

不同网格划分方式下阀门有限元分析结果差异性研究


薛睿渊^{1,2}, 张永楠¹, 张希恒^{1,2}, 张黄立³, 孟晓桥¹

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学温州泵阀工程研究院, 浙江 温州 325024; 3. 四川蜀交中油能源有限公司, 四川 成都 500643)

摘要: 网格划分方式关系着阀门有限元分析结果的准确性, 但不同网格形式和密度对计算结果的影响趋势还鲜有研究。以某轴流式止回阀的阀芯为例, 探讨了在阀门有限元模拟过程中不同软件计算结构的差异及网格划分方式、密度对计算结果的影响。研究表明: 阀门强度有限元分析结果由前处理及求解设置决定; 相对于四面体网格, 采用六面体网格划分能有效避免因网格划分引起的应力奇异或者应力集中现象, 而且能降低接触面间的网格渗透误差, 从而使阀门强度计算结果更为精确, 此外六面体网格计算结果更为稳定, 受网格密度影响较低。研究成果可为阀门网格划分方式选择及强度分析结果的判定提供指导。

关键词: 阀门; 网格划分; 网格密度; 有限元法; 强度分析

中图分类号: TH134; TB115 文献标志码: A

文章微信二维码: 

文章编号: 1673-159X(2025)02-0106-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5212

Study on the Difference of Valve Finite Element Analysis Results Under Different Meshing Methods

XUE Ruiyuan^{1,2}, ZHANG Yongnan¹, ZHANG Xiheng^{1,2}, ZHANG Hongli³, MENG Xiaqiao¹

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China;

2. Wenzhou Pump and Valve Engineering Research Institute, Lanzhou University of Technology, Wenzhou 325024 China;

3. Sichuan Shujiao CNPC Energy Co., Ltd., Chengdu 500643 China)

Abstract: The meshing method determines the accuracy of the valve finite element analysis results. However, the influence trend of different grid forms and density on the calculation results is rarely studied. The spool of an axial check valve was taken as an example to explore the differences of the calculation results of different software and the influence of meshing and density on the calculation results in the process of valve finite element simulation. The results show that the finite element analysis results of valve strength are determined by the pretreatment and solution settings. Compared with the tetrahedral mesh, the use of hexahedral meshing can effectively avoid the stress singularity or stress concentration caused by meshing,

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 甘肃省中青年科技基金计划(22JR5RA297)。

第一作者: 薛睿渊(1993—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为阀门与密封技术。

ORCID: 0000-0002-1918-8934 E-mail: xrywyy@163.com

引用格式: 薛睿渊, 张永楠, 张希恒, 等. 不同网格划分方式下阀门有限元分析结果差异性研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 106-112.

XUE Ruiyuan, ZHANG Yongnan, ZHANG Xiheng, et al. Study on the Difference of Valve Finite Element Analysis Results Under Different Meshing Methods[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2025, 44(2): 106-112.

and can reduce the mesh penetration error between the contact surfaces. Therefore, the valve strength calculation results are more accurate, in addition, the hexahedral mesh calculation results are more stable and less affected by the mesh density. The research results provide guidance for the selection of valve meshing method and the determination of strength analysis results.

Keywords: valve; grid division; meshing grid density; finite elements method; strength analysis

阀门是一种重要的承压设备,通过阀门的开启和关闭可以控制设备与管路中介质的压力、温度以及流量等。由于其结构复杂不规则,要准确获得应力、应变等的解析解较为困难。基于 Workbench 或者 APDL 等商业有限元软件的有限元法是其强度校核的有效手段^[1-4]。阀门有限元分析过程大致可以划分为4个阶段:几何模型建立、离散化处理、有限元求解和可视化后处理。其中,离散化处理即网格划分,占整个分析过程工作量的40%~50%^[5]。彭川桃^[6]、马鹏强^[7]、白刚等^[8]对阀门组件有限元分析流程以及网格划分时的注意事项进行了研究。胡卫华^[9]、甫圣焱等^[10]以长方体这类规则模型为对象,研究了不同单元类型及网格划分方式对计算结果的影响,指出由于不同单元侧重点不同,因此应根据具体情况区别对待。但当前关于网格划分方式及求解器选择对阀门这类复杂结构强度有限元分析结果的影响研究还鲜有报道。

阀门结构中存在大量的结构不连续部位,网格划分方式不当,易引起应力集中和应力奇异^[11-12],并且随着网格密度增加而愈发明显,导致网格无关性验证无法完成^[13],也无法判断过大的应力结果是网格误差导致还是结构设置不合理。

本文以某轴流式止回阀阀座组件为研究对象,探讨不同求解器、网格划分方式以及网格密度对阀门强度有限元分析结果的影响,研究成果将为阀门有限元分析过程中网格划分提供指导。

1 模型

网格划分方法影响着仿真结果的精确性,不同

的网格划分方式会导致不同的结果^[14-15]。有限元分析采用的网格划分方式有2种:六面体结构化网格和四面体网格。四面体、六面体同属于实体单元,四面体网格对复杂几何适应性好,划分方便,但相对于六面体网格结果精度较差。此外,网格密度对有限元分析结果也有一定的影响。一般情况下,各计算结果随网格密度的增大而增大,当网格密度达到一定程度后,各项结果趋于稳定。因此,网格密度需具有一定的合理性^[16-18]。为探讨不同求解器、网格划分方式及网格密度对阀门零部件和不同部件接触部位强度计算结果的影响,为获得高精度的阀门强度分析结果提供支撑,本文以图1所示某轴流式止回阀阀芯组件为对象展开研究。该组件由阀瓣、挡圈、套筒组成,各部件材料默认为结构钢,下文分别对阀瓣以及整个组件进行强度分析。

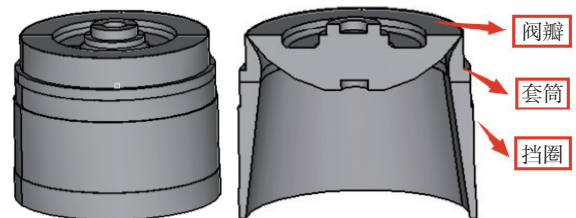


图1 某轴流式止回阀实体模型
Fig. 1 Solid model of an axial check valve

2 零部件有限元计算结果差异性研究

2.1 阀芯有限元模型建立

阀瓣的四面体网格划分结果和六面体网格划分结果分别如图2和图3所示。

为研究网格尺度对强度计算结果的影响及不

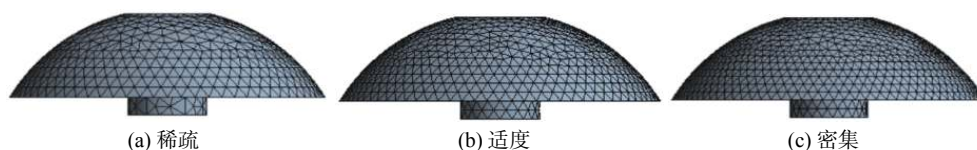


图2 阀瓣四面体网格划分结果
Fig. 2 Disc tetrahedral meshing results

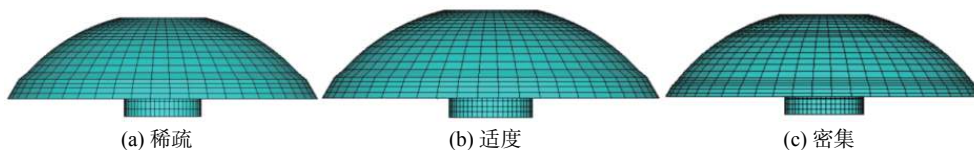


图3 阀瓣六面体网格划分结果
Fig. 3 Disc hexahedral meshing results

同类型网格计算结果的稳定性,对每种类型的网格划分3种不同的密度:稀疏时划分单元1.1万个;适度时划分单元1.6万个;密集时划分单元2.3万个。图2所示的四面体网格是基于Workbench自带的网格划分插件划分,而基于Workbench进行六面体网格划分难度较大,因此,图3所示的六面体网格是基于专业的网格划分软件HyperMesh手动控制完成的。所有单元设置为solid186单元。设置阀瓣承受介质压力为5 MPa,采用线约束方式模拟阀瓣安装过程,其边界条件如图4所示。

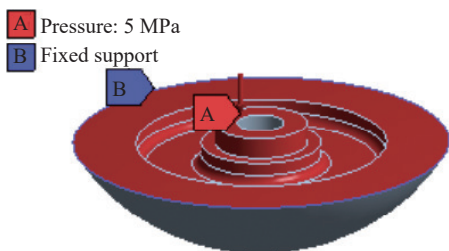


图4 阀瓣单独分析时边界条件
Fig. 4 Boundary conditions when the disc is analyzed alone

2.2 不同软件求解结果对比

采用图3(c)所示六面体网格,分别利用APDL和Workbench软件计算阀瓣在图4所示边界条件作用下的应力、应变及变形结果,求解过程中所有求解设置完全相同。其计算结果如图5所示。

由图5(a)、(b)可知,不同求解器求解阀瓣应力、应变及变形结果分布趋势以及峰值完全相同,应力集中主要出现在约束位置。可见,在网格、边界条件和求解设置完全相同的情况下,APDL和Workbench求解阀门强度问题时将获得完全相同的结果。本质上是因为二者均基于ANSYS平台进行计算,后台求解逻辑原理相同。即阀门有限元计算结果的可靠性由前处理和求解设置决定而非使用的软件。因此,在工程实践中可以根据需求灵活选择合适的软件进行阀门强度分析。

2.3 网格密度对求解结果的影响

由2.2节可知,相同网格质量和求解设置下,不同的求解器得到的计算结果无差异,因此之后的

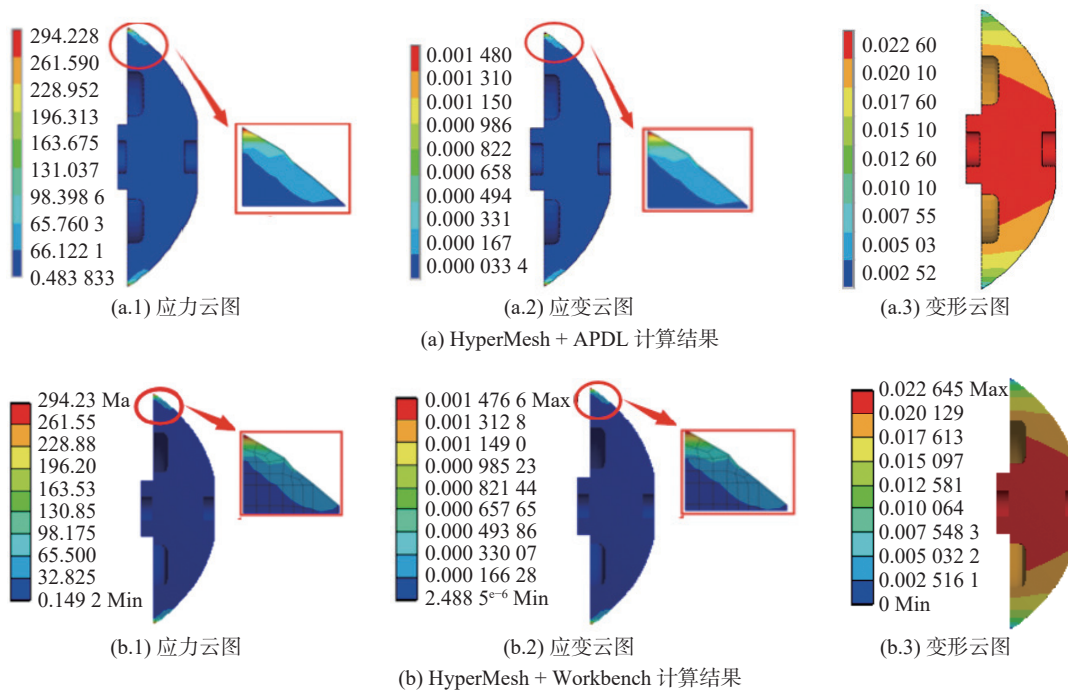


图5 阀瓣计算结果

Fig. 5 Disc calculation results

分析基于 Workbench 完成。分别采用四面体网格和六面体网格展开计算。不同网格密度下阀瓣最

大应力和变形结果及其波动程度如图 6 所示。由于应变结果与应力结果趋势相同, 此处不作讨论。

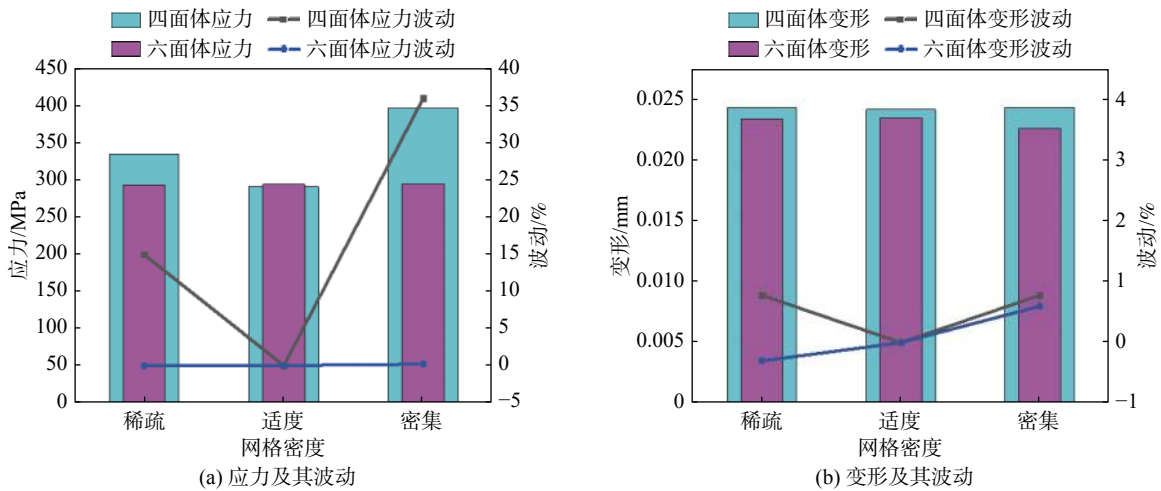


图 6 不同网格密度结果影响

Fig. 6 Effects of different mesh density result

由图 6 可知: 对于六面体网格, 不同网格密度下阀瓣应力及变形结果峰值基本保持稳定, 在网格密度改变时应力波动最大值为 0.2%, 变形峰值波动范围在 2% 以内; 对于四面体网格, 不同网格密度下变形结果最大波动值为 0.78%, 但应力峰值存在明显差异, 最大波动高达 36%。可见, 当阀瓣采用六面体网格时, 阀瓣应力计算结果基本稳定, 更易通过网格无关性验证, 而采用四面体网格时, 应力计算结果随网格密度将产生较大波动。

综上, 采用六面体网格不仅能缓解应力集中和应力奇异, 而且计算结果更为稳定, 受网格密度影响较小。稳定的计算结果意味着其更加可靠。

2.4 不同网格类型对求解结果的影响

本节讨论在网格密度相同的情况下, 不同划分方式对阀瓣强度计算结果的影响。采用图 2(c) 所示四面体网格, 基于 Workbench 计算阀瓣在图 4 所示边界条件下的应力、应变及变形结果, 计算结果如图 7 所示。

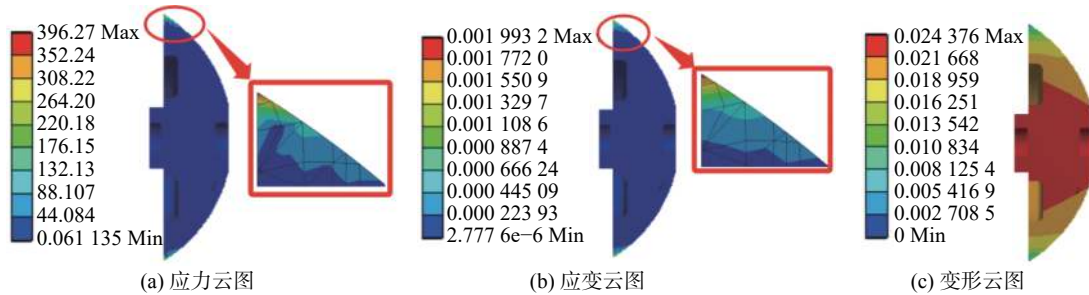


图 7 四面体网格结果

Fig. 7 Tetrahedral mesh results

对比图 5(b) 与图 7 可知, 在相同条件以及网格数量基本持平的情况下, 四面体网格和六面体网格变形云图趋势完全相同, 在线约束位置出现了应力集中现象。需要注意的是, 采用不同类型网格时, 变形结果基本相同, 二者相差仅为 7%, 然而应力与应变结果存在明显差异。采用四面体网格时, 最大应力为 396.27 MPa, 为六面体网格计算结果的 1.35 倍, 此外, 四面体网格应力最大位置相邻两

层网格节点应力比值为 3.4, 而六面体网格下相同位置相邻两层网格节点应力比值仅为 2。

综上, 在网格密度接近的情况下, 采用四面体网格和六面体网格的变形计算结果基本相同, 但应力与应变结果在结构不连续部位或者约束部位将产生明显差异。因此, 在有限元计算过程中, 首先通过插值法求解位移, 然后以位移作为场函数, 求解应力和应变。由广义一类变分原理^[19]可知, 位

移的泛函是独立的自变函数,不必满足边界约束条件和变形协调条件,故位移计算结果受网格影响较小。而需要满足平衡方程和应力边界条件的应力自变函数的数值计算较为复杂,同时与有限元单元节点相关。一般而言,节点排列越规整,应力计算结果越精确。

四面体网格虽然划分效率高,但由于模型内部四面体网格排列不规律,易出现尖角对尖角,尖角对平面的情况,在结构突变及约束位置易出现应力奇异或者应力集中现象。六面体网格划分节点分布均匀,易实现区域的边界拟合,与实际模型更接近。因此,相对于四面体网格,六面体网格能够有效缓解应力集中现象,减小计算结果的网格误差。

3 装配体有限元计算结果差异性研究

本节以阀座组件为研究对象,讨论不同网格划

分方式对装配体计算结果的影响。阀座组件网格划分结果如图 8 所示。模型整体由 Workbench 进行计算。阀座组件边界条件如图 9 所示。其中,阀瓣和套筒之间设置摩擦接触,套筒与挡圈之间设置绑定接触,阀瓣上表面施加 5 MPa 的压力荷载,挡圈下端设置面约束。阀瓣与阀座的接触面加密划分。在此边界条件下,产生的应力云图,应变云图以及变形云图如图 10—11 所示。

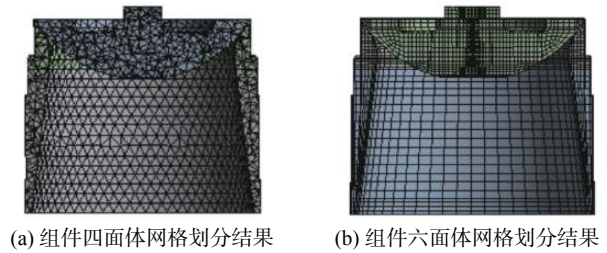


图 8 组件网格划分结果
Fig. 8 Component meshing results

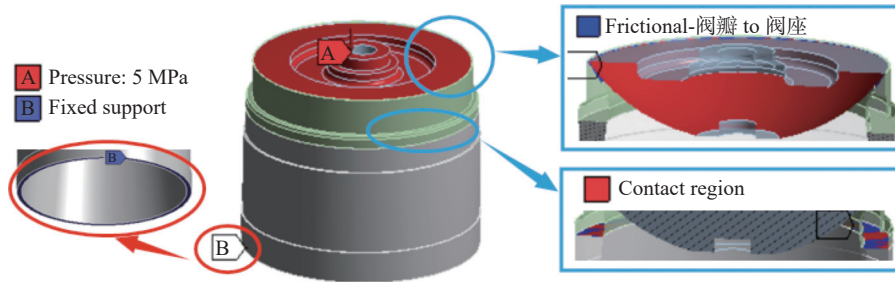


图 9 组件边界条件
Fig. 9 Component boundary conditions

由图 10—11 可知:装配体在网格不同划分方式下,其应力,应变与变形结果均存在较大差异,应力主要集中在阀瓣与套筒之间的接触面上;在相同

条件和网格数量基本持平的情况下,不同类型网格计算阀瓣组件应力、应变与变形云图趋势虽然基本相同,但四面体网格的应力、应变与变形峰值计

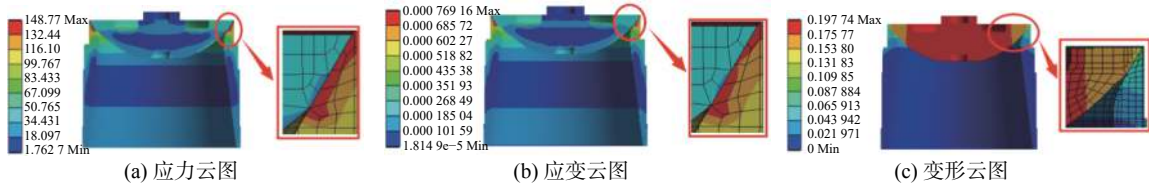


图 10 组件六面体网格计算结果
Fig. 10 Component hexahedral mesh calculation results

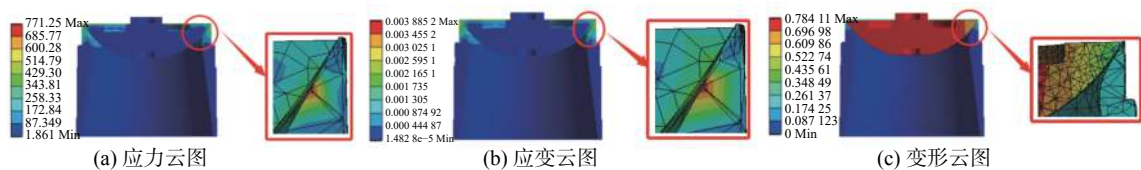


图 11 组件四面体网格计算结果
Fig. 11 Component tetrahedral mesh calculation results

算结果分别是六面体结果的 5.2 倍、5 倍和 4 倍,而且应力结果远超材料许用应力。

增广拉格朗日乘子法是 ANSYS 求解接触问题的常用算法^[20]。增广拉格朗日乘子法中,接触产生时接触面向目标面的渗透值 δ 与接触力 F 之间的关系可简写为

$$F = k\delta + \lambda \quad (1)$$

式中: k 为接触刚度,与结构的形状、尺寸、材料弹性模量、泊松比以及单元划分方法有关; λ 为拉格朗日乘子。

在外载荷确定时,接触力 F 亦为确定,理论上,渗透值 δ 越小,越接近实际物理情况。由式(1)可知,在 F 确定的前提下 δ 足够小,则要求 k 的取值足够大。但刚度大时,一个微小的渗透会产生一个

很大的接触反力,且计算收敛困难。为降低接触力对接触刚度的敏感性,引入 λ 。

理想条件下,物理模型在空载状态是不存在渗透的,但由于建模和网格误差,在初始接触状态,接触面与目标面之间往往存在间隙或者渗透,即 δ 往往不为 0,从而接触不收敛或者产生不符合实际的过大接触应力。

在对装配体进行网格划分时,如图 12 所示,若采用四面体网格,接触面间不可避免地会出现微观上的突出尖角,引起 δ 的初取值误差,而采用六面体网格,其网格整齐,排列均匀,网格之间过渡平滑,在很大程度上能避免网格误差引起的与实际不符的接触应力。

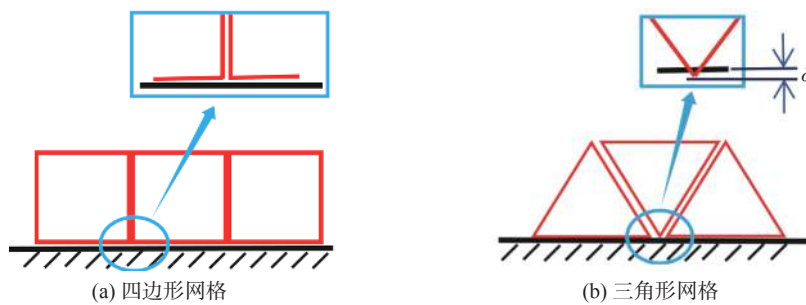


图 12 体接触示意图

Fig. 12 Schematic diagram of bulk contact

综上,在阀门装配体的应力分析中采用六面体网格能有效消除接触网格误差,得到更加准确的接触应力结果。

4 结论

本文以某轴流式止回阀阀座组件为研究对象,运用有限元分析软件 ANSYS 对其强度进行分析,讨论了不同求解器及网格划分结果对阀门强度计算结果的影响规律,得出以下结论。

1) Workbench 和 APDL 二者共用一个运算平台,在前处理和求解设置完全相同时,二者强度计算精度一致,可在工程实践中根据实际需求灵活选择分析软件。

2) 相较于四面体网格,六面体网格在划分效率上优势并不明显,但能有效缓解由结构不连续或者约束引起的应力集中和应力奇异现象,且采用六面体网格时,其计算结果受网格密度影响较小,计算

结果更为稳定。

3) 在阀门装配体分析中,六面体网格能有效消除网格误差,得到更加接近实际结果的接触应力。

参 考 文 献

- [1] 隋浩,冯明. 基于 ANSYS Workbench 的轴流式止回阀流固耦合分析[J]. 机械制造, 2016, 54(7): 24-26.
- [2] SUI H, FENG M. Fluid-solid coupling analysis of axial check valve based on ANSYS Workbench[J]. Machinery, 2016, 54(7): 24-26.
- [3] 翟霄,俞树荣. 阀体应力分类与强度评定的讨论[J]. 流体机械, 2011, 39(1): 32-35.
- [4] ZHAI X, YU S R. Discussion of stress classification and strength estimate of valve body[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(1): 32-35.
- [5] [3] 韦磊,张鸿. 基于 ANSYS 软件的 1+6 钢丝绳网格划分策略及仿真[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(6): 105-109.
- [6] WEI L, ZHANG H. Mesh generation strategy and simulation

of 1+6 wire rope based on ANSYS software[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2022, 45(6): 105 – 109.

[4] 李斌,李一,高亚宁. 泵阀对往复泵排出性能的影响规律[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(7): 670 – 676.

LI B, YI Y, GAO Y N. Influence of pump valve on discharge performance of reciprocating pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(7): 670 – 676.

[5] 王瑞, 陈海霞, 王广峰. ANSYS 有限元网格划分浅析[J]. *天津工业大学学报*, 2002, 21(4): 8 – 11.

WANG R, CHEN H X, WANG G F. Analysis of ANSYS finite element mesh dividing[J]. *Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology*, 2002, 21(4): 8 – 11.

[6] 彭川桃. 超高真空阀门金属密封环的性能分析与结构优化[D]. 成都: 四川大学, 2021.

PENG C T. Performance analysis and structural optimization of metal sealing ring of ultra-high vacuum valve[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.

[7] 马鹏强. 基于 ANSYS Workbench 的水电站坝后浅埋管有限元分析及优化[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.

MA P Q. Based on ANSYS workbench finite element analysis and optimization of shallow buried pipe behind dam of hydro-power station[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[8] 白刚, 尚浩田, 王枫. 压缩机气缸盖联接螺栓的有限元分析[J]. *流体机械*, 2017, 45(4): 22 – 27.

BAI G, SHANG H T, WANG F. Finite element analysis of the compressor cylinder head bolt[J]. *Fluid Machinery*, 2017, 45(4): 22 – 27.

[9] 胡卫华. 网格划分对构件变形和应力的影响分析[J]. *科技信息*, 2009(28): 87.

HU W H. Analysis of the influence of grid division on the deformation and stress of components[J]. *Science & Technology Information*, 2009(28): 87.

[10] 甫圣众, 郑彬, 文超. 不同材料属性的发动机连杆有限元分析[J]. *机械设计*, 2021, 2(38): 151 – 154.

FU S Z, ZHENG B, WEN C. Finite element analysis of engine connecting rod with different material properties[J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 2(38): 151 – 154.

[11] 高思远, 赵旭东, 李卫民, 等. 面向工程应用的应力集中与应力奇异现象的有限元研究[J]. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(5): 281 – 287.

GAO S Y, ZHAO X D, LI W M, et al. Finite element study of stress concentration and stress singular phenomenon for engineering applications[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 41(5): 281 – 287.

[12] 张胜泉, 边汉民, 宋亚杰, 等. 辊压机辊轴快速拆卸复合结构应力分析及应用研究[J]. *机械强度*, 2021, 43(1): 122 – 128.

ZHANG S Q, BIAN H M, SONG Y J, et al. Stress analysis and application of roller press quick replacing composite structure[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2021, 43(1): 122 – 128.

[13] 韩宇. 截止阀阀体强度计算与应力分析[J]. *阀门*, 2021(1): 11 – 15.

HAN Y. Strength calculation and stress analysis of globe valve body[J]. *Valve*, 2021(1): 11 – 15.

[14] 刘志远, 王秀勇, 杜永峰, 等. 网格划分对多级离心泵水力性能计算精度的影响[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(3): 83 – 89.

LIU Z Y, WANG X Y, DU Y F, et al. Research on the influence of grid division on the hydraulic performance calculation accuracy of multistage centrifugal pump[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2021, 40(3): 83 – 89.

[15] 钱尼君, 乔芳, 王成军, 等. 基于 Workbench 六面体网格的桥式起重机受载主梁有限元分析[J]. *矿山机械*, 2021, 49(11): 57 – 61.

QIAN N J, QIAO F, WANG C J, et al. FEA on loaded main beam of bridge crane based on Workbench hexahedron mesh[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2021, 49(11): 57 – 61.

[16] 鄢忠方. 四/六面体网格在钻杆接头应力分析中的性能研究[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(9): 41 – 44.

YAN Z F. Study on performance of tetrahedral/hexahedral grid in stress analysis of drill pipe joint[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(9): 41 – 44.

[17] 赵德斌, 杨宝林, 操文芷, 等. CAD 软件有限元分析精度研究[J]. *机械工程与自动化*, 2022, 6: 70 – 71.

ZHAO D B, YANG B L, CAO W Z, et al. Research on finite element analysis accuracy of CAD software[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2022, 6: 70 – 71.

[18] 谭正生, 陈扬, 林彬, 等. 核电站重要厂用水泵叶片磨损对其性能的影响[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4): 32 – 37.

TAN Z S, CHEN Y, LIN B, et al. The effect of blade wear on the performance of essential service water pumps in nuclear power stations[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(4): 32 – 37.

[19] 郭纯生. 钱伟长学术论文集: 第二卷 [M]. 上海: 上海大学出版社, 2012.

GUO C S. Qian Weichang's academic proceedings, Volume 2 [M]. Shanghai: Shanghai University Press, 2012.

[20] 彼得·艾伯哈特, 胡斌. 现代接触动力学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2003: 99.

PETER E, HU B. Advanced contact dynamics [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2003: 99.

(责任编辑: 饶莉)