

高压物理学报

缠绕离散式大腔体超高压模具的设计计算及数值模拟

赵亮 李明哲 吴楠楠 王金龙 梁晓波 谷洲之 李怀勇

Calculation and Numerical Simulation of Winding Discreted Large Cavity of Ultra-High Pressure Die

ZHAO Liang, LI Mingzhe, WU Nannan, WANG Jinlong, LIANG Xiaobo, GU Zhouzhi, LI Huaiyong

引用本文:

赵亮, 李明哲, 吴楠楠, 等. 缠绕离散式大腔体超高压模具的设计计算及数值模拟[J]. 高压物理学报, 2025, 39(3):033301. DOI: 10.11858/gywlb.20240851

ZHAO Liang, LI Mingzhe, WU Nannan, et al. Calculation and Numerical Simulation of Winding Discreted Large Cavity of Ultra-High Pressure Die[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(3):033301. DOI: 10.11858/gywlb.20240851

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240851>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

棱柱形径向剖分式超高压模具应力分析与实验研究

Stress Analysis and Experiment on a Radial Prism Cavity Split-Type Ultra-High Pressure Die
高压物理学报. 2022, 36(2): 023301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210848>

球弧式纵向剖分超高压模具

Spherical Arc Longitudinal Split Ultra-High Pressure Mold
高压物理学报. 2020, 34(6): 063302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200538>

新型切向分块式两面顶超高压模具

A Novel Tangential Split-Belt Ultrahigh Pressure Apparatus
高压物理学报. 2019, 33(1): 013102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180595>

钢丝缠绕剖分式超高压模具等张力预紧分析

Analysis of Equal Tension Pre-Tightening of Steel Wire Winding Split Ultra-High Pressure Die
高压物理学报. 2021, 35(1): 013302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200591>

具有碳纤维材料环的超高压模具

Ultra-High Pressure Die with Carbon Fiber Ring
高压物理学报. 2021, 35(1): 013301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200580>

超高压处理优化藜麦蛋白的乳化性能

Improvement of Emulsification Performance of Quinoa Protein by Ultra-High Pressure Treatment
高压物理学报. 2021, 35(3): 035901 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200645>

缠绕离散式大腔体超高压模具的设计计算及数值模拟

赵亮¹, 李明哲², 吴楠楠¹, 王金龙¹, 梁晓波¹, 谷洲之¹, 李怀勇¹

(1. 淮阴工学院先进制造技术重点实验室, 江苏 淮安 223005;

2. 吉林大学锻压工艺研究所, 吉林 长春 130025)

摘要: 为了提高年轮式超高压模具腔体的极限承压能力、增大腔体容积, 提出了一种缠绕离散式大腔体超高压模具结构, 该模具主要由离散式压缸、支撑环和钢丝缠绕层组成。离散式结构消除了整体式压缸的周向应力, 模具无需使用大尺寸硬质合金和支撑环, 可有效提高模具的极限承压能力, 降低模具制造难度, 易于实现模具腔体大型化。对模具关键参数进行计算, 得到确定模具结构最佳尺寸的方法。数值模拟结果表明: 在相同的工作内压加载下, 离散式压缸的应力值更低, 压缸内壁的应力环境得到有效改善。对缠绕离散式大腔体超高压模具的极限承压能力进行预测, 发现随着离散块数量的增加, 模具的承压能力逐渐增强, 但是增长速度越来越缓慢。因此, 不能通过无限增加离散块数量来增加模具的极限承压能力。分析表明, 缠绕离散式大腔体超高压模具的承压能力更高, 降低了模具的运行成本。研究结果可为大腔体、高承压能力的超高压装置设计提供新思路、新方法。

关键词: 超高压; 离散式结构; 承压能力; 大腔体

中图分类号: O521.3; O342

文献标志码: A

年轮式超高压装置自发明以来, 已被广泛应用于金刚石和立方氮化硼等超硬材料合成, 满足了切割、钻孔、研磨等加工工业领域对超硬材料的需求^[1-2]。年轮式超高压装置主要由年轮式超高压模具和2个对称布置的顶锤组成, 其中, 年轮式超高压模具由硬质合金压缸和多层高强合金钢支撑环组成^[3-4]。模具的腔体内为合成物质, 并采用叶蜡石或MgO作为传压介质进行密封, 利用液压机驱动2个对称布置的顶锤对腔体内物质进行挤压来产生超高压环境, 该模具可稳定产生5~10 GPa的压力^[5]。年轮式超高压装置具有压力梯度和温度梯度稳定、样品腔体体积大的优点, 也被广泛用作科学研究装置, 如凝聚态物理、高压化学和地球科学等领域^[6-7]。

年轮式超高压装置的设计工作主要集中在提高腔体的工作尺寸和极限承压能力2个方面。提高这2项指标的优势主要表现在: 工业合成金刚石和立方氮化硼时, 可显著增加产量, 降低能耗, 并促进合成物质的稳定生长, 使产品品质得到明显提升; 可为现代测试技术提供更加稳定的测试环境, 更精准地获得测量物质的理化性质数据, 并增加数据采集量; 可为功能材料的设计合成、高压条件下测试物质的原子结构和新理化性质提供更大腔体、更高压力环境。

在实际设计过程中, 腔体的工作尺寸和极限承压能力2项指标是一对矛盾的存在。增大腔体体积, 其承压能力会降低; 为了获得较高的承压能力, 需要减小模具腔体体积。同时, 硬质合金压缸工作时, 压缸内壁会产生非常高的周向拉应力和剪切应力, 从而限制装置的极限承压能力和使用寿命, 影响

* 收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金(23KJB460003, 23KJB460004); 淮安市基础 Research 计划(HABL2023009, HAB202227)

作者简介: 赵亮(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事超高压技术与设备研究. E-mail: minghaibu09@163.com

通信作者: 吴楠楠(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事材料加工技术研究. E-mail: 18989358963@163.com

合成物质的产品品质,且增加装置的使用成本^[8-9]。大尺寸的腔体必然对应大尺寸的硬质合金压缸,受硬质合金生产工艺所限,大尺寸硬质合金加工十分困难,并且成本高昂^[10]。因此,年轮式超高压模具腔体大型化受到大尺寸硬质合金加工难和腔体压力难以提高的限制。

为了维持腔体内压力的稳定,需要采用多层支撑环对剖分式压缸进行预紧,导致支撑环的尺寸增加。此外,大尺寸高强度支撑环的加工也存在诸多困难,如腔体体积为 500 cm^3 的年轮式模具,其支撑环的尺寸可达 1.2 m ,加工难度极大,特别是热处理质量不均匀容易导致支撑环在装配和工作时断裂^[11]。目前,钢丝或钢带缠绕预紧方法已被应用于大型压机设计领域,但尚未用于合成人造金刚石的超高压模具设计中。

为了提高年轮式模具的极限承压能力、降低支撑环尺寸,进而实现腔体大型化,基于大质量支撑原理和侧向支撑原理,研究人员提出了一种钢丝缠绕离散式超高压模具,即将压缸进行离散,只保留一层支撑环对离散后的压缸进行固定和提前预紧,支撑环外部为钢丝缠绕层,进而实现对离散式压缸的充分预紧。压缸离散后,其周向应力得到有效降低,在外部支撑环与钢丝缠绕层预紧的作用下,压缸离散块相互挤压,提供了更好的大质量和侧向支撑效果,可有效提高模具极限承压能力。同时,硬质合金零件尺寸大大减小,离散后的硬质合金体积仅为整体式压缸的十几分之一,降低了硬质合金的制造难度^[12]。本研究将对缠绕离散式大腔体超高压模具进行设计计算,通过有限元方法对模具应力状态进行分析,并预测其极限承压能力,以期为大腔体、高承压能力的超高压模具设计提供新思路、新方法。

1 模具的受力分析及计算

模具的受力分析及计算满足以下基本假设:(1) 根据缠绕离散式超高压模具的工作环境,假设钢丝层及各层均处于弹性范围;(2) 钢丝层缠绕紧密,工作内压引起的应力在整个缠绕层厚度上是连续的,且工作压力可通过 Lamé 公式^[13] 计算;(3) 忽略模具端部对应力和变形的影响,作为平面问题处理。

钢丝满足以下基本要求:(1) 钢丝截面均匀,无误差或公差较小;(2) 钢丝组织无缺陷、表面较光滑,且塑性较高;(3) 钢丝韧性较高,工作过程中不会发生断裂。

缠绕离散式大腔体超高压模具受力如图 1 所示,其中: r_s 、 r_a 分别为压缸内径、外径, r_b 为支撑环外径, r_c 为钢丝缠绕层外径, θ 为微元角度。对于离散式压缸,设腔体高度为 h ,压缸高度为 H ,有

$$p_s r_s h = p_1 r_a H \quad (1)$$

式中: p_s 为工作内压, p_1 为压缸与支撑环之间的压力。由式 (1) 可得, $p_1 = p_s r_s h / r_a H$ 。对于支撑环内部,受离散块传递的内压和钢丝预紧力的作用,在支撑环内 r_1 处产生周向应力 σ_{t_1} 和径向应力 σ_{r_1} ,根据微元平衡条件可得

$$\sigma_{t_1} - \sigma_{r_1} = r_1 \frac{d\sigma_{r_1}}{dr_1} \quad (2)$$

支撑环上周向和径向的剪应力为

$$\tau_1 = \frac{\sigma_{t_1} - \sigma_{r_1}}{2} \quad (3)$$

通过式 (2)、式 (3) 可得支撑环 r_a 和 r_b 处的径向应力 σ_{r_a} 和 σ_{r_b} 的关系为

$$\sigma_{r_a} - \sigma_{r_b} = 2 \int_{r_a}^{r_b} \frac{\tau_1}{r_1} dr_1 \quad (4)$$

通过边界条件可知,支撑环的内壁压力 $p_1 = -\sigma_{r_a}$, 外壁压力 $p_2 = -\sigma_{r_b}$, 进一步可得

$$p_1 - p_2 = 2 \int_{r_a}^{r_b} \tau_1 d \ln r_1 \quad (5)$$

支撑环材料的剪切强度为 τ_1^* , 对式 (5) 进行积分可得

$$p_1 - p_2 = 2\tau_1^* \ln \frac{r_b}{r_a} = 2\tau_1^* \ln K = \tau_1^* \ln K^2 \quad (6)$$

式中: K 为支撑环外径与压缸外径之比。

对于钢丝缠绕层内任意 r_2 处, 同样取一个微元体, 且微元体受力平衡与支撑环微元体受力平衡计算方法一致, 有

$$\sigma_{t_2} - \sigma_{r_2} = r_2 \frac{d\sigma_{r_2}}{dr_2} \quad (7)$$

钢丝以等张力 F 缠绕的方式进行缠绕预紧, 任意半径 r_2 ($r_b \leq r_2 \leq r_c$) 处受到外层钢丝对其预紧产生的径向应力为 σ_{r_2} , 切向应力为 σ'_{t_2} , 根据 Lamé 公式有

$$\sigma'_{t_2} = \frac{r_2^2 + r_a^2}{r_2^2 - r_a^2} \sigma_{r_2} \quad (8)$$

而钢丝层内 r_2 处微元的切向应力 σ_{t_2} 应为钢丝张力 F 与钢丝层内切向应力 σ'_{t_2} 的叠加, 即

$$\sigma_{t_2} = F - \sigma'_{t_2} = F - \frac{r_2^2 + r_a^2}{r_2^2 - r_a^2} \sigma_{r_2} \quad (9)$$

联立式 (8) 和式 (9), 得到

$$F + \left(1 - \frac{r_2^2 + r_a^2}{r_2^2 - r_a^2}\right) \sigma_{r_2} + r_2 \frac{d\sigma_{r_2}}{dr_2} = 0 \quad (10)$$

由模具的边界条件可知, 当 $r_2 = r_c$ 时, $\sigma_{r_2} = 0$, 可得到张力为 F 的缠绕层半径 r_2 处的径向预紧力

$$\sigma_{r_2} = F \left(\frac{r_2^2 - r_a^2}{2r_2^2} \right) \ln \frac{r_c^2 - r_a^2}{r_2^2 - r_a^2} \quad (11)$$

而支撑环外半径处的径向预紧力为 σ_{r_b} , 通过式 (11) 可求得

$$r_c^2 = (r_b^2 - r_a^2) \exp \frac{2r_b^2 \sigma_{r_b}}{(r_b^2 - r_a^2)F} + r_a^2 \quad (12)$$

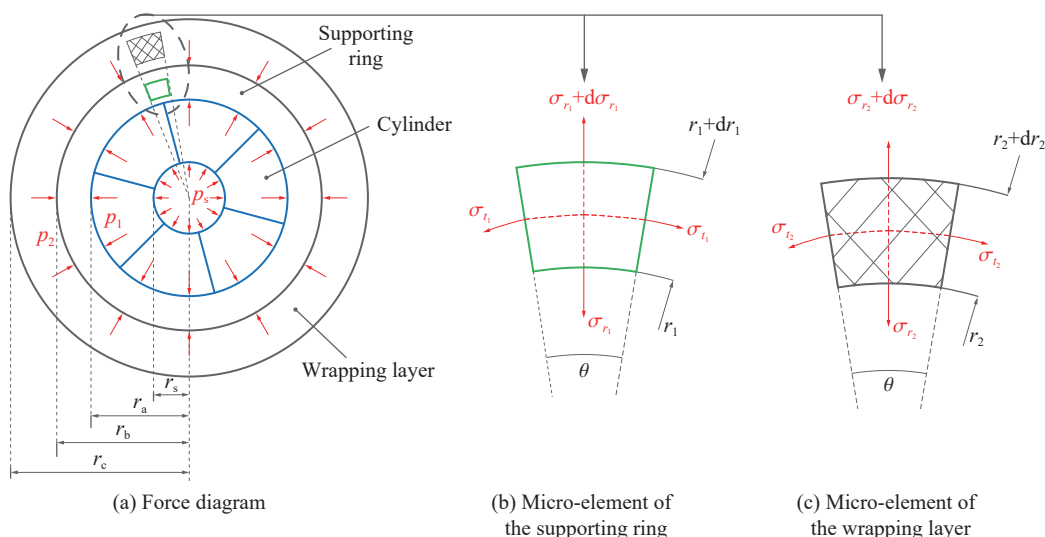


图 1 缠绕离散式大腔体超高压模具受力分析

Fig. 1 Stress analysis of ultra-high pressure die for wound discrete large cavities

压缸材料为硬质合金 YG8, 支撑环材料为优质合金钢 45CrNiMoVA, 钢丝材料为 65Mn。考虑到模具的使用工况, 压缸、支撑环和钢丝材料的安全系数分别取 1.0、1.1 和 1.1, 具体参数如表 1 所示。本研究中硬质合金压缸腔体半径为 10 mm, 压缸外半径为 60 mm。设定腔体内的均布压力为 6 GPa, 支撑环外圈径向预紧力为 500 MPa, 钢丝缠绕张力为 700 MPa。计算的模具尺寸如图 2 所示。

表 1 模具材料参数^[14-15]Table 1 Material parameters of die^[14-15]

Material	Density/(g·cm ⁻³)	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Maximum shear strength/MPa	Failure strength/MPa
YG8	15.63	600	0.22	3 250	6 200
45CrNiMoVA	7.85	210	0.27	772	1 204
65Mn	7.85	197	0.27	709	1 181

2 有限元分析

2.1 有限元模型

采用数值模拟获得模具的受力情况并进行对比, 综合模具腔体体积, 得到模具腔体高度、模具高度等参数的最优值。压缸腔体高为 24 mm, 模具高为 60 mm, 压缸锥面角度为 45°, 压缸腔体的工作压力 p_0 为 6 GPa, 压缸锥面的正压力 $p(s)$ 和密封介质对锥面的摩擦力 $f(s)$ 与腔体内的工作压力存在以下关系

$$p(s) = p_0 e^{-\frac{2\tau s}{\delta}} \quad (13)$$

$$f(s) = f_0 p_0 e^{-\frac{2\tau s}{\delta}} \quad (14)$$

式中: τ 为传压介质的内摩擦系数, δ 为压缸锥面上密封介质的厚度, s 为密封层任意一点到压缸边缘的距离, f_0 为密封介质与压缸之间的摩擦系数。

模具的缠绕层对支撑环和离散式压缸的预紧可通过在支撑环外施加一个等效的预紧外压来模拟, 对离散成 60°、45°、36°和 30°的离散式压缸进行分析。为了缩短计算时间, 分别对缠绕离散式超高压模具建立 1/12、1/16、1/20 和 1/24 有限元模型。有限元的网格尺寸为 1.5 mm, 类型为 Solid186。采用有限元方法分析模具的受力状态, 并预测模具的极限承压能力, 同时与整体式压缸进行对比。

2.2 模具应力分析与讨论

2.2.1 模具应力分析

模具工作时, 腔体内产生的超高压压力会在整体式压缸内壁产生极大的周向拉应力, 而硬质合金类脆性材料承受拉应力的能力较低, 限制了模具的极限承压能力。整体式压缸经过离散化处理, 腔体的工作压力主要沿着模具的径向传递, 又由于钢丝缠绕预紧的作用, 使得离散式压缸主要受压应力的作用。因此, 压缸受力情况得到明显改善。压缸应力随不同离散角度的变化情况如图 3 所示。

整体式压缸的等效应力和最大切应力分别为 7 351.3 和 4 238.6 MPa。采用最大畸变能理论和最大剪切理论作为判断模具失效的依据, 由表 1 可见, 硬质合金压缸在此工况下已经被破坏。压缸内壁与外壁的应力差距较大, 这是由于压缸的工作内压在压缸内壁产生了较大的周向应力, 而压缸外壁由于受到预紧的压应力作用, 导致硬质合金材料没有得到最大化利用。可以看到: 离散成 60°的压缸已经遭到破坏, 而其余离散式压缸可继续提高压力并正常工作; 随着压缸离散块离散角度的减小, 应力逐渐降低。与整体式压缸相比, 离散式压缸的等效应力和最大切应力平均值分别降低了 24.1% 和 24.7%。

基于以上的结果和分析可以推断, 离散式压缸可承受更高的压力, 而支撑环由于受到外部钢丝缠绕预紧作用, 可有效保证模具的安全使用。硬质合金离散块的体积只有整体式压缸的几分之一甚至十几分之一, 有效避免了大尺寸硬质合金零件的使用, 同时破损的压缸离散块也易于更换。因此, 离散式压缸的结构优势可显著降低模具的制造难度和工业应用成本, 也能够为超硬材料的生产和科学研究提供大腔体、超高压力的物理环境。

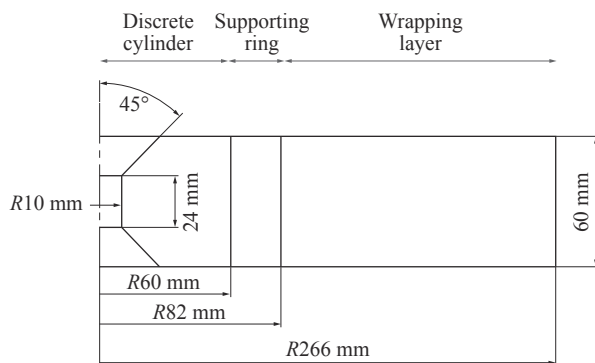


图 2 缠绕式模具尺寸

Fig. 2 Dimensions of wrapping die

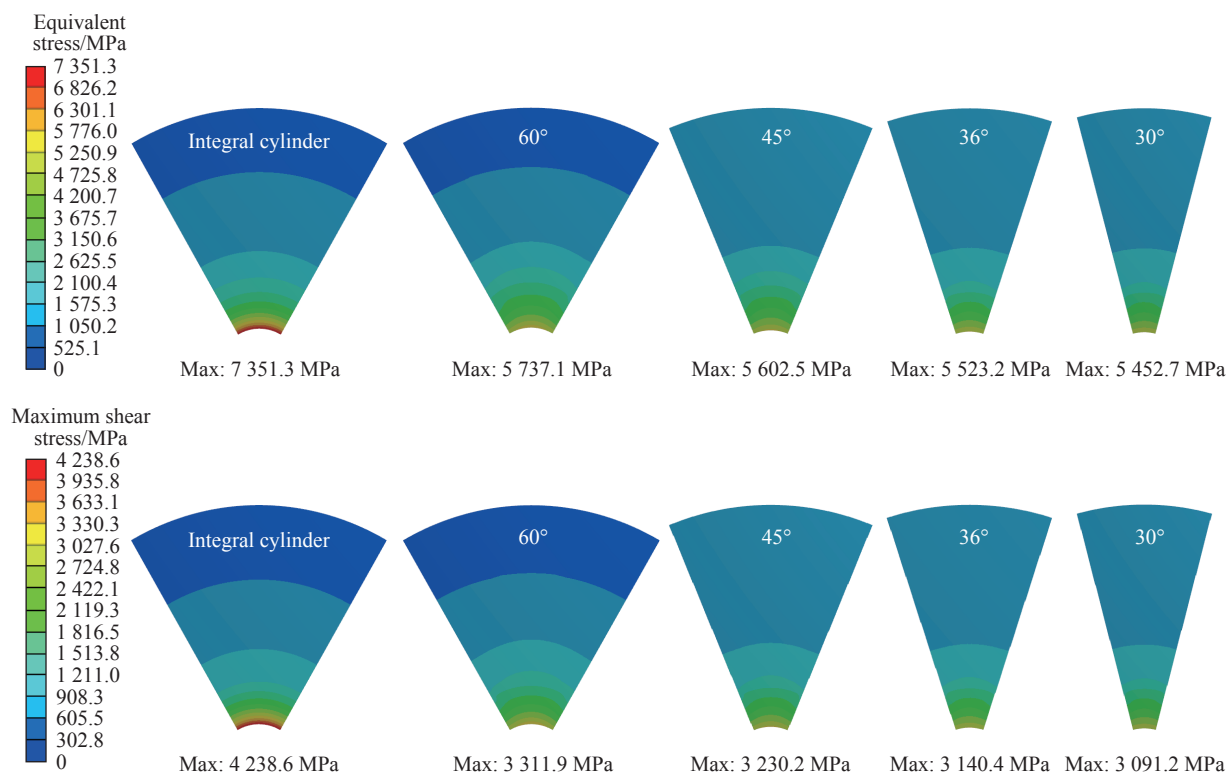


图 3 离散式压缸的等效应力和最大剪切应力分布

Fig. 3 Distribution of equivalent stress and maximum shear stress in discrete pressure cylinder

2.2.2 压缸内壁应力分析

硬质合金压缸内壁是承受压力的主要区域,其应力状态对模具的极限承压能力存在重要影响。为方便分析,统计了如图 4 所示路径上的应力。结果显示,在腔体内部加载压力相等的情况下,与整体式压缸相比,离散式压缸应力明显降低。对于整体式压缸,压缸中部的等效应力和最大剪切应力较大,而端部的应力分别为 5 477.1 和 3 150.0 MPa,腔体中部的等效应力和最大剪切应力比腔体端部分别高 1 968 和 1 411 MPa,压缸中部与端部的应力差值较大,压缸受力不均匀,应力集中明显,限制了压缸的极限承压能力。与整体式压缸相比,离散式压缸内壁应力明显降低,并且这 2 种应力沿路径的分布较为平缓,应力分布较为均匀。压缸中部的应力随着离散化的进行逐渐降低,但是降低的趋势越来越缓慢,说明不能通过无限增加离散块数量来降低压缸内壁应力。离散式压缸内壁的受力情况得到明显改善,应力沿路径的分布较为平缓,可以推断,离散式压缸可承受更高的压力。

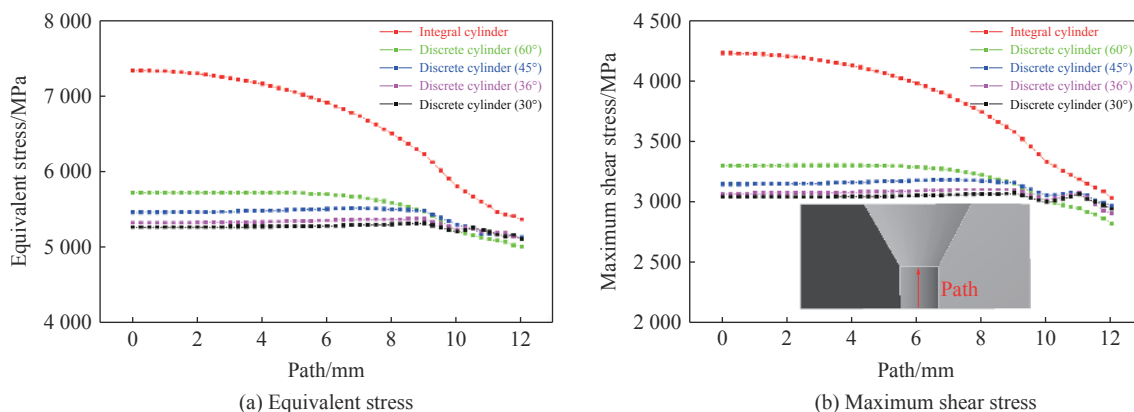


图 4 压缸应力分析

Fig. 4 Stress analysis of pressure cylinder

2.2.3 支撑环应力分析

缠绕离散式大腔体超高压模具的支撑环内壁对离散式压缸进行提前预紧, 外壁受到钢丝缠绕层的预紧力作用, 其应力状态也会对模具的使用产生重要影响。图 5 给出了支撑环的等效应力和最大剪切应力分布情况。从图 5 可以看出, 沿着径向, 等效应力和最大剪切应力均逐渐降低, 最大值出现在支撑环内壁的中间部位, 且年轮式支撑环内壁在周向上的应力分布均匀。由于离散式压缸在周向上是不连续的, 使得其支撑环内壁的等效应力和最大剪切应力在周向上同样不连续, 并呈现周期性分布。

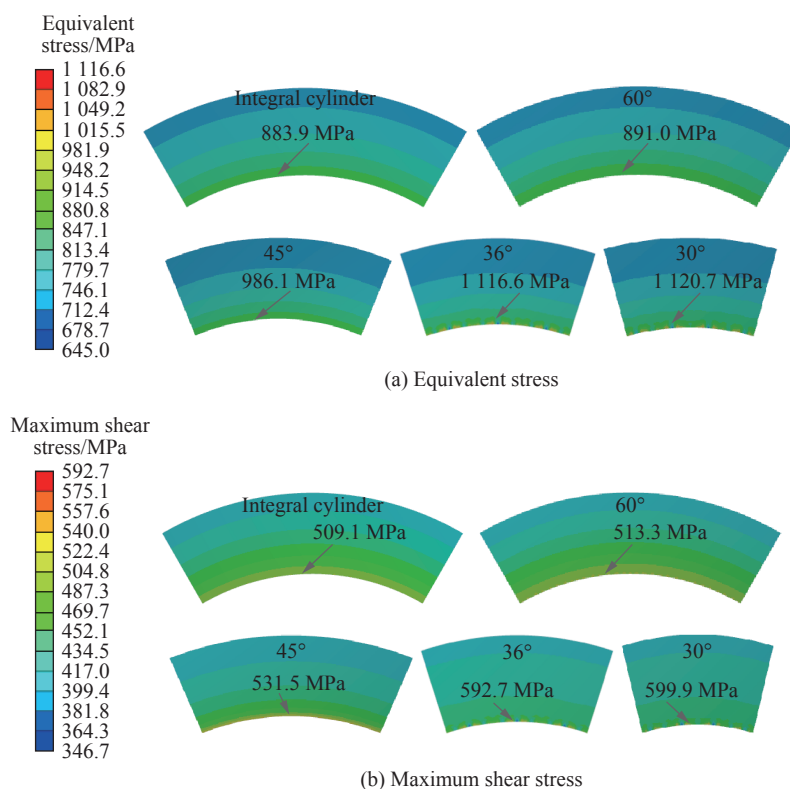


图 5 支撑环应力云图

Fig. 5 Distribution diagram of supporting ring stress

在同样的加载条件下, 随着压缸离散块数量的增加, 支撑环的应力逐渐增大, 与整体式压缸相比, 离散式压缸的支撑环等效应力分别增加了 0.8%、11.5%、26.3% 和 26.7%, 最大剪切应力分别增加了 0.8%、4.4%、16.4% 和 17.8%。支撑环应力虽然也在逐渐增大, 但是增大的趋势越来越慢。需要特别注意的是, 支撑环的应力全部在使用范围内。通过对支撑环内壁应力进行分析可知, 随着压缸离散块数量的增加, 压缸内壁逐渐出现应力集中趋势, 且离散块数量越多, 应力集中趋势越明显。这是因为, 离散块外壁与支撑环内壁接触面之间在预紧力与工作内压的共同作用下, 产生了较大的摩擦力, 离散块数量越多, 摩擦力在周向上的分布越不均匀, 使其表现为应力集中趋势。

2.3 剖分式压缸承压能力预测

利用有限元法对缠绕离散式大腔体超高压模具的极限承压能力进行预测, 在有限元模型中, 以压缸腔体内的压力为设计变量, 范围为 4.0~7.5 GPa, 每间隔 0.1 GPa 作为一个设计点, 以等效应力和最大剪切应力作为输出参数, 并以最大畸变能理论和最大剪切应力理论作为失效判据, 当应力达到压缸和支撑环的强度极限时, 模具失效。图 6 给出了预测的模具极限承压能力的变化趋势。依据 2 个失效判据, 整体式压缸的极限承压能力分别为 5.31 和 4.93 GPa。根据最大畸变能理论, 60°、45°、36° 和 30° 离散式压缸的极限承压能力分别为 6.41、6.55、6.70 和 6.75 GPa; 当采用最大剪切应力理论时, 承压能力分别为 5.95、6.10、6.15 和 6.21 GPa。离散式压缸的承压能力明显优于年轮整体式压缸, 平均增加了 24.3% 和 23.7%。

从图6还可以看出,压缸离散块数量越多,承压能力越强,但是增加的趋势越来越缓慢。硬质合金的加工成本与加工面数量相关,离散块数量增多会导致制造成本增加。因此,结合压缸的应力分析可知,通过无限增加离散式压缸离散块数量来增加极限承压能力是不可行的。总体来说,离散式压缸无需使用大尺寸硬质合金,可充分保证硬质合金零件的烧结质量;并且压缸遭到破坏后,更换破损的压缸即可重新使用,降低了模具的维护和使用成本。

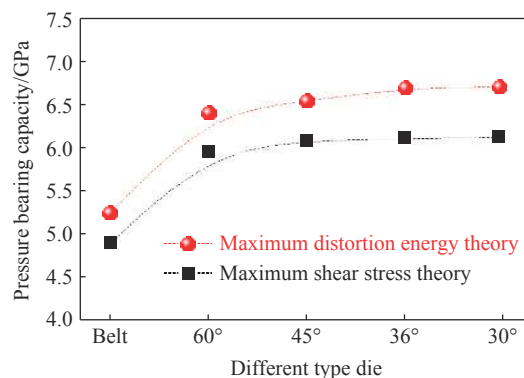


图6 模具极限承压能力预测

Fig. 6 Prediction of ultimate pressure bearing capacity of die

3 结论

提出了一种缠绕离散式大腔体超高压模具结构,即将整体式压缸进行离散化处理,形成组合式压缸结构,通过一层支撑环和钢丝缠绕层进行有效预紧,使压缸具有优异的大质量支撑和侧向支撑效果,其极限承压能力更强,无需使用大尺寸硬质合金,显著降低了模具腔体的大型化难度。分析了模具各层的应力,推导了关键结构参数的计算公式,并采用数值模拟方法获得了模具的应力状态和应力特征并进行分析。与整体式压缸相比,离散式压缸的极限承压能力更强,并且维护和使用成本更低,更易于实现腔体大型化。

对模具极限承压能力与离散块数量关系的研究发现,通过无限提高压缸离散块数量来提高承压能力是不可取的。因此,压缸离散数量的选取原则可以归纳为:当模具压缸尺寸较大时,压缸离散块的数量应该更多,以降低硬质合金制造难度并保障压缸的极限承压能力;当模具的压缸体积较小时,离散块数量应该更少,以降低加工制造费用,同时也能够保证模具的承压能力。

参考文献:

- [1] ITO E, KATSURA T, YAMAZAKI D, et al. A new 6-axis apparatus to squeeze the Kawai-cell of sintered diamond cubes [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 174(1): 264–269.
- [2] YANG Y F, LI M Z, WANG B L. Study on stress distribution of tangent split high pressure apparatus and its pressure bearing capacity [J]. *Diamond and Related Materials*, 2015, 58: 180–184.
- [3] 王伯龙, 李明哲, 刘志卫, 等. 新型切向分块式两面顶超高压模具 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(1): 013102.
WANG B L, LI M Z, LIU Z W, et al. A novel tangential split-belt ultrahigh pressure apparatus [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(1): 013102.
- [4] YANG Y F, LI M Z, LIU Z W, et al. Numerical simulation and experiment on split tungsten carbide cylinder of high pressure apparatus [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(12): 125113.
- [5] 李胜华, 李金良. 球弧式纵向剖分超高压模具 [J]. *高压物理学报*, 2020, 34(6): 063302.
LI S H, LI J L. Spherical arc longitudinal split ultra-high pressure mold [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(6): 063302.
- [6] 刘志卫, 吴承伟, 童明俊, 等. 钢丝缠绕剖分式超高压模具等张力预紧分析 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(1): 013302.
LIU Z W, WU C W, TONG M J, et al. Analysis of equal tension pre-tightening of steel wire winding split ultra-high pressure die [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(1): 013302.
- [7] KHVOSTANTSEV L G, SLESAREV V N. Large-volume high-pressure devices for physical investigations [J]. *Physics-Uspekhi*, 2008, 51(10): 1099–1104.
- [8] LIU Z W, LI M Z, YANG Y F, et al. Study on pressure capacity of multilayer stagger-split die, using simulation-based optimization [J]. *High Pressure Research*, 2013, 33(4): 787–794.
- [9] 朱瑞林. 圆筒形压力容器自增强若干问题研究 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6): 126–133.
ZHU R L. Study on autofrettage of cylindrical pressure vessels [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(6): 126–133.

- [10] ZHAO L, LI M Z, LI R, et al. Stress analysis of the multi-layer stagger-split die for synthesizing gem quality large single crystal diamond [J]. *Diamond and Related Materials*, 2018, 83(3): 57–59.
- [11] YI Z, FU W Z. Numerical study on stress distribution of double-layered split ultrahigh pressure die [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2018, 13(8): 1134–1140.
- [12] 王伯龙, 李明哲, 刘志卫, 等. 新型多层交错剖分超高压模具的数值模拟及其试验验证 [J]. *高压物理学报*, 2018, 32(6): 27–32.
- WANG B L, LI M Z, LIU Z W, et al. Numerical simulation and experiment on new multilayer stagger-split die of ultra-high pressure apparatus [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(6): 27–32.
- [13] 姚裕成. 人造金刚石和超高压高温技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 35–36.
- YAO Y C. Artificial diamond and ultra-high pressure and high temperature technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996: 35–36.
- [14] 杨云飞, 李明哲, 刘志卫, 等. 缠绕式挤压筒结构及缠绕层预应力分析 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(12): 89–94.
- YANG Y F, LI M Z, LIU Z W, et al. Structure of wire wound extrusion container and the analysis of the pre-stressed winding layer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(12): 89–94.
- [15] GETTING I C, CHEN G, BROWN J A. The strength and rheology of commercial tungsten carbide cermets used in high-pressure apparatus [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1993, 141(2): 545–577.

Calculation and Numerical Simulation of Winding Discreted Large Cavity of Ultra-High Pressure Die

ZHAO Liang¹, LI Mingzhe², WU Nannan¹, WANG Jinlong¹, LIANG Xiaobo¹, GU Zhouzhi¹, LI Huaiyong¹

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223005, Jiangsu, China;*

2. *Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China*)

Abstract: In order to improve the ultimate pressure bearing capacity and increase the volume of the cavity of the belt type ultra-high pressure die, a structure of winding discrete type large cavity ultra-high pressure die was proposed. This die is mainly composed of discreted cylinder, supporting ring and steel wire winding layers. The circumferential stress of the integral cylinder is eliminated in discrete structure and there is no need to use large size cemented carbide and supporting ring, which can effectively improve the pressure bearing capacity of high pressure die, reduce the difficulty of its manufacturing, and make it easy to obtain large cavity volume. The key parameters of the structure of high pressure die are designed and calculated to determine the optimal size of the geometry. It is found that under the same working internal pressure loading in numerical simulation, the stress of the discrete cylinder is lower, and the stress environment on the inner wall of the cylinder is effectively improved. The pressure bearing capacity of the winding discrete large-cavity ultra-high pressure die is predicted. It is found that the pressure bearing capacity of the die gradually increases with the increase of the number of discrete blocks, but the growth rate is slower and slower. Therefore, it is not feasible to increase the pressure bearing capacity of the cylinder by increasing the number of discrete blocks infinitely. The analysis shows that the winding discreted large cavity ultra-high pressure die has higher pressure bearing capacity, longer life and lower operating cost. It provides a new idea and method for the design of high pressure device with large volume and high pressure bearing capacity.

Keywords: ultra-high pressure; discreted type structure; pressure bearing capacity; large cavity