

剖分式超高压模具数值模拟及实验

赵 亮¹, 陈文集¹, 李明哲², 吴楠楠¹, 梁晓波¹, 谷洲之¹, 王伯龙³

(1. 淮阴工学院 江苏省先进制造技术重点实验室, 江苏 淮安 223005; 2. 吉林大学 辊锻工艺研究所, 长春 130022; 3. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000)

摘 要:为解决超高压模具大尺寸硬质合金制造工艺难度大、消耗量高的问题,基于大质量支撑和侧向支撑原理设计了新型剖分式超高压模具(STD),其具有更高的极限承压能力和更大的腔体容积等优点。该模具的压缸由多个硬质合金剖分块组合而成,无须使用大尺寸硬质合金,能有效降低压缸周向应力,获得更大的腔体压力。通过数值模拟对剖分式压缸进行应力分析,结果发现,剖分式压缸的应力明显小于年轮式压缸的应力,且随着剖分块数量的增加,应力逐渐减小。压缸经过剖分后,支撑环应力未发生明显改变,能确保压缸获得充分且有效的预紧。基于最大畸变能理论和最大剪切应力理论,评价超高压模具的极限承压能力,结果表明,剖分式超高压模具的承压能力明显大于年轮式超高压模具(BTD)的承压能力,且压缸的剖分块数量越多,承压能力越强。破坏性实验进一步验证了剖分式超高压模具的承压能力优于年轮式超高压模具的承压能力,且压缸剖分块损坏后可单独更换,可有效降低使用成本。

关键词:大腔体;剖分式压缸;承压能力;金刚石合成;超硬材料

中图分类号:TG305;O521.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)01-0123-08

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240715

Numerical simulation and experiment on split type ultra-high pressure die

ZHAO Liang¹, CHEN Wen-ji¹, LI Ming-zhe², WU Nan-nan¹, LIANG Xiao-bo¹,
GU Zhou-zhi¹, WANG Bo-long³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223005, China; 2. Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to overcome the disadvantages of the processing difficulties and high consumption of tungsten carbide cylinder, a novel split-type ultra-high pressure die (STD) is designed according to the principle of mass support and lateral support, which has the advantages of higher limit pressure capacity and larger cavity volume. The STD cylinder is composed of a plurality of cemented carbide sections, without using large-size cemented carbide, effectively reducing the circumferential stress of the cylinder and obtaining greater chamber pressure. The stress of STD cylinder is analysed by numerical simulation. The

收稿日期:2024-06-28.

基金项目:江苏省高等学校自然科学基金项目(23KJB460004, 23KJB460003); 吉林大学超硬材料国家重点实验室开放课题项目(202428).

作者简介:赵亮(1989-),男,讲师,博士.研究方向:超高压技术及设备. E-mail: minghaibu09@sina.com

results show that the stress of STD cylinder is obviously less than that of belt type ultra-high pressure die (BTD) cylinder, and the stress decreases gradually with the increase of the number of split blocks. After the cylinder is split, the stress of the support ring does not change significantly, which can ensure that the pressure cylinder can obtain sufficient and effective pre-tightening. Based on the maximum distortion energy theory and the maximum shear stress theory, the ultimate pressure bearing capacity of the ultra-high pressure die was evaluated. The pressure bearing capacity of STD was obviously greater than that of BTD cylinder, and the more the number of split blocks of the cylinder, the stronger the pressure bearing capacity. The destructive experiment further verifies that the pressure bearing capacity of STD is better than that of BTD, and the split block of the pressure cylinder can be replaced separately after damage, which can effectively reduce the use cost.

Key words: large cavity; split type cylinder; pressure bearing capacity; diamond synthesis; super-hard material

0 引言

利用超高压装置可合成人造金刚石和立方氮化硼,这些材料在工业中主要被用来制作各种切削刀具、磨具^[1,2]。因其在加工制造中应用十分广泛,产量需求持续上升。为提高超硬材料的单次合成产量,提升模具的极限承压能力、增大腔体的容积极为重要。为此,已有学者设计了扇形、立方形和凹形等多种异形超高压模具^[3-5]。

Hall^[6]基于大质量支撑和侧向支撑原理设计了年轮式超高压装置^[7],主要由年轮式超高压模具(Belt type ultra-high pressure die, BTD)和 2 个顶锤组成。BTD 由硬质合金压缸和多层支撑环组成,各层之间为过盈配合。该装置不仅结构简单、压力场和温度场稳定、压力效率高,而且具有体积小、压力加载结构简单的优点^[8,9]。欧美国家普遍采用此类装置生产高档金刚石。英国 De Beers 公司设计了高压缸直径达 $\varnothing 250$ mm、质量为 400 kg 的年轮式超高压装置,可生产直径为 $\varnothing 112$ mm 的聚晶金刚石复合片,单次金刚石产量高达 2 000 ct;日本东名公司设计了 1.8 万吨年轮式超高压装置,其高压缸内径为 $\varnothing 135$ mm,可合成 $\varnothing 80$ mm 的聚晶金刚石复合片,单次产量稳定在 500 ct 以上^[10,11]。国内曾引进德国、瑞典的年轮式模具技术,并于 20 世纪 70 年代由人工晶体研究所设计了缠绕式的年轮式超高压模具^[12,13]。目前,年轮式超高压模具已广泛应用于工业合成金刚石和科学研究领域。

虽然年轮式超高压模具在工业生产超硬材料和科学研究中的使用价值较高,但其腔体大型化

仍受到诸多现实因素的制约。首先,大尺寸硬质合金压缸生产难度大,烧结质量随尺寸增大而降低,质量缺陷明显,难以满足超高压和高温的极端环境的工作要求^[14,15]。其次,年轮式压缸内壁的周向应力会降低其极限承压能力^[16-18]。为提高承压能力,需减小模具的腔体容积,但增大腔体容积和提高承压能力无法同时实现。

针对目前年轮式超高压模具腔体大型化过程中面临的大尺寸硬质合金制造困难的问题,基于大质量支撑和侧向支撑原理,本文提出一种易于制造的“剖分式压缸”超高压模具(Split type ultra-high pressure die, STD),即碳化钨压缸被剖分为数个独立的剖分块,通过组合获得压缸装配体,再与支撑环进行装配,各层之间采用过盈配合,以限制压缸的径向位移。该模具可显著降低压缸剪切应力和周向应力,同时减小硬质合金尺寸,降低硬质合金制造难度。STD 压缸由多层支撑环进行预紧,剖分块侧面之间相互挤压,具有良好的大质量支撑和侧向支撑效果^[19,20]。

有限元分析技术广泛应用于超高压容器和设备的研究工作,用于分析在实际使用过程中无法直接测量的应力状态。本文利用该方法对 STD 应力分布进行研究,并将其与传统的 BTD 进行对比,进一步探究其优势;同时,分析不同剖分块数量对压缸和支撑环应力的影响,为建立科学的 STD 设计方案提供依据。

1 设计方法

1.1 有限元模型

BTD 的设计计算已较为成熟,其几何尺寸可

参考文献[21],如图1所示。BTD的压缸半径和样品腔半径分别为60.0、10.0 mm。支撑环半径分别为83.0、114.8、158.8、220.0 mm。通过过盈配合对压缸实施有效预紧,从内到外各相邻接触面之间的过盈配合值分别为0.246、0.284、0.390、0.535 mm。由于超高压模具的轴向尺寸尚未确定,样品腔和超高压模具的高度分别被定义为 $R \cdot k$ 和 $R \cdot k \cdot h$,其中 R 是模具腔体半径, k 为腔体高度与半径的比值, h 为模具高度和腔体高度的比值。压缸锥度角为 45° 。STD与BTD几何尺寸相同。

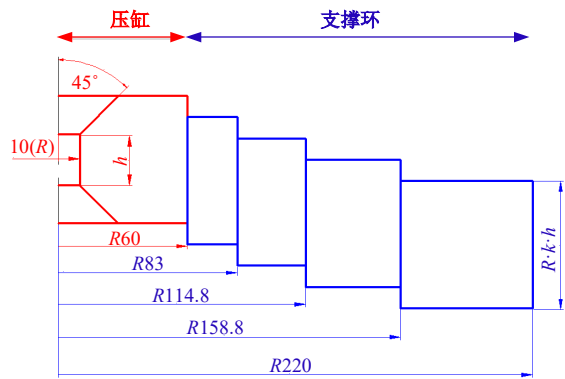


图1 超高压模具几何尺寸
Fig. 1 Geometric dimensions of ultra-high pressure die

压缸材料为碳化钨(YG8,8%钴),支撑环材料为高强度合金钢(45CrNiMoVA)。碳化钨之间的摩擦因数为0.25,碳化钨与高强度合金钢之间的摩擦因数为0.20,高强度合金钢之间的摩擦因数为0.10^[22,23]。施加在样品腔内壁上的内部压力载荷 p_0 (6 000 MPa)均匀分布,压缸锥形面上的加载压力分别为作用在压缸圆锥面上的垂直压力 $p(s)$ 和基于圆锥面上 $p(s)$ 的摩擦应力 $f(s)$,如图2所示,其计算如式(1)(2)所示^[24,25]:

$$p(s)=p_0e^{\frac{-2\tau s}{t}} \tag{1}$$

式中: τ 为压力介质内摩擦因数; t 为密封碗厚度,mm; s 为锥形表面任意点到腔体边缘的距离,mm。

$$f(s)=up_0e^{\frac{-2\tau s}{t}} \tag{2}$$

式中: u 为摩擦因数。

采用最简单的各向同性材料模型进行仿真计算,基于Von Mises屈服准则和最大剪切应力准则判断超高压模具是否失效,相应参数如表1所示^[26]。

考虑到模具轴向对称性,建立1/2模型,以节

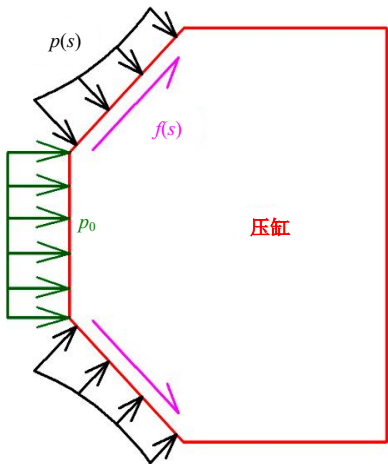


图2 压力加载情况示意图
Fig. 2 Schematic diagram of pressure loading situation

表1 材料参数
Table 1 Material parameter

部件	材料	杨氏模量/GPa	泊松比	失效强度/MPa	最大剪切应力/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
压缸	YG8	578	0.21	6 200	3 250	14.7
支撑环	45CrNiMoVA	210	0.29	1 450	850	7.85

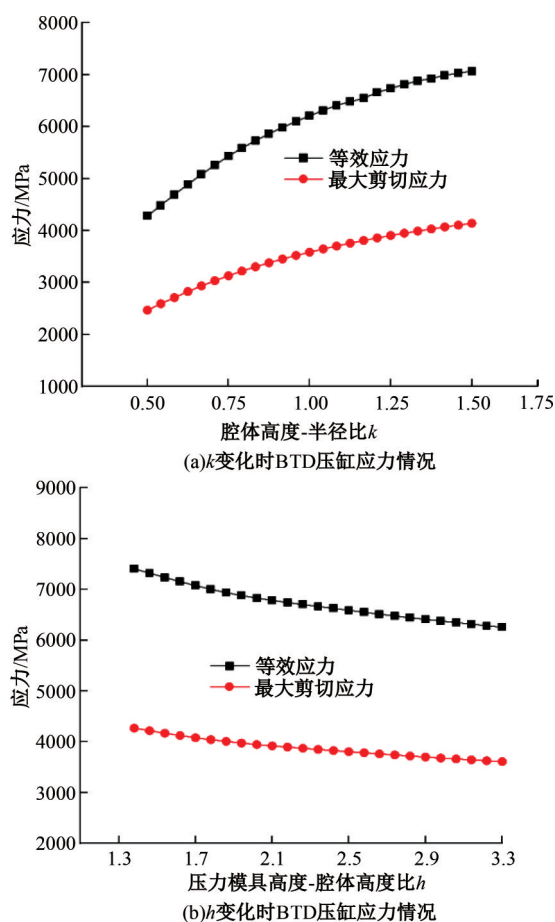
省计算时间。压缸和支撑环的单元模型为SOLID 186,其从内层到外层的尺寸分别为0.5、0.5、0.7、1.0、1.5 mm。采用Newton-Raphson方法对模型进行计算。

1.2 轴向尺寸的确定

以Von Mises屈服准则和最大剪切应力准则为超高压模具失效的判断依据,为确定合适的高度-半径比 k 和压力模具高度-腔体高度比 h ,对BTD进行等效应力和最大剪切应力有限元仿真。图3为随 k 和 h 变化的BTD压缸应力情况。仿真结果表明,BTD压缸等效应力和最大剪切应力均随 k 的增大而增大,随 h 的增大而减小。这是因为当 k 增大时,大质量支撑和侧向支撑效应减小。然而,当 h 增大时,这两种支撑效应都有所增加。因此,综合考虑压缸和支撑环的应力后,确定高度-半径比 k 和压力模具高度-腔体高度比 h 分别为1.2和2.5。

2 结果分析

将BTD压缸分别剖分为4、6、8、10、12块,对应剖分角度分别为 90° 、 60° 、 45° 、 36° 、 30° 。STD压缸组合体由4层支撑环支撑,建立1/2模型,对STD进行仿真研究,探究其应力分布情况,并与

图3 不同 k 和 h 值下BTD压缸应力情况Fig. 3 Stress of BTD cylinder under different k and h values

BTD进行对比分析。

2.1 压缸应力分布

BTD和STD压缸的等效应力分布如图4所示,BTD压缸在内壁中部具有较大的等效应力(6 650.2 MPa)。根据最大畸变能理论,当应力超过极限应力(即6 200 MPa)时,BTD压缸该位置将在压力载荷作用下发生断裂。剖分为4、6、8、10和12块的STD压缸的最大等效应力分别为6 281.8、5 906.7、5 637.7、5 499.4和5 442.6 MPa,均明显小于BTD压缸。对于剖分为6、8、10、12块的STD压缸,当在内壁施加6 000 MPa压力时,其均能正常工作,且能承受更大的压力。与BTD压缸相比,几种STD压缸的等效应力分别降低了5.5%、11.1%、15.2%、17.3%和18.2%。

另外,随着剖分块数量增加,STD压缸的等效应力逐渐减小,应力集中的情况逐步得到改善,所有STD压缸沿半径方向上的等效应力减小。

超高压模具的应力主要处于剪切状态,因此

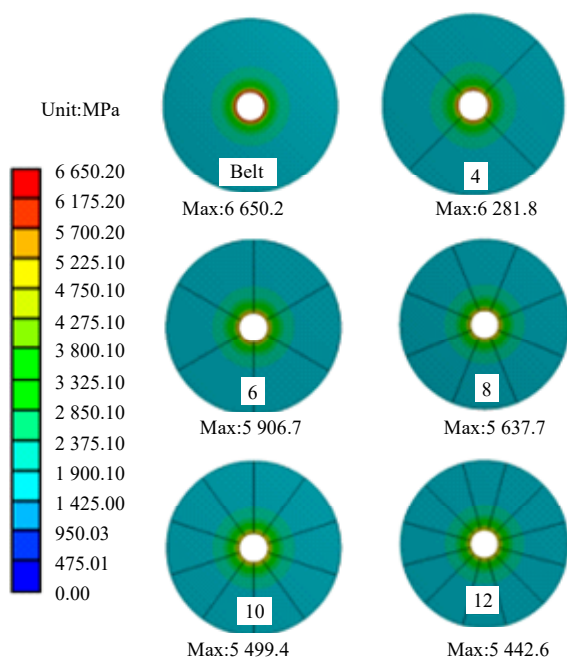


图4 BTD和STD压缸的等效应力

Fig. 4 Equivalent stress of BTD and STD

需对BTD压缸和不同剖分块数量的STD压缸的最大剪切应力进行深入分析,如图5所示。BTD压缸的最大剪切应力为3 839.1 MPa,位于内壁中部,与等效应力值相同,显著大于碳化钨材料的抗剪强度(3 250 MPa)。根据最大剪切应力理论,BTD压缸在内壁和锥形面上的压力作用下已失效。剖分为4、6、8、10、12块的STD压缸的最大剪切应力分别为3 626.8、3 408.8、3 254.2、3 175.0、

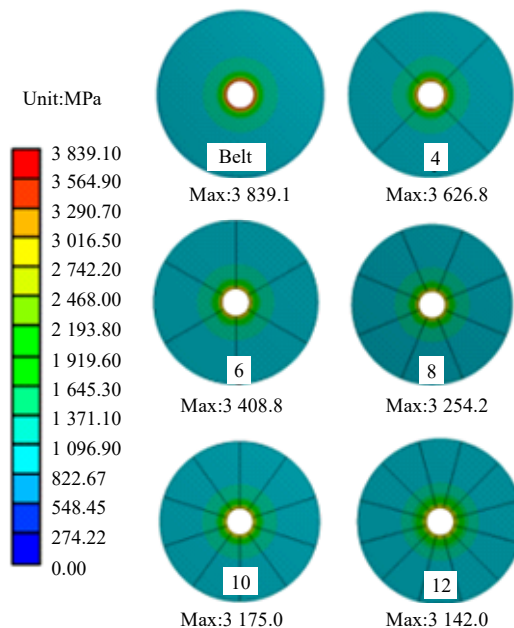


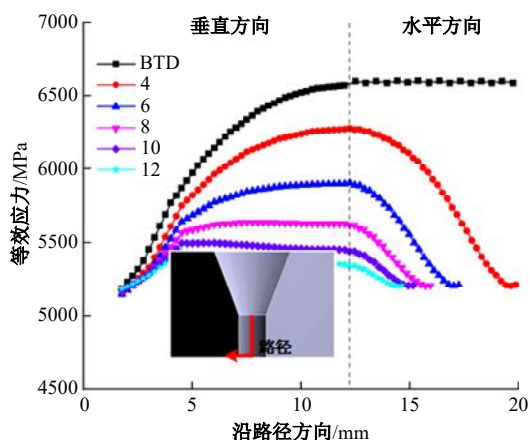
图5 BTD和STD压缸的最大剪切应力

Fig. 5 Maximum shear stress of BTD and STD cylinders

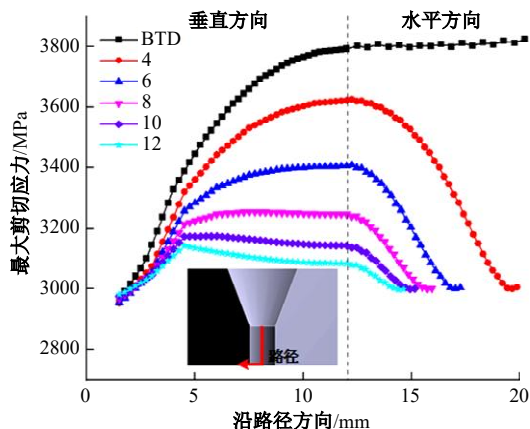
3 142.0 MPa,均明显小于BTD。最大剪切应力变化趋势与等效应力基本一致。以抗剪强度作为判断压缸是否失效的标准,剖分块数量为8、10和12块的STD压缸均能正常工作,其承压能力比BTD压缸强。随着剖分块数量增加,等效应力和最大剪切应力分布越来越均匀,因此STD的优势明显。

2.2 压缸内壁应力分布

BTD压缸内壁要承受传压介质传递的压力,故内壁会产生较大的周向应力,加剧压缸失效。然而,STD压缸是由多个剖分块组合而成的装配式压缸,可有效降低内壁的周向应力,使内壁的应力状态接近静水应力,即脆性材料的最佳应力状态。为进一步探究压缸内壁的应力状态,沿路径(先垂直方向后水平方向)提取应力值,如图6所示。仿真结果表明,在相同的加载条件下,STD压缸的应力远小于BTD压缸的应力。因此,STD压缸能承受更大的压力,且这两种压缸的应力分布趋势相似。



(a)路径方向等效应力分布情况



(b)路径方向最大剪切应力分布情况

图6 沿路径方向的应力分布情况

Fig. 6 Stress distribution along the path direction

在垂直方向上,BTD压缸的应力沿路径逐渐增大,在水平方向上,应力基本保持不变。因此,应力最大值位于BTD压缸内壁中部,此处最有可能断裂。在垂直方向上,STD的应力变化趋势与BTD相似,但随着剖分块数量增加,应力增大趋势逐渐变缓。在水平路径上,STD的应力分布规律完全不同于BTD,呈下降趋势。此外,STD压缸内壁的应力集中现象有所改善,与BTD压缸相比,STD压缸的应力分布更合适,能有效降低压缸失效风险。

2.3 支撑环应力分布

支撑环是限制压缸在工作过程中发生径向位移的主要部件,研究支撑环的应力状态,对维持超高压模具腔内压力稳定具有重要意义。第1层支撑环内壁与STD压缸外壁直接接触,压缸剖分块数量不同,支撑环内壁的应力状态必然不同。图7、图8分别为第1层支撑环内壁的等效应力和最大剪切应力的分布情况。

由图7、图8中可知,BTD应力最大值出现在第1层支撑环的中部,沿周向连续分布,与年轮式压缸的应力分布规律相似。STD第1层支撑环内壁与剖分块接触位置的应力值较低,周向应力呈周期性分布且并不连续,最大值出现在与剖分块接触区域的中部。这是由于在接触面之间摩擦力的作用下,第1层支撑环内壁与剖分块外壁接触区域沿周向的变形趋势不同,导致应力呈现周期性分布。

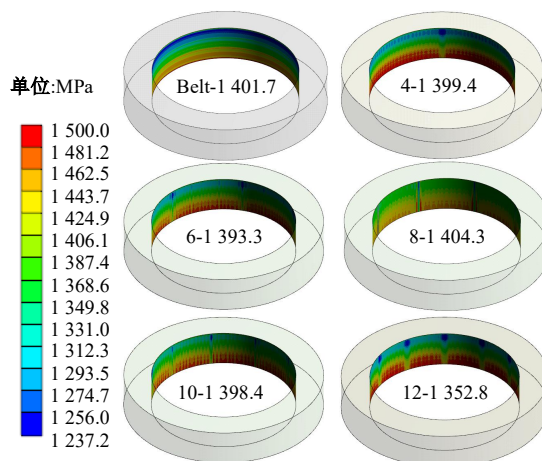


图7 不同模具内壁支撑环等效应力情况

Fig. 7 Equivalent stress condition of different dies

图9为模具4层支撑环的最大应力值统计情况,各模具支撑环的最大应力基本相同,并未发生显著改变,且各层支撑环应力值较为接近。如果

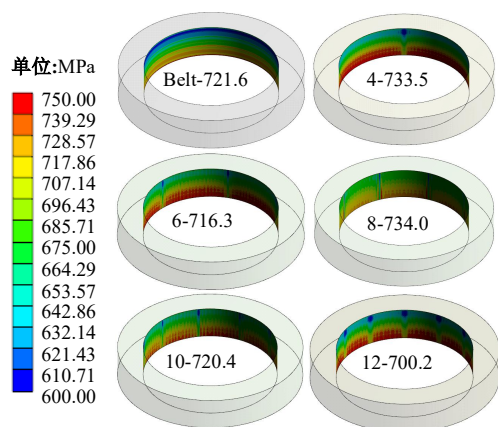


图 8 不同模具内壁支撑环最大剪切应力情况

Fig. 8 Maximum shear stress condition of different dies

用 Von Mises 屈服准则和最大剪切应力准则评价支撑环的强度,所有模具的支撑环均处于弹性状态和安全区域。因此,虽然 STD 压缸为组合式结构,但支撑环的应力未明显增加。在保证支撑环安全的前提下,需增大各层界面间的过盈配合值,以保证 STD 压缸的充分预紧。

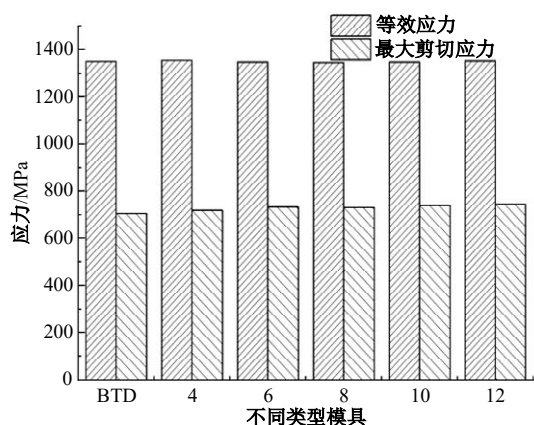


图 9 不同模具支撑环最大应力情况

Fig. 9 Maximum stresses of different dies

2.4 承压能力预测

承压能力是超高压模具的重要性能参数,由压缸和支撑环上的等效应力和最大剪切应力的最大值共同决定。本文通过改变样品腔内壁的压力(以 0.1 GPa 为间隔,从 5 GPa 增加到 10 GPa),进行一系列的有限元分析,以预测 BTD 和 STD 的极限承压能力。基于最大畸变能理论和最大剪切应力理论评价超高压模具的承压能力。不同压缸的极限承压能力如图 10 所示。

根据最大畸变能理论,BTD 压缸极限承压能力为 5.6 GPa,压缸剖分块数量为 4、6、8、10 和 12 块的 STD 压缸极限承压能力分别为 6.1、6.3、6.6、6.7 和 6.8 GPa,分别提高了 7.1%、12.5%、

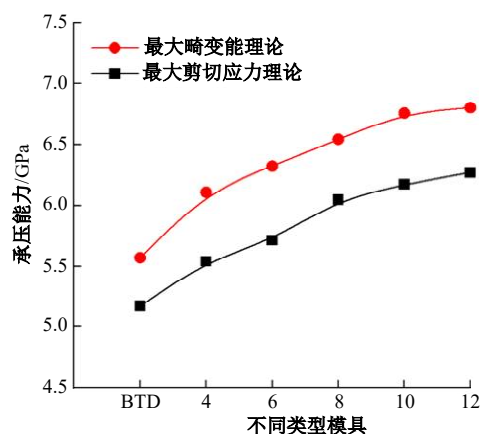


图 10 不同模具承压能力

Fig. 10 Pressure bearing capacity prediction

17.8%、19.6% 和 21.4%。根据最大剪切应力理论,BTD 压缸极限承压能力为 5.2 GPa,压缸剖分块数量为 4、6、8、10、和 12 块的 STD 压缸极限承压能力分别为 5.5、5.7、6.0、6.2 和 6.3 GPa,分别提高了 5.3%、8.9%、14.2%、17.8% 和 19.6%。由此可见,STD 压缸的承压能力明显大于 BTD 的承压能力。剖分块数量越多,STD 压缸的承压能力越强。对比评价结果发现,采用最大剪切应力理论评价的承压能力小于采用最大畸变能理论评价的承压能力,故采用最大剪切应力理论作为失效准则设计超高压模具更为安全。

3 实验验证

为验证仿真结果,对 BTD 压缸和 STD 压缸进行破坏性实验。为节省成本,只对 BTD 压缸和剖分块数量为 6 的 STD 压缸进行实验,且用于实验的尺寸为数值模拟中几何尺寸的 1/2。支撑环、压缸通过液压机系统进行装配,将叶蜡石材料预先挤压成与样品腔相同的形状,装入样品腔作为传压介质。在实验过程中,上下顶砧在 200 t 液压机系统的驱动下相对运动,对样品腔内的叶蜡石试样进行挤压。逐渐增大压力载荷,直至超高压模具断裂,同时记录断裂发生时的压力值。图 11 为压缸剖分块数量为 6 的 STD 压缸装配体。先对支撑环进行装配,再通过液压机对压缸组合体和支撑环装配体进行装配,最终形成 STD 装配体。

图 12(a)(b)分别为 BTD 和剖分块数量为 6 的 STD 压缸,图 12(c)(d)分别为破坏后的 BTD 和 STD 压缸。实验结果表明,当 BTD 和 STD 压缸遭到破坏时,STD 的极限油压为 8.7 MPa,比



图 11 STD 模具装配体

Fig. 11 STD pressure cylinder assembly

BTD 的极限油压 (7.2 MPa) 高 20.8%。因此, STD 的新型结构比传统的 BTD 结构更坚固, 可承受更大的压力, 实验结果与数值分析结果基本一致。另外, 实验发现, 当 STD 压缸断裂时, 只有一个剖分块损坏, 其他剖分块仍可使用。损坏的剖分块可单独更换, 有利于降低使用成本。

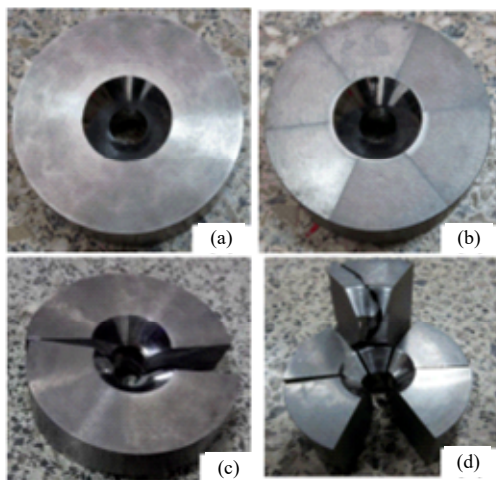


图 12 压缸破坏前后的图像

Fig. 12 Images before and after cylinder failure

4 结束语

本文对剖分式超高压模具的应力状态进行了数值模拟, 并通过破坏性实验对仿真结果进行验证。研究表明, 组合式结构的 STD 压缸能有效消除内壁的周向应力, 使压缸内壁主要承受压应力, 接近静水压状态, 即碳化钨等脆性材料的最佳受力状态; STD 的承压能力明显高于 BTD, 且剖分块数量越多, 承压能力越强。与 BTD 压缸相比, STD 组合式压缸的单个压缸剖分块的体积仅为 BTD 压缸的十几分之一, 无须使用大尺寸硬质

合金, 降低了压缸的制造难度。STD 压缸可利用支撑环的预紧作用, 使剖分块之间相互挤压, 发挥侧向支撑的优势; 同时, 剖分块的特殊形状能提供大质量支撑。这两种支撑能有效减小装置各部件的应力。当 STD 压缸受损时, 可单独更换被破坏的剖分块, 有效降低使用成本。综上所述, STD 具有承压能力高、便于加工和使用成本低等优点, 为超高压模具腔体大型化提供了更多可能。虽然增加剖分块数量可提升 STD 压缸的承压能力, 但剖分块数量还受到生产成本的限制; 当压缸尺寸大、剖分过少时, 硬质合金加工难度大。因此, 设计超高压模具压缸的具体尺寸时, 压缸剖分块数量的选取原则可总结为: 当压缸尺寸较大时, 应优先考虑模具的极限承压能力, 剖分块数量多一些, 以保障硬质合金的烧结质量, 获得大腔体; 当压缸尺寸较小时, 压缸的剖分数量应少一些, 以减少硬质合金的加工制造成本。

参考文献:

- [1] 袁松梅, 陈博川, 邵梦博. 微小孔钻削刀具制造技术研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(3): 265-282.
Yuan Song-mei, Chen Bo-chuan, Shao Meng-bo. Review of research advances in micro-drill manufacturing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(3): 265-282.
- [2] 臧传义, 马红安, 田宇, 等. 利用不同籽晶面生长优质宝石级金刚石单晶[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(1): 10-13.
Zang Chuan-yi, Ma Hong-an, Tian Yu, et al. Growth of high-quality gem diamonds with different seed facets[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2006, 36(1): 10-13.
- [3] Yi Z, Fu W Z, Li M Z, et al. Strength analysis of a novel high-pressure die with double-layered split structure[J]. Metals, 2018, 8(8): 606.
- [4] Hunt S A, Weidner D J, McCormack R J, et al. Deformation T-cup: a new multi-anvil apparatus for controlled strain-rate deformation experiments at pressures above 18 GPa[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(8): 306-316.
- [5] 韩奇钢, 班庆初, 易政, 等. 超高压碳化钨顶砧新结构的设计与研究[J]. 高压物理学报, 2014, 28(6): 686-690.
Han Qi-gang, Ban Qing-chu, Yi Zheng, et al. Study on new structure of ultra-high pressure WC

- anvil[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(6): 686-690.
- [6] Hall H T. Ultra-high-pressure, high-temperature apparatus: the “Belt” [J]. Review of Scientific Instruments, 1960, 31(2): 125-131.
- [7] Zhao L, Wu N N, Li M Z, et al. Stress analysis and experiment on a split-type ultra-high-pressure die for synthesizing diamond[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(10): No. 103903.
- [8] Yang Y F, Li M, Wang B. Study on stress distribution of tangent split high pressure apparatus and its pressure bearing capacity[J]. Diamond & Related Materials, 2015, 58: 180-184.
- [9] Miyakawa, M, Taniguchi T. Homogeneous heating of a sample space by a modified heating assembly in a belt-type high-pressure apparatus[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(2): 1-5.
- [10] Petrova A E, Sidorov V A, Stishov S M. High-pressure helium gas apparatus and hydrostatic toroid cell for low-temperatures applications[J]. Physica, B. Condensed Matter, 2005, 359: 1463-1465.
- [11] Sumiya H, Irifune T. Indentation hardness of nano-polycrystalline diamond prepared from graphite by direct conversion[J]. Diamond & Related Materials, 2004, 13(10): 1771-1776.
- [12] Han Q G, Liu B, Hu M H, et al. Design an effective solution for commercial production and scientific research on gem-quality, large, single-crystal diamond by high pressure and high temperature[J]. Crystal Growth & Design, 2011, 11(4): 1000-1005.
- [13] Yang Y, Li M, Wang B, et al. A novel split-belt apparatus: The stress distribution and performance of its tangent split die[J]. High Pressure Research, 2015, 35(3): 1-7.
- [14] Yamazaki D, Ito E. High pressure generation in the kawai-type multianvil apparatus equipped with sintered diamond anvils[J]. High Pressure Research, 2020, 40(1): 3-11.
- [15] Irifune T, Kunimoto T, Shinmei T, et al. High pressure generation in kawai-type multianvil apparatus using nano-polycrystalline diamond anvils[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2019, 351(3): 260-268.
- [16] Han Q G, Zhang Q, Chen Y D, et al. Design of a double radius type large volume cubic anvil for achieving longer lifetime and higher cell pressure[J]. Key Engineering Materials, 2014, 8(2): 589-590.
- [17] Zhao L, Li M Z, Yang Y F, et al. Finite element analysis and experiment on high pressure apparatus with split cylinder[J]. High Pressure Research. 2017, 37(3): 377-388.
- [18] Han Q G, Li M Z, Jia X P, et al. Modeling of effective design of high pressure anvils used for large scale commercial production of gem quality large single crystal diamond[J]. Diamond & Related Materials, 2011, 20(7): 969-973.
- [19] 依卓, 付文智, 李明哲. 双层剖分式超高压模具数值模拟及实验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49(5): 1593-1599.
- Yi Zhuo, Fu Wen-zhi, Li Ming-zhe. Numerical simulation and experiment on double-layered split ultra-high pressure die[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(5): 1593-1599.
- [20] 吴楠楠, 赵亮, 李明哲, 等. 棱柱形径向剖分式超高压模具应力分析与实验研究[J]. 高压物理学报, 2022, 36(2): 26-32.
- Wu Nan-nan, Zhao Liang, Li Ming-zhe, et al. Stress analysis and experiment on a radial prism cavity split-type ultra-high pressure die[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(2): 26-32.
- [21] 姚裕成. 人造金刚石和高温高压技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 152-157.
- [22] Zhu B J, Qu X H, Tao Y, et al. Optimization of tungsten cemented carbide injection molding process parameters [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2002, 31(3): 232-235.
- [23] 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): No. 125113.
- [24] Zhao L, Wu N N, Li M Z, et al. Stress analysis and experiment on a split-type ultra-high-pressure die for synthesizing diamond[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(10): No. 103903.
- [25] Zhao L, Li M, Wang L, et al. Stress distribution and pressure-bearing capacity of a high-pressure split-cylinder die with prism cavity[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(3): No. 035106.
- [26] Teppernegg T, Klünsner T, Kremsner C, et al. High temperature mechanical properties of WC-Co hard metals[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2016, 56(1): 139-144.