

钻采业用复合片(PDC)和聚晶(PCD)的最新进展

方啸虎^{1,2}, 刘瑞平¹, 温简杰²

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 上海琦实超硬材料有限公司, 上海 201108)

摘要: 金刚石复合片(PDC)和聚晶(PCD)是金刚石产品的重要分支。在分析国内外资料基础上, 提出提高其产品质量的主要方法, 采取各种措施完善 PDC 性能, 探讨了提高钻采业用复合材料工具(PDC、PCD、DEI、TSP)质量的有效途径及前景。

关键词: 金刚石复合片(PDC); 聚晶金刚石(PCD); 钻采业; 提高质量

中图分类号: P634.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-7428(2009)S1-0009-08

Develop Chinese Polycrystalline Diamond Compacts (PDC)、Polycrystalline Diamond (PCD), Serve for the Drilling Industry

FANG Xiao-hu^{1,2}, LIU Rui-ping¹, WEN Jian-jie²

(1. China University of Mining & Technology of Beijing, Beijing 100083, China;

2. Shanghai GEMS Superabrasives Co., Ltd, Shanghai 201108, China)

Abstract: Polycrystalline Diamond Compacts (PDC)、Polycrystalline Diamond (PCD) are the important branches of diamond products. In this paper, The data based on the reports home and abroad were analyzed, the main methods of improving the quality of products were put forward, and various measures were adopted to improve the function of PDC, the effective approach and prospect of raising the quality of compound material implement (PDC, PCD, DEI, TSP) in the drilling industry were discussed.

Key words: polycrystalline diamond compacts (PDC); polycrystalline diamond (PCD); drilling industry; improving quality

1 国内外金刚石复合片(PDC)、聚晶(PCD)的研制情况

金刚石硬度高、耐磨性好, 因此被视为理想的钻进材料。但由于其粒度非常细小, 满足不了使用的要求, 因此人们或者是把小颗粒金刚石聚合在一起制成 PCD (Polycrystalline Diamond), 或者在前端放置金刚石, 其后端放置硬质合金, 增强金刚石的韧性, 从而制备成 PDC (Polycrystalline Diamond Cutter)。

1971 年 G. E. 首先发明了由碳化钨合金支承的聚晶金刚石切削刃, 后来把用于石油钻井的称为 Compax (图 1a), 1976 年又推出 Stratapax, 这是一种具有更长的支承体, 而且更耐冲击的 PDC。1981 年又推出热稳定聚晶 TSP (Thermally Stable Poly-

crystalline), Geoset 用于硬岩地质钻进。稍后 De Beers (即现元素六公司) 于 1981 年进入 PDC 市场, 推出 Syndrill (图 1b) 和 Syndax 3 (图 1c)。1986 年推出 $\Phi 50\text{mm}$ PDC, 可用于超大型切削刃。美国合成公司 (US Synthetic) 于 1993 年成为第一个取得 ISO 认证的 PDC 制造厂家, 1997 年即成为 PDC 领头羊。1986 年梅加金刚石公司 (Mega-diamond) 推出金刚石强化柱齿 DEI (Diamond Enhanced Inserts) 用于三牙轮钻头和冲击钻头的硬岩钻进。这样金刚石复合材料工具 (PDC, TSP, DEI) 逐渐在油田与矿山获得广泛应用。

我国在 20 世纪 70 年代初就相继研究了 Ni-Si、Ni-Si-B 系列的单粒和多粒生产工艺、特别是多粒生产工艺技术为我国地质钻探的聚晶钻头和

收稿日期: 2009-08-30

作者简介: 方啸虎 (1939 -), 男 (汉族), 安徽黄山人, 上海琦实超硬材料有限公司教授级高级工程师, 从事人造金刚石等研磨材料的研究工作, 1332915587。

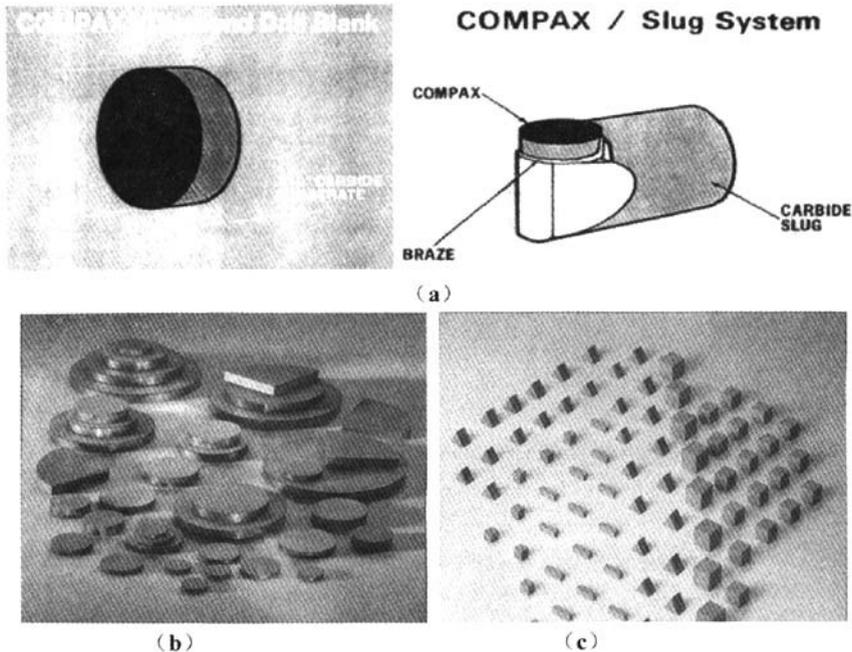


图1 国外金刚石聚晶和复合片样品:

(a) G. E. 公司生产的 Compax; (b) DE BEERS 公司的 Syndrill 复合片; (c) DE BEERS 公司的热稳定聚晶 Syndax3

钻头扩孔器的补强起到了积极的作用。后来 PDC 复合片在郑州磨料所、中国科学院物理研究所、桂林矿产地质研究院、北京人工晶体研究所、北京探矿工具厂等单位得到了研究和发 展。长沙矿山院和桂林金刚石总厂是最早从事金刚石强化柱齿与耐热聚晶研究的单位, 这些产品后来也得到了推广。特别值得一提的是, 郑州三磨所于 1986 年接受机械委科技司的攻关项目, 于 1987 年研制成功 PDC 并逐步进入钻井市场, 以及郑州磨料所合资的郑州新亚复合超硬材料有限公司 1992 年建成投产后, 对 PDC 的性能的提高发挥了很大的作用。与此同时深圳兆丰达公司和江汉钻头厂分别从美国的合成公司、美国的凤凰晶体公司引进了制造 PDC 的设备与技术, 随后从新亚、兆丰达、江汉钻头厂技术扩散而形成的 PDC 生产企业近二十余家, 这里包括如四方公司、上海琦实等都发展的很快, 充分满足了我国石油钻井业的要求, 同时进入采煤工业, 并开始少量出口国外。据 2007 年资料显示, 我国的 PCD 在西北某地就有七到八亿产值的产品投放市场, 进入煤炭工业和石油工业系统, 为我国的能源发展起到了积极作用。图 2 为国内一些厂家生产的

万方数据

聚晶金刚石及复合片。

2 金刚石复合片 (PDC)、聚晶 (PCD) 在钻采业中的应用

自 20 世纪 70 年代初 GE 公司成功制造聚晶金刚石复合片 Compax 以来, 引起了 PCD 和 PDC 复合材料的研究热潮, 目前金刚石聚晶在地质、探矿、石油钻探工具方面得到了广泛应用, PDC 钻头目前广泛应用于大井段软地层中高速钻进、定向井及丛式井配合井底动力钻进、在易斜井段钻直井、高温钻井、钻深井、沙漠及海洋钻井、平衡及超平衡钻井等。

2.1 在石油、煤田中的应用

我国 PDC 及其钻头制造业虽然起步较晚, 但从九十年代中期开始进步十分迅速, PDC 的国产化率已达 80% 以上, 其性能指标已能满足钻进软-中硬地层钻头的要求, 而 PDC 钻头的国产化率已接近 100%。由于国产 PDC 及其钻头低廉的价格, 仅相当国际市场同类产品的 1/3 - 1/4, 因此 PDC 钻头在大庆油田、胜利油田、辽河油田、吉林油田、及中原油田、大港油田等地质条件相对较

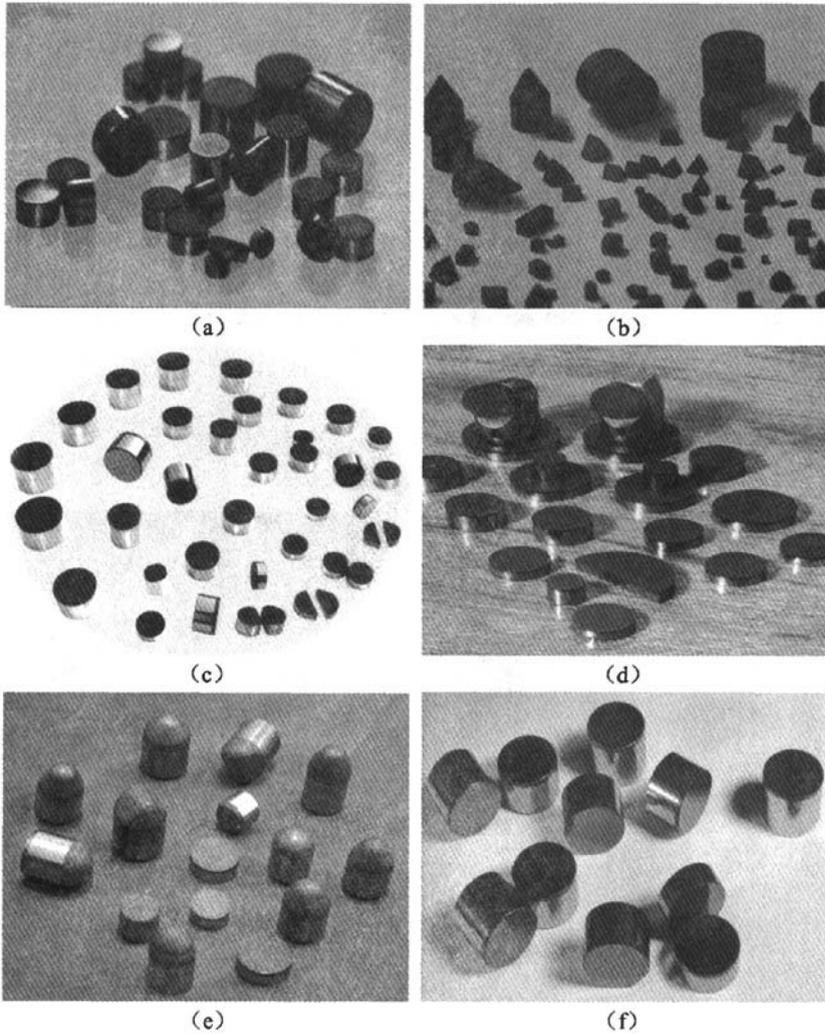


图2 国内一些厂家生产的聚晶金刚石及复合片

- (a) 胜利油田钻井工艺研究院 PDC 产品; (b) 胜利油田钻井工艺研究院 TSP 产品;
 (c) 河南亚龙金刚石公司 PDC 产品; (d) 江钻股份公司 PDC 产品;
 (e) 湖南飞碟新材料公司; (f) 湖南金瑞公司 PDC 产品

好的油田得到了大量应用与普及;新疆油田及四川天然气田等地质条件相对复杂,井位较深或风险性较大的地区,虽然 PDC 钻头也已实现了国产化,但由于国产 PDC 的性能及其可靠性相对国外产品而言还仍存在一定的差距,故仍需要采用部分价格昂贵的进口 PDC。图3为聚晶金刚石石油钻头和金刚石强化柱齿冲击钻头。

2.2 在有色矿山中的应用

我国 PDC 及其钻头不仅在石油、煤田中得到

万方数据

广泛的应用,同时在有色金属矿山的采掘中也得到应用。图4为作者在600m深的采掘现场所摄的照片,该矿山最深采掘深度已达千米,矿山现代化采掘已经达到世界先进水平。据矿山工程技术人员介绍:采用了先进的技术,井下不再有女工,全程流水线管理,每个掌子面工作人员仅2~3人,效率和效益均提高50%以上。为国家提前实践并实现现代化采掘作出了贡献!

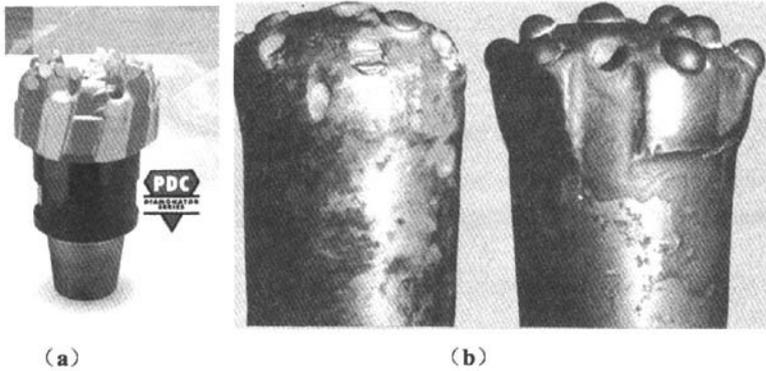


图3 PDC 钻头

(a) PDC 石油钻头；(b) 金刚石强化柱齿冲击钻头

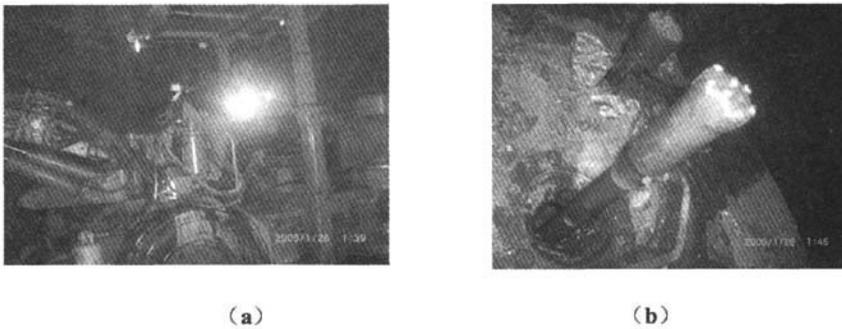


图4 600m 井下现场采掘机和钻头

(a) 现场采掘机；(b) 现场采掘用的钻头

3 提高金刚石复合片（PDC）、聚晶（PCD）质量的主要方法

3.1 采用合理设备及腔体组装结构

采用合理的设备和设计合理的合成腔体与组装结构是保证复合材料烧结的重要条件。目前，国内大多采用铰链式六面顶压机作为主要生产设备。表1为采用不同规格六面顶压机生产的不同规格产品。图4为几种典型的组装结构设计，从图5可见，铰链式六面顶压机在合成超硬复合材料时组装结构设计有下列特点^[1-6]：①采用叶蜡石做传压、绝缘、保温介质，也可使用 ZrO_2 、 $C_6Cl_4 + ZrO_2$ ；②采用导电钢圈；③使用石墨碳管做为发热体；④采用NaCl管或 $NaCl + ZrO_2$ 做均衡压力介质；⑤采用Mo、Ta、Zr箔做为屏蔽系统。

表1 不同规格六面顶压机生产的不同性能产品

产品类型	液压缸直径/mm	单缸压力/kN	产品尺寸/mm
切削刀具 PDC	650	6 × 32000	Φ50 复合片
石油钻具 PDC	560	6 × 25000	Φ25 ~ 28 球齿
石油钻具 PDC	500	6 × 20000	Φ25 复合片
石油钻具 PDC			
煤田钻具 PDC	460	6 × 18000	Φ19 复合片
煤田钻具 PDC	420	6 × 14000	Φ14 复合片

3.2 采用最佳的粘接剂和组分配比

选用不同的粘接剂及控制粘接剂的加入量都会获得不同性能的金金刚石聚晶。其设计思路一般基于两个方面：第一，选择的粘接剂应与金刚石有一定粘结作用；第二，选择的粘接剂在高温高压下生成

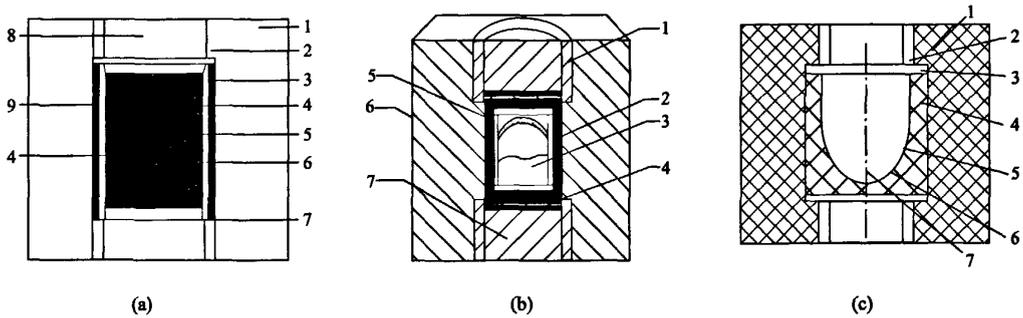


图5 合成复合材料的各种组装结构设计

- (a) 国产6×13MN 六面顶压机合成Φ19×13PDC 组装结构: 1. 叶腊石块; 2. 导电钢圈; 3. 碳管; 4. 屏蔽材料; 5. 金刚石微粉; 6. 硬质基体; 7. 金属导电片; 8. 叶腊石堵头; 9. 盐管; (b) 拉杆式六面顶合成金刚石强化柱齿组装结构: 1. 导电钢圈; 2. 石墨管; 3. 强化柱齿; 4. Ti 片; 5. NaCl 管; 6. 叶腊石传压介质; 7. 叶腊石 (c) 国产六面顶压机合成金刚石强化柱齿组装结构: 1. 叶腊石; 2. 导电钢圈; 3. 碳片; 4. 碳管; 5. 锆箔; 6. 金刚石; 7. WC 基体

的物相自身应具有良好的耐磨性。根据上述原则, 最终选定两个被大部分厂家接受的粘结相体系: Ni-Si-B 与 Ti-Si-B 体系。80 年代中期以前, 国内大部分生产厂家采用 Ni-Si-B 体系。80 年代中期以后, 普遍选用 Ti-Si-B 体系。事实证明, 采用 Ni-Si-B 与 Ti-Si-B 体系作为粘结相制造 PCD, 其产品的耐磨性、耐热性、抗冲击性均是优良的。Ti-Si-B 体系从总体性能来说更优良一些。

另外粘结剂加入量对聚晶性能也有比较大的影响, 较低的加入量虽然可以获得磨耗比较高的聚晶, 但强度较低; 粘结剂加入量增加, 金刚石聚晶的磨耗比下降。汤咏舫等^[7]通过对 Si-Ti-B、Si-Ni-B、Si-(Ni-Ti)-B 三种金刚石聚晶粘结剂进行了对比性研究发现随着粘结剂的增加, 抗压强度先增加后降低, 而且用 Si-(Ni-Ti)-B 作粘结剂, 性能优于 Si-Ti-B 和 Si-Ni-B 粘结剂, 且加入量以 8%~10% (质量分数) 为最佳; 采用 Si-(Ni-Ti)-B 作粘结剂, 金刚石聚晶中金刚石颗粒与粘结剂的界面结合强度高于金刚石颗粒的强度, 这样可大大降低金刚石聚晶使用过程中的“崩块”剥落现象, 很大程度上提高了聚晶的使用性能。

乌克兰科学院超硬材料研究院采用两面顶四砧研制热稳定 PCD 复合片时, 在 8~9 GPa, 1500~1800 °C 条件下, 在 Φ30mm 腔体中合成 Φ13.5mm×3.5mm 三层结构复合片。金刚石粒度 30~40 μm, 硬质合金为 WC/15mass% Co, 金刚石表层放置 Si 片, 烧结合成后表层为金刚石/SiC 结构, 即金刚石分布在 SiC 胎体中。中间层为标准 PCD 层,

底层有 40 μm 厚的含 Co8%~12% 的 Co 粘结层。在中硬的磨蚀性白云岩/粉砂岩, 砂岩/石灰岩层中对比钻进表明: 该钻头进尺为普通 PCD 钻头的 1.7~1.8 倍, 是硬质合金钻头的 10~11 倍, 钻速比硬质合金钻头提高 15%~20%^[5]。

日本国立先进工业科技研究院在两面顶压机上, 在压力 7.7GPa, 温度 2300 °C, 保压 30min 条件下, 用 MgCO₃ 做粘结剂合成 Φ11mm×1.2mmTSP 复合片, 然后固定在硬质合金衬底上, 做成取心钻头。检测与试验表明: MgCO₃ 均匀分布在复合体中, 并实现 D/D 金刚石键合, 钻进花岗岩试验, 其耐磨性优于普通 PCD 钻头, 但强度与韧性略低, 有待进一步改进^[4]。

3.3 消除残余应力, 提高金刚石与 WC/Co 衬底结合强度

在高温高压烧结过程中, 由于聚晶金刚石层与硬质合金基体的热膨胀系数 (WC/Co 为 6×10^{-6} K, PCD 为 2.36×10^{-6} K) 及弹性模量 (WC/Co 为 517~655 GPa, PCD 为 827~896 GPa) 等物性参数相差较大, 所以卸压与冷却的反应速率不同, 不可避免地在界面处产生严重的残余应力, 导致聚晶金刚石与硬质合金基体的附着力减弱、金刚石层抗冲击性能差、易脱落、钻头失效等^[8-9]。为了改善复合片的性能, 提高其抗冲击韧性, 可以在 PCD 层和硬质合金基体之间采用功能梯度过渡层, 来改善两相界面的结合, 或者采用非平面连接技术来改善界面的结合强度。

3.3.1 消除残余应力, 用结合剂解决衬底强度

和普通层合复合材料相比, 功能梯度材料大大

降低了残余应力,改善了应力分布,提高了材料的力学性能和强度。因此可以在PCD层和硬质合金基体之间采用功能梯度过渡层来改善两相界面的结合,即在柱齿式或平面PCD上采用三层以上过渡层技术(见图6),从工作表面由表及里,由100%PCD层逐渐过渡到100%的WC/CO硬质合金。这样由表及里使弹性模量梯度和热膨胀梯度逐渐均匀变化;使残余应力与剥落现象减少,冲击韧性提高。

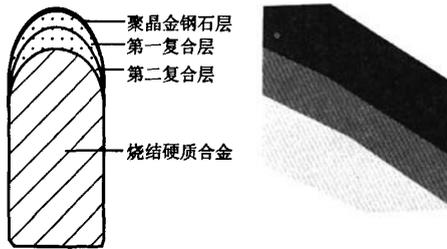


图6 过渡层结构示意图

曹品鲁等^[10]利用有限元方法对梯度结构聚晶金刚石复合片在制造过程中产生的残余热应力进行了计算,并分析了梯度组成分布指数及梯度层层数对热应力的影响。优化结果表明,分布指数最佳值为1.2,功能梯度层数为6层;与普通双层结构聚晶金刚石复合片相比,轴向拉应力由986mPa降到了323mPa,剪应力由722mPa降到454mPa;此外还改善了界面处的应力分布,大大提高了界面的结合强度。

3.3.2 消除残余应力,用不同的机械结合面解决衬底强度

非平面连接是指硬质合金基体与聚晶金刚石层间采用台阶形、槽形或简单凸凹形等几何形式联结。如Dennis^[11]发明了一种沟槽状的复合片;Flood^[12]介绍了一种锯齿形界面的复合片,锯齿有多种表现形式,比如是环形的或直线的,其中锯齿的数目也是可变的;Hardy^[13]等建议把锯齿或沟槽做成同心圆、螺旋或间断的圆弧等形状。这种措施在一定程度上提高了复合片的机械结合强度,改善了其使用性能。

美国合成公司(US. Synthetic Co)通过有限元模型分析及应变测量表明:Φ13×8PDC(Φ13×8/0.762mm)复合片残余应力分布及改进应力分布模型(见图7a、b、c)金刚石层为压应力(兰色),硬质合金衬底为拉应力(红色)(见图7a),平面

界面PDC最大残余拉应力在红色处(见图7b),采用非平面界面环形箍结构(见图7c),有利于控制与消除残余应力^[6,14]。

根据上述分析,对硬质合金衬底采用了非平面界面设计,明显改善了对残余应力的控制及PDC的性能。硬质合金衬底不同形式非平面界面设计见图8。我国亚尤公司在PDC生产中,采用一系列非平面界面设计,如T型是金刚石与硬质合金为网格状槽型结合界面;W型是波浪形直槽结合界面;O型为一字形宽凹槽结合界面;F型为放射状槽型结合界面;B型为包齿波浪型直槽结合界面。

3.4 改进设计与材料,提高冲击性能

Smith Megadiamond(史密斯梅加金刚石公司)和Sandvik矿山与建筑部针对硬岩冲击钻进与牙轮钻进边圈球齿,从结构设计到材料选用,提高了硬岩球齿冲击性能。将Φ18mm球齿的球形半径由10mm增大到13mm,使球头拉伸应力减少15.7%,在球齿表面PCD与WC/Co衬底之间设计了“功能梯度层”,减少了PCD的分层与剥落,并进一步优化层面外形设计,使PCD最厚层不处于球形顶点,而是偏离轴心,移至边圈球齿的理想接触点,这防止了裂缝产生,提高了球齿寿命^[15]。相对于PCD-A1,新设计的PCD-A2中金刚石的粒度没变,但添加的Co增加到30wt%,这样虽然牺牲了硬度与耐磨性,但是显著提高球齿的抗弯强度与耐冲击性(见表2),平均拉弯强度提高6%。

表2 PCD-A1,PCD-A2材料的性能对比

材料	硬度/(kg·mm ⁻²)	抗弯强度/MPa	耐冲击性/J	耐磨性
PCD-A1	3300~3400	1719±97	50.2	1.03×10 ⁶
PCD-A2	2650~2750	1827±234	69.2	0.39×10 ⁶

另外,早期复合片的PCD层厚度仅为0.762mm,后期标准产品PCD厚度增加到1mm,采用非平面界面设计后,PCD厚度增加到1.05~2.4mm,个别达4.0mm,这大大提高复合材料的耐磨性与使用寿命。日进公司采用30μm金刚石粒度为主的多粒度金刚石微粉技术,使耐磨性提高3倍。冲击韧性提高50%。休斯公司专利使用单倒角和多倒角复合片结构,使钻进时的耐磨性提高100%,减少刃部的崩裂现象,同时显著提高钻头耐用性(钻时)及进尺^[16]。

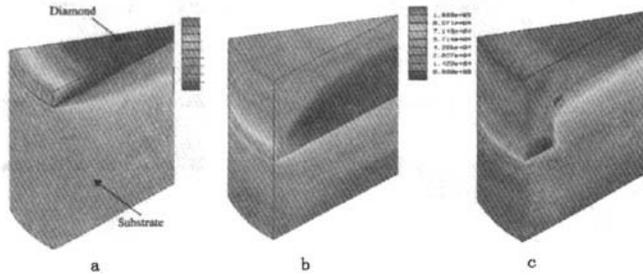


图7 PDC 残余应力有限元结分析模型

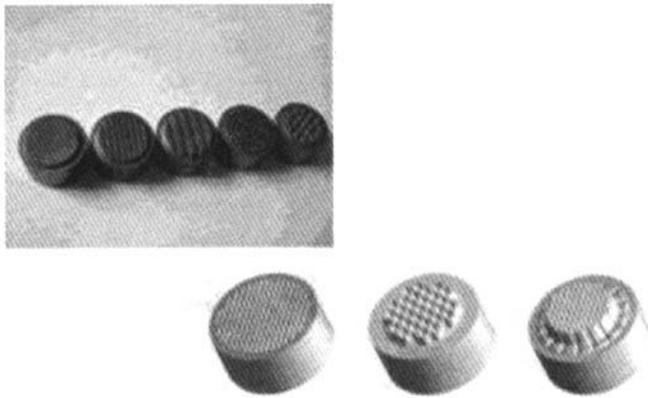


图8 不同非平面界面设计硬质合金衬底

4 结论

(1) 自从 G. E 公司于 1971 年推出 Compax 复合片和国内以磨料所、桂林矿产院等首先推出多粒合成聚晶后, PDC、TSP、DEI、PCD 品种规格不断得到发展, 这些 PDC、TSP、DEI、PCD 复合材料工具先后在油田、煤矿、金属矿、非金属等工程得到广泛应用, 为钻探、采掘业做出了越来越大的贡献。

(2) PDC、TSP、DEI、PCD 市场的扩大, 都伴随着前期复合材料的不断完善与技术突破, 因此始终重视与坚持技术创新是其根本。

(3) 金刚石压机是生产超硬复合材料的重要工具与设备, 国内外实践表明中国六面顶压机是生产 PDC、PCD 的优良设备。

(4) 在 PDC、PCD 的发展历程中, 工艺的改进也是必不可少的, 这里在粘结剂的选用, 金刚石层与合金层界面的应力消除, 几何尺寸的增大、设计等都起到了重要的作用。

(5) 中国的复合体、聚晶在国内新亚、兆丰达、江汉钻头、四方、亚龙、晶日科美、桂林金刚石、上海琦实等公司的倡领下, 我国的 PDC (TSP、DEI)、PCD 的品种、规格已能满足国内市场需要, 并有出口, 中国复合片、聚晶技术进步已经引起探工行业、采掘行业的高度重视。

参考文献:

- [1] Snedden, M. V, Hall D. R. Polycrystalline Diamond: manufacture, wear mechanisms, and implications for bit design[C]. SPE IT006, 1987, 9.
- [2] Shiming Hong. Synthesis of Fine grained polycrystalline diamond compacts, New Diamond Science and Technology[C]. MRS Int Conf. Proc, 1991:155 ~ 160.
- [3] 徐国平, 梁红原, 何利民, 等, 高品质油田钻探用金刚石复合片(PDC)的研制[J]. 矿冶工程, 2005, 25(4): 65 ~ 69.
- [4] Akhmedi Eko W, Hirokazu Karasawa. Laboratory Core Drilling Test on the Granite of the Carbonate Binder PCD [C]. 1st Inter, Indus, Dia, Conf 2005. 10. Barcelona.

- [5] A. S. Osipov, N. A. Bondarenko, I. A. Petrusha. Drill bits with thermostable PCD inserts. 2nd International Industrial Diamond Conference [C]. Rome Italy; 2007. 4.
- [6] Ken Bertagnolli, Roger Vale. 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, 2000, 7.
- [7] 汤咏舫, 黄纲汉, 刘勇. 人造金刚石聚晶粘结剂的研究[J]. 稀有金属, 2003, 24(2): 111~114.
- [8] 贾志宏, 王贵成, 刘菊东, 等. 梯度聚晶金刚石复合材料的开发[J]. 工具技术, 2004, 38: 31~32.
- [9] 李力, 董学斌. 梯度聚晶金刚石(PCD)增强楔形复合齿的制备[J]. 湖南冶金, 2001, (9): 6~8.
- [10] 曹品鲁, 刘宝昌, 张祖培. 梯度结构聚晶金刚石复合片组分优化设计[J]. 煤田地质与勘探. 2006, 34(5): 75~78.
- [11] Mahlon Denis, Kingwood. Tex cutting element having composite for med of cemented carbide substrate and diamond layer and method of making same [P]. US4, 784,023 NOV. 15, 1988.
- [12] Gary M. Flood, Canal Winchester; David M. Johnson, Westerville. Both of Ohio abrasive toll insert [P]. US5, 484, 330 Jan. 16, 1996.
- [13] John W. Hardy, Bill J. Pope, both of Provo; Kevin G. Graham, Payson; Robert J. Farr, Orem all of Utah composite polycrystalline cutting element with improved fracture and delamination resisting [P]. US5, 355, 969. Oct. 18, 1994.
- [14] Ken E, Bertagnolli, Craig H. Cooley. Polycrystalline diamond compact (PDC) design methodology utilizing strain energy capacity[C]. Proceedings of ETCE 2001.
- [15] Dan Bdnap, Lars Hillberg. PCD Inserts for Improved Hard Rock Mining Efficiency[C]. Proceedings An International Technical Conference on Diamond, Cubic Boron Nitride and their Applications, 2006.
- [16] Craig H. Cooley, Jeffrey B. Lund, Redd H. Smith. Diamond cutters having modified cutting edge geometry and drill bit mounting arrangement therefore [P]. US5, 437, 343. Aug. 1, 1995.

(上接第8页)

(2) 泥浆中添加能抑制粘土水化膨胀和降低泥浆失水量的化学处理剂, 抑制地层的膨胀;

(3) 起钻过程中及时灌浆;

(4) 起下钻过程中扫孔(刮除孔壁膨胀的部分)。

这一套措施十分有效, 卡钻事故未再发生, 钻进施工得以正常进行。不过, 还是存在着难以进行固相控制和无法采用绳索取心方法等问题。施工中不得不采用提钻取心, 钻进效率非常低。为能在断层泥地层钻进时采用绳索取心方法, 以便提高施工效率, 下一步拟采用甲酸盐泥浆体系。甲酸盐泥浆是一种液态的高比重泥浆体系, 在保证泥浆加重效果(泥浆密度比重可达1.5~1.6kg/L)的同时, 还具有低粘度和低切力的特点。

参考文献:

- [1] B. Engeser and L. Wohlgenuth. Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland—KT B Bohrtechnische Dokumentation KTB REPORT 95 ~ 4. Niedersaechsischen Landeamt fuer Bodenforschung [R]. 1996
- [2] 张伟. 夏威夷科学钻探项目的钻探技术和施工情况[J]. 探矿工程, 1999, (4): 52~53.
- [3] 王达, 张伟, 张晓西, 等. 中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 张伟, 贾军. 汶川地震科学钻探项目二号孔取心钻进方法的选择[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(7): 5~7.