文章编号：1000-5773(2009)01-0024-07

金刚石层厚度对复合片(PDC)残余应力的影响*

徐国平[1,2]，陈启武[2]，尹志民[1]，徐 根[1]

(1. 中南大学材料科学与工程学院，湖南长沙 410083；
2. 长沙矿冶研究院，湖南长沙 410012)

摘要：通过 X 射线应力测试和有限元分析相结合的方法，研究了金刚石层厚度对聚晶金刚石复合片(PDC)残余应力的影响，并根据实验测试结果推导出了 PDC 表面中心与边缘的应力随金刚石层厚度变化的关系式。随着金刚石层厚度由 0.5 mm 增加到 2.0 mm，PDC 表面中心的压应力从 1800 MPa 下降至 700 MPa 左右，而边缘部分的应力逐渐由压应力转为拉应力。金刚石层加厚虽然对边缘部分的最大拉应力影响不大，但使 PDC 边缘拉应力区宽度由 0.76 mm增加到了 2.85 mm。金刚石层厚度的增加还使得 PDC 边缘界面附近 y 方向的最大拉应力和位于界面边缘处的最大剪应力显著加大，这是金刚石层较厚的 PDC 界面容易产生裂纹的主要原因。

关键词：金刚石层厚度；聚晶金刚石复合片(PDC)；残余应力
中图分类号：TQ164.9 **文献标识码**：A

1 引 言

聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact，简称 PDC) 进入市场 30 年来，对世界范围内的石油、天然气钻井行业产生了重大的影响。采用 PDC 作为切削齿的钻头与硬质合金牙轮钻头相比，使用寿命长，钻进速度(ROP)快。而且结构简单，没有活动部件，在很大程度上降低了钻井成本，提高了效率，还从结构上消除了事故隐患。在地层相同的情况下，PDC 钻头与牙轮钻头相比，机械钻速可以提高 33%～100%，成本可以降低 30%～50%，单只进尺可增加 3～4 倍[1]。

随着 PDC 制造水平和质量的提高，PDC 钻头的适用地层和用量也得到不断扩大。据统计，PDC 钻头的进尺量占油田钻探总进尺的比例已由 10 年前的不足 16%增加到了目前的约 60%[2]。但在钻进硬地层和软硬交错地层时，PDC 钻头的使用仍然受到限制。这是因为 PDC 是在高温、超高压(1300～1500 ℃、5～7 GPa)条件下由金刚石微粉与硬质合金基体烧结而成的。由于金刚石与硬质合金的热膨胀系数相差太大(金刚石层的热膨胀系数为 $2.5\times10^{-6}\ K^{-1}$，而硬质合金层的为 $5.2\times10^{-6}\ K^{-1}$[3])，因此在卸压冷却过程中，复合片容易在界面产生很大的残余应力。残余应力的存在使复合片强度降低，尤其在承受较强外力或温度变化较大时，金刚石层容易破损或从基体上剥落，导致 PDC 失去切削能力而失效。

影响 PDC 残余应力的因素有很多，比如 PDC 的烧结工艺、金刚石层厚度、界面结构、后加工方式以及后期热处理等等，其中金刚石层厚度的影响尤为明显。作者采用 X 射线应力测定仪对不同金刚石层厚度的 PDC 中心及边缘分别做了应力测定。根据测试结果，运用回归分析的方法，导出了 PDC 中心与

* **收稿日期**：2008-03-12；**修回日期**：2008-07-28
基金项目：高校博士点基金项目(20070533113)
作者简介：徐国平(1962—)，男，博士研究生，高级工程师，主要从事复合超硬材料高压合成方面的研究.
E-mail：xuxiexr@163.com

边缘的应力随金刚石层厚度变化的关系式,并结合有限元分析,讨论了金刚石层厚度对 PDC 表面残余应力的影响。

2　实　验

2.1　测试样品

选择最常用的∅19 mm×13 mm 聚晶金刚石复合片,金刚石层厚度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm,界面为平界面,金刚石平均粒度为 28 μm。

2.2　X 射线衍射(XRD)应力测量

2.2.1　衍射晶面的确定

实验所采用的应力测试设备为 X-350A 型 X 射线应力检测仪(见图 1),靶材是铬靶,其 2θ 角的扫描范围为 120°～170°。为确定合适的衍射晶面,先采用德国 Bruck 公司的 D8-Advance X 射线衍射仪,用 Cu 靶 K_α 辐射源对 PDC 样品进行照射,所得图谱见图 2。

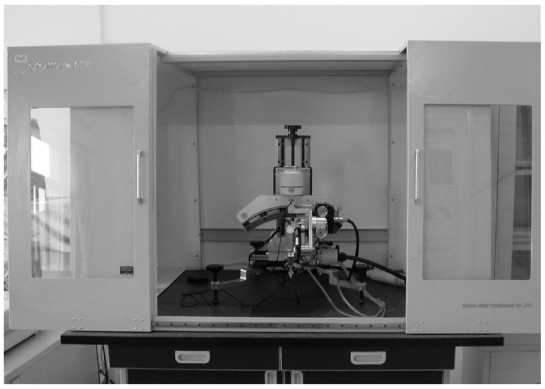


图 1　X-350A 型 X 射线应力检测仪

Fig. 1　X-350A X-ray diffraction residual stress instrument

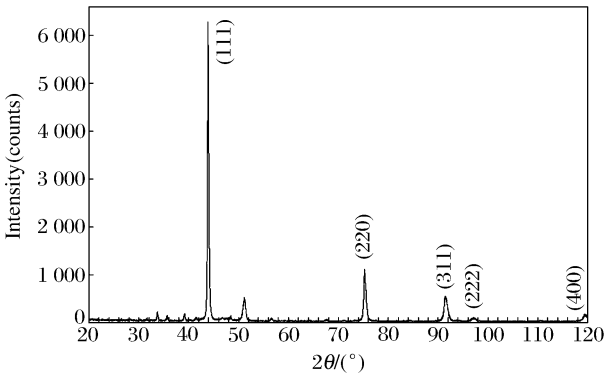


图 2　PDC 金刚石层的 X 射线衍射图谱

Fig. 2　The diffraction diagram of the diamond layer of PDC

由布拉格方程可知,当 $\Delta\theta$ 一定时,采用高 θ 角的衍射线,则面间距误差 $\Delta d/d$ 将较小。因此,为保证应力测试精度,测量时应尽量选择 θ 角大的衍射面。根据图 2,同时考虑到实验中所用 X 射线应力检测仪的 2θ 角扫描范围,本实验选择了(220)面作为衍射晶面。

采用铜靶时,(220)面衍射峰对应的 2θ 角约为 75.2°(见图 2),根据布拉格方程可求得用铬靶时(220)晶面衍射峰所对应的 θ 角

$$\sin\theta_{Cr}=\lambda_{Cr}/\lambda_{Cu}\cdot\sin\theta_{Cu}=2.290/1.541\cdot\sin37.6^\circ=0.9067,\ \theta_{Cr}=65.053^\circ$$

因此,测试时选择 126°～134°作为 2θ 角的扫描范围。

2.2.2　X 射线应力测定条件

应力测试采用侧倾固定 ψ 法,ψ 角取 0°、25°、35°和 45°,其余测定条件见表 1。

表 1　X 射线应力测定条件

Table 1　Parameters used for the measurement of stress

Radiation	Scanning range of 2θ/(°)	Scanning rate of 2θ/(°)	Counting time/(s)	Voltage of tube/(kV)	Current of tube/(mA)	Method for positioning peak	Diameter of collimator tube/(mm)
Cr K_α	126～134	0.10	2.00	25	8	Cross-correlation method	2

2.2.3　应力常数的计算

XRD 测应力的基本公式[4]为

$$\sigma_\varphi = \frac{-E}{2(1+\nu)}\cot\theta_0 \frac{\pi}{180}\frac{\partial(2\theta_\psi)}{\partial(\sin^2\psi)}$$

式中：$\frac{-E}{2(1+\nu)}\cot\theta_0 \frac{\pi}{180}$ 为应力常数，定义为 K。

对于实验所测 PDC，弹性模量 $E=890$ GPa，$\nu=0.07$（数据取自文献[3]）；θ_0 为无应力下的布拉格角（ψ 角为零时的 θ 角），取实测值为 65.069°，根据以上数据可求得 $K=-3\,374$ MPa/°。

2.2.4 *应力值计算*

XRD 测应力的基本公式实质为一直线方程，斜率就是 $\partial(2\theta_\psi)/\partial(\sin^2\psi)$，可用 M 表示。于是，应力公式即可写成

$$\sigma_\varphi = K \cdot M$$

在实验中只要测量出各个 ψ 角下的衍射线位移，并以 2θ 为纵坐标，$\sin^2\psi$ 为横坐标，利用最小二乘法计算和绘制出最贴近各实验值的直线，然后便可由直线斜率 M 得出 σ_φ 值。对于本实验所采用的X-350A型 X 射线应力检测仪，这一过程可由仪器所配计算机自动完成，并给出最终应力值和测量偏差。

2.3 有限元分析

为验证测试数据的准确性和合理性，同时了解金刚石层厚度对 PDC 垂直方向的应力及剪应力的影响，笔者对所测不同金刚石层厚度的 PDC 进行了有限元分析。分析中采用的材料物理力学性能参数见表 2[3]。金刚石层和硬质合金层的单元格尺寸分别为 0.1 mm×0.1 mm 和 0.2 mm×0.2 mm。设 1 000 ℃为应力松弛温度[5]，在这一温度以上 PDC 的残余应力可忽略不计，室温为 20 ℃。由于 PDC 的轴对称性，本工作有限元模拟的均是 PDC 金刚石层右半部分的应力情况（见图 3）。通过有限元分析软件，可得到金刚石层的残余应力二维分布云图，以及 PDC 金刚石层表面的残余应力沿径向的变化曲线。在本文中的残余应力二维分布云图中，上半部分显示的是 PDC 金刚石层右半部分的应力分布，通过不同的颜色来表示应力的大小和性质。下半部分是应力色标，标明了各种颜色代表的应力值。

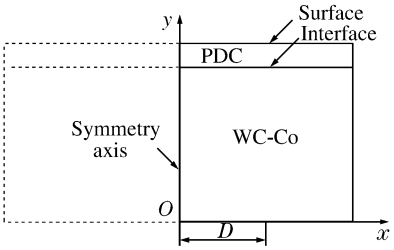


图 3 PDC 有限元分析的模型

Fig. 3 The FEA model of the PDC

表 2 PDC 材料物理力学性能参数

Table 2 Material properties used in FEA models

Material	Thermal expansion coefficient/(10^{-6}K^{-1})	Young's modulus/(GPa)	Poison's ratio
Diamond layer	2.5	890	0.07
Substrate (WC+13%Co)	5.2	579	0.22

3 结果与讨论

对于金刚石层厚分别为 0.5、1.0、1.5 、2.0 mm 的 PDC，每片分别测其中心与边缘两个位置的残余应力，结果见表 3 和图 4。由图 4 可见，随着金刚石层厚度的增加，PDC 金刚石层表面中心的压应力下降，边缘部分的应力逐渐由压应力转为拉应力。

图 4 显示的 PDC 表面中心及边缘的应力与金刚石层厚度的关系近似为两条直线，利用最小二乘法进行回归分析，可分别求得两直线的方程。

（1）PDC 表面中心应力 $\sigma_{\varphi,C}$（单位为 MPa）与金刚石层厚度 t（单位为 mm）的关系式

$$\sigma_{\varphi,C} = 758t - 2\,294.5, \qquad \text{相关系数 } r=0.990$$

（2）PDC 表面边缘应力 $\sigma_{\varphi,E}$（单位为 MPa）与金刚石层厚度 t（单位为 mm）的关系式

$$\sigma_{\varphi,E} = 253.8t - 366, \qquad \text{相关系数 } r = 0.972$$

两式的相关系数均接近于 1,说明统计得到的直线公式与测定值间的线性相关性很好,公式使用的可靠性较大。

表 3　不同金刚石层厚度的 PDC 表面残余应力

Table 3　The stresses on the PDC surface with different thickness of diamond layer

Thickness of diamond layer/(mm)	Residual stress/(MPa)	
	Center	Edge
0.5	−1 851±202	−227±144
1.0	−1 617±206	−155±258
1.5	−1 190±170	64±204
2.0	−730±123	123±9

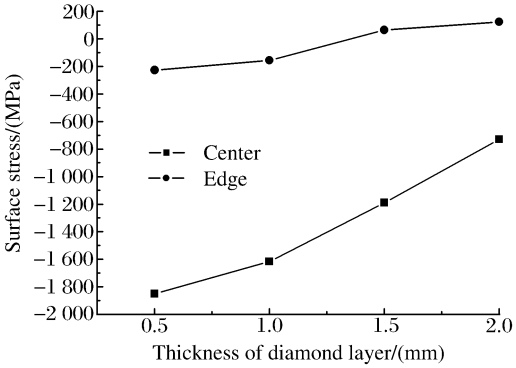
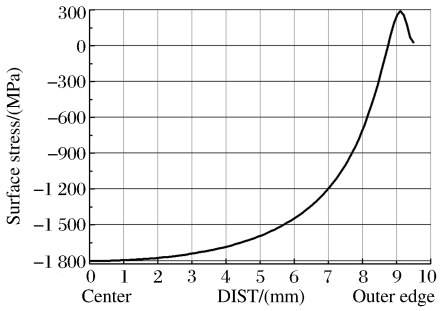


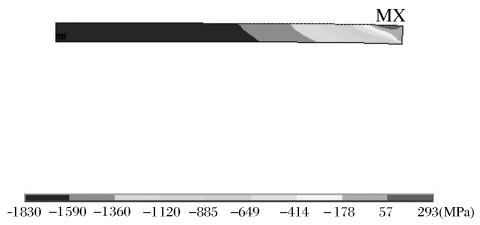
图 4　PDC 表面应力与金刚石层厚度的关系

Fig. 4　Stress on the surface as a function of the thickness of diamond layer

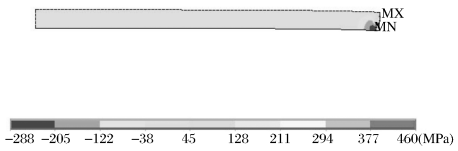
为进一步了解 PDC 应力随金刚石层厚度的变化规律,对这 4 种 PDC 进行了有限元分析,结果示于图 5～图 8。由图可见,随金刚石层厚度由 0.5 mm 增加到 2.0 mm,PDC 表面中心的压应力从 1 800 MPa下降至 700 MPa 左右(与测试结果相近);金刚石层加厚虽然对边缘部分的最大拉应力(约 290 MPa)影响不大,但使 PDC 边缘拉应力区宽度由约 0.76 mm 增加到了 2.85 mm。正是因为拉应力区变宽,才使得 XRD 测出了 PDC 边缘部分的拉应力。y 方向的应力云图显示,随着金刚石层加厚,PDC 边缘界面附近 y 方向的最大拉应力由 460 MPa 增加到了 856 MPa,位于界面边缘处的最大剪应力则从 348 MPa 增加到 469 MPa(图 5(d)、图 6(d)、图 7(d)、图 8(d)),这应该是金刚石层较厚的 PDC 界面容易产生裂纹或脱层的主要原因。



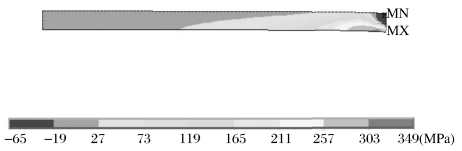
(a) Residual stress gradient on the diamond surface along radical direction



(b) Stress distribution along horizontal direction



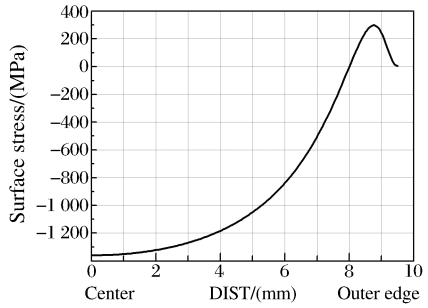
(c) Stress distribution along vertical direction



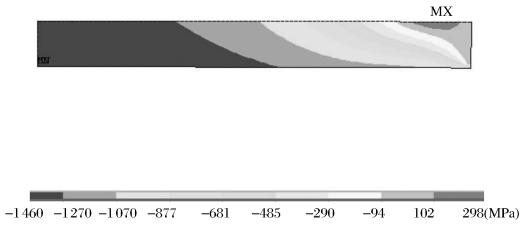
(d) Shear stress distribution

图 5　金刚石层厚 0.5 mm PDC 应力分布图

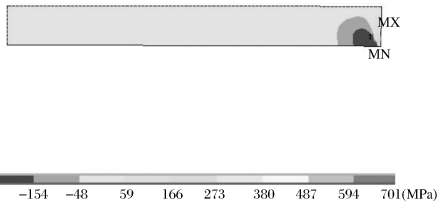
Fig. 5　Stress distribution map of the diamond layer with the thickness of 0.5 mm



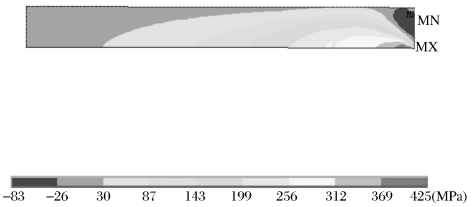
(a) Residual stress gradient on the diamond surface along radical direction



(b) Stress distribution along horizontal direction



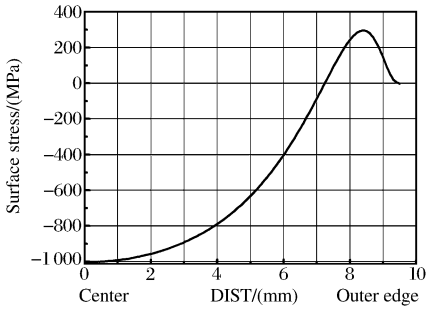
(c) Stress distribution along vertical direction



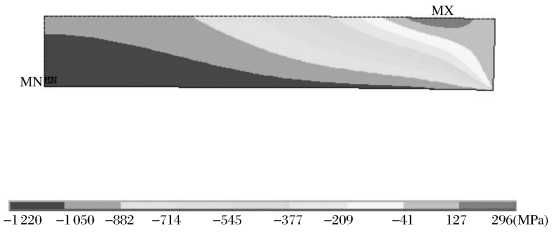
(d) Shear stress distribution

图 6 金刚石层厚 1.0 mm PDC 应力分布图

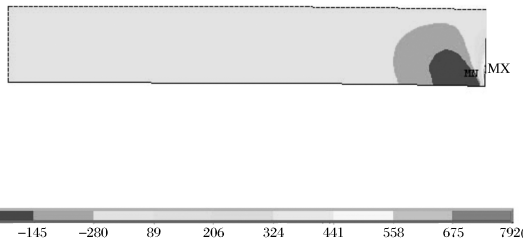
Fig. 6 Stress distribution map of the diamond layer with the thickness of 1.0 mm



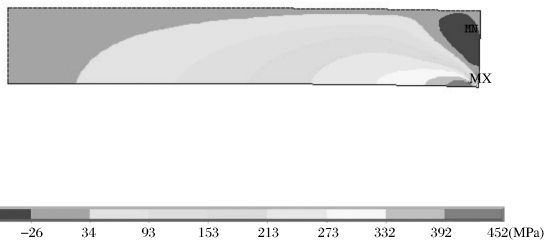
(a) Residual stress gradient on the diamond surface along radical direction



(b) Stress distribution along horizontal direction



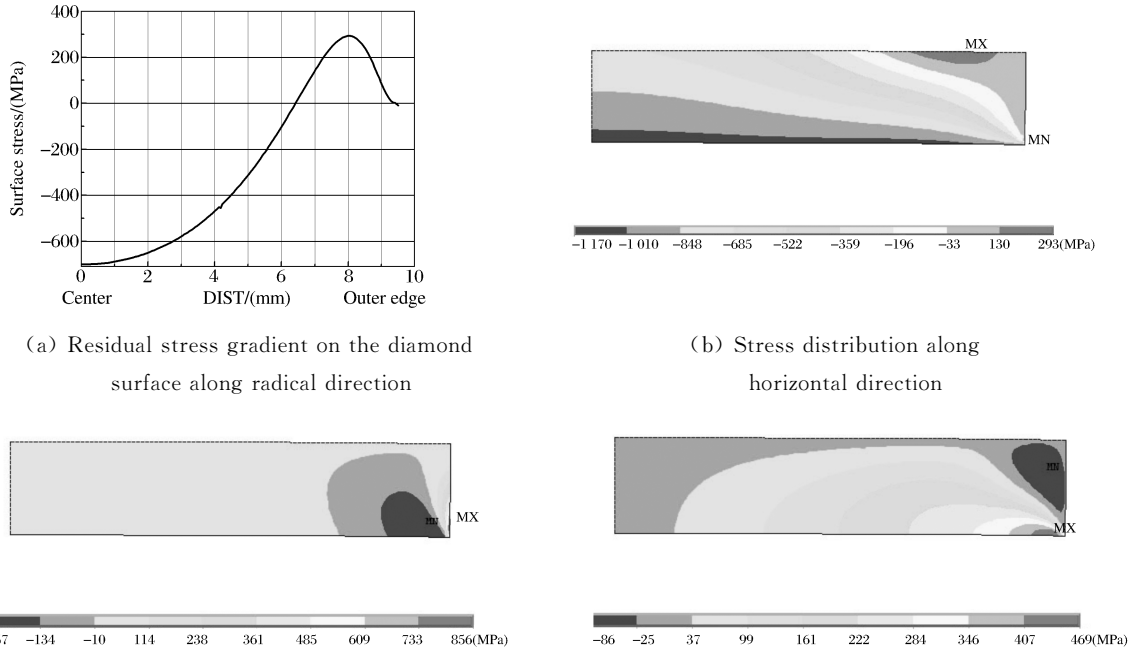
(c) Stress distribution along vertical direction



(d) Shear stress distribution

图 7 金刚石层厚 1.5 mm PDC 应力分布图

Fig. 7 Stress distribution map of the diamond layer with the thickness of 1.5 mm



(a) Residual stress gradient on the diamond surface along radical direction

(b) Stress distribution along horizontal direction

(c) Stress distribution along vertical direction

(d) Shear stress distribution

图 8　金刚石层厚 2.0 mm PDC 应力分布图

Fig. 8　Stress distribution map of the diamond layer with the thickness of 2.0 mm

对于 PDC 金刚石层加厚带来的应力变化,可以用 Lin Tze-Pin 的应变片法测试 PDC 残余应力的结果来解释。应变片法是将应变片粘贴于 PDC 的金刚石层表面中心,然后依次磨掉不同厚度的硬质合金基体,应变片记录下基体厚度改变时 PDC 金刚石层表面的应变量。假设所有硬质合金基体被去除后,金刚石层是无应力的,则将不同基体厚度时测得的应变量减去无基体时测得的应变量,即可得出 PDC 金刚石层表面残余应力与基体厚度的关系。实验得到的 PDC 金刚石层表面残余应力与基体厚度的关系如图 9 所示[5]。当基体被逐渐磨薄时,金刚石层开始向外膨胀,释放压缩应力,使得其表面的压应力下降。另一方面,当相对坚硬的合金基体被减薄后,PDC 整体抗弯刚度减小,会使 PDC 朝金刚石层方向产生轻微的弯曲,造成金刚石层表面处于张应力状态。Lin Tze-Pin 通过实验得出的结论是,PDC 硬质合金层的厚度与金刚石层的厚度比值对 PDC 的径向应力有很大影响,这一比值越大,PDC 的径向压缩应力越大。我们在实验中采用的 PDC 的总高度是一定的,金刚石层加厚一方面使得硬质合金基体变薄,另一方面使硬质合金层厚度与金刚石层厚度的比值成倍减小,从而造成 PDC 金刚石层表面中心的压应力明显下降。同时,金刚石层产生的弯曲则使得其边缘部分的拉应力区变宽,PDC 边缘 y 方向的最大拉应力增大。

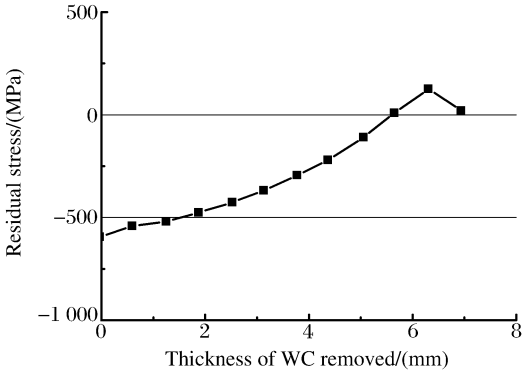


图 9　∅13 mm PDC 金刚石层表面中部的径向应力与基体去除厚度的关系

Fig. 9　Radial stress on the diamond surface at the center as a function of the thickness of the carbide backing removed

Bertagnolli 等人的研究表明,金刚石层表面具有较大压缩应力的 PDC 在达到金刚石抗拉极限前能够承受更大的载荷[6]。因此,金刚石层薄的 PDC 抗冲击性应该更好,但较薄的金刚石层会影响 PDC 的使用寿命,故 PDC 金刚石层厚度的选择应有一个最佳值。

4 结 论

测试结果和 FEA 分析结果都表明，随着金刚石层厚度的增加，PDC 表面中心的压应力下降；金刚石层变厚虽然对边缘部分的最大拉应力影响不大，但使 PDC 边缘拉应力区变宽；同时，由于金刚石层加厚，PDC 边缘界面附近 y 方向的最大拉应力和界面最大剪应力会显著增加，从而使得界面容易产生裂纹。

References:

[1] Ma B S. The New Development and Application of PDC Drilling Bits [J]. Global Geology, 1996, 15(4): 94-97. (in Chinese)
马保松. PDC 钻头的新发展及应用 [J]. 世界地质, 1996, 15(4): 94-97.

[2] Scott D E. The History and Impact of Synthetic Diamond Cutters and Diamond Enhanced Inserts on the Oil and Gas Industry [A]//Proc 1st International Industrial Diamond Conference [C]. Barcelona, Spain, 2005: 1-21.

[3] Paggett J W, Drake E F, Krawitz A D, et al. Residual Stress and Stress Gradients in Polycrystalline Diamond Compacts [J]. Inter J Refrac Metals & Hard Mater, 2002, 20: 187.

[4] Zhou Y, Wu G F. X-Ray Diffraction and Electron Microscopy in Materials [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998. (in Chinese)
周 玉, 武高辉. 材料分析测试技术——材料 X 射线衍射与电子显微分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.

[5] Lin T P, Hood M, Cooper G A, et al. Residual Stress in Polycrystalline Diamond Compacts [J]. J Am Ceram Soc, 1994, 77(6): 1562-1568.

[6] Bertagnolli K E, Cooley C H. Polycrystalline Diamond Compact Design Methodology Utilizing Strain Energy Capacity [A]//Proc 23rd Energy Sources Conference and Exhibition [C]. Houston, USA, 2001: 238-245.

The Effect of Thickness of Diamond Layer on Residual Stresses in Polycrystalline Diamond Compact

XU Guo-Ping[1,2], CHEN Qi-Wu[2], YIN Zhi-Min[1], XU Gen[1]

(1. *School of Materials Science & Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *China*;
2. *Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha* 410012, *China*)

Abstract: The effect of thickness of diamond layer on the residual stresses in polycrystalline diamond compact(PDC) was investigated through XRD measurement and finite element analysis(FEA) method. The results show that as the thickness of the diamond layer increases from 0.5 mm to 2.0 mm, the residual compressive stress on the surface of the diamond layer at the center decreases from 1800 MPa to about 700 MPa, but the stress on the edge changes gradually from compression into tension, and the tensile stress region on the edge of the diamond layer becomes wider. At the same time, the vertical tensile stress on outer edge of the cutter and shear stress near the interface increase significantly. These two stresses are the main factors that cause cracks near the interface of the PDC with a thicker diamond layer. Based on the measured results, the equations of the stresses at the centers and on the edges of the PDC as a function of the thicknesses of diamond layers have been deduced.

Key words: diamond thickness; polycrystalline diamond compact(PDC); residual stress