

# 新型圆角式高压碳化钨硬质合金顶锤的有限元分析\*

于歌<sup>1)</sup> 韩奇钢<sup>1)†</sup> 李明哲<sup>1)</sup> 贾晓鹏<sup>2)</sup> 马红安<sup>2)</sup> 李月芬<sup>3)</sup>

1) (吉林大学锻锻工艺研究所, 长春 130025)

2) (吉林大学超硬材料国家重点实验室, 长春 130012)

3) (吉林大学地球科学学院, 长春 130061)

(2011年1月30日收到; 2011年5月27日收到修改稿)

基于有限元法, 对新型圆角式高压碳化钨硬质合金顶锤进行了分析与研究. 研究表明: 新型圆角式高压碳化钨硬质合金顶锤在不降低顶锤的传压效率的前提下, 能够将顶锤的使用寿命延长 3.05%—16.75%; 新型圆角式高压碳化钨硬质合金顶锤获得的极限腔体压力值可增加至 6.09 GPa, 较传统顶锤 (5.80 GPa) 提高 5%, 从而拓宽高压下功能材料的合成区间. 新型圆角式高压碳化钨硬质合金顶锤的使用, 将降低六面顶液压机器的使用成本, 促进高压技术和材料科学等学科的发展.

**关键词:** 圆角式顶锤, 六面顶压机, 高温高压, 有限元法

**PACS:** 07.35.+k, 07.05.Tp, 07.05. Fb

## 1 引言

自从 Bridgman 成功设计出达到 5 GPa 以上压力的高压设备后, 高压物理学取得了许多意义重大的成果<sup>[1-4]</sup>. 例如, 在高温高压下合成出了金刚石、立方氮化硼等材料, 研究了许多不同物质在高压下的物理性质. 但是几乎所有的高压研究都离不开高压密封装置, 顶锤作为高压密封装置关键零部件之一, 其性能对超高压的获得具有决定性意义<sup>[5,6]</sup>. 当今, 国际上普遍用于合成金刚石和立方氮化硼等材料的超高压设备是 Belt 式两面顶液压机, 而在年生产金刚石 40 亿克拉的中国, 则采用自主研发的六面顶液压机<sup>[7,8]</sup>. 六面顶液压机因其具有升压速率大、易于操作和维护等特点, 已经得到金刚石厂家的广泛认可, 并在世界范围内得以应用.

碳化钨硬质合金顶锤是六面顶液压机消耗性关键零部件之一, 其寿命的长短直接决定着金刚石、立方氮化硼等材料合成的生产成本<sup>[9]</sup>. 因此, 有效地提高碳化钨硬质合金顶锤在实际生产中的使用寿命, 严格控制其消耗成为企业提高经济效益的重要手段. 通常, 碳化钨硬质合金顶锤的使用寿命受其材质 (化学成分、粒度等)、烧结制作、几何结构及使用条件等因素的影响. 而在顶锤烧结工

艺和顶锤的合理使用得以保证的前提下, 几何结构的合理性则成为延长其使用寿命的关键, 因此, 通过调整碳化钨硬质合金顶锤的几何尺寸, 可以满足各研究领域对高压腔体相应性能提升的迫切需求, 如增强顶锤的使用寿命、提高其可获得的极限腔体压力以及增加样品腔体体积等参数.

由于碳化钨硬质合金顶锤结构的复杂性, 迄今较难通过实验直接获知在超高压状态下, 顶锤上的应力分布等重要信息; 这对分析其破裂机理、几何参数与应力分布之间的关系、提出科学的设计方案等产生了巨大障碍. 因此, 借用理论手段对碳化钨硬质合金顶锤进行科学计算显得至关重要<sup>[10]</sup>. 本工作基于有限元方法和弹性理论, 开展了新型圆角式高压碳化钨硬质合金顶锤 (圆角式顶锤) 的分析与研究工作, 期望此种圆角式顶锤能够在不降低顶锤的传压效率的前提下, 延长顶锤的使用寿命以及提高其可获得的极限腔体压力.

## 2 几何模型

六面顶液压机配套使用的碳化钨硬质合金顶锤 (传统顶锤) 如图 1(a) 所示, 从图

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50572032, 50731006, 50801030) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2011M500592) 资助的课题.

† E-mail: hanqg@jlu.edu.cn

中知传统顶锤的锤面边缘存在尖角 (拐角). 由弹性理论知, 拐角的存在, 将导致相应位置产生应力集中. 碳化钨硬质合金材质属

### 3 有限元模型

以生产中正常使用的顶锤实际工况为基础, 分别对 SPD-6×1670 T 六面顶液压机的传统顶锤 (锤面边长 44 mm, 顶锤直径 122 mm, 顶锤高度 90 mm) 和圆角式顶锤进行稳态应力分析. 根据顶锤安全使用过程时的实际工况设定了施加在锤体上的结构载荷, 建立了有限元分析模型, 单元分布图如图 2(a) 所示. 为了便于计算结果讨论, 在锤头上取一些单元为分析路径, 节点位置在图 2(b),(c) 已标明.

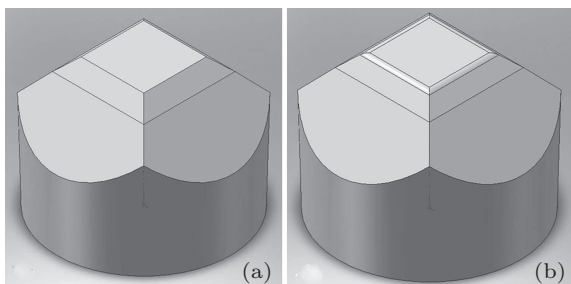


图 1 碳化钨顶锤几何模型图 (a) 传统顶锤; (b) 圆角式顶锤

于组织均匀的脆性材料, 应力集中将大大降低顶锤的强度, 引起脆性材料断裂, 使顶锤产生裂纹, 从而降低顶锤的使用寿命. 顶锤因应力集中效应导致的频繁裂锤, 在小吨位压机尚可忍受 (因为小吨位压机配套顶锤质量轻, 其价格成本较低), 但伴随着压级大型化导致的顶锤大型化, 应力集中效应导致的裂锤成为制约金刚石及立方氮化硼等超硬材料合成成本进一步降低的障碍, 已经成为行业急需解决的瓶颈问题之一. 为避免应力集中造成顶锤破裂, 本工作通过采用圆角技术, 将传统顶锤的锤面边缘处拐角用圆角替代, 如图 1(b) 所示. 圆角技术的采用, 将消除传统顶锤拐角处的应力集中现象, 降低拐角位置应力值, 从而提高顶锤的使用寿命.

### 4 计算结果与讨论

通常六面顶液压机的腔体压力由加载油压、传压介质以及高压腔体组装所用材料等因素决定, 当传压介质和腔体组装确定后, 腔体可获得的压力直接与加载油压相对应 (腔体可获得的极限压力由顶锤性能决定). 在分别对传统顶锤和圆角式顶锤施加相同油压载荷后, 顶锤上的垂直应力路径曲线图如图 3 所示. 通过对图 3 仔细比较分析, 我们发现在传统顶锤和圆角式顶锤上施加相同的油压载荷后, 锤面中心处垂直应力值未发生明显变化, 均为 5.0 GPa. 垂直应力值相同, 表明高压腔体所获得的腔体压力相同, 即圆角式顶锤传压效率与传统顶锤相同.

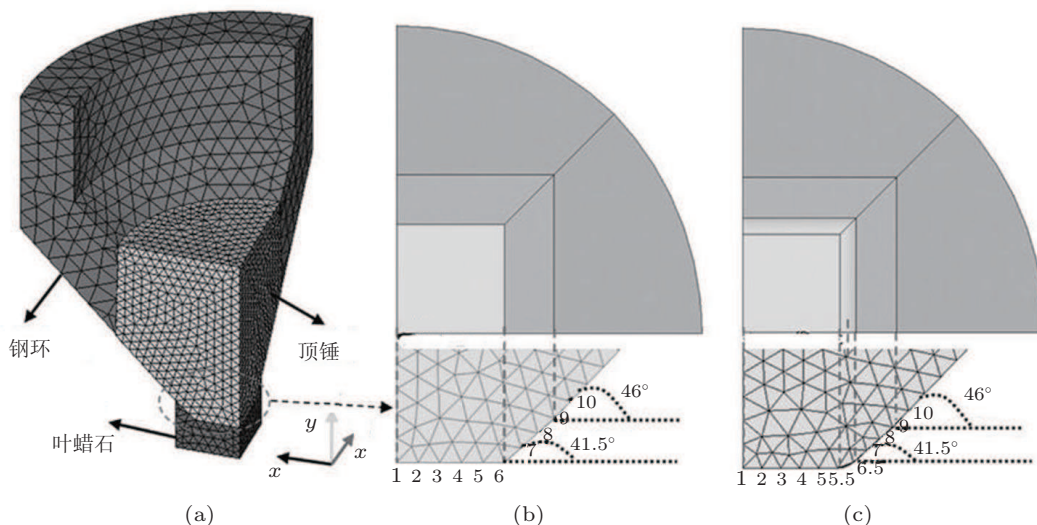


图 2 碳化钨顶锤有限元力学模型图 (a) 有限元模型; (b) 传统顶锤; (c) 圆角式顶锤

圆角式顶锤上的垂直应力分布趋势未发生明显变化, 应力峰值均分布在锤面边缘处, 但在斜边

末尾垂直应力值较传统顶锤末尾垂直应力值降低, 由 4.35 GPa 降为 4.25 GPa, 降低幅度达到 2.30%. 斜

边末尾处垂直应力值的降低, 表明顶锤对叶腊石传压介质形成的密封边的挤压力值减小, 即圆角式顶锤对应高压腔体密封性较传统顶锤降低 2.30%. 由高压实验经验知, 高压腔体密封性降低 2.30% 不会导致腔体“放炮”概率的大幅增加, 因此, 本工作研发的圆角式顶锤可以用于六面顶液压机合成金刚石和立方氮化硼等材料.

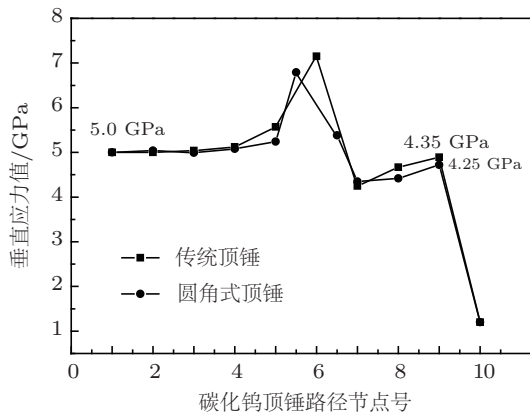


图3 碳化钨顶锤垂直应力路径曲线图

依据第四强度理论, 即 von Mises 准则方程知, 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

$$\sigma_{VM} = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  代表主应力,  $\sigma_{VM}$  为 Von Mises 应力<sup>[11]</sup>. von Mises 准则方程为材料破裂提供了判据. 本工作依据 von Mises 屈服准则对传统顶锤和圆角式顶锤破裂概率即使用寿命进行了比较分析, von Mises 应力路径曲线图如图 4 所示. 通过对图 4 仔细比较分析, 我们发现在传统顶锤和圆角式顶锤上施加相同的油压载荷后, 锤面中心处 von Mises 应力值趋于一致, 且均低于碳化钨材料的破裂强度为 6.20 GPa; 在锤面与小斜边拐角处以及小斜边末尾处, 圆角式顶锤由于采用圆角技术, 能够降低应力集中效应, 促使相应位置的 von Mises 应力值较传统顶锤降低. 在顶锤破裂高发区——锤面与小斜边拐角处, von Mises 应力值由传统顶锤的 6.03 GPa 降低为 5.02 GPa, 降幅达到 16.75%; 在小斜边末尾处, von Mises 应力值由传统顶锤的 5.25 GPa 降低为 5.09 GPa, 降幅达到 3.05%. 由第四强度理论知, 相同腔体压力情况下, von Mises 应力值越低, 表明其破裂概率越低, 即其寿命越长. 所以相同的使用条件下, 圆角顶锤因采用圆角技术

能够降低顶锤拐角处应力集中效应, 从而提高顶锤的使用寿命. 依据模拟结果知, 相同使用条件下, 圆角式顶锤使用寿命能够较传统顶锤提高 3.05%—13.20%. 顶锤使用寿命的提高将降低材料的合成成本, 提高材料合成企业的竞争力.

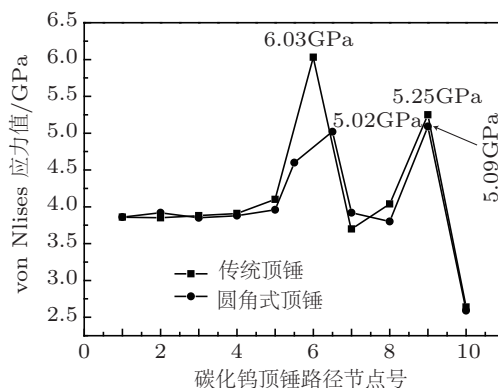


图4 碳化钨顶锤 von Mises 应力路径曲线图

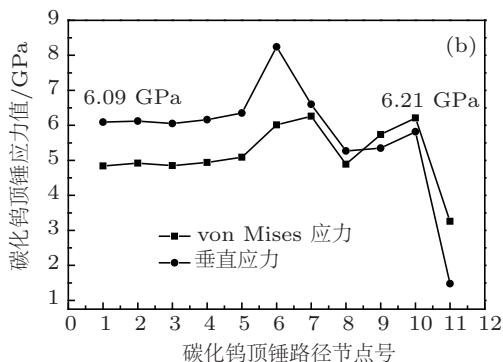
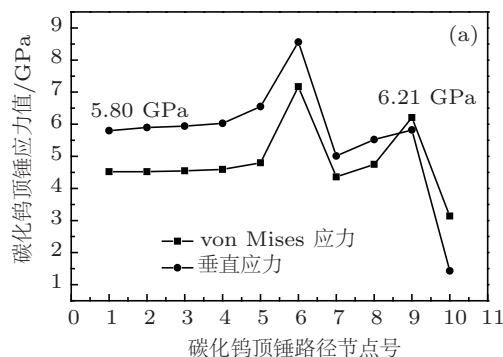


图5 碳化钨顶锤应力路径曲线图 (a) 传统顶锤; (b) 圆角式顶锤

圆角式顶锤 von Mises 应力峰值较传统顶锤降低, 不仅表明圆角式顶锤在相同的腔体压力值时, 其寿命较传统顶锤增加; 也表明圆角式顶锤在与传统顶锤采用相同型号的碳化钨材质时, 其可获得的极限腔体压力将较传统顶锤提升. 如图 5 所示, 通过升高模型施加的油压载荷, 使圆角式顶锤与传统顶锤在顶锤破裂判据参考点处 von Mises 应力值达到 6.21 GPa, 略大于碳化钨破裂强度的 6.20 GPa<sup>[12]</sup>.

由第四强度理论知, von Mises 应力值略大于碳化钨材质屈服强度 6.20 GPa 时, 顶锤将发生破裂, 即产生裂纹, 故此种情况下对应的垂直应力值应为六面顶液压机安全使用条件下可获得的极限腔体压力。

由图 5 知, 当圆角式顶锤和传统顶锤在破裂判据参考点处 von Mises 应力值均为 6.21 GPa 时, 圆角式顶锤锤面中心垂直应力值由传统顶锤垂直应力值 5.80 GPa 升高至 6.09 GPa, 升高幅度达到 5%。锤面中心垂直应力值升高, 表明腔体压力升高。因此, 传统顶锤可获得的极限腔体压力约为 5.80 GPa, 而圆角式顶锤可获得的极限腔体压力可达到 6.09 GPa 左右。圆角式顶锤能够将极限腔体压力较传统顶锤升高 5%, 为提高腔体可获得的极限压力提供了必要条件, 这将扩宽高压下材料的合成区间, 促进高压技术和材料科学等学科领域的发展。

## 5 结论

本工作基于有限元法和弹性理论, 对圆角式顶锤和传统顶锤进行了分析与研究。研究结果表明: 圆角式顶锤在不降低传压效率的前提下, 能够降低顶锤上的 von Mises 应力峰值, 从而延长顶锤的使用寿命, 其使用寿命增幅达到 3.05%—16.75%; 圆角式顶锤对应高压腔体密封性较传统顶锤降低 2.30%。由高压实验经验知, 高压腔体密封性降低 2.30% 不会导致腔体“放炮”概率的大幅增加; 圆角式顶锤因为降低了顶锤斜边拐角处应力集中效应, 故可获得的极限腔体压力增加至 6.09 GPa, 较传统顶锤提高 5%, 这将扩宽高压下功能材料的合成区间。圆角式顶锤的使用将降低六面顶液压机的使用成本, 促进高压技术和材料科学等学科领域的发展。

- 
- [1] *High Pressure- Temperature Apparatus*, edited by Gschneidner, K. A. Hepworth Jr., M. T. and Parlee, N. A. D. (New York, 1964).
- [2] Bridgman W 1952 *the Physics of High Pressure* London, G. Bell and Sons Ltd, 3<sup>rd</sup>, pp30–70
- [3] Ma Y M, Mikhail Eremets, Oganov A R, Xie Y, Ivan Trojan, Sergey Medvedev, Lyakhov A O, Mario Valle, Vitali Prakapenka 2009 *Nature* **458** 182
- [4] Yanming Ma, Artem R. Oganov, Zhenwei Li, Yu Xie, Jani Kotakoski 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 065501
- [5] Han Q G, Ma H A, Huang G F, Zhang C, Li Z C, Jia X P 2009 *Rev. Sci. Instrum* **80** 096107
- [6] Han Q G, Jia X P, Ma H A, Li R, Zhang C, Li Z C, Tian Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4812 (in Chinese) [韩奇钢, 贾晓鹏, 马红安, 李瑞, 张聪, 李占厂, 田宇 2009 物理学报 **58** 4812]
- [7] Hu J Z, Tang R M, Xu J A 1980 *Acta Phys. Sin.* **29** 1351 (in Chinese) [胡静竹, 唐汝明, 徐济安 1980 物理学报 **29** 1351]
- [8] Li Z H, Zhao Q G, Zhao B 2007 *Diamond & Abrasives News* **195** 1 (in Chinese) [李志宏, 赵清国, 赵博 2007 磨料磨具通讯 **195** 1]
- [9] Han Q G, Ma H G, Li R, Zhou L, Jia X P 2007 *Heavy Machinery* **3** 27 (in Chinese) [韩奇钢, 马红安, 李瑞, 周林, 田宇, 贾晓鹏 2007 重型机械 **3** 27]
- [10] Han Q G, Ma H G, Li R, Zhou L, Tian Y, Liang Z Z, Jia X P 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 084504
- [11] Jiang Y C, Zhang J H, Li Z Z 2006 *Elasticity Theory and Finite Element Method* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [蒋玉川, 张建海, 李章政 2006 弹性理论与有限元法 (科学出版社)]
- [12] HAN Q G, MA H A, LI R, Zhang C, Li Z C, Jia X P 2010 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **24** 1 (in Chinese) [韩奇钢, 马红安, 李瑞, 张聪, 李战厂, 贾晓鹏 2010 高压物理学报 **24** 1]

# Finite element analysis of the high-pressure tungsten carbide radius-anvil\*

Yu Ge<sup>1)</sup> Han Qi-Gang<sup>1)†</sup> Li Ming-Zhe<sup>1)</sup> Jia Xiao-Peng<sup>2)</sup>  
Ma Hong-An<sup>2)</sup> Li Yue-Fen<sup>3)</sup>

1) (*Roll-forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130025, China*)

2) (*National Lab of Superhard Materials, Jilin University, Changchun 130012, China*)

3) (*College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China*)

(Received 10 January 2011; revised manuscript received 27 May 2011)

## Abstract

The high-pressure tungsten carbide (WC) radius-anvil is analyzed and studied based on the finite element method (FEM). The results indicate that under the same transfer efficiency of pressure, the lifetime of high-pressure WC radius-anvil is longer than that of the traditional anvil, which can be enhanced about 3.05%–16.75%. The highest sample cell pressure generation by the new design of high-pressure WC radius-anvil increases about 5% (from 5.80 GPa to 6.09 GPa) compared with that by the traditional anvil, which can be attributed to the technology of radius-bevel. The high-pressure WC radius-anvil will be indeed very useful to broaden the synthetic region of functional materials. Further more, in this work, the operational costs of cubic high-pressure apparatus is reduced and the cubic anvil type high pressure techniques is improved in many important aspects.

**Keywords:** radius-anvil, cubic high pressure apparatus, HPHT, FEM

**PACS:** 07.35.+k, 07.05.Tp, 07.05. Fb

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50572032, 50731006, 50801030). and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2011M500592).

† E-mail: hanqg@jlu.edu.cn.