DOI: 10.11858/gywlxb.20251233

梯度结构对 PDC 齿综合性能的影响

高 俊,张治财,侯志强,王 超,李 好,杨易侃,杨 娇,方 锐,唐 垚,王海阔

(浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对深层/超深层油气勘探对高性能聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact, PDC)齿的迫切需求,通过正交试验法优化 PDC 齿的合成配方,在高温高压(8.5 GPa、1 750 ℃)烧结条件下,成功制备出传统均匀混合型 PDC 齿(H-PDC)以及具有“细晶工作层/粗晶过渡层”的梯度结构型 PDC 齿(G-PDC)。梯度结构有助于促进钴烧结助剂的均匀分布,抑制钴的聚集,增强层间的界面结合,并产生较高的残余压应力。G-PDC 工作层中钴的质量分数为 9.16%,经酸浸脱钴后,钴的质量分数降低至 2.49%。性能测试表明:G-PDC 的耐磨寿命达到 920 车磨次数(passes),优于 H-PDC(800 passes);G-PDC 的平均冲击能为 740.0 J,较 H-PDC 提升约 107%;同时,梯度结构缓解了 PDC 齿的热失配问题,使热稳定温度提高约 30 ℃。实验结果表明,高压烧结与梯度结构设计的协同作用会显著提升 PDC 齿的耐磨性、冲击韧性及热稳定性。本研究为面向极端工况的下一代超硬复合材料开发提供了可行路径。

关键词: 聚晶金刚石复合片;梯度结构;冲击性能;耐磨性能;热稳定性;高压烧结

中图分类号: O521.2; TQ164; TG58; TG74 **文献标志码:** A

随着全球碳氢资源需求持续增长及中浅层油气资源储备的快速消耗,矿产资源的勘探活动正不断向深层和超深层领域推进[1−3]。聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact, PDC)凭借其高硬度和优异的破岩效率,已成为中浅层油气钻井作业中的关键工具[4−7]。传统的 PDC 齿通常在高压高温(high pressure and high temperature, HPHT)条件下(5.0～7.7 GPa、1 400～1 700 ℃)制备,在含钴硬质合金基体上烧结金刚石微粉,利用熔融钴催化剂渗透至金刚石层,促进金刚石-金刚石(D-D)键合,从而烧结成致密的整体结构[5, 8−9]。

在深层井/超深井钻探过程中,高硬耐磨岩层(如花岗岩、燧石和石英岩)会显著加剧 PDC 齿的磨损失效[10];此外,多种岩层交替出现,使 PDC 齿承受更严峻的冲击与磨粒磨损的耦合作用[11−12]。在动态冲击与磨损载荷下,金刚石层与硬质合金基体之间显著的热膨胀系数差异[13−14]以及钴元素聚集引发的应力集中,容易导致 PDC 齿出现剥落或断裂现象,降低钻孔效率,缩短使用寿命[1, 9, 15]。因此,为降低深层/超深层钻探成本,提升作业效率,开发兼具高耐磨、高热稳定性和良好冲击韧性的 PDC 齿尤为重要[16−17]。

近期研究表明,提高 PDC 齿的合成压力[5, 18]、设计多层梯度结构[2, 4]以及优化材料设计[19−22]等措施是突破其性能瓶颈的有效途径。在高于传统 PDC 齿烧结压力条件下(高于 8.0 GPa)合成 PDC 材料,理论上可促进更广泛、更牢固的 D-D 键合,抑制金属催化剂的迁移与聚集,从而获得结构更致密、力学性能更优的 PDC 复合材料。尽管超过 8.0 GPa 的高压合成技术具有显著潜力,但目前针对在该极端条件下制备全尺寸、具备工业应用价值的 PDC(如广泛使用的 1613 型号)的报道仍较为有限,理论前景与实际规模化生产之间的衔接仍有待进一步探索。

* **收稿日期:** 2025-10-21; **修回日期:** 2025-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(52073254)

第一作者: 高 俊(1996—),男,博士研究生,主要从事超硬材料制备研究. E-mail: 12327111@zju.edu.cn

通信作者: 王海阔(1984—),男,博士,研究员,主要从事超硬材料和纳米块体材料的合成、表征与应用研究. E-mail: haikuo.wang@zju.edu.cn

本研究采用正交试验法优化实验设计并确定 PDC 齿的最佳合成配方，在高温、高压烧结（8.5 GPa、1 750 ℃）条件下，制备具有梯度结构的新型 PDC 齿材料，并对其性能进行系统检测与评估。通过将梯度结构在工作层中构建合理的双峰金刚石粒径分布，系统研究梯度结构在高压环境下对 PDC 齿的微观结构、力学性能及热性能的影响，以期实现 PDC 齿综合性能的显著提升，为开发适用于深层/超深层钻井苛刻环境的下一代超硬复合材料提供理论依据与技术路线。

1　实　验

1.1　PDC 的制备

PDC 制备的原料选用 D_1（4～6 μm）、D_2（8～12 μm）和 D_3（15～22 μm）3 种不同粒径的金刚石微粉，纯度均高于 99%，由河南联合精密材料股份有限公司提供；钴（Co）粉作为烧结助剂，纯度高于 99.9%，购自厦门金鹭特种合金有限公司；基体采用钴的质量分数为 13% 的 WC-Co 硬质合金，由株洲精钻硬质合金有限公司生产。首先，利用乙醇对金刚石微粉和钴粉进行超声处理 30 min；然后于 70 ℃ 干燥 12 h，在球磨机中以 400 r/min 的速率球磨 5 h。将混合粉末置于真空环境中，先从室温升温至 200 ℃ 保温 3 h，再升温至 450 ℃ 进行 H_2 还原处理 2 h。随后，将混合粉末装入金属杯并与硬质合金基体组装，置于六面顶压机装置（GY650）中进行高压烧结；升压速率为 100 MPa/s，升温速率与降温速率均为 25 ℃/s，保温 5 min，腔体温度降至常温后保压 2 min。接着进行降压处理，首先以 100 MPa/s 的降压速率降压至 5.5 GPa，保压 60 s；然后以 50 MPa/s 的速率降压至常压。实验制备过程与组装结构分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示。本研究重点考察不同金刚石微粉及钴粉质量分数在高温、高压烧结（8.5 GPa，1 750 ℃）条件下对 PDC 性能的影响。采用 L9(3^4) 正交试验设计，以金刚石微粉粒径（D_1、D_2 和 D_3）和 Co 为影响因素，其质量分数各设 3 个水平，其中粒径为 D_1 的金刚石微粉的质量分数 w_{D_1} 由粒径为 D_2 和 D_3 的金刚石微粉 w_{D_2}、w_{D_3} 共同决定，并满足 $w_{D_1}+w_{D_2}+w_{D_3}$=100%，具体因素水平如表 1 所示。以 PDC 在立式车床（vertical

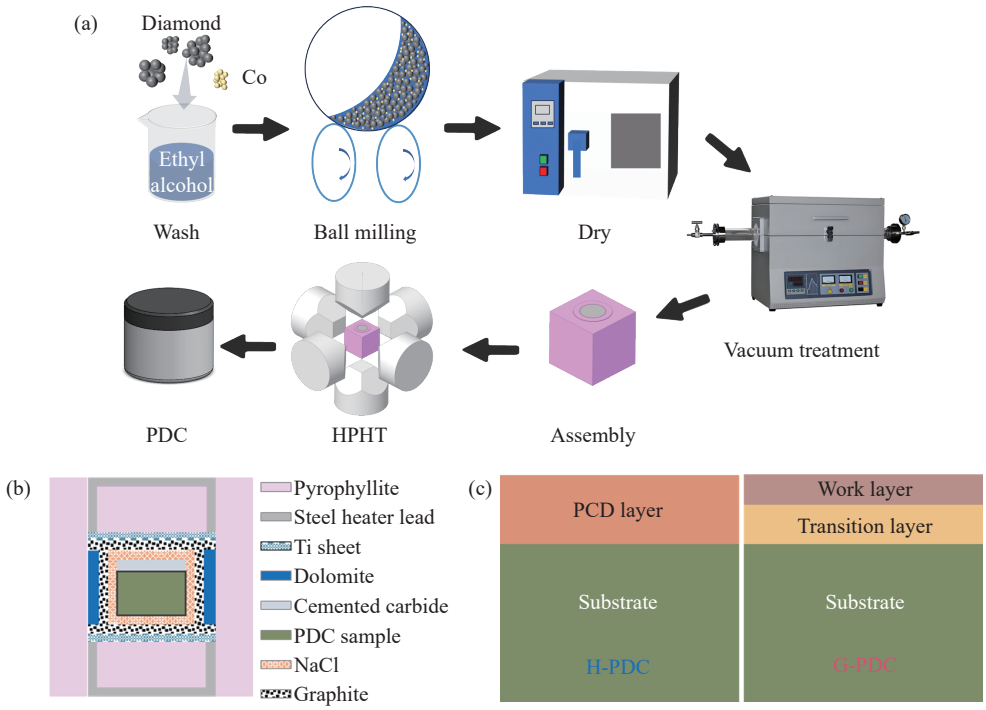


图 1　(a) PDC 齿的制备流程，(b) 高压组装结构示意图，(c) PDC 齿的结构示意图

Fig. 1　(a) Pocess of preparing PDC cutters; (b) schematic diagram of high-pressure assembly; (c) schematic diagrams of the PDC cutters

turning lathe, VTL)实验中磨损失效时的车磨次数 N(pass)作为评价指标,具体试验结果如表 2 和表 3 所示,其中,R 和 K_i(i=1, 2, 3)为极差分析法的核心统计量,R 代表极值,K_i 代表第 i 水平下的总和。

表 1　正交试验因素

Table 1　Factors of orthogonal test

Level	w_{D_3}/%	w_{D_2}/%	w_{D_1}/%	w_{Co}/%
1	75	20	5	5
2	70	15	15	3
3	65	10	25	0

表 2　正交试验结果

Table 2　Results of orthogonal test

Test No.	Level of w_{Co}	Level of w_{D_3}	Level of w_{D_2}	Level of w_{D_1}	N/passes
1	1	1	1	1	55
2	1	2	2	2	80
3	1	3	3	3	96
4	2	1	2	3	230
5	2	2	3	1	40
6	2	3	1	2	60
7	3	1	3	2	20
8	3	2	1	3	18
9	3	3	2	1	30

表 3　极差分析结果

Table 3　Results of the variance analysis

Factor	K_1	K_2	K_3	R	Optimal scheme
w_{Co}	77	110	22.667	87.333	3%
w_{D_3}	101.667	46	62	55.667	75%
w_{D_2}	44.333	113.330	52	69	15%

依据上述正交试验所得最优配方,制备了 2 种结构的 PDC 齿样品:一种为均匀混合型 PDC 齿(H-PDC),金刚石层中,粒径为 D_1、D_2 和 D_3 的金刚石微粉的质量分数分别为 10%、15% 和 75%, Co 的质量为金刚石微粉总质量的 3%;另一种为具有梯度结构的 PDC 齿(G-PDC),其表面工作层由粒径为 D_2(质量分数为 80%)和 D_1(质量分数为 20%)的金刚石微粉构成,过渡层组成则与 H-PDC 的聚晶金刚石层(PCD layer)保持一致(见图 1(c)),梯度结构设计参照文献 [2]。所有样品均经研磨和抛光处理,最终制成尺寸为⌀16 mm×13 mm(1613 型)的 PDC 齿材料,具体参数如表 4 所示。实验极差分析表明,各因素影响主次顺序由大到小依次为 w_{Co}、w_{D_2}、w_{D_1},据此确定最优配方为:钻粉质量占金刚石微粉总质量的 3%,粒径为 D_3、D_2 和 D_1 的金刚石微粉的质量分数分别为 75%、15% 和 10%。

表 4　PDC 齿的尺寸参数

Table 4　Size of PDC cutter samples

No.	Diameter/mm	Height/mm	Thickness of PCD/mm	Chamfer of PCD
H-PDC	15.88	13.20	2.90	0.45 mm, 45°
G-PDC	15.88	13.21	2.92	0.43 mm, 44°

1.2　材料表征

采用型号为 Bruker D8 Advance 的 X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)对原料及 PDC 齿进行物相分析，扫描范围为 30°～100°。利用 ZEISS Gemini 300 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察其微观形貌，并结合能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)表征元素分布及含量。利用拉曼光谱仪(Horiba LabRAM HR Evolution)在 1 000～1 600 cm^{-1} 范围内对 PDC 齿的截面位置进行扫描，以评估其残余应力。采用热膨胀仪(PCY-G，湘潭湘仪)在空气气氛下测试样品的热稳定性，测试温度范围为 30～1 000 ℃，升温速率为 10 ℃/min。

1.3　VTL 检测

采用立式车床(VTL，SVT125，齐重数控装备)对 PDC 齿样品的耐磨性能进行评估。PDC 刀具对花岗岩工件由外径至内径进行径向磨削，单次磨削行程(1 pass)长度约为 283 m。通过测量磨损区域的面积(S)、长度(a)及高度(h)对磨损程度进行量化表征，具体实验测试与相关工艺参数如图 2 和表 5 所示。

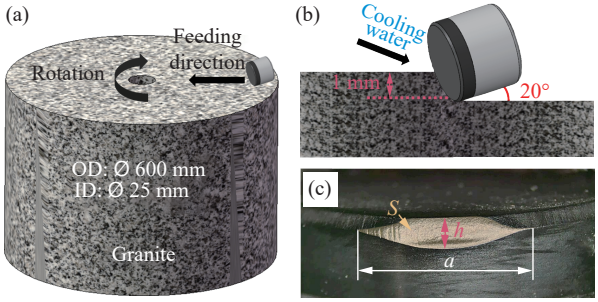


图 2　(a) 车磨花岗岩的参数，(b) PDC 齿车磨花岗岩示意图，(c) PDC 磨损位置的定量化表征

Fig. 2　(a) Parameters for grinding granite; (b) schematic diagram of the PDC cutter grinding the granite; (c) quantitative characterization of PDC cutter wear morphology

表 5　花岗岩参数和 VTL 实验参数

Table 5　Granite parameters and VTL experimental parameters

Parameters of granite		VTL test				
Hardness	Compression strength/MPa	Relief angle/(°)	Rotational speed/(r·min^{-1})	Feed rate/(mm·rad^{-1})	Depth/mm	Condition
110 HSD	182	20	100	1.0	1	Wet

1.4　冲击实验

采用重力落锤冲击试验机(LCS150，郑州豪泰机械)对 PDC 齿样品进行冲击韧性测试，图 3 为实验装置结构示意图。样品固定于专用夹具中，与合金钢冲击垫块(洛氏硬度为 HRC61～HRC63)呈 15°夹角。初始冲击能量设定为 30 J，若样品可连续承受 10 次冲击而未发生失效，则冲击能量以 10 J 为梯度逐级增加，并重复上述过程，直至样品发生冲击失效。记录导致样品破裂的冲击能量及相应的冲击次数。

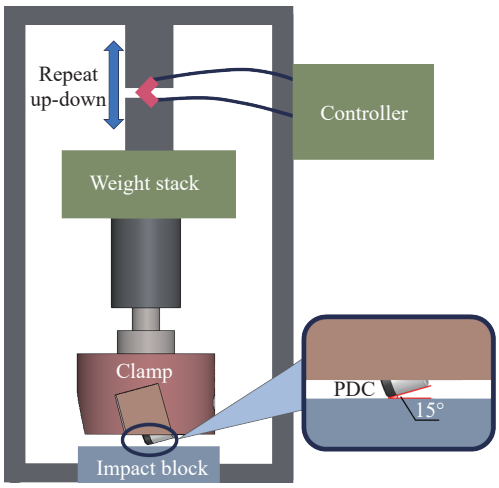


图 3　重力落锤冲击实验示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the drop hammer impact test

2　结果与讨论

2.1　相组成分析

图 4 给出了原料及 PDC 齿样品的 XRD 谱，金刚石微粉与钴粉均为高纯相，与标准 PDF 卡片吻合。在混合粉末的 XRD 谱中可识别出金刚石、钴以及碳化钨(WC)的衍射峰，其中 WC 来源于球磨过程中硬质合金磨球的磨损；钴的衍射强度显著低于 WC 与金刚石，其特征峰会被强衍射峰掩盖。经

高温高压烧结的 PDC 齿样品，其 PCD 层的衍射峰出现明显右移，该现象归因于金刚石层与硬质合金基体之间热膨胀系数的显著差异：在 PDC 齿冷却过程中，基体的收缩程度大于金刚石层，使其受到均匀的压缩应变，导致金刚石晶面间距减小，最终在 PCD 层中呈现残余压应力。

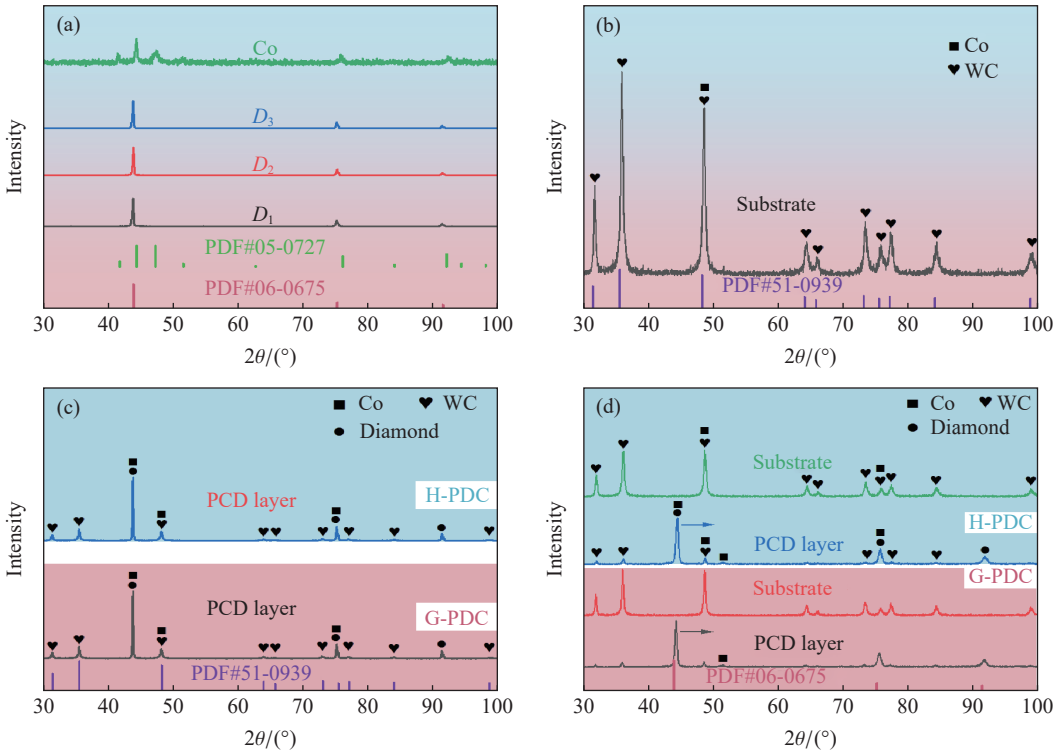


图 4　原料及 PDC 齿的 XRD 谱：(a) 原料，(b) WC 基体，(c) 混料，(d) 金刚石层和基体

Fig. 4　XRD patterns of the raw materials and PDC cutter: (a) raw materials; (b) WC matrix; (c) mixed powders; (d) PCD layer and the matrix of PDC

进一步对 PDC 不同位置处的残余应力进行拉曼测试，残余应力(σ_h)[9] 表示为

$$\sigma_h = 1\,000(\gamma_0 - \gamma)/2.88 \tag{1}$$

式中：γ_0 为金刚石无应力下的拉曼位移(1 332 cm^{-1})；γ 为测量的拉曼位移，cm^{-1}。式 (1) 中，σ_h<0 表示压应力，σ_h>0 表示拉应力。图 5 和表 6 的实验结果表明，PDC 截面位置的拉曼光谱显示出蓝移现象，进一步证实金刚石层中存在残余压应力。值得注意的是，G-PDC 工作层的压应力更大，而过渡层的压应力小于 H-PDC 的同一位置。这种残余应力状态主要源于金刚石、碳化钨基底(WC-Co)与烧结助剂之间

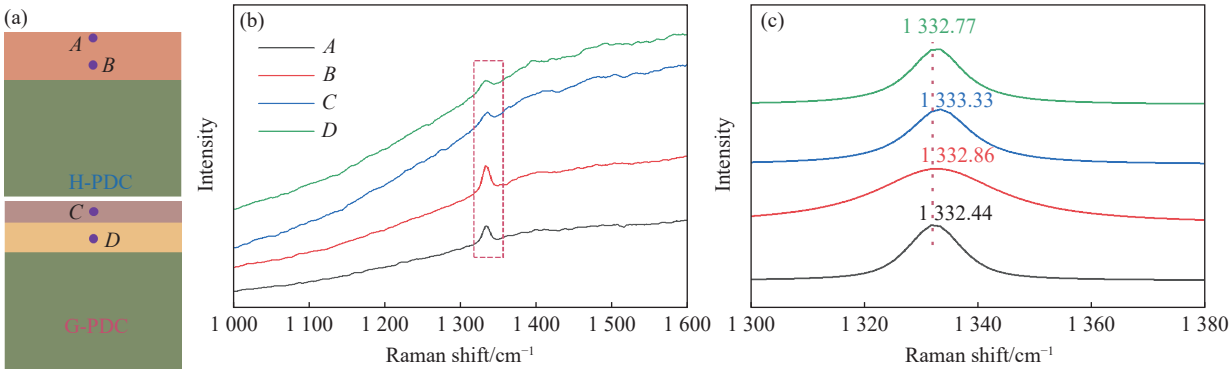


图 5　(a) PDC 齿截面的拉曼测试位置，(b) 不同位置的拉曼光谱，(c) 拉曼特征峰的高斯拟合曲线

Fig. 5　(a) Raman test positions of PDC cutters section; (b) Raman spectra at different positions; (c) Gaussian fitting curves of the Raman characteristic peak positions

的热失配；均匀分布且较高的 Co 含量进一步增强了 G-PDC 工作层的压应力。此外，烧结过程中细晶粒与粗晶粒金刚石颗粒之间的体积收缩差异也对残余应力状态产生影响，粗晶粒之间的相互约束能力较弱，有更多的空间可以通过晶界的微量滑移或调整来释放部分应力，因而过渡层的残余压应力比工作层的残余压应力小，PCD 层整体呈现压缩应力，有利于提高 PDC 的抗冲击性能[19]。

表 6　测试点的拉曼频移和残余应力

Table 6　Raman shift and residual stress for the test points

Test point	Raman shift/cm^{-1}	$\Delta\gamma$/cm^{-1}	Residual stress/MPa
A	1 332.44	−0.44	−152.8
B	1 332.86	−0.86	−298.6
C	1 333.33	−1.33	−461.8
D	1 332.77	−0.77	−267.4

2.2　微观形貌分析

图 6 展示了 PDC 齿的 PCD 层原料的微观形貌、粒度分布及元素组成。可见，金刚石粉末表面洁净、晶形完整、棱角清晰，边缘缺陷较少，颗粒尺寸分布窄，平均粒径与标称范围一致，晶粒尺寸较均匀。亚微米级钴粉（尺寸约为 580 nm）因比表面积大且具有磁性，呈现团聚倾向，团聚体的尺寸约为 4 μm，需球磨处理等工艺来改善其在混合粉末中的分散状态。EDS 检测（图 6(f)）显示，混合粉末位置 2 的

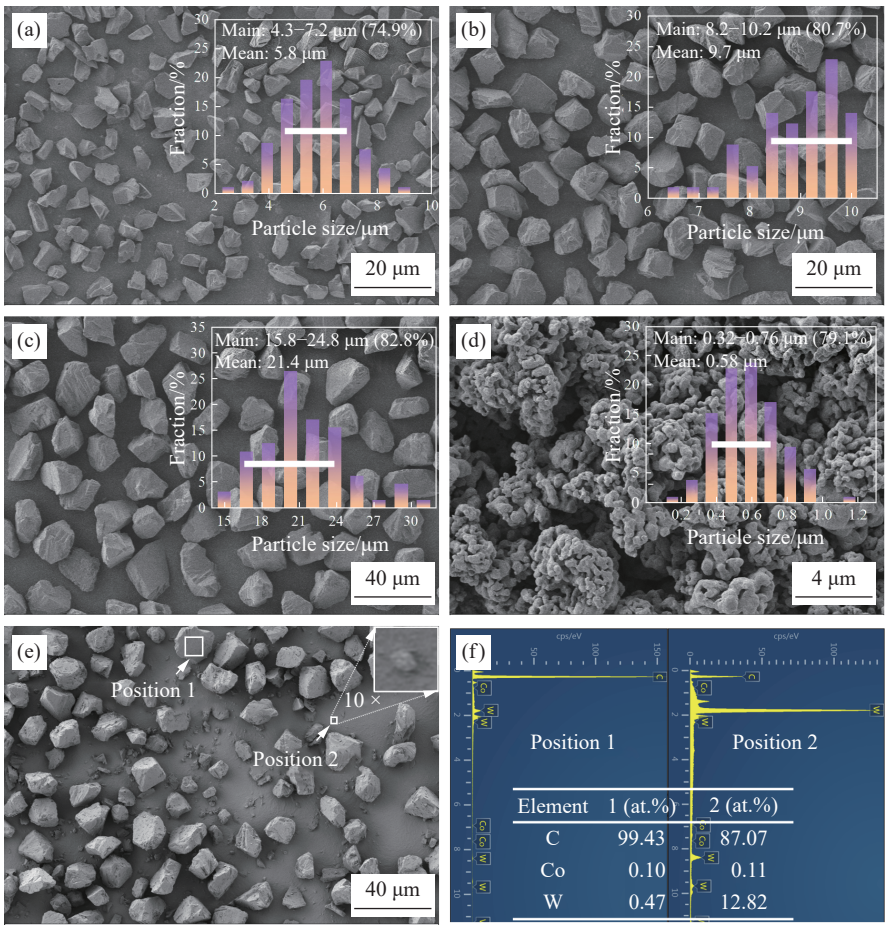
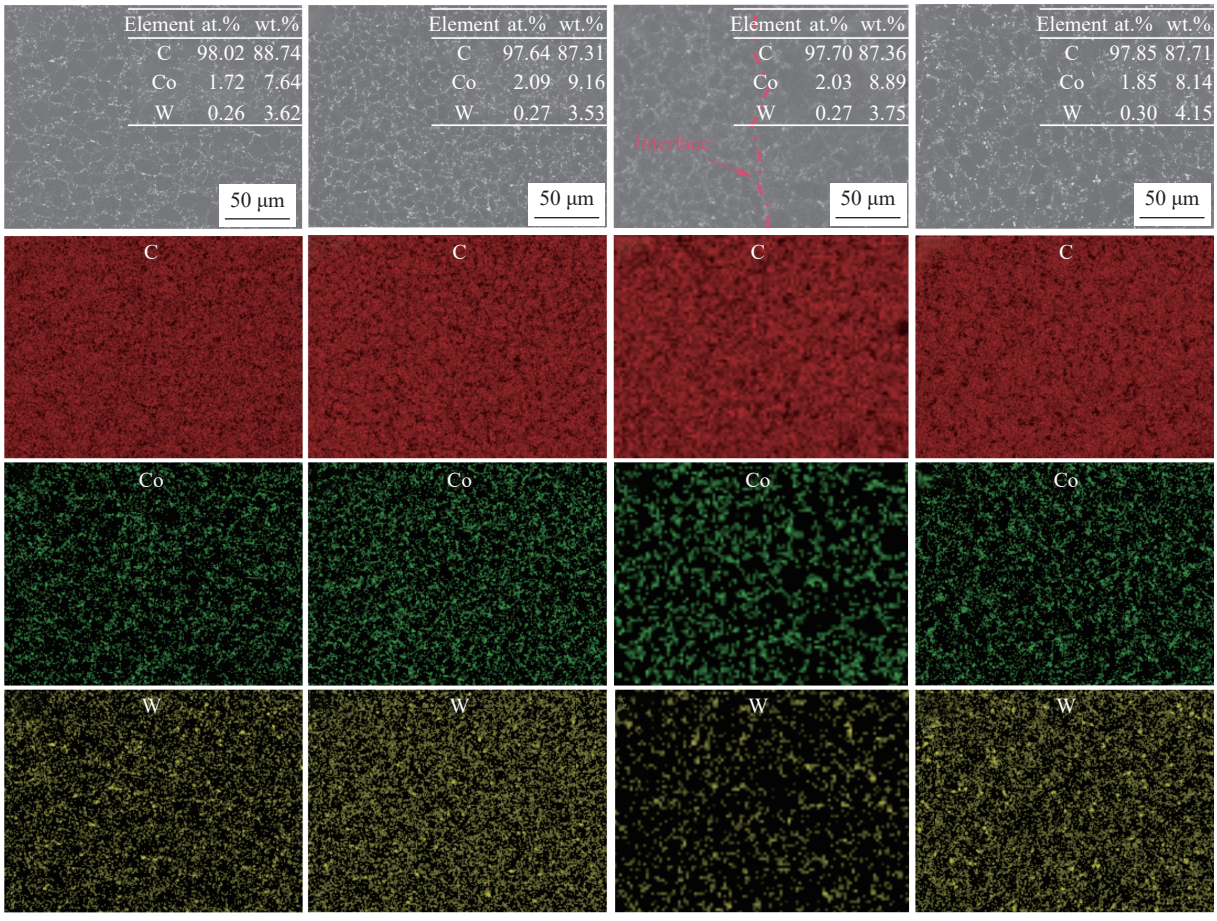


图 6　PCD 层原料的 SEM 图像及粒径分布：(a) D_1, (b) D_2, (c) D_3, (d) Co, (e) 混料, (f) 混料中颗粒点扫

Fig. 6　SEM images and particle size distribution of the raw PCD layer material: (a) D_1; (b) D_2; (c) D_3; (d) Co; (e) mixed materials; (f) element content of the particles in the mixed material

W 元素含量较高，与 2.1 节 XRD 中检测出 WC 物相的结果相互印证，证实了硬质合金磨球因磨损产生 WC 颗粒，并分散附着于金刚石表面。

对 H-PDC 和 G-PDC 截面位置的微观形貌、粒径分布及元素分布进行表征，结果如图 7 所示。2 种 PDC 的金刚石颗粒均烧结致密，未观察到明显的裂纹或孔隙。H-PDC 与 G-PDC 在组织结构和晶粒尺寸分布方面存在明显差异，G-PDC 在工作层与过渡层之间呈现出清晰的界面，与初始材料设计的梯度组成一致。高压烧结工艺有效抑制了金刚石晶粒的异常长大；同时，高压作用使部分颗粒发生破碎，进一步细化了晶粒。为探究梯度结构在高温高压环境下对元素迁移行为的影响，对样品不同区域的元素分布及含量进行检测。黑色区域代表金刚石，亮白色的晶界区域则对应 Co 和 WC，钴烧结助剂在高温高压驱动下发生熔化和迁移，优先富集于晶界区域，填充金刚石颗粒间的孔隙，提升 PCD 层的致密度，催化金刚石与金刚石之间形成强 D-D 键。值得注意的是，若晶界处的钴含量过高，易形成局部钴池，成为潜在失效源，降低 PDC 的使用寿命。较小的金刚石颗粒往往更易溶解于液态钴，然后重新沉淀 D-D 键合的金刚石[23]。G-PDC 工作层在材料设计中并没有额外添加钴，但经高温高压烧结，钴含量高于其过渡层，也显著高于 H-PDC 中对应区域的钴含量。这归因于其 G-PDC 的工作层采用更细的金刚石颗粒，有助于提高烧结致密度，高比面积造成晶界数量众多，毛细作用增强，钴含量随之增多，形成众多狭窄的钴迁移通道；同时，高比表面积的细晶结构增强钴的均匀分布能力，使得钴元素在更广泛的晶界区域内分散，从而在宏观上表现为整体钴含量较高；但在微观尺度上，单个晶粒界面的钴浓度相对较低。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 7　PCD 层的 SEM 图像、元素分布及含量：(a) H-PDC 中的 PCD 层，(b) G-PDC 的工作层，(c) G-PDC 中的工作层与过渡层的界面位置，(d) G-PDC 中的过渡层

Fig. 7　SEM images, element distribution and elemental composition of the PCD layer: (a) PCD layer in H-PDC; (b) working layer of G-PDC; (c) interface between the working layer and the transition layer in G-PDC; (d) transition layer in G-PDC

2.3　脱钴检测

为模拟 PDC 材料在实际钻井极端工况下的服役行为，在性能测试前，需要对样品进行脱钴处理[24−25]，PDC 的脱钴深度均大于 1 mm。PDC 脱钴后的截面形貌如图 8 所示。

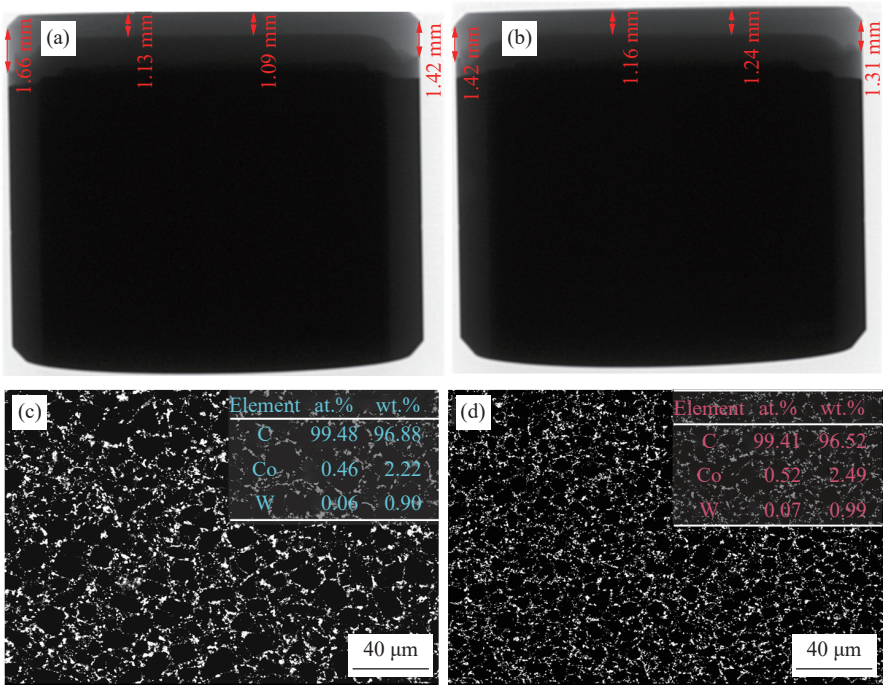


图 8　X 射线检测的 (a) H-PDC、(b) G-PDC 的脱钴深度，(c) H-PDC 截面脱钴的金刚石层以及 (d) G-PDC 截面脱钴的工作层的 SEM 图像及元素含量

Fig. 8　X-ray characterization of Co-depleted depth in (a) H-PDC and (b) G-PDC; SEM images and element composition of (c) the Co-depleted diamond layer in the cross-section of H-PDC, and (d) Co-depleted working layer in the cross-section of G-PDC

从实验结果可清晰识别出 3 个区域：浅色部分为 PCD 脱钴层，黑色区域为硬质合金基体，介于两者之间的区域为未脱钴的 PCD 层。进一步对脱钴区域进行微观结构表征，G-PDC 脱钴层中的钴含量相对较高，检测结果与 2.2 节未进行脱 Co 的位置一致（图 7）；钴在晶界处均匀分布，单个金刚石晶粒周围的钴含量较 H-PDC 的钴含量更少。从工作层到过渡层再到基体，构成了钴浓度梯度。

2.4　耐磨性能检测

为评估复合片在极端工况下的耐磨性能，对脱钴后的 PDC 进行了车磨花岗岩实验，以模拟其在超深井坚硬地层中的磨削环境。通过测量磨损参数（S、a、h）表征其耐磨性能。PDC 样品的磨损参数均随车磨次数增加而逐渐上升，如图 9 和图 10 所示。



图 9　PDC 的 VTL 耐磨性能检测：(a) H-PDC，(b) G-PDC

Fig. 9　VTL wear resistance tests of PDC: (a) H-PDC; (b) G-PDC

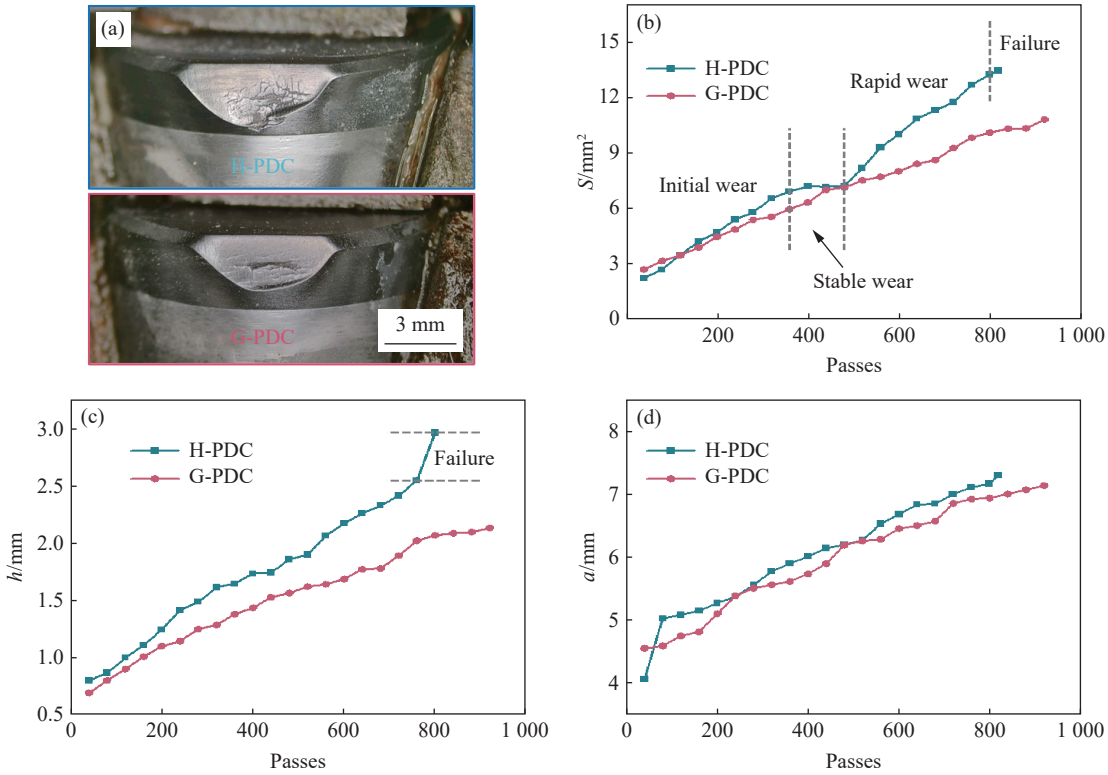


图 10　(a) PDC 齿在 800 passes 的磨损情况以及磨损参数 (b) S、(c) h、(d) a 随车磨测试的变化

Fig. 10　(a) Wear condition of PDC cutter after 800 passes, and the wear parameters (b) S, (c) h, (d) a change with the number of passes

H-PDC 的耐磨寿命为 800 passes，显著优于正交试验中其他配方样品；G-PDC 在整个测试过程中未出现磨损失效迹象，仅表现为磨损参数的均匀增长，其寿命高达 920 passes。以 H-PDC 为例，其磨损过程可分为 4 个阶段：初始磨损阶段（小于 320 passes），因初始接触面积有限，磨损率较高；稳定磨损阶段（400～480 passes）：磨损参数均匀上升，磨损速率最低；快速磨损阶段（480～780 passes），磨损高度 h 超过脱钴深度，致使材料耐磨性显著降低，同时 H-PDC 中钴的局部聚集加剧了磨损行为；失效阶段（大于等于 800 passes），钴富集区域出现大颗粒金刚石脱落[26]，导致局部剥落，参数 h 急剧上升。值得注意的是，在 800 passes 时，G-PDC 的磨损参数 S、h 和 a 分别较 H-PDC 降低 23.81%、28.39% 和 1.50%。G-PDC 的磨损过程以初始磨损区和稳定磨损区为主，表现出更小的磨损参数与更长的耐磨寿命。G-PDC 耐磨性能的显著提升得益于其双层梯度结构设计：工作层细晶粒的金刚石具有高比表面积，在高温高压烧结过程中促进颗粒塑性流动与重排，形成高度致密的烧结体，具备优异的表面完整性与耐磨性；同时，该结构中钴分布更均匀，有效避免钴池形成，提升了整体硬度与强度，从而赋予其卓越的耐磨性能[27]。

2.5　冲击性能检测

采用重力落锤冲击试验评估 PDC 齿的冲击韧性，以模拟钻探过程中遭遇地层突变或钻井液冲击等引起的瞬时高能载荷作用，进而量化其抗断裂及抗裂纹扩展能力。结果显示，G-PDC 的平均冲击能量（$\overline{E}$）为 740.0 J，较 H-PDC 提升约 107%；其冲击能量标准差（σ）为 82.05 J，较 H-PDC 降低约 46.87%（表 7）。以上数据表明，G-PDC 不仅具备优异的冲击韧性，同时具有更高的冲击稳定性，实现了 PDC 的冲击韧性与耐磨性的同步提升。

为深入探究 PDC 齿冲击性能的差异机制，对冲击实验后的样品断裂面进行了微观结构表征，结果如图 11 所示。H-PDC 与 G-PDC 在断裂形貌上表现出较大区别。H-PDC 的 SEM 图像显示，其断面不规则，存在因金刚石颗粒剥落形成的凹凸区域，晶界处可见明显的 D-D 键合及亮白色 Co-W 氧化物，并伴有脱钴处理留下的孔隙。此外，部分晶界区域出现钴元素聚集现象。G-PDC 的断裂面则同时呈现穿晶

断裂(transgranular fracture, TF)与沿晶断裂(intergranular fracture, IF)特征。由于其过渡层中的粗晶金刚石比例较高，扩展中的微裂纹在遇到大尺寸晶粒时会发生偏转，沿晶界分支或绕行至能量较低的路径。这一过程使裂纹扩展路径由直线转变为曲折形态，从而显著增加断裂能消耗，缓解裂纹尖端的应力集中，降低发生灾难性脆性断裂的风险。此类混合断裂模式有效提高了材料的裂纹扩展能量阈值，进而增强整体冲击抗力[9, 28]。

表 7　PDC 齿的冲击测试数据

Table 7　Impact test data of PDC cutters

Sample	Impact energy/J	$\overline{E}$/J	σ/J
H-PDC	300, 210, 420, 500	357.5	154.48
G-PDC	700, 750, 850, 660	740.0	82.05

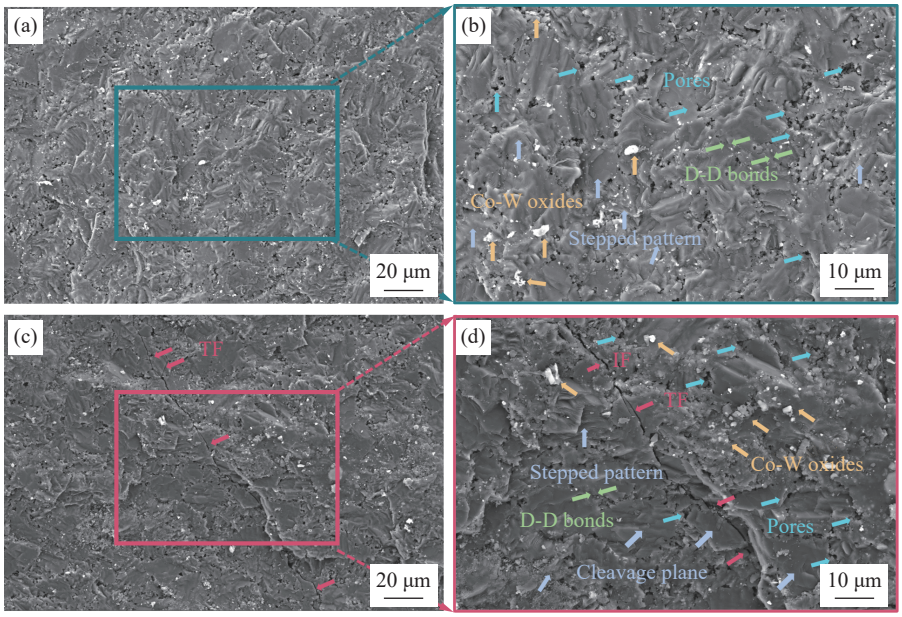


图 11　PDC 齿冲击断裂位置的 SEM 谱: (a)～(b) H-PDC, (c)～(d) G-PDC

Fig. 11　SEM spectrum of the impact fracture location of PDC cutters: (a)–(b) H-PDC; (c)–(d) G-PDC

G-PDC 抗冲击性能的提升源于多因素的协同作用，该冲击试验主要受径向残余应力的影响，而径向残余应力主要来源于界面处的热残余应力，集中在界面的径向位置，而中心受到的影响较小[23, 29]，且 PCD 层中的残余压应力有利于延迟裂纹的形成，抑制冲击载荷的破坏行为，从而提高冲击韧性[30]；粒径和钴含量梯度结构设计有助于提升 PDC 齿的冲击韧性。过渡层中的钴含量较高(见图 7)，但钴分布均匀，未出现明显聚集，有利于构建良好的钴过渡梯度，提升硬质合金与金刚石层的界面强度[31]。因此，所设计的梯度结构有效增强了层间界面的结合强度，对 PDC 材料的冲击韧性与稳定性的整体提升具有重要的促进作用。

2.6　热稳定性测试

为模拟井下钻探过程中因切削岩石产生的局部高温环境，对 PDC 齿样品进行了热膨胀分析以评估其热稳定性。图 12 展示了热膨胀(ΔL)和热膨胀系数(α)随温度(T)的变化规律。

本研究依据热膨胀曲线(ΔL-T 和 α-T)切线交点所对应的温度作为热稳定性的关键评价指标[32]，并取 2 组样品的平均值作为最终结果。在该临界温度以下，热膨胀系数与热膨胀均呈现缓慢而均匀的上升趋势；一旦超过该温度，则出现急剧加速增长。这一突变主要源于碳化钨、金刚石与钴三者具有不同的热膨胀系数，所产生的热应力诱发微裂纹，最终导致金刚石层的剥落或断裂。对于未脱钴的 PCD 层，

G-PDC 的热稳定温度较 H-PDC 提高约 30 ℃。经脱钴处理后，2 种 PDC 的热稳定温度均提升约 55 ℃，且 G-PDC 仍比 H-PDC 高出近 15 ℃。在临界温度点，G-PDC 的热膨胀为 219.5 μm，较 H-PDC 降低 10.59%，其热膨胀系数也相应下降 8.07%。这些结果充分表明，双层梯度结构设计有助于提高复合片的热失效阈值。EDS 结果（图 7 和图 8）进一步表明：工作层晶界处实现更均匀的钴分布，梯度结构有效降低了过渡层中的钴含量，构建钴梯度浓度，从而改善了金刚石层和硬质合金界面的热失配问题。实验结果表明，钴含量的合理控制有助于降低 PDC 热膨胀率，进而提升热稳定性。

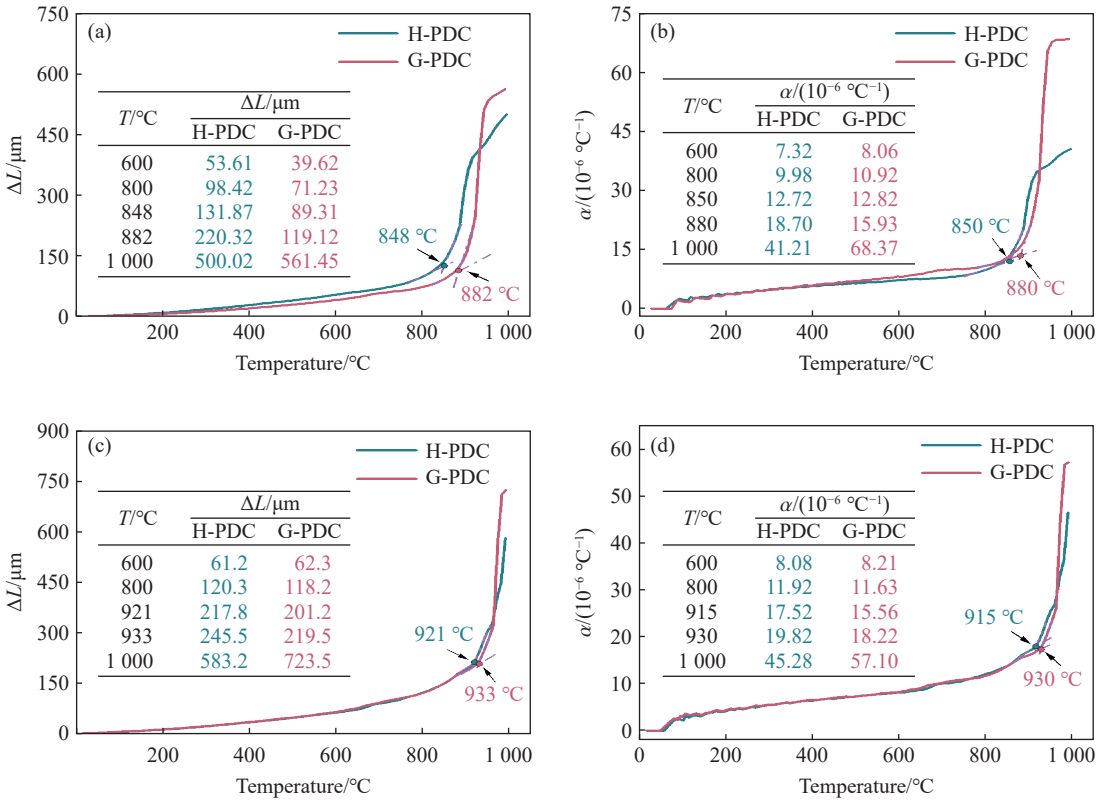


图 12　未脱钴 PDC 齿的 (a) 热膨胀和 (b) 热膨胀系数随温度的变化，脱钴 PDC 的 (c) 热膨胀和 (d) 热膨胀系数随温度的变化

Fig. 12　Temperature dependence of (a) thermal expansion and (b) coefficient of thermal expansion for the PDC cutter without codepletion; (c) thermal expansion and (d) coefficient of thermal expansion for the cobalt-depleted PDC cutter

3　结　论

通过正交试验对 PDC 齿配方进行了设计与优化，在 1 750 ℃ 和 8.5 GPa 的高温高压条件下，成功制备了具有“细晶工作层/粗晶过渡层”梯度结构的 PDC 齿（G-PDC），系统评价了其微观结构、耐磨性、冲击韧性及热稳定性，并与均匀结构的 PDC 齿（H-PDC）进行对比，得到以下主要结论。

(1) 高压烧结结合梯度结构设计有效细化了金刚石晶粒，促进了钴黏结剂的均匀分布，抑制了钴池形成，增强了 D-D 键合及层间界面结合，并在 PCD 层中引入了更高的残余压应力。

(2) G-PDC 展现出优异的综合力学性能：其耐磨寿命达 920 passes，较 H-PDC（800 passes）显著提升；平均冲击韧性为 740 J，比 H-PDC 提高约 107%，且其冲击能的标准差降低 46.87%，具备更优的冲击稳定性。

(3) 梯度结构有效缓解了因热失配引发的内应力集中，使 G-PDC 在脱钴前后的热稳定温度均高于 H-PDC，热稳定温度保持约 30 ℃ 的优势，同时热膨胀与热膨胀系数分别降低了 10.59% 与 8.07%。

本研究证实，在高温高压烧结环境下选择“梯度结构”设计可突破传统 PDC 齿的性能瓶颈，实现耐磨性、冲击韧性及热稳定性的同步提升，为适用于深层/超深层钻探的下一代超硬复合材料开发提供了新的设计思路与实验依据。

参考文献：

[1] GUO Y Z, MENG D Z, CAI Z B, et al. Dynamic response and damage behavior of impact wear for polycrystalline diamond compact under low kinetic energy impact [J]. Carbon, 2024, 226: 119166.

[2] WANG X Q, TU J B, LIU B C. High-impact-resistant polycrystalline diamond compact cutters with double working layers [J]. Diamond and Related Materials, 2025, 152: 111906.

[3] 王虎, 胡永, 赵洪波. PDC 异形齿破岩研究与应用进展 [J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 10–17.
WANG H, HU Y, ZHAO H B. Research and application progress of special-shaped PDC cutters in rock breaking [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 10–17.

[4] RONG L L, ZHANG S H, WU D Y, et al. Optimization of functionally graded polycrystalline diamond compact based on residual stress: numerical simulation and experimental verification [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 117: 106414.

[5] 崔行宇, 陈卫民. 合成工艺对聚晶金刚石复合片性能的影响 [J]. 超硬材料工程, 2024, 36(5): 44–49.
CUI X Y, CHEN W M. Effect of synthesis process on properties of PDC [J]. Superhard Material Engineering, 2024, 36(5): 44–49.

[6] MA Y C, YOU M H, ZHANG W L, et al. Research on dynamic wear law of polycrystalline diamond compact (PDC) single cutter under thermal-mechanical coupling [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 247: 213673.

[7] DING Y B, LI Q K, JIA R Z, et al. Surface texturing on polycrystalline diamond compact cutter by nanosecond laser processing [J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(4): 2402204.

[8] JIANG B, KOU Z L, WANG C Q, et al. Effect of diamond layer thickness on tool wear of polycrystalline diamond composites [J]. Diamond and Related Materials, 2022, 122: 108800.

[9] LI F J, LIU W, GAO D L, et al. Study on super impact resistant polycrystalline diamond compacts with homogeneous PCD/WC-Co interlayer [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 119: 106558.

[10] MENG D Z, LI Y, YUE W. Mechanism and evolution of polycrystalline diamond compact back rake angles by experiment and simulation on impact mechanical response [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2025, 132: 107279.

[11] WU J J, ZHANG S H, DING X Y, et al. Abrasion rule of polycrystalline diamond compact bit cutter [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(4): 1135–1143.

[12] CLAYTON R, CHEN S L, LEFORT G. New bit design, cutter technology extend PDC applications to hard rock drilling [C]// SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE, 2005: 23−25.

[13] ZHOU L, HE D W, SU Y X, et al. Effect of residual cobalt on cutting edge wear behavior in polycrystalline diamond compact (PDC) [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2025, 133: 107390.

[14] HUANG H F, ZHAO B, WEI W L, et al. Effect of cobalt content on the performance of polycrystalline diamond compacts [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 92: 105312.

[15] LUO X, GOU R Y. Friction and wear of polycrystalline diamond in oil drilling: a review [J]. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2025, 33(5): 473–486.

[16] GUO Z H, LI C G, MA Z F, et al. Preparation, wear resistance, and impact toughness of homoepitaxial diamond film deposited on polycrystalline diamond compact by HFCVD method [J]. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2025, 33(3): 294–302.

[17] KANYANTA V, DORMER A, MURPHY N, et al. Impact fatigue fracture of polycrystalline diamond compact (PDC) cutters and the effect of microstructure [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 46: 145–151.

[18] TONG X, ZHOU L, TIAN Y, et al. Effect of pressure on sintering behavior of polycrystalline diamond [J]. Diamond and Related Materials, 2024, 144: 111049.

[19] WANG X Q, TU J B, LIU B C. Effects of initial diamond particle size on the comprehensive mechanical properties of PDC [J]. Ceramics International, 2025, 51(8): 10433–10442.

[20] DE MEDEIROS R B D, DE PAIVA BARRETO L P, GURGEL D P, et al. Study of tantalum as an alternative binder of polycrystalline diamond [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 99: 105587.

[21] TU J B, WANG X Q, DAI W H, et al. Mechanical properties and microstructures of HPHT sintered polycrystalline diamond compacts reinforced with SiC whiskers [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 153–167.

[22] LIU W, LI F J, ZHANG J W, et al. Synthesis of polycrystalline diamond using C_{60} as binder for deep-Earth scientific exploration [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, 8(4): 299.

［23］NI P S, ZHAO Z, YANG W X, et al. Effect of feedstock diamond powder property on microstructure and mechanical properties of polycrystalline diamond compacts [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 111: 106102.
［24］YANG Y, DUAN L C, HU Y L, et al. Cobalt removal process from PDC with ultrasonication in neutral electrolyte [J]. Ceramics International, 2024, 50(20): 39298–39306.
［25］LI L, WU W Y, LIU J, et al. Study on cobalt removal process of PDC by pressurized chemical precipitation method [J]. Diamond and Related Materials, 2023, 139: 110368.
［26］ZHAO S Z, CUI X W, HAO J L, et al. An advanced investigation of polycrystalline diamond compact's degradation mechanism during granite turning [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 120: 106615.
［27］ZHAO S, LI C F, DAVOODI D, et al. Tribological behavior of PDC-cutter including cemented carbide and polycrystalline diamond composites produced by HPHT for drilling applications [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 123: 106756.
［28］LIU W, LI Y, GAO D L. New understandings of the applications of PDC cutters in oil and gas drilling [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 122: 106724.
［29］KE X H, YANG X W, PRASAD V, et al. Effect of thermal residual stress on the impact failure of PDC in application [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2025, 128: 107078.
［30］WANG X Q, TU J B, DAI W H, et al. Novel high-performance polycrystalline diamond compact enhanced using vanadium additives [J]. Ceramics International, 2024, 50(10): 17773–17782.
［31］WANG X Q, TU J B, LIU B C. On the comprehensive performance enhancement of polycrystalline diamond compact by initial diamond particle ratio optimization and cobalt removal treatment [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2025, 131: 107226.
［32］WANG X Q, TU J B, DAI W H, et al. Regulating the binder phase of polycrystalline diamond compact by adding tantalum to enhance the mechanical properties [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 116: 106344.

Role of Gradient Structure in the Integrated Performance of PDC Cutters

GAO Jun, ZHANG Zhicai, HOU Zhiqiang, WANG Chao, LI Hao, YANG Yikan,
YANG Jiao, FANG Rui, TANG Yao, WANG Haikuo

（*College of Energy Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310027, *Zhejiang*, *China*）

Abstract: Addressing the urgent demand for high-performance polycrystalline diamond compact (PDC) cutters in deep/ultra-deep oil and gas exploration, this work optimized the PDC synthesis formulation through orthogonal experimental design. Under high pressure conditions (8.5 GPa and 1 750 ℃), we successfully fabricated both conventional homogeneous mixed PDC cutter (H-PDC) and gradient-structured PDC cutter (G-PDC) featuring a "fine-grained work layer/coarse-grained transition layer" structure. Microstructural characterization reveals that the gradient structure facilitates uniform distribution of cobalt binder, suppresses cobalt aggregation, enhances interlayer interfacial bonding, and generates higher residual compressive stress. The cobalt mass fraction in the G-PDC work layer is 9.16%. After acid leaching for cobalt removal, the cobalt mass fraction decreased to 2.49%. Performance evaluations demonstrate that G-PDC achieves a wear resistance lifespan of 920 passes, superior to H-PDC (800 passes). The average impact toughness of G-PDC reaches 740.0 J, representing approximately 107% improvement over H-PDC. Furthermore, the gradient structure alleviates thermal expansion mismatch, increasing the thermal stability temperature by about 30 ℃. This research confirms that combining high pressure synthesis technology with gradient structural design can synergistically enhance the wear resistance, impact toughness, and thermal stability of PDC cutters, providing a viable pathway for developing next-generation superhard composites for extreme conditions.

Keywords: polycrystalline diamond compact (PDC); gradient structure; impact performance; wear resistance; thermal stability; high pressure sintering