

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.011

# 金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模的制备、抛光及应用\*

王新昶, 王成川, 孙方宏

(上海交通大学 机械与动力工程学院 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 为改善异型绞线紧压模耐磨损性能, 提高异型线缆质量, 采用热丝化学气相沉积方法, 在孔型经优化设计的扇形孔绞线紧压模内孔沉积了厚度均匀、附着性能优异、相对易于抛光且具有很好的耐磨损性能的硼掺杂微米-本征微米-本征细晶粒复合金刚石薄膜, 采用机械自动线抛光、磨料流抛光及手工机械抛光相结合的抛光工艺对内孔工作表面进行抛光, 使其整体表面粗糙度 $R_a$ 值达到50 nm以下, 在铜材质扇形分裂导体绞线紧压实际生产应用试验表明, 可以替代低效的传统滚轮挤压工艺; 采用传统工艺制造的异型电缆表面粗糙度 $R_a$ 值约为 $1.027\ \mu\text{m}$ , 应用金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模可以将其表面粗糙度降低到 $0.473\ \mu\text{m}$ , 且在截面积更小、质量更轻的情况下获得更小的电阻。

**关键词:** 化学气相沉积; 扇形孔; 紧压模; 金刚石薄膜; 抛光

中图分类号: TG174.44; TG580.692

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)06-0075-08

## Fabrication, Polishing and Application of Diamond Coated Compacting Die with Sector-shaped Hole

WANG Xin-chang, WANG Cheng-chuan, SUN Fang-hong

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** In order to improve the wear resistance of the shaped compacting dies and the quality of as-produced cables, adopting the hot filament chemical vapor deposition, a type of high-performance diamond film was uniformly deposited on the inner hole surface of the compacting die with a sector-shaped hole that has been optimally designed. Such the diamond film is the boron-doped micro-crystalline, undoped micro-crystalline and undoped fine-grained composite diamond film, which shows favorable adhesion, relatively nice polishability and high wear resistance. Afterwards, as-deposited diamond film is polished by a combined polishing technology, including the mechanical polishing using an automatic wire, abrasive flow machining and the manual mechanical polishing, for reducing the surface roughness  $R_a$  on the whole surface of the inner hole to below 50 nm. Finally the diamond coated compacting die was employed for producing the Cu sector-shaped split conductors, which can replace the low-efficiency conventional extruding technology. The shaped wires produced by the conventional technology show a surface roughness  $R_a$  value of  $1.027\ \mu\text{m}$ , while the application of the diamond coated dies can reduce it to  $0.473\ \mu\text{m}$ . Besides, the new cables also perform lower electrical resistance under the conditions of smaller section and lighter weight.

**Keywords:** chemical vapor deposition (CVD); sector-shaped hole; compacting die; diamond film; polishing

收稿日期: 2016-08-03; 修回日期: 2016-11-11; 基金项目: \*国家自然科学基金(51275302); 中国博士后科学基金(15Z102060056, 2016T90370)

通讯作者: 王新昶(1988—), 男(汉), 博士; 研究方向: 金刚石薄膜的制备、改性及应用; Tel: 13585748931; E-mail: wangxinchangz@163.com

网络出版日期: 2016-12-14 15:49; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161214.1549.010.html>

引文格式: 王新昶, 王成川, 孙方宏. 金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模的制备、抛光及应用[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 75-82. WANG X C, WANG C C, SUN F H. Fabrication, polishing and application of diamond coated compacting die with sector-shaped hole[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 75-82.

## 0 引言

传统电缆一般是采用多根圆形导线绞制而成的圆形电缆(如图1(a)所示),对于该类电缆而言,在超高压输电过程中,为了减小表面场强及电晕引起的电能损耗,必须增加电缆截面,这会导致电缆重量增加、电缆成本及超高压线路架设成本均显著上升;新型超高压输电电缆多采用多股异型分裂导体组合而成(如图1(b)所示),采用这种组合方式可以显著降低电缆表面的场强,在限制电晕方面起到类似于增大电缆等效直径的作用,此外分裂导体还能使输电线路电感减小、电容增大,减小对交流电的波阻抗,有效缓解“趋肤效应”对于电缆有效电阻的影响,从而起到提高线路输电能力、降低输电成本、提高超高压输电可靠性的作用<sup>[1]</sup>。

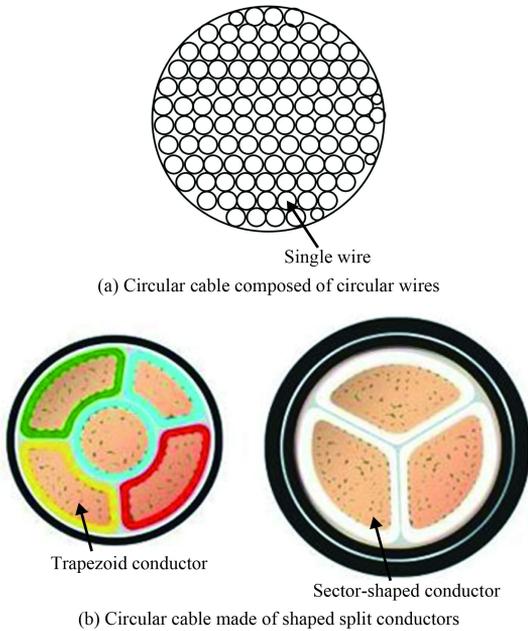


图1 圆形导线及异型分裂导体组合而成的电缆示意图

Fig.1 Schematic diagrams of cables composed of circular wires or shaped split conductors

分裂导体是采用多根圆形导线绞制而成的,但是由于其成型后的形状较为复杂,采用传统硬质合金模具进行直接绞线紧压生产时,极易在内孔转角位置发生卡线、断线等问题,因此实际生产中多采用滚轮挤压工艺,但该工艺存在生产效率低、产品质量差等缺点,严重限制了高品质电缆产品的生产和应用。采用硬质合金模具进行直接绞线紧压生产时容易出现卡线、断线等问题主

要有2个原因:一是模具孔型设计不合理,转角位置曲率半径过小,二是硬质合金与电缆材料(多为铜)之间的摩擦因数较大。

化学气相沉积(Cheical vapor deposition, 简称CVD)金刚石薄膜具有接近天然金刚石的极高的硬度和弹性模量、优异的耐磨损性能、较高的热传导系数和良好的化学稳定性,尤其是较低的摩擦因数<sup>[2]</sup>,使其适合作拉拔模具内孔表面耐磨减摩擦涂层,可起到提高模具寿命、改善产品质量、推动拉拔工艺改革的作用。对于传统的圆孔模具,采用直拉热丝法或鼠笼绞线法在其内孔表面沉积金刚石薄膜的工艺相对简单<sup>[3-4]</sup>,但是对于具有复杂孔型的异型模而言,则需要对其热丝排布方式等沉积参数进行合理优化,才能保证内孔表面沉积金刚石薄膜的厚度及质量均匀性<sup>[5]</sup>,这对于后续抛光及应用都至关重要。此外,对于异型分裂导体绞线紧压模而言,转角位置曲率半径过小不仅会影响拉拔生产,还会导致沉积的金刚石薄膜应力集中现象明显,影响膜基附着性能及模具寿命,并且转角位置难以顺利抛光,因此必须要结合孔型设计,方可保证金刚石薄膜涂层异型孔绞线紧压模的制备、抛光及应用。

用作拉拔模具内孔表面保护涂层的金刚石薄膜的类型对于其后续的抛光及应用也有显著影响,金刚石成分纯度很高的本征微米金刚石(Undoped micro-crystalline diamond, 简称UMCD)薄膜具有最接近天然金刚石的特性<sup>[6]</sup>,但是优异的耐磨损性能也显著提高了其抛光难度,耗时费力的抛光过程不但提高了模具生产的成本,且容易造成薄膜内裂纹等缺陷,导致薄膜在应用过程中较易疲劳失效,无法体现出其优异的耐磨损性能,此外,本征薄膜与硬质合金基体之间的附着性能较差<sup>[7]</sup>,这也是制约金刚石薄膜涂层硬质合金器件寿命提高的主要因素之一。针对上述问题,国内外学者开发了多种复合金刚石薄膜沉积工艺<sup>[8-10]</sup>,获得优于单层金刚石薄膜的综合性能,其中本课题组开发的硼掺杂微米-本征微米-本征细晶粒复合金刚石(Boron doped micro-crystalline, undoped micro-crystalline and undoped fine-grained composite diamond, 简称BDM-UM-UFGCD)薄膜中,底层硼掺杂技术的应用可显著改善膜基附着性能,表层本征细晶粒金刚石(Undoped fine-grained diamond,

简称UFGD)薄膜易于抛光, 中间UMCD薄膜层又可对表层薄膜的硬度及耐磨损性能起到有效的补充作用<sup>[11]</sup>。

金刚石材料, 尤其是CVD金刚石薄膜的抛光也是金刚石薄膜涂层模具制造过程中需要解决的关键问题, 因为在拉拔或绞线生产过程中, 模具工作表面粗糙度对于产品质量影响显著, 未抛光的金刚石薄膜难以满足应用需求。金刚石薄膜具有随机的晶粒取向, 抛光过程中磨料会触碰到随机取向的晶面, 因此其抛光过程中存在取决于晶粒取向的显著的各向异性磨损<sup>[12]</sup>, 并且抛光过程还会受到薄膜厚度及薄膜内缺陷的影响。复合金刚石薄膜的应用可有效提高抛光效率, 但是对于复杂形状内孔表面沉积的金刚石薄膜而言, 还需对其抛光工艺进行设计, 方可满足金刚石薄膜涂层异型模批量化生产及推广应用的需求。

首先针对扇形孔绞线紧压模的应用要求, 对模具内孔进行了孔型优化设计, 然后采用热丝CVD (Hot filament CVD, 简称HFCVD)方法, 在硬质合金模具基体内孔表面沉积BDM-UM-UFGCD薄膜, 并采用机械自动线抛光、磨料流抛光及手工机械抛光相结合的抛光工艺进行抛光, 最后在铜材质扇形分裂导体绞线紧压生产过程中进行现场试验。

## 1 试验

### 1.1 异型模孔型设计

试验中所设计和制备的金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模的应用对象为铜材质扇形分裂导体的拉拔加工, 该导体的有效截面积要求为 $70 \text{ mm}^2$ , 电阻要求为不高于 $268 \text{ m}\Omega/\text{km}$ , 单丝直径为 $2.6 \text{ mm}$ , 单丝根数为14根(即对应压缩比为0.943 6)。

针对上述要求, 综合考虑绞线紧压生产过程中的缩径和空隙率, 对应的扇形孔绞线紧压模的定径带设计截面积为 $78.774 5 \text{ mm}^2$ , 设计孔型如图2所示, 扇形孔圆弧边的曲率半径为 $10.45 \text{ mm}$ , 扇形孔3个圆角的曲率半径均为 $2.4 \text{ mm}$ , 已有的有限元分析方法<sup>[13]</sup>可以确定, 该孔型适用于扇形分裂导体绞线紧压生产, 由于采用单丝直径为 $2.6 \text{ mm}$ , 该曲率半径可有效避免生产过程中的卡丝和断丝问题, 亦可在自动线抛光过程中留出足够的空间以利于抛光线与模孔间的相对回转运动。

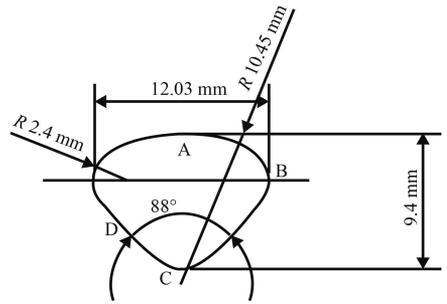


图2 扇形孔绞线紧压模的设计孔型

Fig.2 As-designed inner hole of the compacting die with a sector-shaped hole

### 1.2 金刚石薄膜沉积

基于上述设计思路, 采用慢走丝线切割及流体抛光制备模坯, 模坯材质为YG6硬质合金, 根据设计要求, 模坯外缘尺寸(即最终成型的金刚石薄膜涂层模具外缘尺寸)为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 定径带深度为 $10 \text{ mm}$ , 平均压缩角为 $22^\circ$ , 在金刚石薄膜沉积前, 先采用典型的酸碱两步预处理方法对模坯内孔表面进行预处理<sup>[14]</sup>。

鉴于该扇形孔截面积相对较小, 且其整体形状近似为圆形, 因此在其质心位置直拉拉丝即可基本满足金刚石薄膜均匀沉积的要求, 针对试验中所选定的BDM-UM-UFGCD薄膜, 基于已有研究成果<sup>[15]</sup>优化确定的沉积参数如表1所述。

金刚石薄膜沉积试验采用的是自主研发的内孔金刚石薄膜沉积专用设备, 反应气体为氢气和丙酮的混合气体, 其中丙酮是采用载流氢气带入反应腔, 硼源采用无毒的硼酸三甲酯, 在BDMCD薄膜层沉积过程中事先将硼酸三甲酯和丙酮按照预定B/C原子比进行混合, 然后同样采用载流氢气带入反应腔。形核阶段和UFGD薄膜层生长阶段采用了较低的反应压力以提高形核密度; 在整个生长阶段施加偏压电流(即偏压增强作用)可提高金刚石的形核及生长速度; 选用的各层薄膜的生长时间均通过大量的试验验证及优化, 以保证复合薄膜的附着性能、表面光洁度、表面硬度及耐磨损性能最优化。

应用场发射扫描电子显微镜(Field emission scanning electron microscopy, 简称FESEM)观测沉积的金刚石薄膜的表面及截面形貌; 采用Raman谱仪分析金刚石薄膜的化学成分; 采用表面轮廓仪测量薄膜的表面粗糙度。

表1 扇形孔异型模内孔表面BDM-UM-UFGCD薄膜沉积参数

Table 1 Deposition parameters for depositing the BDM-UM-UFGCD film on the inner hole surface of the sector-shaped drawing die

Parameters	Nucleation	BDMCD growth	UMCD growth	UFGD growth
Total gas flux / (mL·min <sup>-1</sup> )	1 200	1 100	1 100	1 200
Acetone/H <sub>2</sub> volume ratio / %	2.5	2	2	2.5
B/C atomic ratio / 10 <sup>-6</sup>	0	4 500	0	0
Reactant pressure / Pa	1 600	5 000	5 000	1 200
Filament length / mm	60	60	60	60
Filament diameter / mm	0.7	0.7	0.7	0.7
Filament temperature / °C	2 100–2 200	2 100–2 200	2 100–2 200	2 100–2 200
Substrate temperature / °C	800–900	800–850	800–850	800–900
Bias current / A	3.0	2.0	2.0	3.0
Duration / hr	0.5	5	3	2

### 1.3 模具内孔表面涂层抛光

针对金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模内孔抛光的特殊需求, 试验中采取了机械自动线抛光、磨料流抛光及手工机械抛光相结合的综合抛光工艺进行内孔抛光, 其中机械自动线抛光设备如图3所示, 所采用的抛光线为表面布满金刚石微粉悬浊液的、直径2 mm的不锈钢丝, 抛光过程中, 抛光线保持0.3 m/s的线速度往返运动, 模具以300 r/min的转速旋转, 线抛光分为两步, 第一步采用W7的金刚石微粉抛光30 min, 第二步采用W2.5的金刚石微粉抛光2 h。

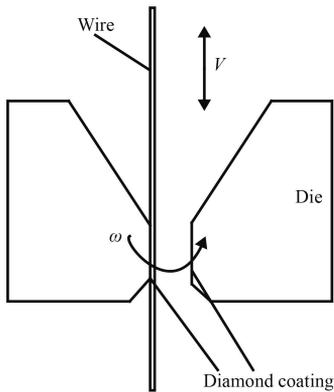


图3 机械自动内孔线抛光设备示意图

Fig.3 Schematic diagram of the mechanical polishing using an automatic wire

虽然试验中选用的复合薄膜表面较易抛光, 但由于模具孔型并非回转体, 因此单纯采用机械自动线抛光无法保证整个内孔表面都抛光到所需的表面光洁度, 尤其是圆角位置内孔表面与抛光线之间难免存在接触不充分的位置。

磨料流抛光(Abrasive flow machining, 简称

AFM)是近年来得到普遍应用的一种新型抛光技术, 尤其适用于复杂形状表面抛光, 但是由于抛光力较小, 抛光效率较低, 试验中选用磨料流抛光作为机械自动线抛光后的精抛光工序, 磨料流成分包括树脂载体、38 mm (400目)的金刚石微粉、润滑剂及粘结剂, 磨料流抛光初定参数为: 加载压力15 MPa, 抛光往返次数为50次(次数会根据实际需要调整)。经机械自动线抛光及磨料流抛光后, 模具内孔转角位置仍然有表面光洁度不达标的区域, 因此最后再采用手工机械抛光的方法进行辅助精抛。在抛光试验中, 同样采用FESEM Raman谱仪和表面轮廓仪表征抛光后的样品。

### 1.4 应用试验

金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模在铜材质扇形分裂导体绞线紧压生产过程中进行了应用试验, 试验现场及示意图如图4所示, 绞线紧压的拉拔速度为1.5 km/h(用作对比的传统滚轮挤压工艺的最大拉拔速度约为1 km/h, 大于该速度容易断丝)。在应用试验中, 应用专用的电缆电阻测量仪检测生产的分裂导体产品的电阻水平, 并应用表面轮廓仪测量产品的表面粗糙度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 薄膜的组织结构

扇形孔绞线紧压模内孔表面沉积的复合金刚石薄膜在抛光前的典型表面及截面形貌如图5所示, 采用上述沉积参数在扇形孔绞线紧压模内孔表面沉积的BDM-UM-UFGCD薄膜具有纳米级的晶粒度, 根据FESEM表面形貌可辨别出来的金刚

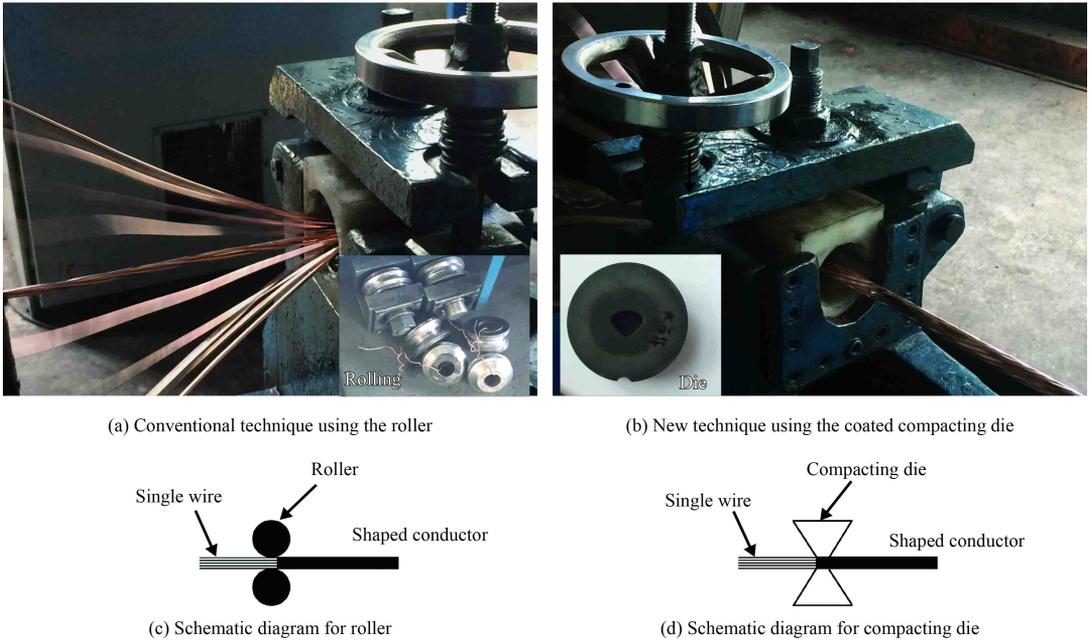


图4 扇形分裂导体生产现场及其示意图  
Fig.4 Production field and schematic diagrams of sector-shaped split conductors

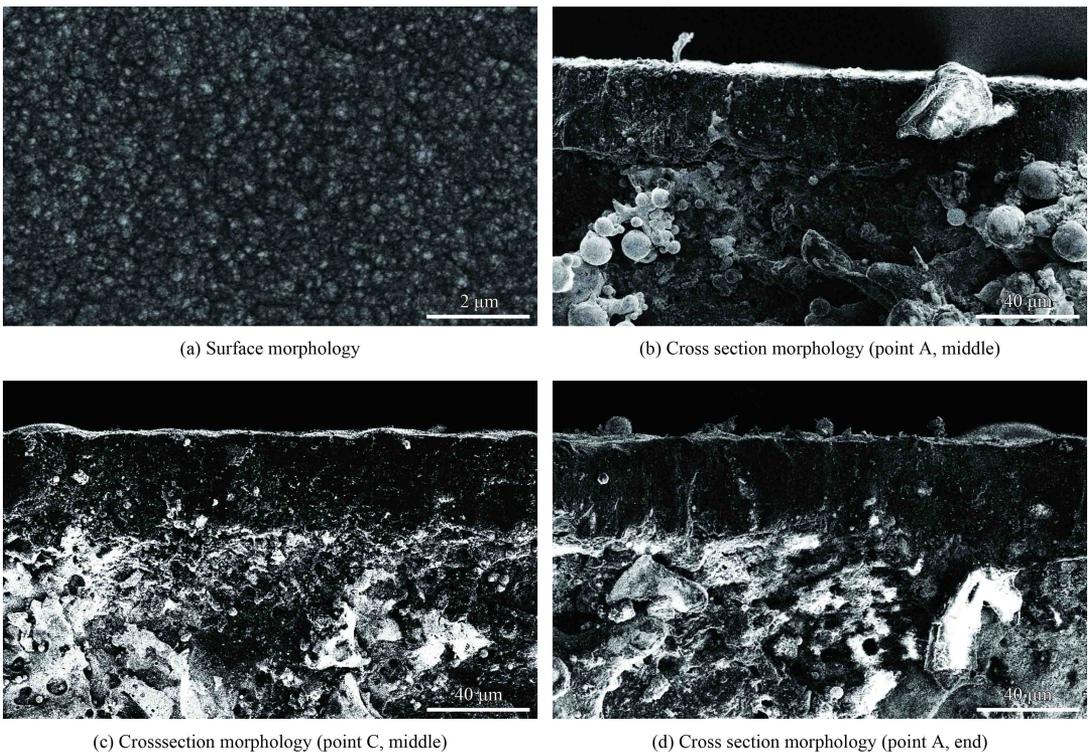


图5 扇形孔绞线紧压模内孔表面沉积的金刚石薄膜表面及不同位置的截面形貌

Fig.5 Surface and cross section morphologies of the diamond film deposited on inner hole surface of the compacting die with a sector-shaped hole

石表面晶粒尺寸一般都在200 nm以下, 根据XRD结果(见图6所示)中(111)晶面对应衍射峰的位置(44.044 778°)、该衍射峰的半峰宽(0.234 84°)及Scherrer公式可估算出该薄膜中金刚石平均晶粒尺

寸约为46.54 nm, 与之相对应的, 该薄膜在抛光前的表面粗糙度Ra值仅有110~125 nm, 需要抛光降低的幅度较小; 采用优化的生长时间沉积的复合金刚石薄膜的总厚度约30 μm, 并且在模具内孔

表面沿轴向和周向不同位置沉积的薄膜具有较好的厚度均匀性,均在 $27\sim 32\ \mu\text{m}$ (如图5(b)(d)所示)。

BDM-UM-UFGCD薄膜的Raman谱图如图7所示,该谱图表现出典型的细晶粒/纳米金刚石薄膜的特征,在 $1\ 332.4\ \text{cm}^{-1}$ 附近的Raman峰是金刚石 $\text{sp}^3$ 成分的特征峰,但是相比于天然金刚石或本征微米金刚石薄膜,该峰的半峰宽较大,说明该薄膜表面非金刚石成分含量相对较多,这一点同样可以从 $1\ 580\ \text{cm}^{-1}$ 附近位置存在的Raman峰得到佐证,该峰表征的是金刚石薄膜表面石墨成分的存在。考虑到Raman信号对于石墨成分的敏感度较之于其对金刚石成分的敏感度要高50倍左右,因此对于该复合金刚石薄膜表层的UFGD薄膜而言,金刚石成分仍然占有主导地位,但是非金刚石成分的增加依旧会导致薄膜表面硬度降低,进而降

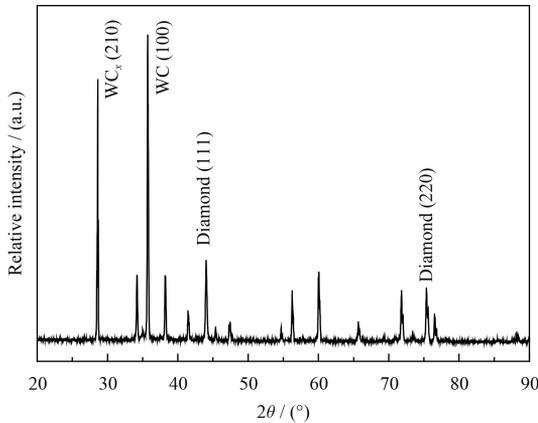


图6 BDM-UM-UFGCD薄膜的XRD图谱

Fig.6 XRD patterns of the BDM-UM-UFGCD film

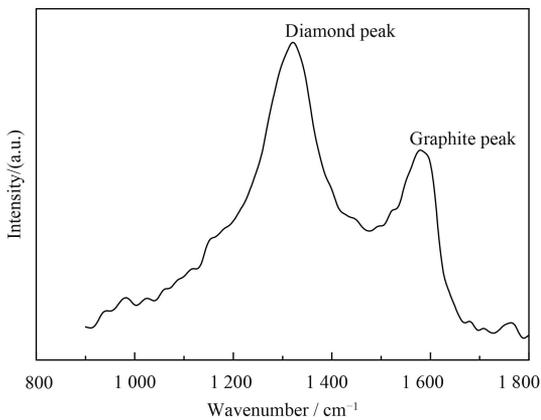


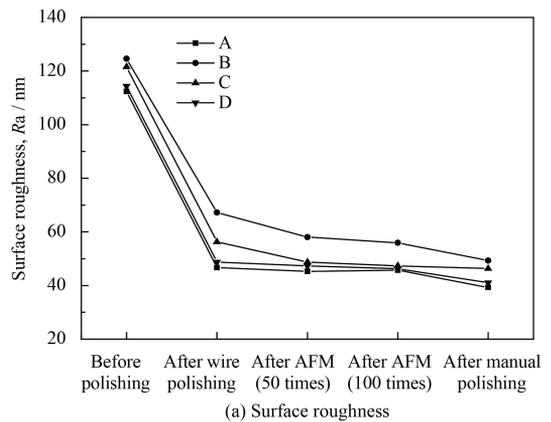
图7 扇形孔绞线紧压模内孔表面沉积的BDM-UM-UFGCD薄膜的Raman谱图

Fig.7 Raman spectrum of the BDM-UM-UFGCD film deposited on the inner hole surface of the compacting die with a sector-shaped hole

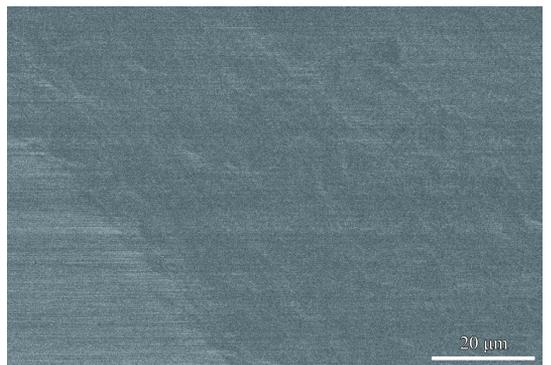
低金刚石薄膜的抛光难度。

## 2.2 薄膜的抛光

取图2中所示A~D的4个点作为采样点进行表面粗糙度 $R_a$ 值的测量,在抛光试验不同阶段测量得到的 $R_a$ 值如图8所示,其中插图图为典型的抛光后内孔表面形貌(抛光过程结束后C点的表面形貌),可见纳米级的金刚石颗粒形貌已经无法辨别,抛光后的扇形孔绞线紧压模表现出光整的内孔表面。根据抛光表面 $R_a$ 值的变化趋势可知,扇形孔内孔表面非转角位置(A点和D点)的表面粗糙度 $R_a$ 值经机械自动线抛光之后即可达到 $50\ \text{nm}$ 以下,达到圆孔模具经线抛光之后的标准<sup>[16]</sup>,完全满足绞线紧压生产的需求;弧长较短的圆角位置(C点)经线抛光之后 $R_a$ 值达到了 $56\ \text{nm}$ ,再经过磨料流抛光之后即降到了 $50\ \text{nm}$ 以下;弧长较长的圆角位置(B点)经线抛光之后 $R_a$ 值仍大于 $60\ \text{nm}$ ,磨料流抛光之后 $R_a$ 值约为 $58\ \text{nm}$ ,并且经扩展试验证明,将



(a) Surface roughness



(b) Surface morphology after polishing

图8 涂层扇形孔绞线紧压模内孔表面不同位置在不同抛光阶段的 $R_a$ 值及C点抛光后的表面形貌

Fig.8  $R_a$  values at the different positions on the inner hole surface of the coated compacting die with a sector-shaped hole at the different stages of the polishing process, and the surface morphology at the position C after polishing

磨料流抛光时间加倍后该数值仍有56 nm, 继续延长磨料流抛光时间仍然无法将之降低到50 nm以下, 这证明机械自动线抛光和磨料流抛光对于改善该位置不满足要求的表面粗糙度效果有限, 只有再经过一定时间(30 min)的手动精抛后方可将之降低到50 nm以下。如图2所示, 扇形孔内表面的最小曲率半径(即B点位置的设计曲率半径)为2.4 mm, 机械自动线抛光所采用的抛光线实测初始直径为2.04 mm, 试验设定抛光线达到使用寿命的实测直径为1.80 mm, 在该范围内抛光线在机械线抛光过程中可以与扇形孔内表面所有位置接触, 但是曲率半径较小位置(如B点)抛光线与待抛光表面的接触时间及接触完整程度受到限制, 因此采用单一的线抛光甚至是线抛光加流体抛光, 依旧无法达到最终的抛光要求。

应用Conoptica孔型测量仪测量抛光成型后的金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模成品的孔型, 结果如图9所示, 可见基于上述工艺生产的金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模的孔型与设计孔型具有较好的吻合度, 圆弧边曲率半径、圆角曲率半径及截面积与设计尺寸的偏差均不超过6.5%。

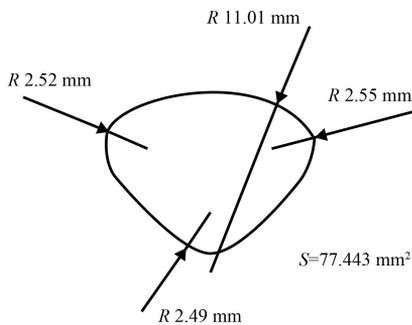


图9 抛光成型后的BDM-UM-UFGCD薄膜涂层扇形孔绞线紧压模的实际孔型

Fig.9 Actual dimension of the inner hole of BDM-UM-UFGCD coated compacting die with a sector-shaped hole after the polishing

### 2.3 应用试验考核

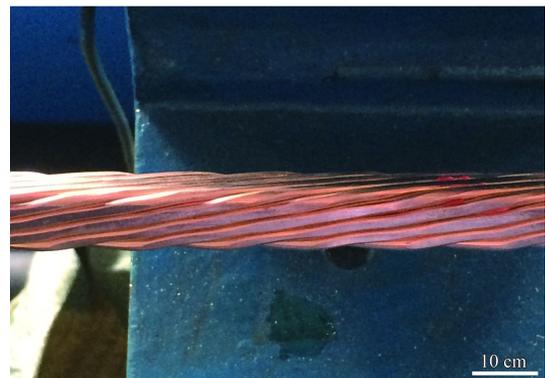
应用试验制备的金刚石薄膜涂层扇形绞线紧压模, 采用直接拉拔工艺生产的扇形分裂导体(Sample I)与采用传统滚轮挤压工艺生产的扇形分裂导体(Sample II)的对比检测结果如表2所述, 在紧压模或滚轮寿命范围内生产的产品电阻特性均可满足质量要求; 采用金刚石薄膜涂层扇形绞线紧压模生产的产品在截面积更小(更接近标准有效截面积)、质量更轻的情况下反而具有更小的电

阻, 这说明其紧压质量更好; 采用两种不同工艺生产的扇形分裂导体表面质量表现出明显差别(如图10所示), 挤压工艺采用的滚轮多为工具钢材质, 工具钢与铜之间的摩擦因数较高, 容易在产品表面形成挤压痕迹, 影响其表面光洁度(采用传统工艺生产的异型电缆分裂导体的平均表面粗糙度Ra值约为1.027  $\mu\text{m}$ ), 而采用金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模及配套工艺可显著改善产品的表面光洁度(平均表面粗糙度Ra值下降到0.473  $\mu\text{m}$ ); 此外新工艺还可提高拉拔速度, 提升生产效率。

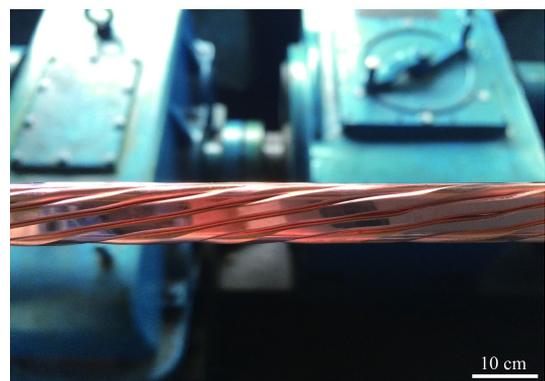
表2 不同工艺生产的分裂导体质量对比检测结果

Table 2 Comparative results on the quality parameters for the split conductors produced by different technologies

Property	Sample I	Sample II
Electric resistance/ $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	261.86	266.27
Cross-sectional area/ $\text{mm}^2$	70.24	71.06
Weight/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-1})$	594	595
Ra/ $\mu\text{m}$	0.473	1.027



(a) Conductor produced by conventional extruding technology



(a) Conductor produced by BDM-UM-UFGCD

图10 采用传统滚轮挤压工艺及BDM-UM-UFGCD薄膜涂层扇形孔绞线紧压模拉拔的扇形分裂导体

Fig.10 Split conductors produced by conventional extruding technology and BDM-UM-UFGCD coated compacting die with a sector-shaped hole

### 3 结论

(1) 针对扇形分裂导体的加工要求, 完成了金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模的孔型设计。

(2) 采用热丝化学气相沉积法, 在硬质合金扇形孔绞线紧压模内孔表面沉积了厚度均匀、附着性能优异、易于抛光且具有较好的耐磨损性能的BDM-UM-UFGCD薄膜。

(3) 采用机械自动线抛光、磨料流抛光及手工机械抛光相结合的综合抛光工艺对金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模内孔表面进行抛光, 可将整个内孔表面的粗糙度Ra值降低到50 nm以下, 满足扇形分裂导体的绞线紧压生产需求。

(4) 孔型测量结果表明, 最终成型的金刚石薄膜涂层扇形孔绞线紧压模的孔型与设计孔型具有较好的吻合度。

(5) 采用金刚石薄膜涂层绞线紧压模, 可采用直接拉拔工艺替代传统的滚轮挤压工艺, 提高生产效率, 且可显著改善产品质量。

### 参考文献

- [1] 杨滔, 赵克江, 刘渝根, 等. 特高压交流输电线路分裂导线表面电场计算分析[J]. 高压电器, 2015, 12: 6-13.  
YANG T, ZHAO K J, LIU H G, et al. Calculation and analysis on surface electric field intensity of bundled conductors for UHVAC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 12: 6-13 (in Chinese).
- [2] LIU Y, DU M, ZHANG M, et al. Growth of diamond coatings on functionally graded cemented carbides[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 49: 307-313.
- [3] SUN F H, MA Y P, SHEN B, et al. Fabrication and application of nano-microcrystalline composite diamond films on the interior hole surfaces of Co cemented tungsten carbide substrates[J]. Diamond and Related Materials, 2009, 18(2/3): 276-282.
- [4] ZHANG Z M, SHEN H S, SUN F H, et al. Fabrication and application of chemical vapor deposition diamond-coated drawing dies[J]. Diamond and Related Materials, 2001, 10(1): 33-38.
- [5] WANG X C, LIN Z C, ZHANG T, et al. Fabrication and application of boron-doped diamond coated rectangular-hole shaped drawing dies[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 41: 422-431.
- [6] WANG X C, ZHANG J G, SUN F H, et al. Investigations on the fabrication and erosion behavior of the composite dia-

- mond coated nozzles[J]. Wear, 2013, 304(1/2): 126-137.
- [7] DUMPALA R, KUMAR N, KUMARAN C R, et al. Adhesion characteristics of nano- and micro-crystalline diamond coatings: Raman stress mapping of the scratch tracks[J]. Diamond and Related Materials, 2014, 44: 71-77.
- [8] SALGUEIREDO E, ALMEIDA F A, AMARAL M, et al. A multilayer approach for enhancing the erosive wear resistance of CVD diamond coatings[J]. Wear, 2013, 297(1/2): 1064-1073.
- [9] DUMPALA R, CHANDRAN M, KUMAR N, et al. Growth and characterization of integrated nano- and microcrystalline dual layer composite diamond coatings on WC-Co substrates[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 37: 127-133.
- [10] SHEN B, SUN F H. Deposition and friction properties of ultra-smooth composite diamond films on Co-cemented tungsten carbide substrates[J]. Diamond and Related Materials, 2009, 18(2/3): 238-243.
- [11] WANG X C, WANG L, SHEN B, et al. Friction and wear performance of boron doped, undoped microcrystalline and fine grained composite diamond films[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(1): 155-163.
- [12] TSAI H Y, TING C J, CHOU C P. Evaluation research of polishing methods for large area diamond films produced by chemical vapor deposition[J]. Diamond and Related Materials, 2007, 16: 253-261.
- [13] LIN Z C, SHEN B, SUN F H, et al. Numerical and experimental investigation of trapezoidal wire cold drawing through a series of shaped dies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5/6/7/8): 1383-1391.
- [14] SARANGI S K, CHATTOPADHYAY A, CHATTOPADHYAY A K. Effect of pretreatment methods and chamber pressure on morphology, quality and adhesion of HFCVD diamond coating on cemented carbide inserts[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(13): 3721-3733.
- [15] WANG X C, WANG C C, SUN F H. Development and growth time optimization of the boron-doped micro-crystalline, pristine micro-crystalline and pristine fine-grained composite diamond film[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, doi: 1177/0954405416666902.
- [16] 王新昶, 申笑天, 赵天奇, 等. 复合金刚石薄膜涂层铝塑复合管拉拔模的制备及应用[J]. 超硬材料工程, 2016, 28(2): 20-23.  
WANG X C, SHEN X T, ZHAO T Q, et al. Production and application of composite diamond film coated PAP drawing die[J]. Superhard Material Engineering, 2016, 28(2): 20-23 (in Chinese).