

高压物理学报

静态超高压装置研究进展

赵亮 吴楠楠 陈慧轩 李明哲 梁晓波

Research Progress of Static Ultra-High Pressure Device

ZHAO Liang, WU Nannan, CHEN Huixuan, LI Mingzhe, LIANG Xiaobo

引用本文:

赵亮, 吴楠楠, 陈慧轩, 等. 静态超高压装置研究进展[J]. 高压物理学报, 2025, 39(9):090203. DOI: 10.11858/gywlb.20251065

ZHAO Liang, WU Nannan, CHEN Huixuan, et al. Research Progress of Static Ultra-High Pressure Device[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2025, 39(9):090203. DOI: 10.11858/gywlb.20251065

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20251065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

缠绕离散式大腔体超高压模具的设计计算及数值模拟

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

高压物理学报. 2025, 39(3): 033301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240851>

动态压力加载/卸载装置dDAC及原位表征技术研究进展

Research Progress of Dynamic Pressure Loading/Unloading Device and *In-Situ* Characterization Technology

高压物理学报. 2021, 35(6): 060102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210505>

压力环境对纳米晶金刚石石墨化的影响

Effect of Pressure Environment on Graphitization of Nano-Crystalline Diamond

高压物理学报. 2024, 38(4): 041101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240715>

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>

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>

静态超高压装置研究进展

赵 亮¹, 吴楠楠¹, 陈慧轩¹, 李明哲², 梁晓波¹

(1. 淮阴工学院江苏省先进制造重点实验室, 江苏 淮安 223003;

2. 吉林大学锻锻工艺研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:超高压技术作为极端条件制造领域的重要手段,其应用已从凝聚态物理、地球科学等基础研究拓展至超硬材料合成及高密度储能器件制造等工程实践,并逐步向精密能场调控等前沿方向延伸。尽管我国超高压装置需求激增,但是受限于大尺寸硬质合金烧结技术壁垒,国产超高压装置占比较低。为此,系统梳理了对顶砧、两面顶、多面顶、分球式 4 类主流静态超高压装置的结构特征与技术瓶颈,并对未来超高压装置的发展和技术方向进行了展望。

关键词:超高压装置; 结构优化; 压力效率; 腔体容积; 超硬材料合成

中图分类号:O521.3

文献标志码:A

物理学中将大于或等于 100 MPa 的压力称作超高压,超高压装置是超高压发生的重要载体。通过稳定加载方式长时间维持压力的超高压装置被称为静态超高压装置。为了深入探索物质在超高压和高温条件下的微观和宏观行为,科学家们对静态超高压装置进行了深入研究与开发,使其在高压物理学、化学、地球物理学、天体物理学、新材料设计合成等领域发挥不可替代的作用。因此,超高压装置的研发在国际上受到高度重视,并在科学研究和工业生产中得到广泛应用。

在科学研究方面,由于静态超高压装置可以提供特殊的高温、高压物理环境,为发展凝聚态物理理论、研究新材料合成机制、揭示新物理现象以及探索新化学机理提供了关键实验平台,提高了人类认识自然、探索科学奥秘的能力。首先,利用超高压装置提供的超高压可以改变物质的晶体结构、电子结构和原子间的作用,进而伴随着一系列特殊的理化现象,使物质呈现新的特性。例如:氮气分子在超高压下会以双键甚至单键的固体聚合氮结构存在,相互转换过程中伴随着巨大的能量释放,为未来金属富氮化合物的设计和制备提出了新方向^[1];通过原位 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)技术,发现 23 GPa 时 GeTe 的超导转变温度达到 6.4 K^[2], 19.93 GPa 时 PbSe₂ 开始发生半导体到金属的结构相变。其次,通过超高压装置提供的高温、高压物理空间,可以探索地球内部结构,寻找火山、地震爆发的规律。例如:对天然含硫矿物黄铁矿(FeS₂)进行 55 GPa 的冲击加载,通过回收实验,研究了黄铁矿的热不稳定状态,分析了硫气体进入海洋和大气的新技术,描述了 2.5 亿年前二叠纪末期的生物灭绝事件^[3]。另外,通过高温-高压反应釜构建的地壳压力和温度环境,不仅能够揭示水热成岩作用的关键机制,还可以模拟油气生成过程,深化了对成岩演化和油气运移规律的认识,为非常规油气资源勘探提供了理论支撑和实验依据。

在工业应用方面,基于非平衡态热力学调控原理,超高压加工可通过亚稳态滞留效应实现材料性能跨尺度重构,该特性在金刚石等超硬材料合成领域已形成成熟的工艺体系,并逐步拓展至精密加工刀具表面改性等先进制造场景。例如:石墨在 5~7 GPa、1200~1800 °C 的压力温度范围内可实现晶体结构重构,所得的人造金刚石在力学性能上已超越天然产物,其规模化制备技术覆盖 95% 以上的工业

* 收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-05-11

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金(23KJB460004, 23KJB460003)

作者简介: 赵 亮(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事材料加工研究. E-mail: minghaibu09@163.com

通信作者: 吴楠楠(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事机械制造研究. E-mail: angeliawnn@163.com

需求。在高温高压环境中合成的立方氮化硼的硬度仅弱于金刚石,但耐热性却优于金刚石,所制的切削刀具非常适合高速切削,可用于超硬材料的精密加工^[4]。通过高压环境诱导的脆-塑转变效应,可实现常规条件下难以加工的脆性物质(如碳化硅)异形构件的精密成型,该特性已成功应用于涡轮叶片冷却通道等复杂构件的高效制造^[5]。

根据设计原理和结构类型,静态超高压装置可分为对顶砧式超高压装置、两面顶超高压装置、多面顶式超高压装置以及分球式超高压装置^[6-7],科研人员对这些装置进行了大量研究,致力于提高超高压装置的极限压力和腔体容积。本文将根据静态超高压装置的结构类型进行讨论,系统梳理现有静态超高压装置的技术瓶颈,旨在突破腔体大型化与极限承压能力提升的关键难题,以满足科学研究和工业生产的双重需求。

1 对顶砧式超高压装置

1.1 金刚石对顶砧装置

金刚石是已知的自然界中硬度最高的材料,利用其制作超高压装置研究高温高压条件下的物质发展规律具有显著的优势。20 世纪中叶,基于大质量支撑理论,科学家以单晶金刚石为砧体研制出对顶砧装置,其晶向择优取向使压力生成效率提升,如图 1^[8]所示。金刚石对顶砧装置有多种加压结构,其中,实验室中常用的是活塞式和四柱式金刚石对顶砧装置。采用环氧树脂作为黏合剂,将金刚石与硬质合金材质的压板进行稳固而可靠的粘合,然后与圆筒部件精密装配。通过螺栓的驱动力,使圆筒相向运动,促使 2 个对置的金刚石压砧紧密挤压,并对其间的样品施加压力。因为金刚石压砧的端部面积较小且硬度高,所以可产生非常高的压力。传压介质可选择金属垫片,液体传压介质可应用硅油和甲-乙醇(甲醇与乙醇的体积比为 4:1),叶蜡石类软固体材料同样满足要求。金刚石对顶砧的压力标定主要采用 3 种方法:荧光光谱法、利用已知物质的状态方程进行压力测定法、物质相变压力测定法。

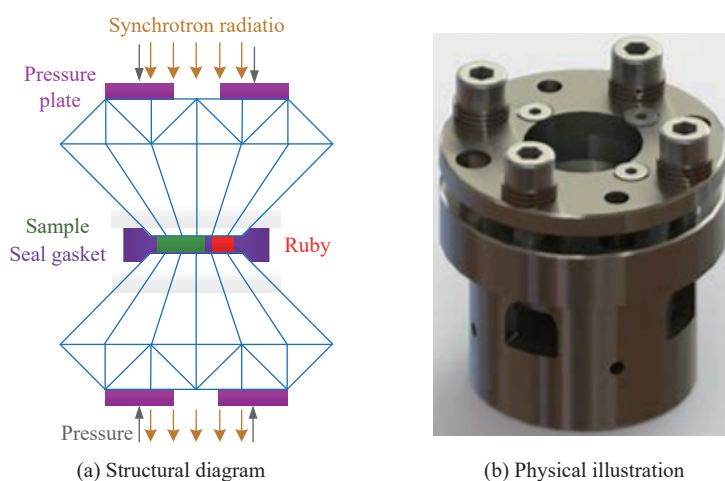


图 1 金刚石对顶砧装置^[8]

Fig. 1 Diamond anvil cell setup^[8]

Forman 等^[9]创新性地提出了利用红宝石荧光测量金刚石对顶砧的腔内压力。该方法的原理:在常压条件下,通过显微光谱仪可以观测红宝石的 2 个荧光光谱峰,红宝石受压时,其中一个荧光光谱峰的波长会发生偏移($\Delta\lambda$),其与所受压强 p 之间存在特定的关系

$$p = 380.8 \left[\left(\frac{\Delta\lambda}{694.2} + 1 \right)^5 - 1 \right] \quad (1)$$

式中: p 和 $\Delta\lambda$ 的单位分别为 GPa 和 nm。

利用已知物质的状态方程测定法是一种精确测量金刚石对顶砧腔体内压力的方法,它依据物质已知的压力-比容-温度(p - V - T)状态方程,利用 XRD 技术测定腔体内状态方程已知的金属的晶格参数,结合其状态方程,可以计算出腔体内的压力。采用该方法所得的腔体压力误差通常在 1~2 GPa 范围内。物质相变法依赖已知物质(NaCl 或石英)的压力与温度之间的特定关系。测试过程中,逐级提升压力,在每个压力级别上进行相应的检测^[10]。

合成新材料和探索地心内部的物理状态均高度依赖高温环境的模拟与支持,将高温环境引入实验研究至关重要。在金刚石对顶砧装置中,主要有 2 种途径提升温度:外加热和激光加热。外加热可细分为电阻加热和电磁感应加热 2 种方式;激光加热则是利用高能激光束直接照射金刚石对顶砧腔体内的样品,样品吸收光波能量后实现温度的迅速提升。目前,在实验室条件下,科研人员已成功获得接近 6000 K 的极端高温环境^[11]。

美国芝加哥大学的 Jamieson 等^[12]用金刚石作为顶砧材料,研制了 2 种改进的金刚石对顶砧超高压装置,得到了 Bi 金属在 3 GPa 压力下的 XRD 谱。Bell 等^[13]利用该类型装置成功获得了超过 172 GPa 的压力,随后采用固化气体作为传压介质,又获得了 60 GPa 以上的准静水压。美国卡内基研究所地球物理实验室的 Gregoryanz 等^[14]利用金刚石对顶砧获得了 550 GPa 的压力,超过了地心最大压强 360 GPa。哈佛大学的 Dias 等^[15]利用该类型装置在 495 GPa 的压力下成功合成了金属氢。吉林大学 Zhang 等^[16]利用自研的金刚石对顶砧装置成功阐释了金属亚氮化物的稳定性机理,为半导体材料的研制做出了重要贡献。金刚石对顶砧凭借其优异的光学透过率和紧凑结构,可与同步辐射光源、拉曼光谱仪等多种设备联用,为原位观测高压相变提供了关键技术。金刚石对于绝大多数波长的光都具有优异的透射性能,其内部可集成光学探测窗口,从而支持原位分析测试。这一特性使金刚石对顶砧装置成为目前唯一兼具高压加载与实时光学分析能力的实验平台。

1.2 Bridgeman 对顶砧装置

Bridgeman 开发出一种平面对顶砧超高压装置,如图 2(a)所示,并创造性地提出静态高压装置应遵循“大质量支撑原理”和“侧向支撑原理”的设计原则,使得高压科学这门新兴学科随着超高压装置的进步而飞速发展^[17-18]。其顶砧为硬质合金,支撑环采用高强钢材料,顶砧与支撑环过盈配合。平面对顶砧装置基于压力接触原理,在硬质合金砧面间隙预置金属垫层,通过塑性形变维持密闭腔体的高压状态。由于密封垫具有一定的厚度,占用样品腔容积,因此,可用于压缩物质的容积有限。该装置的结构简单,加工制造成本低,能够提供 0~25 GPa 的压力^[19];但其腔体容积小,压力不易控制,所以仅用于新材料设计合成、相变和材料低温流动行为等实验研究,未能在工业生产中得到应用^[20]。

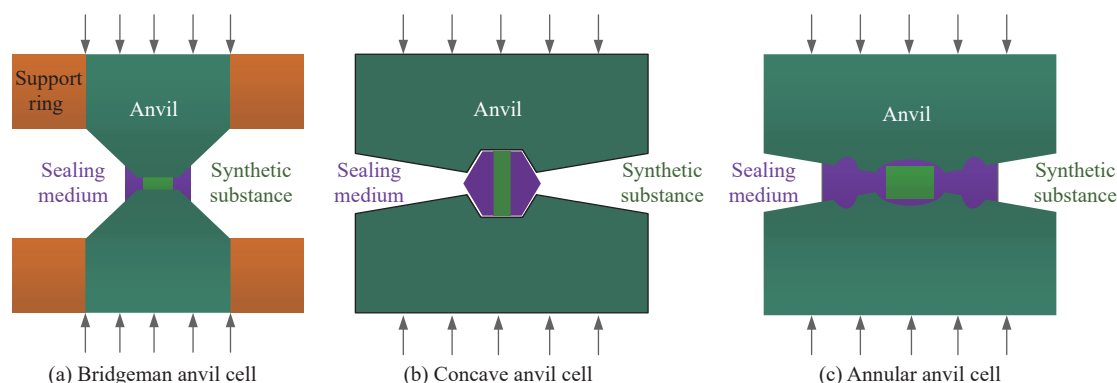


图 2 Bridgeman 对顶砧装置
Fig. 2 Bridgeman anvil cell setup

1.3 凹形对顶砧装置

为了增大腔体容积,提高反应物质的质量,俄罗斯的科研人员研制了一种凹形对顶砧装置^[21-22]。

凹形对顶砧装置是在 Bridgeman 对顶砧装置的基础上进行演化, 结构如图 2(b) 所示。压力机推动上下顶砧时, 相对的 2 个压砧逐渐闭合形成压腔, 密封介质因受压在腔体内流动, 其中一部分流入压腔内, 另一部分流入 2 个压砧间的缝隙中, 形成密封垫。当施加在顶砧上的压力不断增大时, 2 个压砧持续闭合, 进一步产生高压。显然, 密封介质不可避免地占据压腔空间, 因此, 压腔容积受限。不仅如此, 该装置的高压腔体压力稳定性差, 变形不均匀, 且重复性不高。

Khvostantsev 等^[23]、Ni 等^[24]对凹形对顶砧装置进行了改进, 研制了环形对顶砧超高压装置, 如图 2(c) 所示。环形对顶砧的砧面是一对轴对称半球凹面, 2 个顶砧相对运动后, 形成一个独特的近似半球的空间。空间外围有一个或多个梯度环形槽, 用来约束密封介质的流变行为, 有效控制压力场的波动幅度。首选叶蜡石作为密封材料, 在中子散射实验中也使用金属密封垫片^[25]。Bianca 等^[26]对环形对顶砧装置进行了改进, 使装置压力达到 20 GPa, 样品腔体积增大至 3 mm³。由烧结金刚石做成的双环形对顶砧在 XRD 实验中的极限压力达到 30 GPa^[27]。与 Bridgeman 对顶砧相比, 凹形对顶砧装置的样品腔容积显著增大, 压力发生效率更高, 具有较高的科学研究和工业应用价值。

2 两面顶超高压装置

2.1 Belt 式超高压装置

Hall 基于大质量支撑和侧向支撑原理, 研制出双向加载装置(Belt 式/年轮式)。该装置由 2 个对置的硬质合金顶锤和年轮式模具组成, 其中, 年轮式模具由硬质合金压缸和多层高强钢支撑环组成, 各层之间过盈配合, 如图 3^[28]所示。通过结构紧凑化和加载机构简化设计, 实现了稳定的压力场和温度场, 开创了层状超高压模具结构设计的先河^[28]。前期, 在实验室条件下获得了超过 6 GPa 的压力, 但是腔体容积有限, 不能进行工业生产。经过不断地改进, 基于该装置的超高压技术日趋成熟。美国、英国和日本都采用此类装置进行宝石级金刚石工业化制备, 英国 De Beers 公司^[29-30]研发的 $\varnothing 250$ mm 压缸系统可实现 $\varnothing 112$ mm 的聚晶复合片制备(单周期产量超过 2000 克拉)。日本东名公司通过 1.8×10^4 t 级模具将合成规格提升至 $\varnothing 80$ mm(单周期产量 500 克拉), 压缸直径为 135 mm^[31]。这几家公司采用的两面顶超高压模具的腔体压力最高仅 6.5 GPa, 生产单位金刚石消耗的硬质合金较高。

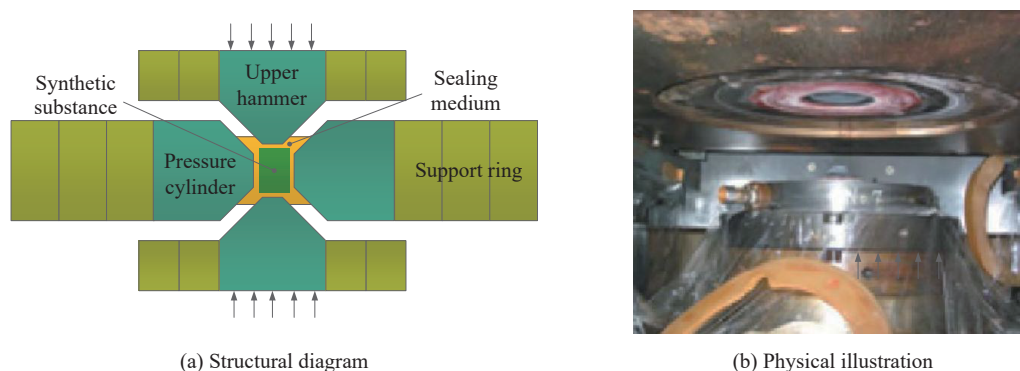


图 3 Belt 式超高压装置^[28]

Fig. 3 Belt-type ultra-high pressure device^[28]

日本国立无机材料研究所采用高速钢取代昂贵的硬质合金制作压缸, 由于高速钢的弹性模量较小, 径向变形大, 故将压缸设计成扁平状, 模具直径达 2 m, 腔体容积为 1000 cm³, 但是尚未见该装置合成金刚石的报道^[32]。我国对两面顶超高压装置的研究始于 20 世纪 60 年代, 人工晶体研究所的两面顶装置研究基地先后完成高压腔直径为 20、32、40 mm 的装置研制, 也曾引进国外两面顶超高压模具的相关技术, 其直径为 50~80 mm, 高压腔体容积为 100~500 cm³, 可承受的推力范围为 25~100 MN。1993 年, 成功设计了腔体直径为 65 mm、容积达 218 cm³ 的两面顶高压装置。然而, 因该装置对硬质合金压缸的消耗较高、价格昂贵, 造成运行成本居高不下, 已处于停产状态^[33]。

2.2 缠绕式两面顶超高压装置

Groenbaek 等^[34-35]提出用钢丝缠绕代替外层支撑环,改进了 Belt 式超高压模具,其结构如图 4 所示。缠绕式两面顶超高压模具由压缸、衬环、支撑环和缠绕层组成。钢丝通过专用缠绕机对支撑环进行缠绕,进而对硬质合金压缸形成有效预紧,预压应力场抵消拉应力分量,从而提高超高压装置的承压极限。钢丝缠绕方式主要有等张力缠绕法、等周向应力缠绕法和等剪应力缠绕法^[36-37]。缠绕式两面顶超高压装置具有承压能力高、模具尺寸小、零部件加工难度低、使用寿命长等特点。目前,关于该类型超高压装置的研究较少。安徽理工大学刘志卫等^[38]对缠绕式两面顶超高压模具进行了细致研究,如对缠绕层等张力缠绕预紧进行了分析,研究了钢丝直径和缠绕层数对模具应力的影响规律,设计了用于两面顶超高压装置的可变拉力钢丝缠绕机,促进了缠绕式两面顶超高压模具的研究进程。同时,他们还对具有剖分式结构的缠绕式两面顶超高压模具进行了设计计算和数值模拟,得到了模具缠绕过程中钢丝直径和缠绕张力对两面顶模具应力的影响^[39]。济南大学的陈孔军等^[40]、来小丽等^[41]利用钢带对两面顶超高压模具进行预紧,解决了预紧过程中钢带抖动的问题,并分析了缠绕层数对模具表面预紧力和轴向应力的影响规律,得到了钢带缠绕层的确定方法。

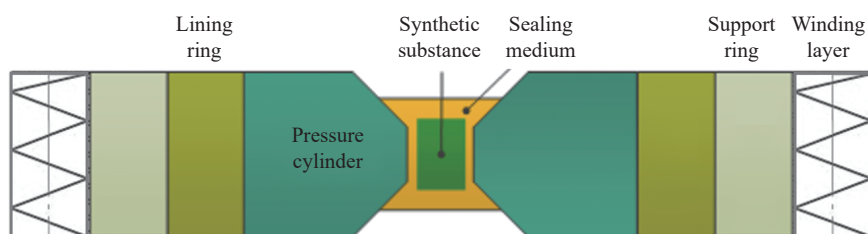


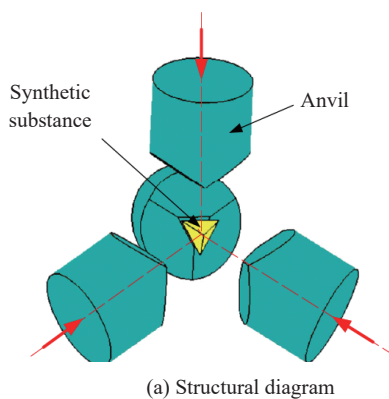
图 4 缠绕式超高压装置

Fig. 4 Wire-wound ultra-high pressure apparatus

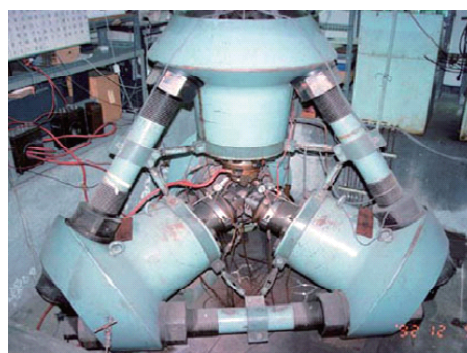
3 多面顶式超高压装置

3.1 四面顶超高压装置

Hall^[42]研发了最早的四面顶超高压样机,该装置采用 4 个硬质合金顶砧作为主要施压部件,腔体形状为正四面体,如图 5 所示。通常采用叶蜡石作为传压介质,受压材料则被加工成圆柱体,被封装在四面体叶蜡石的中心位置,在常温条件下,获得了接近 12 GPa 的超高压。然而,因为 4 个顶砧的加载均不同轴,因此,液压缸力系不平衡,压力的发生和保持较为困难,并且装置的操作复杂,装料困难,目前已经很少使用。值得注意的是,基于四面顶超高压装置, Hall 等^[43]首次成功地将 XRD 系统应用到矿



(a) Structural diagram



(b) Physical illustration

图 5 四面顶超高压装置^[42]

Fig. 5 Multi-anvil high pressure apparatus^[42]

物和金属材料相变研究中。尽管该装置未在工业生产中得以运用,但它却开启了原位 XRD 技术应用于超高压研究的新时代。我国也曾研制具有二级加压的四面体超高压装置,可产生超过 10 GPa 的压力^[44]。

3.2 六面顶超高压装置

六面顶高压装置研究始于 20 世纪 50 年代,可分为拉杆式和铰链式。2 种类型都主要由 3 对在 3 个相互垂直方向上的顶砧构成,组成正六面体的高压腔体,在液压缸的推力作用下,顶砧相向运动,挤压叶蜡石密封材料形成高压环境,如图 6^[45]所示。该装置还需要配合电加热控制系统使用,使腔体内产生金刚石籽晶生长的高温高压条件。六面顶高压装置具有操作方便、压力发生快、压力效率高等优点。我国在六面顶超高压装置研究和应用方面一直走在国际先进行列,不断推动高品质单晶金刚石合成质量提升,并逐渐成为世界金刚石生产强国。该装置的缺点是腔体的极限压力低,限制了该装置腔体内金刚石合成质量的进一步提升。

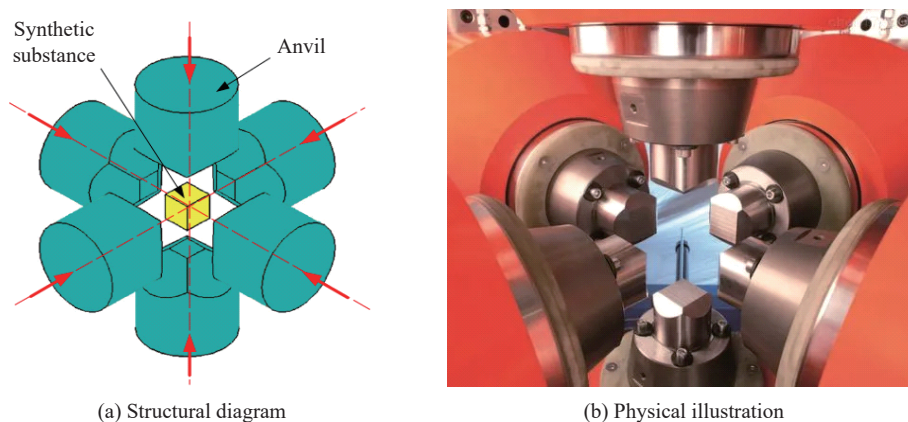


图 6 六面顶超高压装置^[45]

Fig. 6 Cubic anvil ultra-high pressure system^[45]

美国研制了腔体体积为 28 cm³、单缸推力为 20 MN 的六面顶装置。济南铸锻研究所成功研制了中国首台六面顶高压装置,此外,还设计制造了单个顶砧推力分别为 15、35 和 50 MN 的六面顶压机,但更大推力的六面顶压机因硬质合金顶砧尺寸过大导致性能不过关^[46-47]。韩奇钢等^[48]通过有限元分析技术,对六面顶高压装置的顶砧进行了系统优化,通过将顶砧圆角化,降低了断裂风险。Wang 等^[49]进行了基于六面顶装置的高压研究,并进行了先进材料和新材料的高温高压合成。何强等^[50]设计了一种适用于极端条件下的实验料块压装组合结构,热电偶在石墨炉中纵向分布、横向引出,提高了六面顶装置的高温稳定性和使用寿命。

3.3 6-8 型超高压装置

Kawai 等^[51]设计了二级加压结构的 6-8 型超高压装置,其中:一级加压结构与六面顶装置相同,如图 7 所示;二级加压结构由 8 个较小的硬质合金立方体构成,每个立方体通过切除一个正三角形顶角的方式,形成了一个正八面体形状样品空间。Ito 等^[52]以烧结金刚石作为二级加压顶砧材料,腔体边长为 14 mm,倒角为 1.5 mm,成功在 51.5 GPa、750 K 的条件下观察到了 GaN 的相变。

Yamazaki 等^[53]利用腔体边长为 14 mm 的 6-8 型高压装置,在 55 GPa、1000 °C 的条件下发现了镁硅钛矿在高压下的一种新的稳定晶体结构,同时,采用金刚石烧结二级顶砧进一步提高了承压能力。Tetsuo 等^[54]设计了一台 60 MN 的 6-8 型超高压装置,腔体体积达到 2 cm³,在 2500 °C、16 GPa 的条件下合成了尺寸超过 1 mm 的多晶金刚石。Mueller 等^[55]利用 X 射线断层摄影技术分析 6-8 型超高压装置腔体内部样品和挤压块的变形规律,并优化了挤压块的组装,腔体尺寸达到 10 mm,在获得大腔体的同时,提高了装置的承压能力。王文丹等^[56]通过自行设计的预密封边,对腔体内部样品进行有效

密封,使二级压力达到 20 GPa 以上,一级压力达到 9 GPa 的承压极限。张佳威等^[57]利用所开发的腔体边长为 4 mm 的 6-8 型超高压发生装置,成功在 16 GPa、2 100 °C 条件下合成了金刚石,同时提出了纳米金刚石形成的压力-温度区。

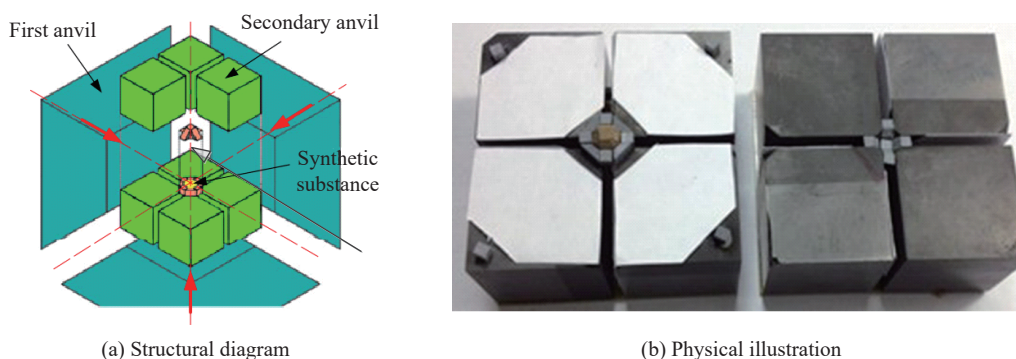


图 7 6-8 型超高压装置^[51]

Fig. 7 6-8 type multi-anvil ultra-high pressure system^[51]

4 分球式超高压装置

分球式超高压装置由日本的 Kawai 等^[58]设计,该装置属于二级加压型,如图 8^[59]所示。8 个二级顶锤由硬质合金制成,而 8 个一级顶锤则由高强钢制成,顶锤之间放置绝缘材料,可对顶锤起支撑作用,并允许测试导线通过。一级顶锤外侧覆橡胶膜,橡胶膜与半球之间留有液压油腔。橡胶膜嵌入铜触点并与导线相连,利用电流对样品外部的石墨管进行加热,获得高温环境。装配后放入油槽,利用液压系统使液压油进入液压油腔,推动一级、二级顶锤向中心挤压,使样品腔产生超高压。由于分球式超高压装置的结构特殊,早期应用时必须将其置于密封的油箱内,并浸没到液压油中,组装较为复杂,无工业应用价值。为了解决该问题,俄罗斯的科学家用设计了 BARS 球高压装置^[60],采用特制的密封钢桶取代油槽,液压系统将液压油注入钢桶内,驱动顶锤挤压样品产生超高压。经过测试,该装置的极限承压能力接近 10 GPa。美国加州大学研究人员对该装置做了进一步优化,承压能力再次得到提升,利用该装置成功合成了金刚石^[59]。

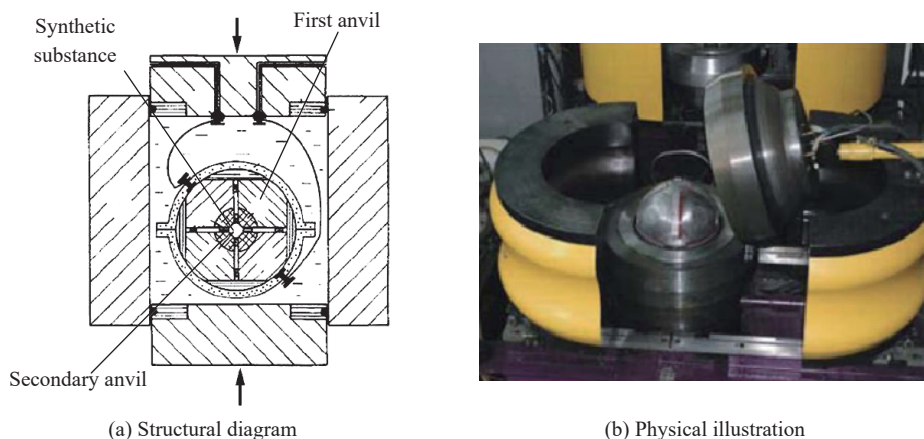


图 8 分球式超高压装置^[59]

Fig. 8 Split-sphere high pressure apparatus^[59]

5 静态超高压装置的发展方向

开发腔体更大、承压能力更强的静态超高压装置是超高压技术发展的重要方向。一方面,腔体大型化可以满足科学研究的需要。目前的静态超高压研究需要在样品腔体内布置传感器,导致样品的装

入量减少,影响数据的采集和精准测量,腔体大型化后,腔体内部可以放入更多的样品和传感器元件,降低数据采集误差。另一方面,腔体大型化可以满足工业生产的需要。对于合成如金刚石、立方氮化硼等超硬材料,腔体大型化后不但能够增加单次合成产量、降低能耗,而且可以使样品腔内的压力场和温度场更加稳定,有利于合成物质的稳定生长,保证产品质量。现阶段的静态超高压装置各有优缺点,具有特定的应用场景,表 1 列出了静态超高压装置性能。

表 1 静态超高压装置性能对比

Table 1 Performance evaluation of static ultra-high pressure devices

Device type	Pressure range/GPa	Cavity dimensions	Primary applications	Technical features
Diamond anvil cell setup	0–550	Cavity diameter: 0.3–0.5 mm	<i>In-situ</i> characterization techniques, ultrahigh-pressure research (e.g., planetary interior simulations, metallic hydrogen synthesis)	Single-crystal diamond anvil cell (DAC); piston-cylinder/four-column pressure systems; transparent anvils enabling <i>in-situ</i> optical characterization
Bridgman anvil cell setup	0–25	Extremely small	Phase transition mechanisms and cryogenic rheology of advanced materials	Cemented carbide flat anvils; interference-fit high-strength steel support rings; metal gasket sealing assembly
Annular anvil cell setup	20–30	3 mm ³ (Optimized Haberl)	Neutron scattering characterization, high-pressure and high-temperature (HPHT) studies in large-volume press systems	Axisymmetric hemispherical concave anvils; peripheral gradient annular groove design; split-type sealing gaskets (pyrophyllite+metal)
Belt-type ultra-high pressure device	0–6.5	Cavity diameter: 250 mm ^[29–30] , 135 mm ^[31]	Industrial diamond production (polycrystalline diamond compacts)	Belt-type multi-layered support die; cemented carbide pressure cylinder with steel support rings; isostatic pressing loading mechanism
Multi-anvil high pressure apparatus	0–12	Regular tetrahedral cavity	Pioneering advancements in XRD instrumentation	Asymmetric configuration of four cemented-carbide top anvils; regular tetrahedral sealed chamber; manual loading system
Cubic anvil ultra-high pressure system	0–6.5	28 000 mm ³	Scalable production of mid-to-low grade diamonds	Orthogonal configuration of six cemented carbide top anvil; electrically heated graphite tube for precise temperature control; hydraulically synchronized driving system
6-8 type multi-anvil ultra-high pressure system	20–55	Side length: 14 mm ^[52] , 2 000 mm ^{3[54]}	Phase transitions under HPHT conditions (e.g., magnesium silicate perovskite)	Two-stage pressurization structure (8 sintered diamond top anvils); regular octahedral sample chamber; pre-sealed edge technology
Split-sphere high pressure apparatuses	0–10		Experimental diamond synthesis	Multi-stage hydraulic driven top anvils; rubber membrane-sealed oil chamber; embedded graphite tube heating system

对顶砧式超高压装置的极限压力高,但只适合实验室条件下的科学研究,不能进行工业生产。四面顶超高压装置的样品腔形状复杂,液压缸力系不对称,压力施加困难,因此,几乎看不到其应用的相关报道。六面顶超高压装置的结构简单,压力场和温度场稳定,我国的超硬材料企业多采用该装置生产中低档金刚石。然而,在腔体大型化过程中,不仅难以实现精确的对中控制,而且保证顶锤同步运动也颇具挑战性。此外,由于难以构建一个独立且统一的调控系统,导致装置的重复性较差,进一步限制了其向腔体大型化的发展。6-8 型超高压装置的腔体为正八面体结构,料棒难制作,8 个立方块结构的密封边较多,密封很困难,影响压力传递,使承压能力受限。两面顶超高压装置具有装置结构简单、腔体较大、压力稳定、热分布均匀等优点,欧美国家的宝石企业都采用该类装置进行宝石级金刚石生产,但是其硬质合金压缸制作较为困难,成本高。

产生更高的压力与拥有更大的样品腔体两者相互制约。近年来,国内外在万吨级压力机的研制方面取得了很大的进展,但承压能力更强、样品腔体积更大的静态超高压装置研制一直比较缓慢,成为超高压技术发展的瓶颈。在静态超高压装置腔体大型化的尝试中面临诸多难点。首先,在当前的技术条件下,制造出符合质量标准的大型硬质合金零件依然存在困难。大体积硬质合金在烧结过程中易发生欠烧现象,热传导梯度导致物质扩散动力学受限,致使固相反应未充分完成,晶相转化率不足,伴随粉末流变特性劣化而引发孔隙率上升以及结构完整性降低。其次,大尺寸支撑环的制造困难。伴随着腔体大型化,装置的零部件尺寸也随之增大,尤其是大尺寸支撑环,不但增加了零件的质量和材料成本,而且材料热处理和机加工质量也很难保证。

结合上述各类型静态超高压装置结构分析可知,两面顶超高压模具在大型化方面具有独特的优势。将两面顶超高压模具的压缸进行剖分,形成组合式压缸,用钢丝或钢带对压缸进行高效缠绕预紧,此方法可有效避免使用大尺寸硬质合金和支撑环零件,如图 9 所示。然而,由于结构发生了改变,需要对该装置的应力特点、承压能力、压力发生效率以及保压能力做进一步研究。

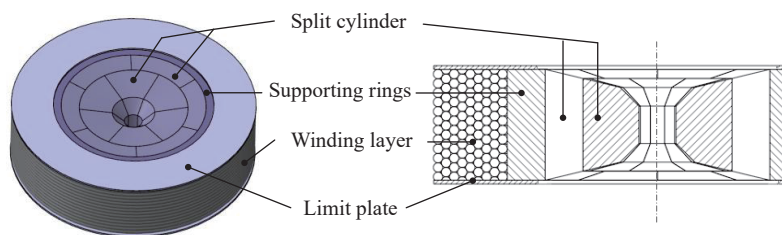


图 9 缠绕预紧交错剖分式两面顶超高压模具

Fig. 9 Wound preloading interlocked split-type double-anvil ultra-high pressure device

6 结 语

通过对不同类型静态超高压装置的研究现状进行整理,发现对顶砧式超高压装置、四面顶超高压装置、6-8 型和分球式超高压装置的腔体体积小,不能进行工业生产,仅限于实验室研究使用。目前,世界上用于合成金刚石的超高压装置主要是两面顶超高压装置和六面顶超高压装置。十万吨级压力机技术的日趋成熟为超高压技术完善提供了新的契机,也为实现更大腔体、更高极限承压能力的超高压模具提出了更高的要求,而两面顶和六面顶超高压装置因其结构的独特优势成为超高压技术的研究热点。然而,大尺寸硬质合金制造和加工极其困难,使得这 2 种超高压装置的腔体大型化进展缓慢。未来的静态超高压技术研究将集中在超高压装置的腔体大型化方面,以期实现更大腔体、更高极限承压能力的超高压装置。

参考文献:

- [1] 翟航, 杨锦坭, 王建云, 等. 高压下主族金属富氮化合物的结构与含能特性 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(4): 040101.

- ZHAI H, YANG J N, WANG J Y, et al. Structure and energy properties of nitrogen-rich compounds of main group metals under high pressure [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(4): 040101.
- [2] 王莹莹. 高压下典型金属硫族化合物和氢化物的结构及超导电性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- WANG Y Y. Structures and superconductivity of typical metal chalcogenides and hydrides under high pressure [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [3] 吴杰, 甘波, 宋文豪, 等. 冲击下黄铁矿脱硫及其对地球早期环境的影响 [J]. *高压物理学报*, 2025, 39(3): 030101.
- WU J, GAN B, SONG W H, et al. Shock-induced desulfurization of natural pyrite and its implications for the early Earth's environment [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2025, 39(3): 030101.
- [4] YANG X X, YE Q L. Synthesis of high-quality octahedral cBN crystals with large size using lithium metal as a catalyst [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 580: 1–4.
- [5] WANG X M, ZENG X Q, YAO S S, et al. The corrosion behavior of Ce-implanted magnesium alloys [J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(5): 618–623.
- [6] XIE L J, YONEDA A, YOSHINO T, et al. Graphite-boron composite heater in a Kawai-type apparatus: the inhibitory effect of boron oxide and countermeasures [J]. *High Pressure Research*, 2016, 36(2): 105–120.
- [7] YI Z, FU W Z, LI M Z, et al. Numerical simulation and experimental verification of a novel double-layered split die for high pressure apparatus used for synthesizing superhard materials [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2019, 26(3): 377–385.
- [8] MAO H K, BELL P M, HEMLEY R J. Ultrahigh pressures: optical observations and Raman measurements of hydrogen and deuterium to 1.47 Mbar [J]. *Physical Review Letters*, 1985, 55(1): 99–102.
- [9] FORMAN R A, PIERMARINI G J, BARNETT J D, et al. Pressure measurement made by the utilization of ruby sharp-line luminescence [J]. *Science*, 1972, 176(4032): 284–285.
- [10] XU J A, MAO H K, BELL P M. High-pressure ruby and diamond fluorescence: observations at 0.21 to 0.55 terapascal [J]. *Science*, 1986, 232(4756): 1404–1406.
- [11] SCHULTZ E, MEZOUAR M, CRICHTON W, et al. Double-sided laser heating system for *in situ* high pressure-high temperature monochromatic X-ray diffraction at the esrf [J]. *High Pressure Research*, 2005, 25(1): 71–83.
- [12] JAMIESON J C, LAWSON A W, NACHTRIEB N D. New device for obtaining X-ray diffraction patterns from substances exposed to high pressure [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1959, 30(11): 1016–1019.
- [13] BELL P M, MAO H K, GOETTEL K. Ultrahigh pressure: beyond 2 megabars and the ruby fluorescence scale [J]. *Science*, 1984, 226(4674): 542–544.
- [14] GREGORYANZ D S. Comment on “evidence of a first-order phase transition to metallic hydrogen” [J]. *Physical Review B*, 2017, 96(15): 52–54.
- [15] DIAS R P, SILVERA I F. Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen [J]. *Science*, 2017, 355(6326): 715–718.
- [16] ZHANG L J, WANG Y C, LV J, et al. Materials discovery at high pressures [J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(4): 17005.
- [17] FASOL G, SCHILLING J S. New hydrostatic pressure cell to 90 kilobars for precise electrical and magnetic measurements at low temperatures [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1978, 49(12): 1722–1724.
- [18] 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.
- [19] 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: 54–59.
- [20] JACCARD D, HOLMES A T, BEHR G, et al. Superconductivity of ϵ -Fe: complete resistive transition [J]. *Physics Letters A*, 2002, 299(2/3): 282–286.
- [21] EREMETS M I. High pressure experimental methods [M]. Oxford: Oxford University Press, 1996: 102–107.
- [22] KLOTZ S, BESSON J M, HAMEL G, et al. Neutron powder diffraction at pressures beyond 25 GPa [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(14): 1735–1737.
- [23] KHVOSTANTSEV L G, SLESAREV V N, BRAZHKIN V V. Toroid type high-pressure device: history and prospects [J]. *High*

- [Pressure Research](#), 2004, 24(3): 371–383.
- [24] NI P Y, HUA R D, LV Z L, et al. Performance analysis of compact thermoelectric generation device for harvesting waste heat [J]. [Energy Conversion and Management](#), 2023, 291: 117333.
- [25] NEMES R J, LOVEDAY J S, WILSON R M, et al. Neutron diffraction study of the structure of deuterated ice VIII to 10 GPa [J]. [Physical Review Letters](#), 1993, 71(8): 1192–1195.
- [26] BIANCA H, JAMIE J M, JOERG C N, et al. Modified Bridgman anvils for high pressure synthesis and neutron scattering [J]. [High Pressure Research](#), 2019, 39(3): 1–13.
- [27] BILYALOV Y R, KAUROV A A, TSVYASHCHENKO A V. Pressure generation by a double-stage system using sintered diamond as the last stage anvil [J]. [Review of Scientific Instruments](#), 1992, 63(4): 2311–2314.
- [28] HALL H T. Ultra-high-pressure, high-temperature apparatus: the “belt” [J]. [Review of Scientific Instruments](#), 1960, 31(2): 125–131.
- [29] 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, 359/360/361: 1463–1465.
- [30] YANG Y F, LI M Z, WANG B L, et al. A novel split-belt apparatus: the stress distribution and performance of its tangent split die [J]. [High Pressure Research](#), 2015, 35(3): 247–253.
- [31] SUMIYA H, IRIFUNE T. Indentation hardness of nano-polycrystalline diamond prepared from graphite by direct conversion [J]. [Diamond and Related Materials](#), 2004, 13(10): 1771–1776.
- [32] 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: 152–157.
- YAO Y C. Synthetic diamond and ultra-high pressure high temperature technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996: 152–157.
- [33] 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.
- [34] GROENBAEK J, THUN N. Forming tool for a pressable material: 2001052977 [P]. 2001-07-26.
- [35] GROENBAEK J. High-pressure tool: 2001036080 [P]. 2001-05-25.
- [36] 刘长海, 唐立强. 超高压容器损伤自增强的应力分析 [J]. [压力容器](#), 2005, 22(5): 20–22, 58.
- LIU C H, TANG L Q. Stress analysis of vessel with self-reinforced damage under super-high pressure [J]. [Pressure Vessel Technology](#), 2005, 22(5): 20–22, 58.
- [37] 吴俊飞. 绕丝式超高压容器模糊优化设计 [J]. [压力容器](#), 2008, 25(1): 11–13, 55.
- WU J F. Fuzzy optimization design of wire-wound ultra-high pressure vessel [J]. [Pressure Vessel Technology](#), 2008, 25(1): 11–13, 55.
- [38] 刘志卫, 余其成, 胡海霞. 金属挤压筒结构研究进展 [J]. [塑性工程学报](#), 2021, 28(10): 1–8.
- LIU Z W, YU Q C, HU H X. Research progress of metal extrusion container structure [J]. [Journal of Plasticity Engineering](#), 2021, 28(10): 1–8.
- [39] 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.
- [40] 陈孔军, 王强, 赵东, 等. 钢带缠绕预应力模具缠绕过程的数值模拟 [J]. [制造技术与机床](#), 2012(5): 33–36.
- CHEN K J, WANG Q, ZHAO D, et al. Numerical simulation on the winding process of strip wound prestressed die [J]. [Manufacturing Technology & Machine Tool](#), 2012(5): 33–36.
- [41] 来小丽, 王强, 蔡冬梅, 等. 钢带缠绕预应力模具缠绕层数的确定方法 [J]. [塑性工程学报](#), 2008, 15(3): 152–156.
- LAI X L, WANG Q, CAI D M, et al. Approach to determine winding layers of prestressed strip-wound dies [J]. [Journal of Plasticity Engineering](#), 2008, 15(3): 152–156.
- [42] HALL H T. Some high-pressure, high-temperature apparatus design considerations: equipment for use at 100 000 atmospheres and 3 000 °C [J]. [Review of Scientific Instruments](#), 1958, 29(4): 267–275.
- [43] HALL H T, MERRILL L, BARNETT J D. High pressure polymorphism in cesium [J]. [Science](#), 1964, 146(3649): 1297–1299.
- [44] 姚裕成, 胡光亚, 佟学礼. 从两面顶、六面顶、凹模的特点论我国合成金刚石装备大型化的方向 [J]. [人工晶体学报](#), 1999,

- 28(1): 103–107.
- YAO Y C, HU G Y, TONG X L. Discussing on the developing direction of large sized apparatus for making synthetic diamond in China according to the characteristics of belt-type press, cubic press and recess dies [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1999, 28(1): 103–107.
- [45] 韩奇钢. 人造金刚石的制备方法及其超高压技术 [J]. *高压物理学报*, 2015, 29(4): 313–320.
- HAN Q G. Preparation methods and ultra-high pressure technologies of synthetic diamonds [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2015, 29(4): 313–320.
- [46] 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.
- [47] 许俊杰, 鲁森远, 陈孝鹏, 等. 新锤面顶锤在六面顶压机合成工业金刚石中的应用 [J]. *超硬材料工程*, 2021, 33(2): 24–27.
- XU J J, LU S Y, CHEN X P, et al. Application of a new hammer face anvil in the synthesis of industrial diamond by hexahedron press [J]. *Superhard Material Engineering*, 2021, 33(2): 24–27.
- [48] 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 Q G, BAN Q C, YI Z, et al. Study on new structure of ultra-high pressure WC anvil [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(6): 686–690.
- [49] WANG D J, LI H P, LIU C Q, et al. Electrical conductivity of synthetic quartz crystals at high temperature and pressure from complex impedance measurements [J]. *Chinese Physics Letters*, 2002, 19(8): 1211–1213.
- [50] 何强, 唐俊杰, 王隼, 等. 一种适用于极端高温条件的六面顶压机实验组装 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(2): 145–151.
- HE Q, TANG J J, WANG F, et al. High temperature stable assembly designed for cubic press [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(2): 145–151.
- [51] KAWAI N, TOGAYA M, ONODERA A. A new device for pressure vessels [J]. *Proceedings of the Japan Academy*, 1973, 49(8): 623–626.
- [52] ITO E, KATSURA T, AIZAWA Y, et al. Chapter 22: high-pressure generation in the Kawai-type apparatus equipped with sintered diamond anvils: application to the wurtzite-rocksalt transformation in GaN [M]//CHEN J H, WANG Y B, DUFFY T S, et al. *Advances in High-Pressure Technology for Geophysical Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2005: 451–460.
- [53] 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.
- [54] TETSUO I, FUTOSHI I, TORU S. A novel large-volume Kawai-type apparatus and its application to the synthesis of sintered bodies of nano-polycrystalline diamond [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2014, 228(22): 255–261.
- [55] MUELLER H J, BECKMANN F, DOBSON D P, et al. New techniques for high pressure falling sphere viscosimetry in DIA-type large volume presses [J]. *High Pressure Research*, 2014, 34(3): 345–354.
- [56] 王文丹, 贺端威, 王海阔, 等. 二级 6-8 型大腔体装置的高压发生效率机理研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(5): 3107–3115.
- WANG W D, HE D W, WANG H K, et al. Research on pressure generation efficiency of 6-8 type multianvil high pressure apparatus [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(5): 3107–3115.
- [57] 张佳威, 李强, 王俊普, 等. 二次加压对六面顶压腔压力发生效率和压力密封性能的影响 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(2): 020105.
- ZHANG J W, LI Q, WANG J P, et al. Effect of re-compression on the pressure-generation efficiency and pressure-seal capability of large volume cubic press [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(2): 020105.
- [58] KAWAI N, ENDO S. The generation of ultrahigh hydrostatic pressures by a split sphere apparatus [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1970, 41(8): 1178–1181.
- [59] REZA A, HENRY Z, CARTER C. High pressure-high temperature growth of diamond crystals using split sphere apparatus [J]. *Diamond and Related Materials*, 2005, 14(11/12): 1916–1919.
- [60] YELISSEYEV A, NADOLINNY V, FEIGELSON B, et al. Spatial distribution of impurity defects in synthetic diamonds obtained by the BARS technology [J]. *Diamond and Related Materials*, 1996, 5(10): 1113–1117.

Research Progress of Static Ultra-High Pressure Device

ZHAO Liang¹, WU Nannan¹, CHEN Huixuan¹, LI Mingzhe², LIANG Xiaobo¹

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huaiyin Institute of Technology,*

Huai'an 223003, Jiangsu, China;

2. Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: Ultra-high pressure (UHP) technology, a core technique in manufacturing under extreme conditions, has expanded its scope from fundamental research in areas like condensed matter physics and geosciences to practical engineering applications such as superhard material synthesis and high-density energy storage device fabrication. Furthermore, UHP techniques are increasingly being used in cutting-edge fields such as the precise control of energy fields. Despite the surging demand for ultra-high pressure equipment in China, the market share of domestically produced ultra-high pressure equipment remains relatively low due to the technical barriers in large-size cemented carbide sintering. This study systematically reviews the design features and technical limitations of four mainstream static ultra-high-pressure devices: opposed anvil presses, belt-type presses, multi-anvil presses, and split-sphere apparatus. Finally, it presents an outlook on potential future advancements and technological pathways for UHP equipment.

Keywords: ultra-high pressure device; structural optimization; pressure efficiency; chamber volume; superhard material synthesis