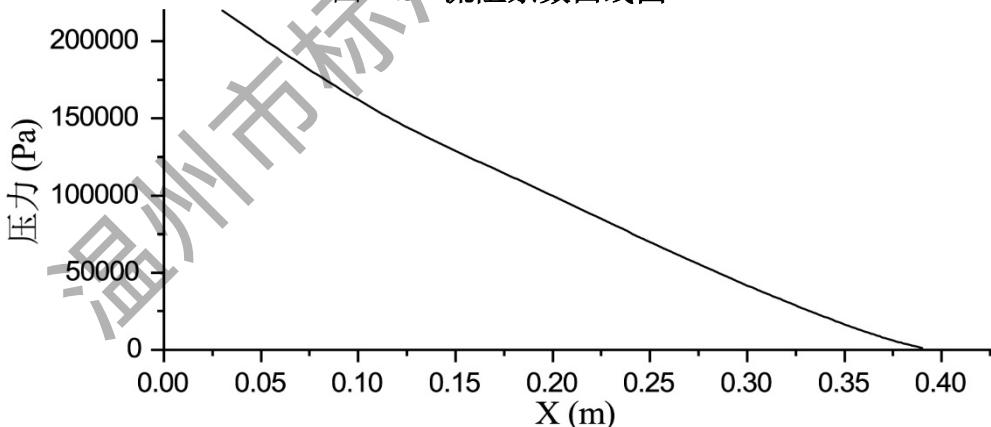


图 1.32 压力分布曲线图

经过计算，球阀的的流量系数，流阻系数和压力系数如图 1.30 图 1.22-图 1.32 所示，流量系数曲线先增速明显再缓慢递增，最后趋于稳定达到 $4522.08m^2$ ；流阻系数随着时间的增加大幅度降低，逐渐趋于平缓，稳定后最终达到 0.0399；如图 1.13 所示，压力曲线图通过在截面中的一端到另一端选取 9 个点分别在仿真计算中计算压力值，构成压力曲线，曲线呈现出从进口到出口逐渐减小的趋势。

1.11 结论

根据仿真任务要求，本章基于 STARCCM+软件和 ABAQUS 软件对球阀进行了流固耦合仿真。经过计算，得到以下结论：

- 1、球阀壳体内壁的变形呈现先变大后变小最后趋于稳定的趋势（见附件视频）。
- 2、球阀内的流速基本一致，除了靠近壁面处流速有所降低。随着进口压强的增加，球阀内流速增加。
- 3、当进口压强设定为 0.3MPa，经过计算，0.15s 时流固耦合计算的流场已经达到稳定，此时，最大变形达到 $1.1192e-4\text{mm}$ （压强可达到 $9.4637e4\text{Pa}$ ），在此之前 0.084s 时达到历史最大变形 $8.0641e-4\text{mm}$ （压强达到 $2.8083e5\text{Pa}$ ），最大变形集中在球性阀体和密封塞交界处。流量系数曲线先增速明显再缓慢递增，最后趋于稳定达到 4370m^2 ；流阻系数随着时间的增加大幅度降低，逐渐趋于平缓，稳定后最终达到 0.042；压力曲线图通过在截面中的一端到另一端选取 9 个点分别在仿真计算中计算压力值，构成压力曲线，曲线呈现出从进口到出口逐渐减小的趋势。
- 4、当进口压强设定为 1.5MPa，经过计算，0.15s 时流固耦合计算的流场已经达到稳定，此时，最大变形达到 $5.6029e-4\text{mm}$ （压强可达到 $5.0454e5\text{Pa}$ ），在此之前 0.006s 时达到历史最大变形 $3.7034e-3\text{mm}$ （压强可达到 $1.2716e6\text{Pa}$ ），最大变形集中在球性阀体和密封塞交界处。流量系数曲线先增速明显再缓慢递增，最后趋于稳定达到 4476.04m^2 ；流阻系数随着时间的增加大幅度降低，逐渐趋于平缓，稳定后最终达到 0.040；压力曲线图通过在截面中的一端到另一端选取 9 个点分别在仿真计算中计算压力值，构成压力曲线，曲线呈现出从进口到出口逐渐减小的趋势。
- 5、当进口压强设定为 5MPa，经过计算，0.15s 时流固耦合计算的流场已经达到稳定，此时，最大变形达到 $1.9037e-3\text{mm}$ （压强可达到 $1.8125e6\text{Pa}$ ），在此之前 0.0044s 时达到历史最大变形 $1.0871e-2\text{mm}$ （压强达到 $3.7137e6\text{Pa}$ ），最大变形集中在球性阀体和密封塞交界处。流量系数曲线先增速明显再缓慢递增，最后趋于稳定达到 4522.08m^2 ；流阻系数随着时间的增加大幅度降低，逐渐趋于平缓，稳定后最终达到 0.0399；压力

曲线图通过在截面中的一端到另一端选取 9 个点分别在仿真计算中计算压力值，构成压力曲线，曲线呈现出从进口到出口逐渐减小的趋势。

- 6、综上所述，当进口压强不超过 5MPa 时，历史最大变形量为 $1.0871e-2$ mm 且出现在密封塞上。此时，密封塞的应变约为 0.58%，结构安全。

温州市标准化科学研究院

2 球阀的静力学分析

2.1 球阀的仿真任务要求

针对保一集团提供的阀门模型，在单一流动介质条件下进行其静力学分析、流动动态过程计算、流固耦合分析。具体为：针对指定的球阀模型，同时考虑流场造成的球阀结构变形（拟采用 ABAQUS 软件）及球阀变形对球阀内流场（拟采用 StarCCM+软件）的影响。

2.2 网格划分及边界条件

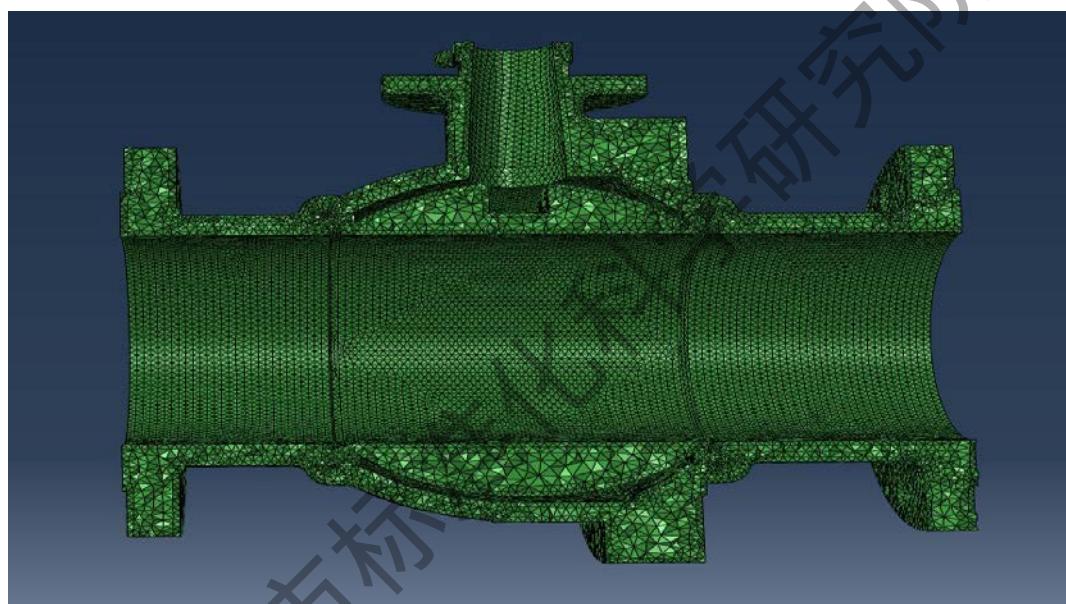


图 2.1 球阀结构网格剖面图

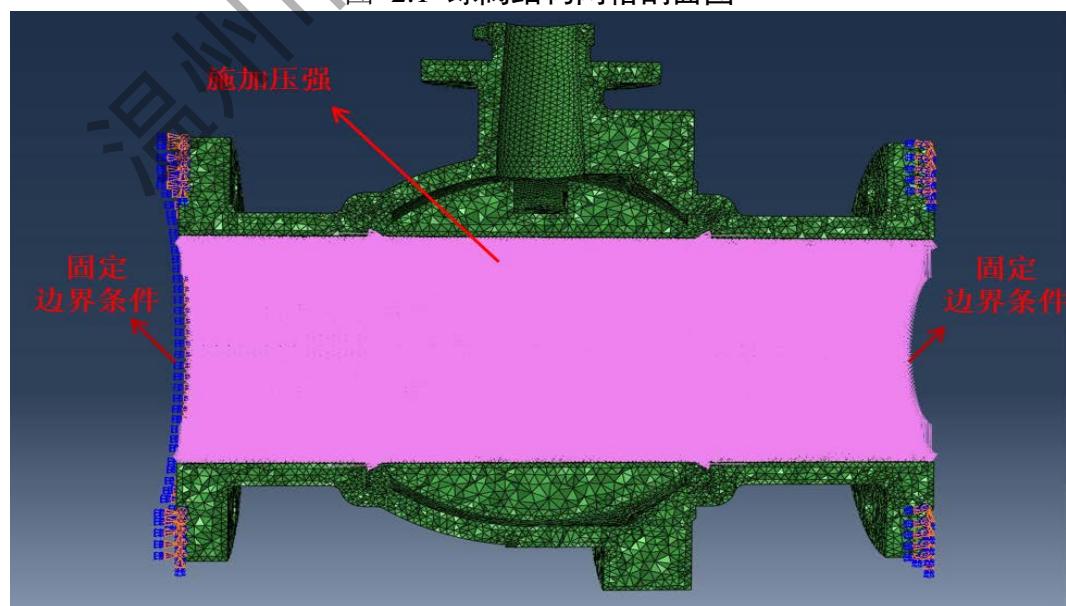


图 2.2 球阀静力学仿真边界条件

如图 2.1 所示, 将球阀模型简化, 只考虑球体、球阀外壳和密封塞。在此基础上, 计算球阀的结构强度。将球阀管道两端固定, 根据第一章 STARCCM+计算, 当入口压强为 5MPa 时, 在内流场演化趋于稳定的过程中, 内壁受到的峰值压强数据为 (3.7e6MPa)。因此, 本仿真考虑最危险工况, 在内壁面施加均布压强载荷 (3.7e6MPa) 并基于 ABAQUS 进行静力学计算。其中, 密封塞为聚四氟乙烯 PTFE, 阀门球体为不锈钢 410SS 材料, 球阀壳体为碳钢材料。

2.3 静力学结果分析

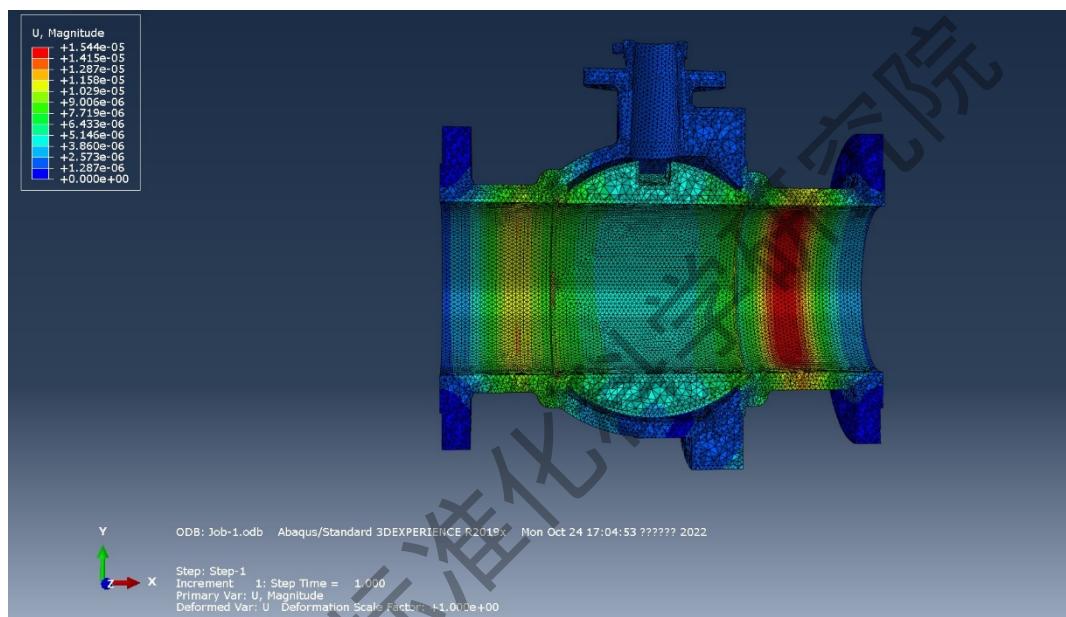


图 2.3 球阀结构剖面变形图

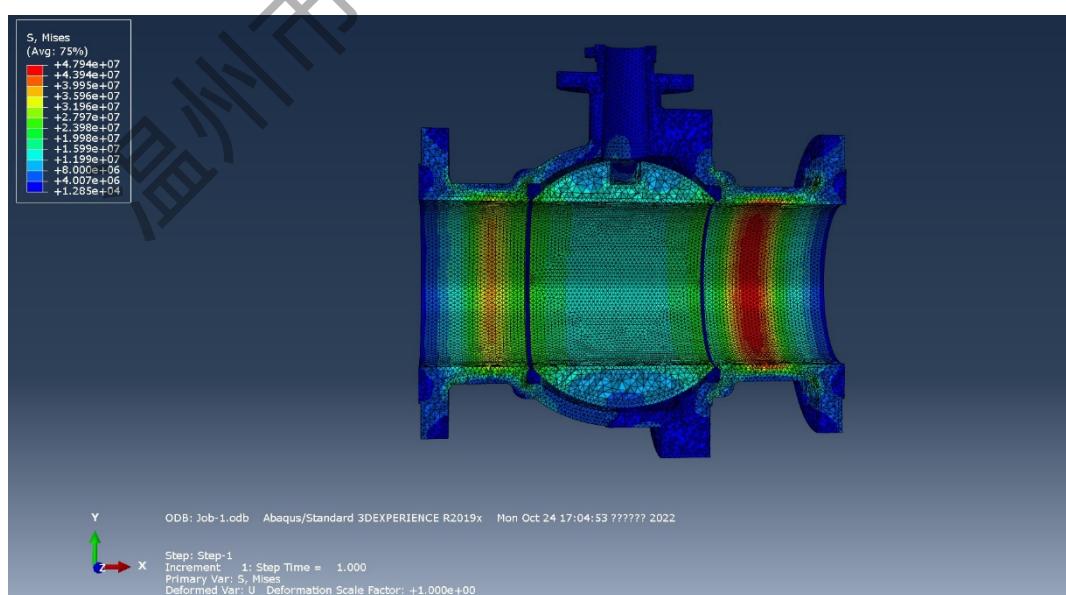


图 2.4 球阀结构剖面应力图

经过计算, 稳态后, 球阀结构的最大变形达到 0.015 mm, 应力达到 4.8e7Pa。

球阀的密封塞宽度为 3.6 mm，不难发现，应变率达到 0.4%。最大变形集中在密封塞与阀门球体交界处，相比于密封塞宽度，此时密封塞与阀门球体的变形已经相当明显。实际工作时，当入口压强小于 5Mpa 时球阀不会产生明显的结构变形，结构安全。

2.4 结论

根据球阀静力学仿真计算结果，得到以下结论：

- 1、根据第一章 STARCCM+计算，当入口压强为 5MPa 时，在内流场演化趋于稳定的过程中，内壁受到的峰值压强数据为 (3.7e6MPa)。因此，本仿真考虑最危险工况，在内壁面施加均布压强载荷 (3.7e6MPa) 并基于 ABAQUS 进行静力学计算。其中，密封塞为聚四氟乙烯 PTFE，阀门球体为不锈钢 410SS 材料，球阀壳体为碳钢材料。
- 2、经过计算，稳态后，球阀结构的最大变形达到 0.015 mm，应力达到 4.8e7Pa。球阀的密封塞宽度为 3.6 mm，不难发现，应变率达到 0.4%。最大变形集中在密封塞与阀门球体交界处，相比于密封塞宽度，此时密封塞与阀门球体的变形已经相当明显。实际工作时，当入口压强小于 5Mpa 时球阀不会产生明显的结构变形，结构安全。