

采用应力释放法测量 PDC 热残余应力

徐 根¹ 陈 枫² 徐国平³ 肖建清¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 现代分析测试中心, 湖南 长沙 410083; 3. 金瑞新材料科技股份有限公司, 湖南 长沙 410012)

摘 要:精确测量聚晶金刚石复合片的热残余应力是优化其界面结构和提高其使用性能的关键。在分析原有应力释放法测聚晶金刚石复合片热残余应力原理的基础上,采用改进的应力释放法,对 4 种同材料与外形尺寸、不同金刚石层厚度的聚晶金刚石复合片进行了热残余应力试验研究,得到了金刚石层表面热残余应力的分布规律及热残余应力与基体厚度的关系曲线,比较了其试验结果和有限元计算结果,两者基本吻合。

关键词:聚晶金刚石复合片; 应力释放法; 热残余应力; 有限元法

中图分类号:TE921⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)01-0067-05

聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact,简称 PDC)是由聚晶金刚石层(简称 PCD)与硬质合金基体构成的超硬复合材料。一般认为,热残余应力是造成 PDC 非正常失效的主要原因^[1-6]。精确测量 PDC 热残余应力是优化 PDC 界面结构、提高 PDC 使用性能的关键。目前,国内外检测 PDC 残余应力的主要方法有:应力释放法、中子衍射法和带高能同步加速器 X 射线衍射法等几种^[7-11]。其中,应力释放法相对简单、直观,而后两种测试设备昂贵,不适合在工程中采用。为此,笔者利用应力释放法,对 4 种同材料与外形尺寸、不同金刚石层厚度的 PDC 进行了热残余应力测试,得到了 PCD 层表面热残余应力值,以及热残余应力随基体厚度的变化规律,并与有限元分析结果作了比较,两者基本吻合,证明了应力释放法测 PDC 热残余应力的可靠性。

1 应力释放法测 PDC 热残余应力的原理及方法

1.1 测试原理

应力释放法测量金属残余应力的原理为:在处于原始应力场平衡的金属上钻孔,去除一部分具有应力的金属,从而使圆孔附近部分金属内的应力得到松弛,钻孔破坏了原来的应力平衡状态而使应力重新分布,并呈现新的应力平衡,从而使圆孔附近的

金属发生位移或应变,通过附于金属件上的高灵敏度应变片测量钻孔后的应变值,就可以计算原应力场的应力值。

用应力释放法测 PDC 热残余应力的具体过程为^[12]:将电阻应变片粘贴于 PCD 层的表面,然后依次切割不同厚度的硬质合金基体,应变片记录下基体厚度改变时 PCD 层表面的应变值。假设所有硬质合金基体被去除后 PCD 层是无应力的,则将不同基体厚度时测得的应变值减去无基体时测得的应变值,即可得出 PCD 层表面残余应力与基体厚度的关系曲线,并求得其应力值。

1.2 测试方法与步骤

试验试样规格为 $\phi 19 \times 13$ mm,PCD 层厚度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 4 种,见图 1。金刚石平均粒度为 28 μm ,金刚石层表面经过研磨处理。在试样中部、1/2 半径及边缘分别贴电阻应变片(规

收稿日期:2009-01-11;改回日期:2009-11-14

基金项目:教育部博士点基金项目“油田钻探用金刚石复合片热残余应力致裂与止裂研究”(编号:20070533113)部分研究内容

作者简介:徐根(1979—),浙江桐乡人,2002 年毕业于中南大学建筑工程专业,2005 年获中南大学固体力学专业硕士学位,在读博士研究生,主要从事金刚石复合片残余应力与界面结构优化方面的研究。

联系方式:(0731)8876593,gen.x@163.com

格为 3×2 mm,见图 2),并进行防水处理。试样的材料参数见表 1。



图 1 同规格、不同 PCD 层厚度试样



图 2 贴片及导线连接方式

表 1 PDC 材料物理力学性能参数

原材料	密度/kg·m ⁻³	导热系数 ^① / W·(m·℃) ⁻¹	比热 ^① / J·(kg·℃) ⁻¹	热胀系数 α ^① / 10 ⁻⁶ K ⁻¹	弹性模量/GPa	泊松比
D6Co	3 510	543	790	2.5	890	0.07
YG15	15 000	100	230	5.2	579	0.22

注:① 温度条件为 20℃。

试验采用 DH3817 动静态应变测试系统及 DHDAS 信号测试分析系统进行数据采集与分析。试验时首先对连接试样后的各应变通道进行调零,然后利用电火花线切割机对基体进行逐次切割,每次切割厚度为 2.0 mm,且每切割一次进行一次应变值的测量,整个切割过程测试系统保持运行状态(即每个试样连续测量,连续记录,每次记录时

间为 100 s)。

2 试验结果分析

试验结果见表 2 及图 3(为节省篇幅,笔者只给出了部分基体厚度与应力值的关系曲线)。为便于比较,同时给出了数值计算结果。

表 2 PDC 表面热残余应力测试值

试样编号	PCD 层厚度/mm	位置	应变	应力/MPa	计算值/MPa
1	0.5	中心	-1 988.403×10 ⁻⁶	-1 879.689	-1 802.11
		1/2 半径	-1 934.204×10 ⁻⁶	-1 831.442	-1 619.25
		边缘	-236.289×10 ⁻⁶	-210.297	-271.91
2	1.0	中心	-1 232.056×10 ⁻⁶	-1 096.529	-1 360.90
		1/2 半径	-1 067.603×10 ⁻⁶	-950.167	-1 088.81
		边缘	208.032×10 ⁻⁶	185.148	247.72
3	1.5	中心	-1 317.487×10 ⁻⁶	-1 172.563	-1 003.10
		1/2 半径	-913.989×10 ⁻⁶	-813.450	-677.65
		边缘	359.835×10 ⁻⁶	320.252	291.25
4	2.0	中心	-713.016×10 ⁻⁶	-634.584	-701.11
		1/2 半径	-445.179×10 ⁻⁶	-396.209	-365.51
		边缘	276.807×10 ⁻⁶	246.358	240.65

注:拉应力为正,压应力为负。

由表 2、图 3 可知,测试值与有限元计算值较为接近,证明了应力释放法测 PDC 热残余应力的可靠性。由结果看,PCD 层厚度越小,所测得的压应力越大,即在相同基体厚度情况下,PCD 层厚度越小,沿直径方向的横截面积越小,单位面积所受压应力越大。

图 3 中,室温下基体完整时,PCD 层表面中心受压缩应力。当基体被切割之后,PCD 层开始向外膨胀,应力开始得到释放,中心点压应力值逐渐减

小。当合金基体被逐步去除后,PCD 层的膨胀加上整体抗弯刚度的减小,使整个 PDC 发生弯曲,PCD 层表面由压应力转变为张应力状态。当基体被完全切割时,PCD 层充分膨胀,表面应力转变为零,与理论分析完全一致。

采用应力释放法测试 PDC 热残余应力,只能测 PDC 自由表面的热残余应力,难以得到界面热残余应力,因而无法精确掌握 PDC 热残余应力的极限

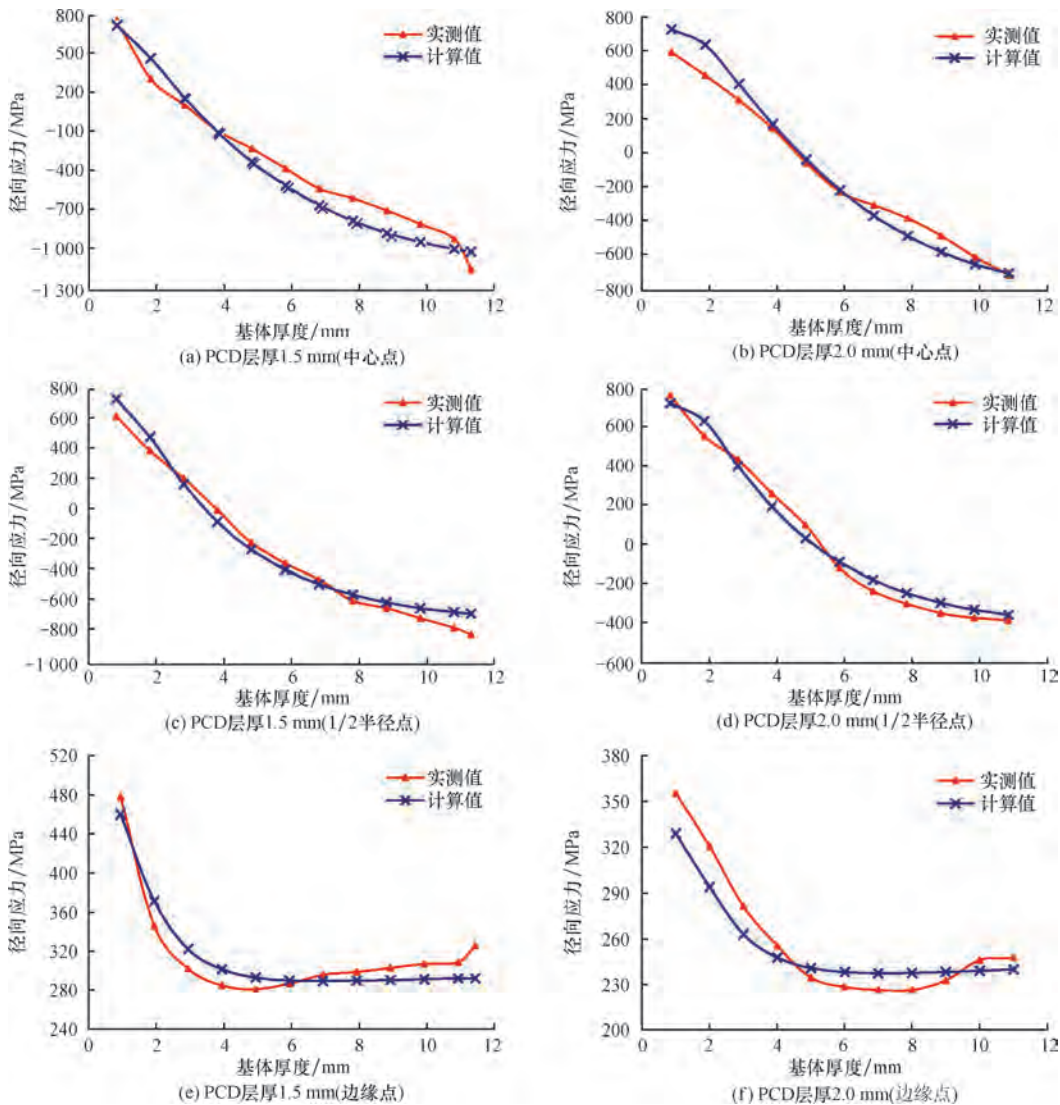


图 3 基体厚度与 PCD 层表面热残余应力关系曲线

值。为此,建立如图 4 所示的坐标系,利用有限元方法(利用轴对称性)可以得到 PCD 层径向热残余应力分布云图(见图 5,PCD 层厚度 $h=2.0\text{ mm}$)以及自由面径向应力分布曲线(见图 6)。从图 4~6 可以看出:PCD 层自由面最大压应力分布在 $D=0$ 附近,为 701.11 MPa ;最大拉应力分布在 $D=8.03$ 处,为 293.01 MPa 。此时,PCD 层靠近界面一侧径向最大压应力为 $1\,170.70\text{ MPa}$,为自由面最大压应力的 1.67 倍。设 PCD 层界面处径向最大压应力与表面最大压应力的比为 k ,并保持基体厚度(11 mm)不变,可以得到 k 与 PCD 层厚度 h 之间的关系曲线,见图 7。从图 7 可以看出,保持基体厚度不变的情况下,PCD 层厚度越小,PCD 层表面横向最大压应力越接近于界面处的径向应力极限值,反之,则相差越大。将图 6、图 7 进行曲线拟合,可以得到 PCD 层表面径向应力计算公式以及 $k-h$ 的关系式:

$$\sigma_r = -824.78 + \frac{7\,704.22}{(D - 7.90)^2 + 7.02} \quad (1)$$

$$k = 0.93 + \frac{0.40}{(h - 2.47)^2 + 0.47} \quad (2)$$

式中, σ_r 为 PDC 表面径向热残余应力,MPa; D 为计算点到对称轴的距离,mm; k 为 PCD 层界面处径向最大压应力与表面最大压应力的比,无因次; h 为 PCD 层的厚度,mm。

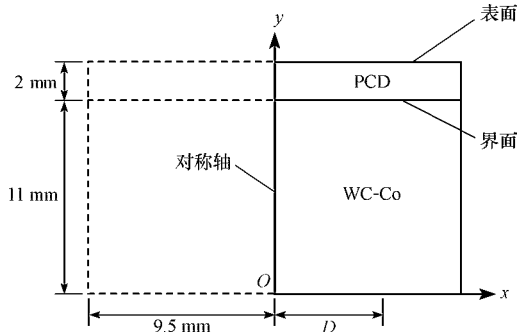


图 4 有限元模型示意

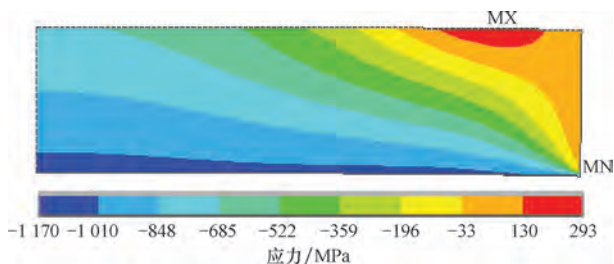


图5 PCD层径向热残余应力分布云图

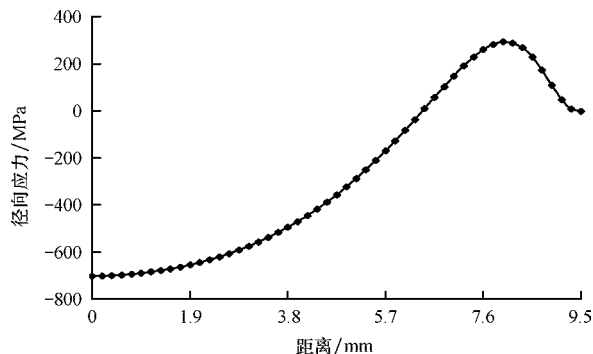


图6 PCD层自由面径向应力曲线

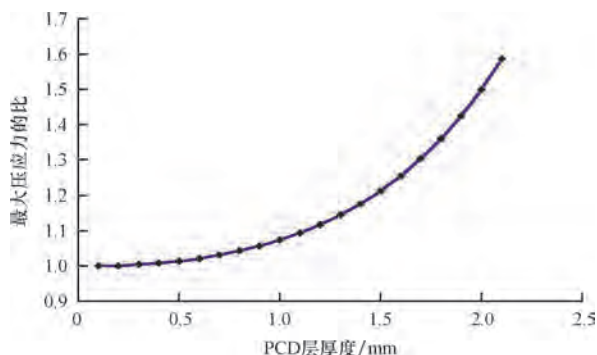


图7 PCD层界面与表面最大压应力的比与PCD层厚度的关系曲线

另外,当采用分层切割基体时,要准确测量PCD层表面最大拉应力也比较困难。由理论计算可知,同样基体厚度的情况下,PCD层厚度越小表面拉应力极值也越小。但由表2数据可以看出,边缘点的应力值与PCD层厚度变化的关系无规律性。这是因为,当切割基体时,PCD层表面最大应力不但其值发生了变化,其位置也在变化。图8为基体厚度与PCD层表面拉应力极值位置的关系曲线。从图8可以看出,当PCD层厚度与基体厚度的比不大于1/5时,表面拉应力极值的位置才基本保持不变。因而,要准确测量PCD层表面的最大拉应力,尽量减少误差,需预先计算确定其位置,然后一次性将基体切除。

利用改进的应力释放法测试PDC热残余应力,其结果显示出该方法的优越性:

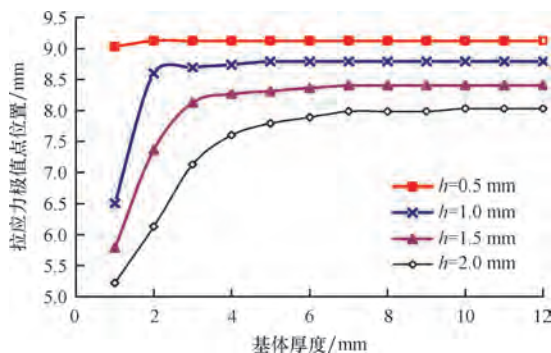


图8 拉应力极值点位置与基体厚度关系曲线

1) 试验在试样金刚石层表面的中心、1/2半径及边缘处分别粘贴了应变片,使测试结果在热残余应力分布曲线上具有代表性,有助于掌握PDC热残余应力的分布规律;

2) 利用电火花线切割机对基体进行分层切除,在切割时冷却液可以对试样进行有效的冷却,使试样及应变片免受切割产生的高温影响,显然,将金刚石层与基体进行一次性分离可以减少测试误差;

3) 所有测试结果与有限元计算结果基本吻合,显示出该方法的精确性和可靠性。

3 结论与认识

1) 采用应力释放法测试PDC热残余应力,所测值为表面应力,无法直接测量界面应力的大小。另外,采用分层切割基体时,只有当PCD层厚度与基体厚度的比不大于1/5时,表面拉应力极值的位置才基本保持不变。因而,要测量PCD层表面最大拉应力,需预先计算、确定其位置,然后切割基体,以尽可能减小误差。

2) 应力释放法测PDC热残余应力为破坏性试验,当采用多次切割基体时,较容易引入误差,在测试时应尽可能减少切割次数。

3) 与X-射线衍射、Raman光谱等方法相比,应力释放法测PDC热残余应力过程相对简单,结果可靠,测试费用便宜,非常适用于实验室及工程应用研究时采用,为准确测试PDC的其他应力(如环向应力以及高性能PDC刀具的设计与制造)奠定了试验基础。

参考文献

- [1] Zeren M, Karaqöz S. Sintering of polycrystalline diamond cutting tools[J]. Materials & Design, 2007, 28(3): 1055-1058.

- [2] Gittel H J. Cutting tool materials for high performance machining [J]. Industrial Diamond Review, 2001(1): 17-21.
- [3] Clark I E. The use of polycrystalline diamond (PCD) for machining highly abrasive workpiece materials [J]. Key Engineering Materials, 1996, 118/119: 221-232.
- [4] Lin T P, Hood M, Cooper G A, et al. Residual stresses in polycrystalline diamond compacts [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(6): 1562-1568.
- [5] 徐根, 陈枫, 徐国平, 等. 不同界面形态聚晶金刚石复合片热残余应力分析[J]. 超硬材料工程, 2007, 19(4): 10-15.
- [6] 徐根, 陈枫, 肖建清, 等. 油田钻探用金刚石复合片热残余应力分析[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(4): 49-52.
- [7] Bertagnolli K, Vale R. Understanding and controlling residual stresses in thick polycrystalline diamond cutters for enhanced durability[C]// Proceedings, An International Technical Conference on Diamond, Cubic Boron Nitride and their Applications, Vancouver, Canada, July 17-21, 2000.
- [8] Teasdal P, Riley N, Mackinnon P. New PDC technology delivers significant savings in Oman: bit technology[J]. JPT, 2005, 57(12): 66-67.
- [9] Paggett J W, Drake E F, Krawitz A D. Residual stress and stress gradients in polycrystalline diamond compacts[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2002, 20(3): 187-194.
- [10] Krawitz A D, Winholtz R A, Drake E F, et al. Residual stresses in polycrystalline diamond compacts [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1999, 17(1/2/3): 117-122.
- [11] 徐国平, 尹志民, 黄继武, 等. X 射线衍射测试 PDC 表面残余应力的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007, 161(5): 40-43.
- [12] Xu gen, Xu guoping, Chen feng. Experimental research on the residual stress of polycrystalline diamond compacts for oil drilling[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2008(1): 92-96.

[审稿 孙明光]

Researches on Measuring Residual Stresses of Polycrystalline Diamond Compacts Using Stress-Release Method

Xu Gen¹ Chen Feng² Xu Guoping³ Xiao Jianqing²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China; 2. Testing Center, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China; 3. King-Ray New Materials Science & Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410012, China)

Abstract: It is very important to accurately test the thermal residual stresses of polycrystalline diamond compacts (PDC) for the purpose of optimizing the composition of interface and improving the performance of PDC. Based on the analysis of using the current stress-release method to test residual stresses of PDC, the stresses of four substrate thicknesses of PDC were tested. The distribution of thermal residual stresses and the relationship of it with substrate thickness were obtained. The test results agreed with those obtained by finite element analysis.

Key words: polycrystalline diamond compact; stress-release method; thermal residual stress; finite element method

欢迎订阅 2010 年《石油与装备》杂志

《石油与装备》杂志是由香港振威国际能源传媒集团出版、中国图书进出口(集团)总公司在国内发行(中图书刊编号:817Y0003,国际刊号:ISSN 1990-5947)的一本石油装备业专业性综合期刊,是《中文科技期刊数据库》全文收录期刊。主要报道石油与装备行业的新技术、新工艺、新产品和新观念;提供石油装备制造厂商与石油生产企业信息交流的平台。

杂志主要以石油石化行业的高层管理者、决策者、科技人员及物资采购人员等为重点读者对象,读者遍布全国各大油田、工程公司、科研院所和装备制造公司。

杂志为双月刊,逢双月 1 日出版,十六开彩色全铜印刷;国内外公开发行人,每期发行量 30 000 余册。

订阅专线:010-58236535 广告专线:010-58236542 编辑部专线:010-58236541

投稿邮箱:shiyouzhuangbei@yahoo.com.cn 官方网站:zazhi.cippe.net