文章编号：1000-5773(2010)01-0001-05

基于有限元法确立碳化钨顶锤的破裂判据*

韩奇钢[1]，马红安[1]，李 瑞[2]，张 聪[1]，李战厂[1]，贾晓鹏[1]

(1. 吉林大学超硬材料国家重点实验室，吉林长春 130012；
2. 长春理工大学材料科学与工程学院，吉林长春 130012)

摘要：以有限元法为理论基础，通过运行大型有限元软件，成功构建了铰链式六面顶压机配套顶锤的有限元理论模型，并确立了碳化钨顶锤的破裂判据。模拟结果表明：以小斜边末尾处为应力参考点，依据第四强度理论，能够对碳化钨顶锤的性能进行更加合理的数值分析。依据此判据可知：在顶锤锤面及小斜边附近，裂纹高发区分布在小斜边附近；在顶锤轴向上，裂纹高发区分布在距离顶锤锤面 30 mm 处。铰链式六面顶压机配套碳化钨顶锤的有限元模型以及碳化钨顶锤破裂判据的成功构建，为实现新型碳化钨顶锤的设计与研究奠定了基础，对促进实现铰链式六面顶压机腔体大型化具有现实意义。

关键词：破裂判据；顶锤；有限元法；高压物理
中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

伴随着高压技术的发展与进步，近年来，高压物理领域的研究取得了飞速的发展以及辉煌的成绩，尤其是金刚石、氮化硼等新型功能材料的合成，为国家进步和社会发展创造了巨大的财富[1-3]。经过几代科技工作者的共同努力，我国现已成为世界第一金刚石生产大国，但是与先进国家相比，在金刚石的质量、热冲击强度(TTI)等方面仍存在着一定的差距。为了改变这一状况，即提高金刚石的质量，20 世纪末，作为生产优质高产金刚石的技术基础“高压腔体大型化”的提出，使我们看见了希望的曙光[4]。高压腔体大型化不仅能够提高金刚石等功能材料的单次合成产量和品质，还能够满足高压物理领域对合成大尺寸新型半导体材料、热电材料以及地球物理领域对地球内部矿物质的研究需要。因此，实现高压腔体大型化，对促进高压物理学和地球物理学等领域具有现实意义。

高压腔体大型化将导致铰链式六面顶压机所需配套的铰链梁、液压缸以及碳化钨顶锤大型化。现今，科技工作者已经成功地铸造出可实现腔体大型化的铰链式六面顶压机的铰链梁和液压缸，但按传统方法设计生产出的配套大尺寸碳化钨顶锤的寿命却较原有顶锤大大降低，严重制约着腔体大型化的实现，成为金刚石行业、高压物理领域以及地球物理领域急需解决的瓶颈问题[5]。因此，用传统方法设计顶锤已经很难满足压机大型化的发展，基于数值模拟分析的方法，实现新型顶锤的设计与研究已经成为行业发展的焦点。遗憾的是时至今日有效的理论模型以及合理的顶锤破裂判据鲜有报道。

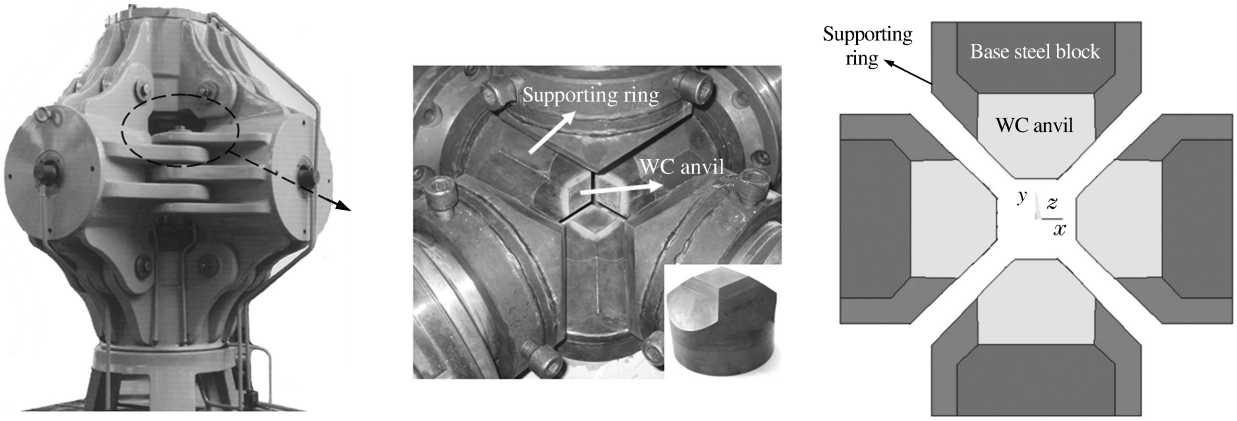
本课题组运用大型有限元软件，结合必要的实验数据，成功地构建出铰链式六面顶压机配套碳化钨顶锤的有限元模型以及碳化钨顶锤的破裂判据。依据此模型及判据对 SPD 6×2000 型铰链式六面顶压机配套顶锤进行了数值分析与研究，其研究结果与高压实验事实相符。铰链式六面顶压机配套碳化

* **收稿日期**：2009-11-11；**修回日期**：2009-12-12
基金项目：国家自然科学基金资助(50572032，50731006，50801030)
作者简介：韩奇钢(1983—)，男，博士研究生，主要从事高压技术有限元理论计算研究. E-mail：hanqigangjlu@sina.com
通讯作者：贾晓鹏，男，教授，博士生导师，主要从事超硬材料、高压科学与技术等研究. E-mail：jiaxp@jlu.edu.cn

钨顶锤的有限元模型以及碳化钨顶锤的破裂判据的成功构建，为下一步实现新型碳化钨顶锤的设计与研究奠定了基础，对促进实现铰链式六面顶压机腔体大型化具有现实意义。

2 理论模型

铰链式六面顶压机的光学照片如图 1(a)所示，其顶锤工作时产生的高压腔体如图 1(b)所示(顶锤光学照片如图 1(b)内插图所示)，六面顶压机的 6 个顶锤在工作时产生的高压腔体的剖面示意图如图 1(c)所示。六面顶压机的 6 个碳化钨顶锤通常由 3 个定锤和 3 个动锤组成，3 个定锤为下锤、后锤和左锤；而 3 个动锤为与之对应的上锤、前锤和右锤。所谓定锤即在产生超高压前由限位钢环进行限位，从而构成六面体腔体的 3 个面，便于以叶蜡石为传压介质的样品腔的摆放。所谓动锤即没有限位钢环进行限位的顶锤。铰链式六面顶压机在工作时，先由油压推进 3 个动锤前进，待动锤液压缸行程与定锤行程相同后，再由油压推动 6 个顶锤前进，直至样品腔产生所需的超高压。



(a) Cubic high pressure apparatus (b) High pressure chamber (c) Sketch map of chamber

图 1 光学照片和模型示意图

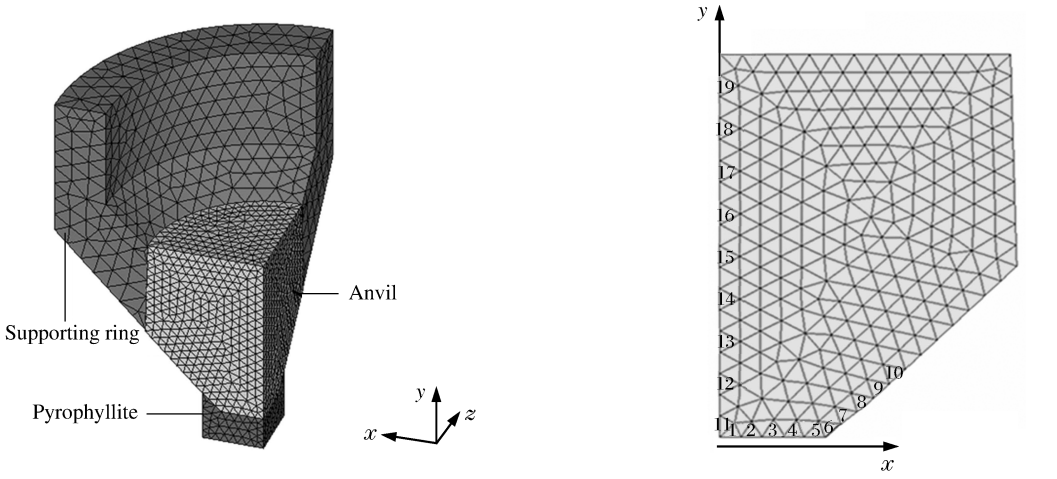
Fig. 1 The optical photo and sketch map

基于铰链式六面顶压机合成工业金刚石的实际工况，以此构建高压下 SPD 6×2000 型六面顶压机的碳化钨硬质合金顶锤有限元理论模型，对锤面边长为 44 mm、顶锤小斜边边长为 13 mm、角度为 41.5°、顶锤直径为 122 mm、顶锤高度为 90 mm 的碳化钨顶锤进行结构分析。模型中叶蜡石的尺寸采用高压实验后叶蜡石变形后的尺寸，即由 55 mm 立方块挤压成 52 mm 立方块。叶蜡石形成的密封边长度取为 13 mm，体积取相邻顶锤小斜边所围体积。选用 3-D、20 节点结构单元(Solid 95)对碳化钨顶锤进行网格划分。依据铰链式六面顶压机及碳化钨顶锤的对称性，对碳化钨顶锤进行简化，取碳化钨顶锤的 1/4 进行模拟分析，碳化钨顶锤的有限元模型及单元分布图如图 2(a)所示，为了便于进行模拟结果的比较分析，对碳化钨顶锤锤面单元进行了编号，如图 2(b)所示。

与国产铰链式六面顶压机配套的碳化钨顶锤采用国产 YG8 硬质合金，其 Co 的添加量为 8%。由于各厂家顶锤的生产工艺不同，其材料参数存在一定差异。本工作忽略实际使用的碳化钨材质参数与所选碳化钨材质参数的微小差异，采用 I. C. Getting 等对碳化钨材质的测量结果[6]，取泊松比为 0.21、弹性模量为 605 GPa、破裂强度为 6.20 GPa。本工作依据第四强度理论即 von Mises 屈服准则，分析了碳化钨顶锤的破裂机理并确定了其破裂判据。依据第四强度理论即 von Mises 准则方程可知，当 von Mises 应力值大于材料破裂强度值时，材料将破裂。von Mises 准则方程为[7]

$$\sigma_{vM}=\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2]} \tag{1}$$

式中：σ_1、σ_2、σ_3 代表主应力，σ_{vM}为 von Mises 应力。von Mises 准则方程为材料破裂提供了判据。



(a) The finite element model　　(b) Enlarged view of anvil in figure

图 2　理论模型图

Fig. 2　The plot of theory model

3　计算结果与讨论

图 3 为顶锤锤面及小斜边附近各位置的 von Mises 应力值曲线图,从图中可以发现,顶锤锤面 von Mises 应力值的分布不均匀,应力峰值分布在顶锤端面与小斜边的交界处。在小斜边附近,von Mises 应力值较高,依据第四强度理论知,此区域为顶锤在高压使用过程中的裂纹高发区。顶锤端面与小斜边交界处的 von Mises 应力虽然为锤体应力峰值所在处,但依据侧向支撑原理知,由于叶蜡石密封边在高压下对此位置能够提供足够的侧向支撑,所以其强度将大大加强[8]。而小斜边末尾处在高压下没有叶蜡石密封边封堵,即无侧向支撑力作用在小斜边末尾处,此处应为裂纹源位置。故本工作通过大型有限元软件对碳化钨顶锤各位置的应力值进行计算,依据第四强度理论,以碳化钨顶锤小斜边末尾处(单元 9 所在位置)为参考位置确立顶锤破裂判据,对碳化钨顶锤的破裂机理进行分析。此判据得到了高压合成实验后的裂锤照片的验证,如图 3 内插图所示。从裂锤照片发现,裂纹多分布在无叶蜡石密封边支撑的小斜边末尾处,并以此位置为中心向无支撑的 46°大斜面延伸(小斜边斜下方)。

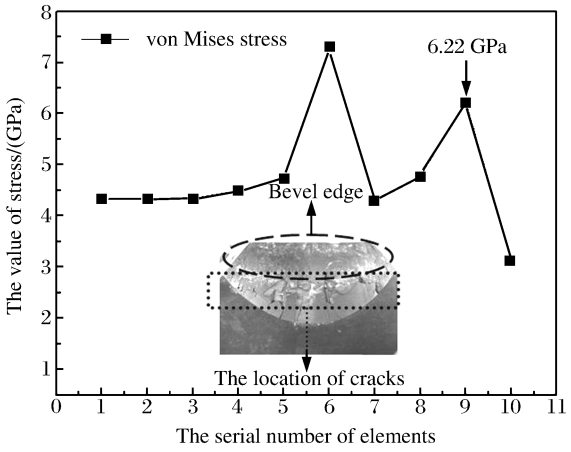


图 3　碳化钨顶锤锤面及小斜边附近各位置的 von Mises 应力值曲线图

Fig. 3　The plot of von Mises stress on the anvil surface and around the bevel edge

图 4 为碳化钨顶锤锤面及小斜边附近各位置的垂直应力值曲线图。由图 4 知,当小斜边末尾处的 von Mises 应力值达到 6.22 GPa 时,其对应的锤面中心的垂直应力达到 5.65 GPa。依据第四强度理论可知,von Mises 应力值达到 6.22 GPa,其值超过碳化钨材质的屈服强度(6.20 GPa),碳化钨顶锤将发生破裂,即产生裂纹,故铰链式六面顶压机在安全使用条件下可获得的极限腔体压力约为 5.65 GPa。此结果在忽略实际使用的碳化钨材质参数与所选碳化钨材质参数的差异的情况下,得到了大量的高压实验事实的证实。依据金刚石的合成经验以及高压腔体的压力标定结果知,铰链式六面顶压机可获得的极限腔体压力略高于 5.50 GPa,且低于 6.00 GPa[9]。

图 5 为碳化钨顶锤轴向各位置的 von Mises 应力值曲线。由图 5 可知，von Mises 应力值在顶锤轴向上成不均匀分布，von Mises 应力峰值分布在距离顶锤锤面 30 mm 处(1/3 锤体高度)，即单元 14 所在位置。由第四强度理论知，von Mises 应力值越高，其破裂几率越大，故在顶锤轴向上距离顶锤锤面 30 mm 处，即距离锤面 1/3 锤体高度处的破裂几率较轴向其它位置大。此模拟结果与王民和王松顺等科技工作者的测量结果[10]相符，再次证明了本课题组构建的理论模型的合理性和实用性。

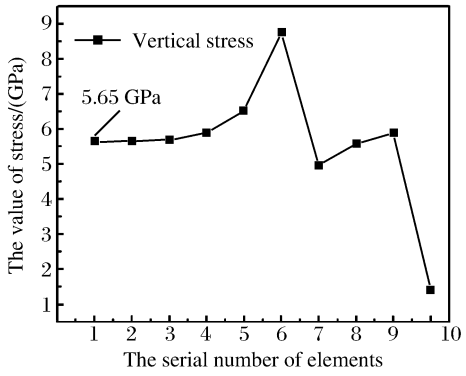


图 4 碳化钨顶锤锤面及小斜边附近各位置的垂直应力值曲线图

Fig. 4 The plot of vertical stress on the anvil surface and around the bevel edge

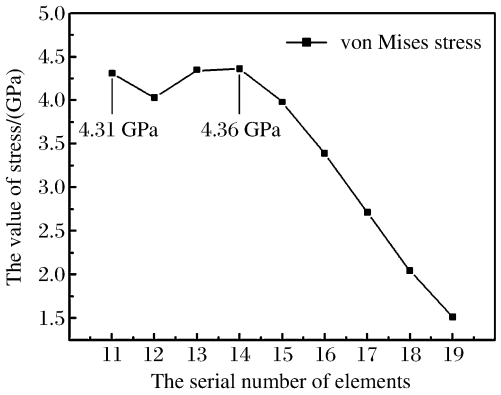


图 5 碳化钨顶锤轴向各位置的 von Mises 应力值曲线图

Fig. 5 The plot of von Mises stress in the axis of anvil

图 6 为碳化钨顶锤轴向各位置的垂直应力值曲线图。由图 6 知，碳化钨顶锤轴向上的垂直应力峰值分布在顶锤锤面上，达到 5.65 GPa。垂直应力在顶锤锤面指向顶锤底面的轴向路径上呈线性单调递减。此模拟结果与 Bridgman 提出的高压装置的设计原理——大质量支撑原理相符[11]。依据大质量原理知，当载荷作用在顶锤的大底面上时，将按 $p_1S_1 = p_2S_2$ 的比例关系在顶锤的小砧面上产生超高压力(式中 p_1 为顶锤底面所施加的载荷，S_1 为顶锤底面面积，p_2 为顶锤锤面所获得的压力，S_2 为顶锤小砧面的面积)。大质量支撑原理具体体现在高压环境下整个顶锤对小砧面所产生的高压的支撑作用，即垂直应力在顶锤锤面指向顶锤底面的轴向路径上呈线性单调递减。

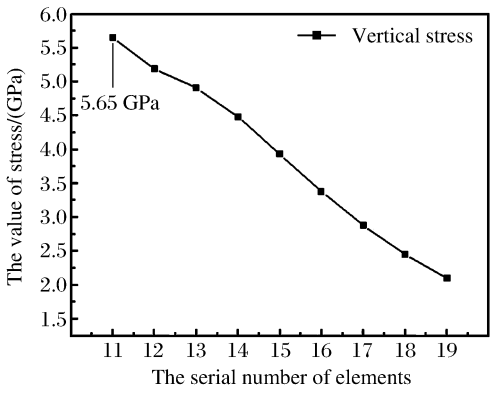


图 6 碳化钨顶锤轴向各位置的垂直应力值曲线图

Fig. 6 The plot of vertical stress in the axis of anvil

4 结 论

以有限元法为理论基础，通过运行大型有限元软件，成功构建了铰链式六面顶压机配套顶锤的有限元理论模型，并确立了碳化钨顶锤的破裂判据。模拟结果表明：以小斜边末尾处为应力参考点，依据第四强度理论，能够对碳化钨顶锤的性能进行理论分析。在忽略实际使用的碳化钨材质参数与所选碳化钨材质参数的差异的情况下，选用国产 YG8 硬质合金的铰链式六面顶压机可获得的极限腔体压力约为 5.65 GPa；在顶锤的锤面及小斜边附近，von Mises 应力值较高，此处为裂纹高发区；在顶锤轴向，裂纹高发区分布在距离顶锤锤面 30 mm 处，即距离锤面 1/3 锤体高度处(此处 von Mises 应力值较其它轴向位置高)。铰链式六面顶压机配套碳化钨顶锤的有限元模型以及碳化钨顶锤的破裂判据的成功构建，为实现新型碳化钨顶锤的设计与研究奠定了基础，对促进实现铰链式六面顶压机腔体大型化具有现实意义。

References:

[1] Jiang Y P,Jia X P,Ma H A,et al. High Pressure Synthesis and Electric Transport Properties of La-Filled $CoSb_3$ Skutterudite Thermoelectric Materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2009,23(2):87-90. (in Chinese)
姜一平,贾晓鹏,马红安,等. 高压合成 La 填充型 $CoSb_3$ 方钴矿热电材料及其电输运性能 [J]. 高压物理学报,2009,23(2): 87-90.

[2] Li X L,Ma H A,Zuo G H,et al. Low-Temperature Sintering of High-Density Aluminium Nitride Ceramics without Additives at High Pressure [J]. Scripta Materialia,2007,56:1015-1018.

[3] Liang Z Z,Kanda H,Jia X,et al. Synthesis of Diamond with High Nitrogen Concentration from Powder Catalyst-C-Additive Na_3N_3 by HPHT [J]. Carbon,2006,44:913-917.

[4] Wang G Z,Zhai X Q,Luo M. the High Pressure and High Temperature Apparatus of the Hinge-Type Cubic-Anvil Press [J]. Diamond and Abrasive Tools Engineering,2000,120:34-37. (in Chinese)
王光祖,翟小青,罗　明. 铰链式六面砧高压高温装置 [J]. 金刚石与磨料磨具工程,2000,120:34-37.

[5] Li Z H,Zhao Q G,Zhao B,et al. The Development of China-Type Cubic High Pressure Apparatus and Man-Made Diamond [J]. Diamond & Abrasives News,2007,195(1):1-5. (in Chinese)
李志宏,赵清国,赵　博,等. 发展中的中国六面顶压机和人造金刚石 [J]. 磨料磨具通讯,2007,195(1):1-5.

[6] Getting I C,Chen G L,Brown J A. The Strength and Rheology of Commercial Tungsten Carbide Cermets Used in High-Pressure Apparatus [J]. Pure Appl Geophys,1993,141(2/3/4):545-577.

[7] Zhang X Y,Yan S W. Fundamentals of Geotechnic Plasticity [M]. Tianjin:Tianjin University Publishing House,2004:76-77. (in Chinese)
张学言,闫澍旺. 岩土塑性力学基础 [M]. 天津:天津大学出版社,2004:76-77.

[8] Venkateswaran C,Anbukumaran K,Victor J N,et al. Design and Performance of Belt-Type High Pressure High Temperature Apparatus [J]. Rev Sci Instrum,1997,68(1):189-192.

[9] Li S S. Growth of Large High-Quality Type Ⅱa Diamond Crystals and Research of the Mechanism under HPHT [M]. Changchun:Jilin University,2009:23-34. (in Chinese)
李尚升. 优质Ⅱa 型宝石级金刚石的高温高压合成及机理研究 [M]. 长春:吉林大学,2009:23-34.

[10] Wang M,Wang S S. the Break Characteristic and Breakdown Factors Analysis of Cement Carbide Anvil and Pressure Die and the Way of Raise Their Service Life [J]. Cemented Carbide,1994,11(4):231-240. (in Chinese)
王　民,王松顺. 硬质合金顶锤和压缸的破裂特征、破坏因素的分析和提高使用寿命的途径 [J]. 硬质合金,1994,11(4):231-240.

[11] Tracy H H . Metallurgy at High Pressures and High Temperatures [M]. New York:Gordon and Breach Science Publishers,1964:1-31.

The Criterion for Crack of Tungsten Carbide Anvil Based on Finite Element Method

HAN Qi-Gang[1], MA Hong-An[1], LI Rui[2], ZHANG Cong[1], LI Zhan-Chang[1], JIA Xiao-Peng[1]

(1. *National Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun* 130012, *China*;
2. *School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130012, *China*)

Abstract: Based on finite element method, the model of tungsten carbide(WC) anvil and the criterion for crack of WC anvil used in China-type cubic high pressure apparatus have been founded successfully. The simulation results indicated that the criterion for crack of WC anvil should make the reference point at the end of bevel edge. According to the von Mises criterion, we know that in the area of anvil surface and bevel edge, the cracks are often arising around the bevel edge. In the axis of anvil, the cracks are often arising at the place which is 30 mm below anvil surface. This study may greatly help to design new type WC anvil and improve the large volume cubic anvil type high pressure techniques.

Key words: criterion for crack; anvil; finite element method; high pressure physics