

# 基于三维有限元法模拟分析六面顶顶锤的热应力\*

韩奇钢<sup>1)</sup> 贾晓鹏<sup>1)</sup> 马红安<sup>1)†</sup> 李 瑞<sup>2)</sup> 张 聪<sup>1)</sup> 李战<sup>1)</sup> 田 宇<sup>1)</sup>

1) 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 长春 130012)

2) 长春理工大学材料科学与工程学院, 长春 130012)

(2008 年 10 月 23 日收到, 2008 年 11 月 13 日收到修改稿)

以有限元法为理论分析手段模拟分析了国产六面顶压机配套顶锤内部的温度场和热应力分布. 探寻出了 XKY-6 × 2000 MN 型六面顶压机顶锤内部的温度场分布以及热应力取值. 模拟结果表明加热顶锤内部温度分布不均匀, 不均匀的温度分布产生了热剪切应力, 热剪切应力峰值达到 0.62 GPa, 分布在 41.5° 小斜面上. 加热顶锤内部的剪切应力值较非加热锤内部的剪切应力值高出 18.0%. 模拟分析结果与金刚石的高压合成实验事实相符, 在理论上解释了加热顶锤使用寿命较非加热顶锤使用寿命短的原因. 此项工作对于提高大顶锤使用寿命, 降低生产成本有着重要的现实意义, 为新型六面顶压机的研制提供了良好的设计基础.

关键词: 热应力, 顶锤, 有限元法, 工业金刚石

PACC: 6110F, 6155H, 0650M, 0735

## 1. 引 言

1935 年 Bridgman 利用“大质量支撑原理”和“侧向支撑原理”成功的设计出可达到 5 GPa 以上压力的高压设备<sup>[1,2]</sup>, 从此高压物理学取得了许多意义重大的成果<sup>[3-5]</sup>. 1963 年, 继美国、瑞典、苏联、日本、英国后, 中国凭借自己的技术力量独立合成出了人造金刚石, 并很快进入工业化生产. 相继自行研制成功 XKY6 × 600 MN, XKY6 × 800 MN, XKY6 × 2000 MN 型六面顶人造金刚石压机<sup>[6]</sup>. 经过几代科技工作者的共同努力, 我国金刚石的生产技术水平已经有了突飞猛进的发展. 如今, 我国金刚石年产量达到 40 亿克拉, 生产设备主要采用自主研发的“六面顶压机”; 但是与其他先进国家相比, 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, 即提高金刚石质量, 上世纪末, 作为生产优质高产金刚石的技术基础“高压腔体大型化”的出现, 使我们看见了希望的曙光<sup>[7,8]</sup>. “高压腔体大型化”的瓶颈问题之一就是大吨位压机配套顶锤寿命过短, 这严重制约着行业的发展.

通常, 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、几何结构以及使用条件等因素的影响<sup>[9,10]</sup>. 而在几何结构合理、制作质量完善得以保证的前提下, 硬质合金顶锤的合理的使用则成为延长其使用寿命的关键. 在长期的生产实践中, 我们发现同一工艺生产的同一批顶锤, 在保证合理使用的前提下, 加热顶锤(上下锤) 较非加热顶锤(侧锤) 使用寿命缩短 20% 左右. 因此, 有效地提高加热顶锤在实际生产中的使用寿命, 严格控制加热顶锤的消耗成为企业提高经济效益的重要手段. 由于顶锤结构的复杂性, 迄今我们无法通过实验直接获知在工作环境下, 顶锤内部的温度以及应力分布等重要信息. 这对分析加热顶锤与非加热顶锤使用寿命差异的原因, 从而提出科学的解决方案等产生了巨大障碍.

针对各行业存在的瓶颈问题, 借用理论手段进行科学计算显得至关重要<sup>[11-14]</sup>. 本课题组采用三维有限元方法, 以生产中正常使用的顶锤表面温度的实际测量值为基础, 对六面顶顶锤进行了热力耦合分析, 计算出了顶锤内部的温度场以及热应力取值, 首次在理论上解释了加热顶锤使用寿命较非加热顶锤使用寿命短的原因. 此项工作对于提高大顶锤使用寿命, 降低生产成本有着重要的现实意义, 为

\* 国家自然科学基金(批准号: 50572032, 50731006, 50801030) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: maha@jlu.edu.cn.

新型六面顶压机的研制提供了良好的设计基础。

## 2. 有限元模型

以生产中正常使用的顶锤表面温度的测量值为基础,对 XKY-6 × 2000 MN 型六面顶压机的碳化钨硬质合金顶锤(锤面边长 44 mm,顶锤直径 122 mm,顶锤高度 90 mm)进行热-结构耦合分析,根据顶锤安全使用过程时的实际条件设定了施加在锤体上的结构载荷,建立了有限元分析模型。所选单元相关属性选用 3-D 20 节点热单元(Solid90)以及 3-D 20 节点结构单元(Solid95),对顶锤进行映射网格划分。锤体单元分布图如图 1 所示。

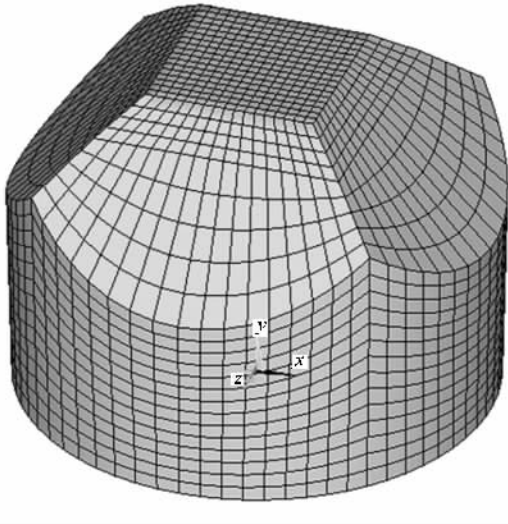


图 1 六面顶顶锤有限元力学模型

六面顶顶锤采用国产 YG8 硬质合金( $C_{60}$  为 8%)。由于各厂家顶锤生产工艺的不同,材料参数存在一定差异。本分析采用的主要材料参数如表 1 所示。

表 1 YG8 主要性能参数表<sup>[15-17]</sup>

比重 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$1.46 \times 10^4$
弹性模量 $E/\text{GPa}$	717
泊松比 $\mu$	0.22
热传导系数 $\lambda$ ( $\text{W}/\text{m}$ )	75.4
热膨胀系数 $\alpha$ ( $\text{m}/^\circ\text{C}$ )	$4.5 \times 10^{-6}$

## 3. 计算结果与讨论

### 3.1. 温度场分布

顶锤内部的温度场分布与金刚石的合成功率、

加热时间、循环水温度以及环境温度等因素有关。本分析以正常工作并达到热稳定状态下的顶锤为研究对象,在实验合成腔体内部温度为  $1350^\circ\text{C}$ ,顶锤锤面温度为  $200^\circ\text{C}$ ,室温为  $35^\circ\text{C}$  的实测参数条件下,采用有限元方法进行热分析,模拟结果如图 2 所示。

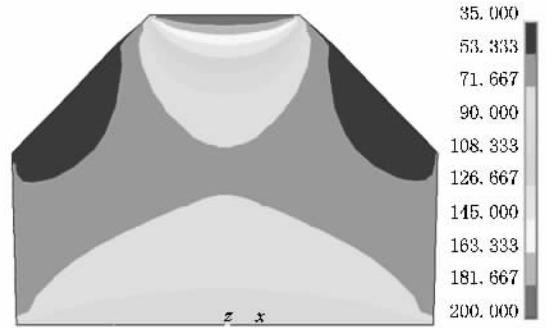


图 2 六面顶加热顶锤温度场分布(剖面图)

模拟结果表明加热顶锤内部温度分布不均匀,高温区分布在锤顶平面附近,而低温区则分布在顶锤的  $46^\circ$  大斜面附近。加热顶锤内部不均匀的温度分布将产生热应力,热应力的存在将严重削弱顶锤的强度,从而降低顶锤的使用寿命。

### 3.2. 热变形分布

六面顶顶锤材质为 YG8 硬质合金,此合金属于脆性材料。依据第三强度原理知,脆性材料的破裂通常是由于其剪切应力超过材料的许用强度造成的<sup>[18]</sup>。因此,我们运用有限元法对顶锤进行热结构分析,由温度引起的顶锤热变形分布图如图 3 所示。

模拟结果表明,由温度引起的顶锤膨胀量最大值为  $0.02\text{ mm}$ ,分布在六面顶顶锤  $46^\circ$  大斜面处;膨胀量最小值分布在顶锤的上下表面,这是因为在高温高压合成金刚石的过程中,顶锤的上下表面分别由叶蜡石合成块以及垫块紧紧挤压,而  $46^\circ$  大斜面处没有钢环等部件约束。由温度引起的顶锤位移图具有对称性,这符合客观试验规律,从一个侧面证明了模拟结果的正确性。

### 3.3. 应力场与破裂机理

由于六面顶顶锤具有结构对称性以及材质为脆性材料(脆性材料的破裂为剪切破裂),因此,分析由温度引起的应力时,我们只分析 XY 方向剪切应力分布,三维有限元热力耦合分析计算出的顶锤 XY 方向剪切应力如图 4 所示。

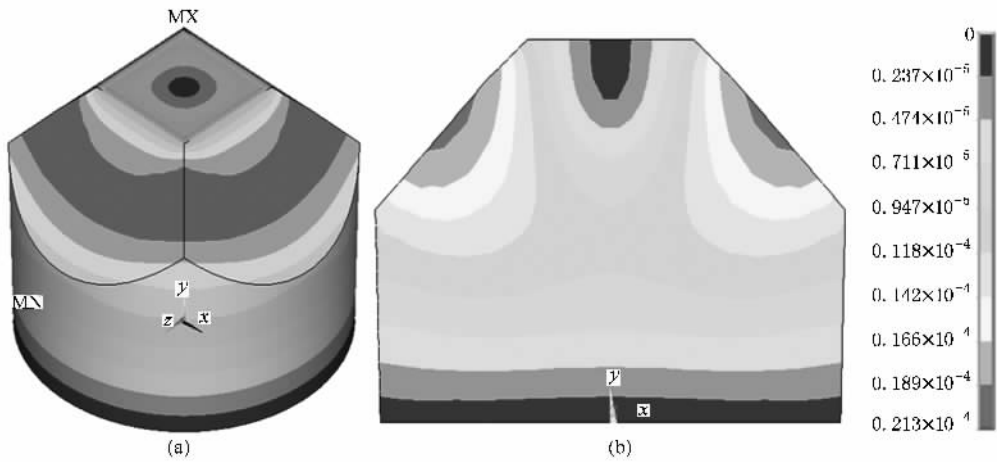


图3 六面顶加热顶锤热变形图 (a)等轴视 (b)剖面图

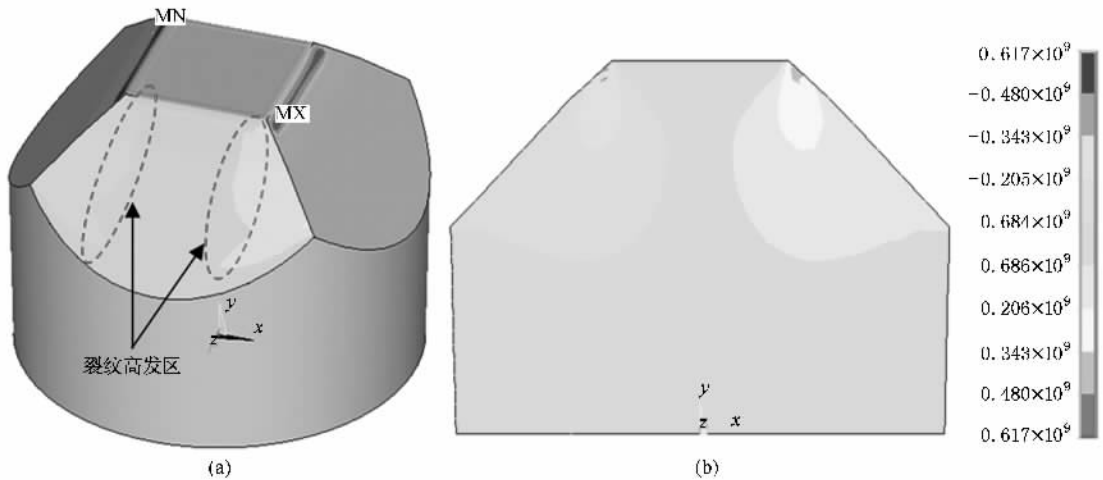


图4 六面顶加热顶锤 XY 方向应力分布图 (a)等轴视 (b)剖面图

模拟结果表明,XY 方向剪切应力峰值达到 0.62 GPa,分布在  $41.5^\circ$  小斜面上.而 Smithells 等人曾经对碳化钨硬质合金的屈服强度进行测定<sup>[16]</sup>,根据其测定结果推算的碳化钨材质极限切应力值为 3.40 GPa,因此温度产生的热应力峰值占极限切应力值的比例为 18.0%,即加热顶锤的剪切应力值较非加热锤的热剪切应力值高出 18.0%,依据第三强度理论,剪切应力数值越大,可能会造成顶锤在高剪切应力附近发生破裂.此模拟结果在理论上解释了加热顶锤使用寿命比非加热顶锤使用寿命低的实验事实.

剪切应力峰值分布在  $41.5^\circ$  小斜面上,在顶锤的  $41.5^\circ$  小斜面和  $46^\circ$  大斜面热剪切应力梯度较大,由强度理论知,此区域将会发生破裂.由剪切应力的方向及剪切应力引起的断裂方式知,此区域发生破裂

产生的裂纹方向应为纵向裂纹(图 4(a)中已标明).

## 4. 实验验证

为了验证模拟结果的正确性,用 XKY-6  $\times$  2000 MN 型六面顶压机配套的碳化钨硬质合金顶锤(锤面边长 44mm,顶锤直径 122 mm,顶锤高度 90 mm)进行了高压合成实验.在实验过程中用 Bi-Ba-Tl 以及 Pt6% Rh-Pt30% Rh 热电偶对高压合成腔体进行压力和温度标定<sup>[19,20]</sup>.待腔体压力和温度标定完成后,进行了大量的合成实验,实验结果表明加热顶锤的寿命较非加热锤低,加热顶锤的使用寿命为 6000 次,而非加热顶锤的寿命为 8000 次.加热顶锤的裂锤照片如图 5 所示,裂纹位置与模拟结果相同.模拟结果得到了实验过程中的裂锤照片(图 5)的验证.

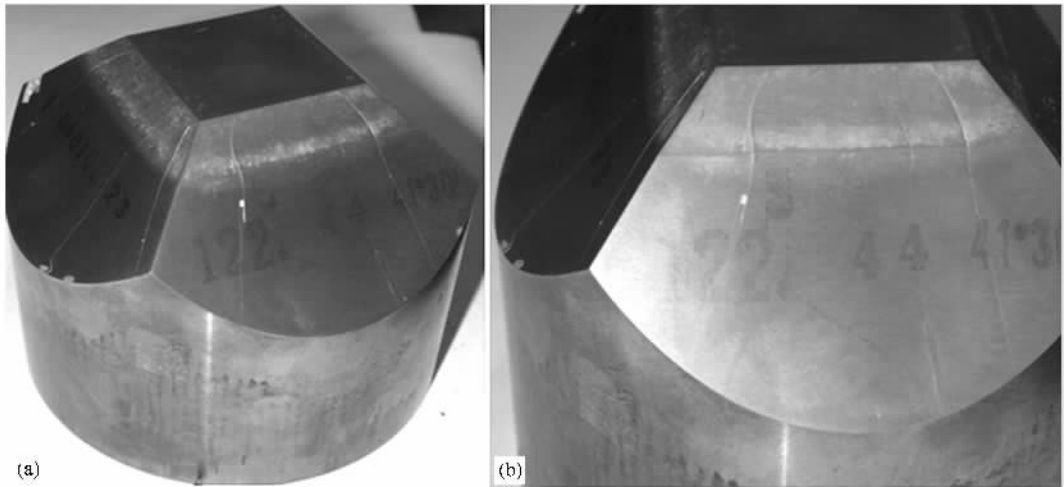


图5 六面顶压机实验过程中的裂锤照片 (a)等轴视;(b)前视图

## 5. 结 论

本文运用有限元方法,在实验合成腔体内部温度为 $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,顶锤锤面温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,室温为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实测参数条件下,对六面顶加热顶锤进行了三维热力耦合分析.模拟结果表明加热顶锤内部温度分布不均匀,加热顶锤内部不均匀的温度分布产生了热剪切应力,热剪切应力峰值达到 $0.62\text{ GPa}$ ,分布在

$41.5^{\circ}$ 小斜面上.在顶锤的 $41.5^{\circ}$ 小斜面 and  $46^{\circ}$ 大斜面热剪切应力梯度较大,由强度理论知,此区域将会发生破裂.加热顶锤的剪切应力值较非加热锤的剪切应力值高出 $18.0\%$ ,此模拟结果在理论上解释了加热顶锤使用寿命比非加热顶锤使用寿命低的实验事实.此项工作对于提高大顶锤使用寿命,降低生产成本有着重要的现实意义,为新型六面顶压机的研制提供了良好的设计基础.

- [1] Gschneidner K A, Jr, Hepworth M T, 1964 *Metalurgy at High Pressures and High Temperatures* (New York: Gordon and Breach Science Publishers) p10
- [2] Bridgman W 1952 *the Physics of High Pressure*, London, G. Bell and Sons Ltd, 1952, 3<sup>rd</sup>, p30—70
- [3] Zou Y G, Liu B B, Liu Y C et al 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5172 (in Chinese)[邹永刚、刘冰冰、刘益春等 2007 物理学报 **56** 5172]
- [4] Ding Y C, Xu M, Pan H Z, Shen Y B, Zhu W J, He H L, 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 117 (in Chinese)[丁迎春、徐明、潘洪哲、沈益斌、祝文军、贺红亮 2007 物理学报 **56** 117]
- [5] Bai S Z, Yao B, Zheng D F, Xing G Z, Su W H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5744 (in Chinese)[白锁柱、姚斌、郑大方、邢国忠、苏文辉 2006 物理学报 **55** 5744]
- [6] Wang G Z, Zhai X Q, Luo M, Yao H X 2000 *Diamond & Abrasives Engineering* **6** 34 (in Chinese)[王光祖等 2000 金刚石磨料与磨具工程 **6** 34]
- [7] Jia X P 2001 *China Superhard Marterial* **3** 1 (in Chinese)[贾晓鹏 2001 中国超硬材料 **3** 1]
- [8] Wang F L, He D W, Fang L M, Chen X F, Li Y J, Zhang W, Zhang J, Kou Z L, Peng F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5429 (in Chinese)[王福龙、贺端威、房雷鸣、陈晓芳、李拥军、张伟、张剑、寇自力、彭放 2008 物理学报 **57** 5429]
- [9] Han Q G, Ma H A, Li R, Zhou L, Tian Y, Liang Z Z, Jia X P 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 084504
- [10] Han Q G, Ma H G, Li R, Zhou L, Tian Y, Jia X P 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 113906
- [11] Chang Y C, Zhang Y M, Zhang Y M 2006 *Chin. Phys.* **15** 636
- [12] Long W Y, Cai Q Z, Wei B K, Chen L L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1345 (in Chinese)[龙纹元、蔡启舟、魏伯康、陈立亮 2006 物理学报 **55** 1345]
- [13] Buteler D I, Neves P C U, Ramos L V, Santos C E R, Souza R M, Sinatora A 2006 *Journal of Materials Processing Technology* **179** 50
- [14] Deng D M, Liu Z B, Zhou L S 2006 *Journal of iron and steel research, international* **13** 75
- [15] Eremets M I, Trojan I A, Gwaze P, Huth J, Boehler R, Blank V D 2005 *Applied Physics Letters* **87** 141902
- [16] Smithells C J (ed.) 1976 *Metals Reference Book* 5<sup>th</sup> edn (London: Butterworth)
- [17] Paul J, Ruoff A L 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 2447

- [ 18 ] Bridgman P W 1947 *J. Appl. Phys.* **18** 782
- [ 19 ] Haygarth T C , Geffing I C , Kennedy G C 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 4557
- [ 20 ] Ma H A , Jia X P , Chen L X , Zhu P W , Guo W L , Guo X B , Wang Y D , Li S Q , Zou G T , Grace Zhang , Phillip Bex 2002 *J. Phys : Condens. Matter* **14** 11269

## Finite element simulations of thermal-stress on cemented tungsten carbide anvil used in cubic high pressure apparatus<sup>\*</sup>

Han Qi-Gang<sup>1)</sup> Jia Xiao-Peng<sup>1)</sup> Ma Hong-An<sup>1)†</sup> Li Rui<sup>2)</sup> Zhang Cong<sup>1)</sup> Li Zhan-Chang<sup>1)</sup> Tian Yu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *National Lab of Superhard Materials , Jilin University , Changchun 130012 , China*

<sup>2)</sup> *Institute of Materials Science and Engineering , Changchun University of Science and Technology , Changchun 130012 , China*

( Received 23 October 2008 ; revised manuscript received 13 November 2008 )

### Abstract

Based on the theoretical analysis , we performed finite element simulation of high pressure experiment in multi-anvil devices ( XKY-6 × 2000 MN ) to determine the temperature and the stress in WC anvil . The simulated results show that the temperature is not uniform , and the ununiform temperature can produce thermal-shear stress in the anvil . The peak value of thermal-shear stress lies on the beveling edge of the anvil , the peak value of thermal-shear stress is 0.62 GPa , which is 18 percent that of unheated anvil . The simulation results have been verified by high pressure synthesis experiment . We developed a new method to simulate the stress of WC anvil at high pressure and high temperature . This would greatly help the design of anvil with safe dimension .

**Keywords** : thermal-stress , anvil , FEM , industrial diamond

**PACC** : 6110F , 6155H , 0650M , 0735

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 50572032 , 50731006 , 50801030 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : maha@jlu.edu.cn