

## 热震法分离电镀金刚石工具磨料层与基体的研究

高冰媛, 于爱兵\*, 李 照, 董 亮, 汪 浩

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 提出一种电镀金刚石工具磨料层与基体的绿色分离方法, 可以实现工具的有效回收和再利用. 采用有限元分析软件 ANSYS 模拟了电镀金刚石磨头的热震过程, 分析了工具基体与镍镀层之间的热应力及其分布. 计算结果表明: 在冷热载荷作用下, 镀层与基体之间发生热膨胀失配, 导致界面附近易出现疲劳破坏, 产生裂纹, 且裂纹首先产生于界面形状突变区域. 通过电镀金刚石钻头的热震实验观察到磨料层的脱落现象, 验证了有限元分析结果, 同时也证明了热震法分离电镀金刚石工具磨料层与基体的可行性.

**关键词:** 电镀; 金刚石工具; 回收; 热震; 分离

**中图分类号:** TG74

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2011) 01-0067-04

电镀金刚石工具由磨料层与基体组成, 而通常情况下, 当金刚石磨料磨损后, 残留有金刚石磨料的工具便失去切削能力而报废. 同时, 报废的金刚石工具基体材料也没有得到再次利用, 因此有必要对电镀金刚石工具进行回收. 现有的回收方法主要有化学法和电化学法. 化学法常用硝酸、氢氟酸、盐酸等酸液按比例混合后对工具进行腐蚀; 电化学法是在一定温度和电流密度下, 对工具进行电解回收得到金刚石颗粒<sup>[1-4]</sup>. 但 2 种方法都存在着效率低和环境污染现象, 且基体存在被腐蚀现象, 未能实现基体和结合剂的有效回收和再利用.

笔者提出了一种电镀金刚石工具磨料层与基体的分离方法——热震法, 通过有限元模拟电镀金刚石磨头的热震过程, 并对电镀金刚石钻头进行热震实验, 证明了热震法分离电镀金刚石工具磨料层与基体的可行性.

### 1 电镀金刚石工具磨料层与基体的分离方法

根据热弹性理论, 由 2 种不同线膨胀系数材料固结成的物体发生温度变化时, 由于材料的膨胀或缩小量存在差异, 热应变会受到约束而产生热应力. 若循环温度变化  $\Delta T$  引起的应力超过材料屈

服强度时, 材料就会出现疲劳破坏及断裂<sup>[5]</sup>. 若 2 种材料在界面处存在热应力集中且不断叠加, 那么, 界面附近就有出现开裂和剥落的可能. 这就为从物理角度实现基体和磨料层的分离提供了理论依据.

在上述理论的基础上, 笔者提出热震法, 即先将电镀金刚石工具经过一定的温度加热, 保温后放入冷水中冷却, 并重复上述操作. 因为电镀金刚石工具镍镀层与碳钢基体的膨胀系数不同, 所以, 无论是处于高温加热过程还是低温冷却过程, 磨料层与基体之间都会因为失配而产生突变应力; 经过反复冷热, 残存的应力才会逐渐积累, 界面将产生热疲劳裂纹, 随着残余应力继续增大, 裂纹将扩展、汇聚, 最后导致磨料层的剥落, 即可实现电镀金刚石工具磨料层与基体的绿色分离.

以电镀金刚石工具为例, 磨料层相对于工具基体来说, 其厚度很薄, 且在磨料层的预镀层内不含金刚石颗粒, 电镀金刚石工具的界面两侧分别是基体和镀镍层, 那么试样几何模型可看作是由基体和镀层组成. 基体可以看作半无限大弹性体, 当温度变化  $\Delta T$  时, 基体发生自由变形, 不受镀层约束, 即  $\sigma_s = 0$ , 可将其作为平面应力问题进行处

收稿日期: 2009-11-28.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(20070866).

第一作者: 高冰媛(1986-), 女, 山东成武人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 数字化制造技术. E-mail: gaobingyuan@163.com

\*通讯作者: 于爱兵(1968-), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 主要研究方向: 硬脆材料加工理论与技术. E-mail: yuaibing@nbu.edu.cn

理, 镀层与基体的弹性模量、热膨胀系数和泊松比分别为  $(E_c, \alpha_c, \nu_c), (E_s, \alpha_s, \nu_s)$ , 依据广义胡克定律, 基体自由变形时, 在界面处的应变  $\varepsilon_s$  为:

$$\varepsilon_s = \alpha_s \Delta T. \quad (1)$$

镀层在界面处的应变由两部分组成, 一部分为弹性应变  $\varepsilon_{c1}$ :

$$\varepsilon_{c1} = (\sigma_c - \nu_c \sigma_c) / E_c, \quad (2)$$

另一部分为温差引起的应变  $\varepsilon_{c2}$ :

$$\varepsilon_{c2} = \alpha_c \Delta T. \quad (3)$$

在界面处, 由变形协调可得:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}, \quad (4)$$

即:

$$\alpha_s \Delta T = \alpha_c \Delta T + (\sigma_c - \nu_c \sigma_c) / E_c. \quad (5)$$

由此可得镀层所受应力  $\sigma_c$  为:

$$\sigma_c = E_c \Delta T (\alpha_s - \alpha_c) / (1 - \nu_c). \quad (6)$$

对于  $\alpha_c > \alpha_s$  条件下, 升温时  $\Delta T > 0, \sigma_c < 0$ , 即镀层受压应力; 降温时  $\Delta T < 0, \sigma_c > 0$ , 镀层受拉应力. 其中镍的热膨胀系数大于 45 号钢基体的热膨胀系数. 也就是说, 热震中镀层受到交变应力的作用, 热震后在镀层形成拉应力, 而拉应力会加剧材料内部的应力集中, 并促使裂纹萌生或加速裂纹扩展.

## 2 有限元模拟与实验

### 2.1 有限元建模

以直径为 8 mm 的电镀金刚石磨头为试样, 基体为 45 号钢, 长 80 mm; 镀层为镍, 厚 1 mm, 长 10 mm, 包裹在基体头部周围. 因为研究重点在 2 种材料的结合区, 没有镀镍的基体部分对结合区的影响, 可忽略不计, 故有限元几何模型取基体长度为 30 mm. 试样及冷热温度载荷的施加均是对称

的, 选择过柱体纵剖面的一半建立二维平面模型, 沿界面进行一倍网格细化, 试样头部有限元网格划分如图 1 所示. 45 号钢与镍两种材料的物理参数见表 1.

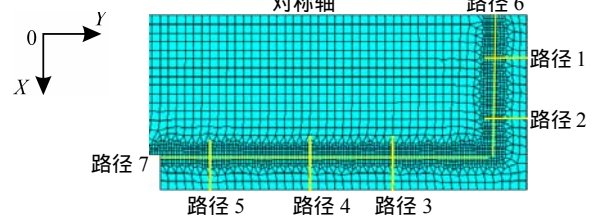


图 1 试样头部有限元网格划分图

对试样进行单周期循环载荷条件下的有限元热应力分析, 整个过程分为加热、保温和冷却 3 个阶段. 设定加热温度为 500 , 加热时间为 10 min, 保温时间为 5 min, 降温冷水温度为 20 , 冷却时间为 10 min. 在 ANSYS 中采用写载荷步方式, 时间步长设为 30 s, 因此整个过程共有 50 个载荷步.

有限元位移边界条件为:  $u_x = 0, y = 0; u_y = 0, x = 0$ , 其中,  $u_i (i = x, y)$  是在  $i$  方向上的位移. 试样初始温度、零应力时的参考温度分别为:  $T|_{t=0} = T_0 = 20$  ;  $T_{ref} = 20$  . 热分析边界条件为对流, 降温采用水冷, 计算得出:  $h_{水} = 5480 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  [8], 升温时采用炉热, 一般强迫气体的对流系数在  $20 \sim 100 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  之间, 据经验值, 分析中取  $100 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ .

### 2.2 有限元分析结果

图 2 为  $t = 900 \text{ s}$  时模型的等效力 (即  $\sigma_{eq}$ ), 可见: (1) 在靠近镀层和基体界面的区域应力梯度明显, 尤其在侧面镍镀层内; 而基体内部应力梯度不明显, 应力值也相对小, 说明应力差是由于不同材料受热后失配引起; (2) 样品形状突变区域在界面折点 B 点和端点 A 点附近, 应力值大于其他区域,

表 1 45 号钢/镍的材料性能参数<sup>[6-7]</sup>

参数	20	100	200	300	400	500
弹性模量 $E / \text{GPa}$	209/211	207/207	202/201	196/194	186/187	174/179
屈服强度 $\sigma_s / \text{MPa}$	355/48	323/154	302/139	292/138	282/115	269/103
切变模量 $G / \text{GPa}$	82.3/83.5	81.5/81.6	80.2/77.9	74.8/74.05	71.2/71.27	67.8/68.53
线膨胀系数 $\alpha / (\times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	10.6/13.3	11.7/13.3	12.43/13.7	13.13/14.4	13.67/15.1	14.10/15.5
导热系数 $k / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1})$	48/67.5	47/67.1	46.5/67.3	45.2/56.3	39.4/54.5	39.4/59.1
比热容 $C_p / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{s})^{-1})$	480/406	512/426	578/448	624/465	649/477	716/490
泊松比	0.269/0.264	0.27/0.269	0.29/0.29	0.312/0.31	0.309/0.312	0.308/0.306
相对密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 890/8 880					

其中, 应力最大值 205 MPa 出现在 A 点处.  $t = 900$  s 时, 在靠近界面的镀层内, 等效应力沿路径 C-B-A 的分布情况如图 3 所示, 看出: 区域 I 和 II 的应力变化幅度较大且应力在折点及端点处出现极值, 而区域 III 和 IV 中的应力较小且曲线比较缓和, 说明在界面形状转折区材料容易疲劳.

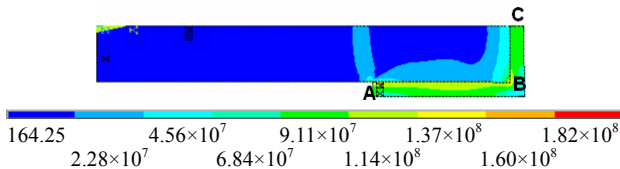


图 2  $t=900$  s 时的等效应力分布图

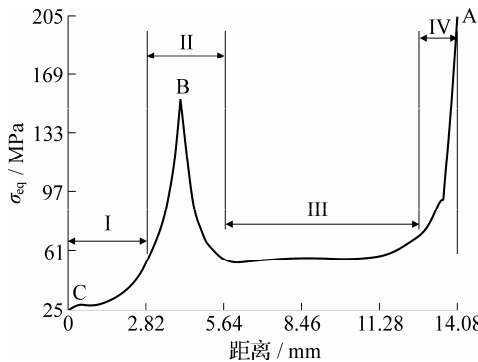


图 3  $t=900$  s 时沿 C-B-A 路径的等效应力分布

图 4 为  $t = 900$  s 时沿镀层厚度方向的路径 1 至路径 5 的等效应力分布图, 可见各路径上等效应力的变化趋势相同, 表现为: 等效应力沿镀层厚度方向先是增大, 在靠近界面约 0.1 mm 时达到最大值, 随后快速减小直至距离界面 0.02 mm 的基体内, 之后, 路径 1 和路径 2 的应力先有小幅度的增加, 当距离界面为 0.1 mm 时又开始减小, 路径 3、路径 4 和路径 5 上的应力均是继续沿镀层厚度方向减小, 但变化幅度很小. 较大的应力和应力差预示着镀层部位, 尤其是靠近界面的镀层内容易疲劳.

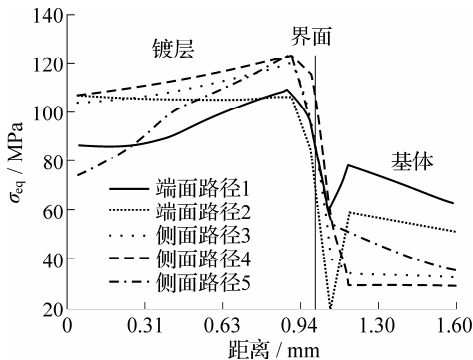


图 4  $t=900$  s 时沿镀层厚度方向的等效应力分布  
冷却后, 等效应力梯度分布的明显区域仍旧

在界面附近, 最大应力值点也保持在端点 A 处. 如图 1 中在镀层内选取紧靠界面两路径, 图 5 与图 6 分别为  $t = 1500$  s 时沿 X 轴正方向路径 6 与沿 Y 轴负方向路径 7 上的单向应力情况, 即  $\sigma_y$  与  $\sigma_x$  的分布, 可见在形状突变区域的残余应力较中间区域大, 且残余应力表现为拉应力, 中间区域则为压应力, 而拉应力的存在有利于材料的疲劳破坏, 这预示着经过热震, 界面形状突变区域最容易出现开裂.

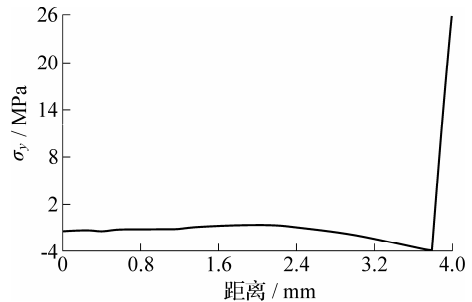


图 5  $t=1500$  s 时路径 6 上的应力

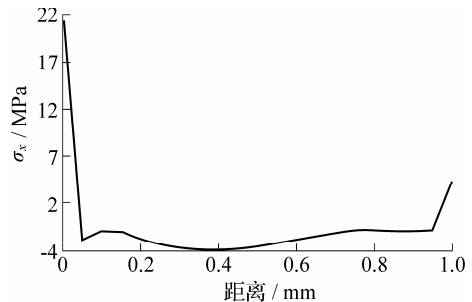


图 6  $t=1500$  s 时路径 7 上的应力

经过 1 次热震, 镀层与基体界面附近应力值较大且梯度明显, 在界面形状突变处及其附近尤其如此; 在靠近界面形状突变区域的镀层内, 单向残余应力存在拉压应力突变, 在镀层内主要表现为拉应力, 有助于出现疲劳破坏进而产生裂纹. 因此, 经过热震, 靠近界面的镀层内最容易出现疲劳, 且裂纹最先有可能出现在界面形状突变区域.

### 2.3 热震实验

选用图 7(a)所示的电镀金刚石钻头为实验对象, 实验电炉型号为 SX2-4-10, 当炉温升至 500 时将金刚石钻头放入, 保温 15 min 后投入 20 水中冷却, 重复以上步骤直至磨料层全部脱落. 图 7(b)是 2 次热震后的图片, 端部出现裂纹, 轻轻敲击, 磨料层沿裂纹呈片状脱落, 最后完全露出新鲜的未经高温氧化的基体表面.

通过上述实验得出: (1)磨料层首先在界面形状突变处出现裂纹, 说明是应力变化引起了磨料

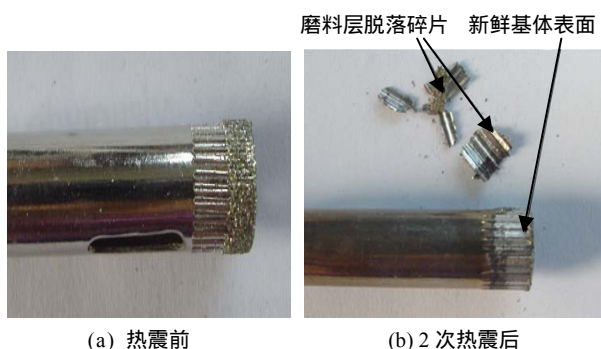


图7 电镀金刚石钻头热震前后图片

层与基体界面结合力的弱化, 实验结果与 ANSYS 模拟结果相吻合, 验证了有限元分析的结果; (2) 磨料层的完全脱落及整个实验过程无有毒物质产生, 无环境污染现象, 证明了热震法分离电镀金刚石工具镀层与基体的可行性和环保性。

### 3 结论

分别以电镀金刚石磨头与电镀金刚石钻头为例, 对热震过程中镍镀层与 45 号钢基体间应力场进行有限元数值模拟与热震实验, 得出以下结论:

(1) 在镀层和基体之间的热膨胀失配与冷热载荷的共同作用下, 界面附近出现应力集中以及应力方向的突变, 使 2 种材料间的结合强度被破坏, 这是造成磨料层从基体上脱落的重要条件。数值分析表明, 经过热震后, 在界面附近产生裂纹, 且

裂纹将首先产生于界面形状突变区域。

(2) 热震实验观察到工具磨料层的脱落与开裂现象, 同样首先是在界面形状突变处发生脱落, 进而沿着断裂面脱落, 验证了有限元分析结果。

(3) 提出的热震法可实现电镀金刚石工具磨料层与基体的绿色分离, 符合环境保护和可持续发展, 解决了电镀金刚石工具回收关键技术问题。

### 参考文献:

- [1] 张从良, 彭国胜, 王岩. 废金刚石刀具中铜钴镍的回收工艺研究[J]. 无机盐工业, 2006, 38(9):54-60.
- [2] 曲志平. 废残金刚石刀头的回收利用[J]. 中国物资再生, 1997(7):20-22.
- [3] 李超群. 废旧电镀磨头金刚石回收的试验研究[J]. 探矿工程, 1992(4):91-96.
- [4] 谭世同, 曹淑敏. 从金刚石工具中回收金刚石[J]. 石材, 1995(1):38-41.
- [5] 顾泽同, 葛永乐, 翁中杰, 等. 工程热应力[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987:162-163.
- [6] 机械工程材料性能数据手册编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994:423-426.
- [7] 美国金属学会. 金属手册——不锈钢、工具材料及特殊用途金属材料性能与选择[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991:234-238.
- [8] 翁中杰, 程惠尔, 戴华淦. 传热学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987:298.

## Thermal Shock Method to Separate Abrasive Layer and Substrate of Electroplated Diamond Tools

GAO Bing-yuan, YU Ai-bing\*, LI Zhao, DONG Liang, WANG Hao

(The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** One separating method of abrasive layer and substrate named thermal shock method is proposed to realize the recovery of the electroplated diamond tools. Taken electroplated diamond grinding wheel for example, the distribution of the thermal stresses between the nickel coating and 45 steel substrate were simulated by the finite element software ANSYS. Under the cycling interaction of hot and cold load, the calculation results indicate the thermal expansion mismatches between coating and substrate in the fatigue and cracks near the interface, and the cracks usually first occurred in the transition region of the interface shape. The thermal shock experiments of electroplated diamond tools were carried out and the separating between abrasive layer and substrate was observed. The finite element analysis results were verified through experiments, the feasibility of thermal shock in separating the abrasive layer and the substrate was proved.

**Key words:** electroplating; diamond tools; recovery; thermal shock; separating

(责任编辑 章踐立)