

doi:10.3799/dqkx.2016.076

基于打滑地层的孕镶金刚石钻头设计

王佳亮¹, 张绍和²

1. 湖南科技大学海洋矿产资源探索装备与技术湖南省工程实验室, 湖南湘潭 411201

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

摘要: 为了提高金刚石钻头在坚硬致密、弱研磨性地层的钻进效率, 将弱化胎体耐磨损性能理论与切削齿非光滑设计相结合, 制作钻头进行现场试验并对胎体进行扫描电镜分析。研究结果表明: 在胎体中添加适当浓度的胎体弱化颗粒, 有利于提高钻头的钻速; 经胎体耐磨性弱化处理的钻头在钻进过程中, 弱化颗粒易于从胎体表面脱落, 使其表面形成微观非光滑形态, 提高了钻头唇面与岩石的单位面积压力, 增加了孔底岩粉的研磨能力, 促进了胎体中新颗粒金刚石的出刃; 弱化颗粒浓度存在一个较优的设计范围, 过高或过低都不利于提高钻头的钻进效率和使用寿命。

关键词: 胎体耐磨损性弱化; 金刚石钻头; 非光滑形态; 胎体弱化颗粒; 弱化颗粒浓度; 工程地质。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2016)05-0895-06

收稿日期: 2015-12-12

Design of Impregnated Diamond Bit Based on Slipping Formation

Wang Jialiang¹, Zhang Shaohe²

1. Hunan Province Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Weakening matrix theory was applied on design of the drilling bit in order to improve the drilling efficiency of impregnated diamond bit in hard compact rock formation in this study. The matrix was analyzed with SEM and EDS. The results show that it can help improve drilling rate by putting matrix weakening particle into matrix. Under the process of drilling, the weakening particle can drop easily from matrix developing non-smooth surface; the pressure between surface and rock is increased and the weakening particle participates in wearing matrix, increasing abrasive power of rock powder, promoting speed of diamond metabolism. There is an optimum range for matrix weaken ratio, designing too high or too low simply can not improve drilling rate and bit life.

Key words: weakening matrix; diamond bit; non-smooth surface; particle of weakening matrix; weakening ratio; engineering geology.

0 引言

随着深部找矿工作的开展, 遇坚硬致密、弱研磨性岩层的几率显著增加。由于该岩层岩石致密且抗压强度高, 常规金刚石钻头在钻进该地层时, 胎体中的金刚石易被磨平, 钻头易出现打滑现象(陆洪志和刘晓阳, 2004; Tan *et al.*, 2014)。为此, 科研人员采用不同方法, 如唇面酸洗法、孔底投砂法、优化切削齿结

构、提高金刚石品级等, 但仍无法较好地解决钻头打滑现象。在金刚石切割工具时, 在保证胎体强度能够满足使用要求的前提下, 利用适当方法降低胎体的耐磨损性能, 将这种工艺过程称为胎体耐磨损性弱化(宋月清等, 1997, 1998)。笔者将金刚石工具中的胎体耐磨性弱化理论与金刚石钻头切削齿的非光滑设计相结合, 提出了钻头设计新思路, 以期更好地解决钻头在坚硬致密弱研磨性地层钻进时的打滑现象。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51074180)。

作者简介: 王佳亮(1986—), 男, 讲师, 博士, 从事地质工程等方面的教学和科研工作。E-mail: 40850979@qq.com

引用格式: 王佳亮, 张绍和, 2016. 基于打滑地层的孕镶金刚石钻头设计. 地球科学, 41(5): 895—900.

1 孕镶金刚石钻头磨损机理

金刚石钻头破碎岩石时,一方面,岩石对金刚石进行冲击和摩擦,导致金刚石发生磨粒磨损;另一方面,岩屑及脱落 的金刚石对胎体进行磨损.金刚石的磨损形态主要有初期形态、微破碎状态、大面积破碎状态、抛光状态、脱落状态等(Gao and Yuan,2011).金刚石初期或微破碎状态保持得越久,则钻进效率越高,钻头寿命越长.胎体的磨损主要分以下几类:冲洗液中的岩屑等固相颗粒冲蚀胎体;岩屑挤夹在胎体唇面间隙中,以滚动和滑动方式凿削胎体;岩屑受到冲洗液的作用,获得一定的速度,以碰撞形式磨损胎体(Polini and Turchetta, 2004; de Oliveira *et al.*,2007;蒋青光和张绍和,2012).胎体的磨损速度应与金刚石的磨损速度相适应,若胎体的耐磨性过高,则易导致胎体的磨损速度减慢,金刚石新陈代谢周期下降,致使钻头打滑;若胎体耐磨性过低,则易导致胎体磨损过快,胎体对金刚石的包镶力下降,造成金刚石提前脱落,影响钻头寿命(Zhang *et al.*, 2002;沈立娜和阮海龙,2011;刘天乐等,2015).此外,岩石本身的硬度、致密度也与钻头磨损有密切的关系.坚硬致密、弱研磨性岩层岩石的硬度高、强度大、岩粉少,钻头胎体不易磨损.

2 钻头设计

2.1 胎体耐磨性弱化方式设计

弱化胎体耐磨性能的方式大体上可以分为:工艺控制法、表面非光滑形态法、添加剂法等.钻头在坚硬致密弱研磨性地层钻进时,产生的岩粉少且研磨能力弱,胎体中金刚石的新陈代谢速度减慢,导致钻头打滑不进尺(张丽和杨凯华,2003;张绍和和王涛,2004).因此,在该地层钻进时要求钻头具有较高的自锐能力.本设计将添加剂法和表面非光滑形态法相结合,将 SiC 磨粒作为胎体弱化元素添加至钻头胎体中,磨粒形状不规则,粒度为 550~



图 1 试验钻头成品
Fig.1 End-product drawing

650 μm .钻进过程中由于 SiC 磨粒脆性较大且与胎体包镶力较弱,易于从胎体中脱落,使胎体唇面形成微观非光滑形态,增加了钻头唇面的粗糙度,有利于唇面比压的提高.此外,残留孔底的 SiC 磨粒增加了岩粉的研磨能力,以达到提高钻头钻进效率的目的.

2.2 钻头参数设计

常规钻头参数设计主要包括胎体性能参数、金刚石参数、切削齿齿型结构参数、水路系统参数等.本设计还包括了胎体弱化颗粒度浓度参数设计.胎体弱化颗粒浓度是指胎体弱化颗粒体积占胎体体积的百分比.弱化颗粒浓度参数的设计原则是在胎体强度少受损害的前提下适当降低胎体的耐磨损性能.试验研究表明,弱化颗粒浓度设计不当的情况下,胎体存在以下几个问题:弱化颗粒浓度过低,则胎体力学性能改变不明显;弱化颗粒浓度过高,则金刚石与胎体弱化颗粒易发生互粘现象,导致金刚石提前脱落造成钻头寿命下降.

根据前述试验结果,确定钻头设计参数如下:钻头尺寸为外径 $\Phi 77$,内径 $\Phi 49$;胎体硬度为 HRC20;金刚石选用 SMD40 型.试验钻头金刚石的体积浓度和弱化颗粒的体积浓度如表 1 所示;水口数为 8 个;切削齿设计为径向同心环齿型结构.钻头参数设计如表 1 所示.采用 100kW 的频炉进行热压烧结.烧

表 1 钻头设计参数
Table 1 Design parameters of both bits

编号	金刚石粒度(μm)	金刚石浓度(%)	胎体硬度(HRC)	弱化颗粒浓度(%)	水口数(个)	切削齿型结构
1	355~450	88	20	—	8	同心环齿
2	355~450	80	20	10	8	同心环齿
3	355~450	72	20	20	8	同心环齿
4	355~450	64	20	30	8	同心环齿

结工艺为:烧结温度 1 000 ℃,烧结压力(压机表头压力读数)为 5.5 MPa,保温保压时间 5 min.钻头成品如图 1 所示.

3 钻头试验

3.1 野外试验

试验地点位于江西新余某矿区,主要地层为:(1)石英岩,致密研磨性差,平均厚度为 8~10 m;(2)硅化大理岩,硅化强,坚硬,平均厚度为 25 m 左右;(3)二长花岗岩,夹有磁铁矿,弱研磨性,平均厚度为 30 m 左右,较完整.岩石硬度可钻性级别为 8~10 级,研磨性为中等至较强,压入硬度为 400~550 kg/mm².钻进参数如下:钻压分别为 9~13 kN;转速为 750~850 r/min;泵量为 36 L/min.

根据标准和经验,确定钻头设计参数如下:钻头尺寸外径 Φ77,内径 Φ49;胎体硬度为 HRC20;金刚石粒径为 355~450 μm;水口数为 8 个,试验结果如表 2 所示,钻头钻进效率和使用寿命如图 2 所示.

由表 2 可以看出,添加了胎体弱化颗粒的钻头的平均钻速较常规设计的 1 号钻头均有所提高,其中 2 号钻头提高了 8%,3 号钻头提高了 64%,4 号钻头提高了 102%.钻头的使用寿命随胎体弱化度的增大呈下降趋势,其中 4 号钻头寿命下降最明显,较常规设计的 1 号钻头下降了 37%,严重影响了钻头的综合使用性能.2 号钻头的寿命比 1 号钻头仅下降 4%,但是其平均钻速仅提高了 8%,因此不是最佳设计方案.3 号钻头平均钻速虽然不是最高(仅次于 4 号钻头),但其使用寿命比 1 号钻头仅下降了 13%,平均钻速提高了 64%.在坚硬致密、弱研磨性地层中钻进,钻头设计应以提高钻进速度为侧重点,力求快速通过“打滑”岩层,而非过分强调钻头使用寿命.因此,3 号钻头的综合性能表现最好,为本次设计的较佳方案.

3.2 分析与讨论

采用 EPMA-1720 电子探针及 GENSIS60 能谱仪对胎体表面进行形貌观察和微区成分分析.

图 3 所示为钻头的胎体磨损形貌,其中图 3a 为 1 号钻头胎体形貌图,图 3b 为图 3a 圆形框区域金刚石放大照片.由图 3a 可以看出,金刚石在胎体中分布较均匀,未出现偏聚现象.但是,金刚石磨粒出刃高度较低且胎体表面无明显的磨粒磨损特征.这是由于所钻地层产生的岩粉少且研磨能力弱,导致胎体的磨损速度下降,金刚石不易出刃.由图 3b 可

表 2 钻头试验参数			
Table 2 Experimental data of both bits			
钻头编号	累计进尺(m)	回次数	平均钻速(m·h ⁻¹)
1	45.4	17	0.56
2	43.5	14	0.61
3	39.2	13	0.92
4	28.4	10	1.13

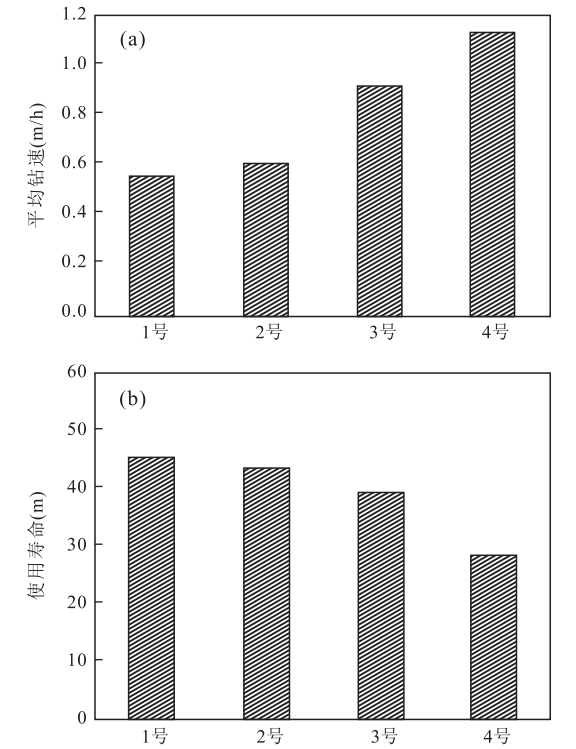


图 2 钻头试验结果
Fig.2 Test results of bits

以看出,金刚石发生了解离断裂且出现剥层破坏,但金刚石仍无法脱落,严重影响了钻进效率.

图 3c 为 2 号钻头胎体形貌图,图 3d 为图 3c 方形框区域胎体放大照片.由图 3c 可以看出,胎体中存在尺寸约为 400 μm 的大颗粒,颗粒形状不规则,结合能谱分析,判断该颗粒为 SiC 颗粒.与 1 号钻头相比,2 号钻头胎体有较明显磨粒磨损特征,存在较浅的横向犁沟.这是由于 SiC 颗粒易于从胎体表面脱落,增加了胎体的粗糙度,此外脱落 SiC 颗粒与孔底岩粉共同研磨胎体,增加了岩粉的研磨能力,导致胎体磨损量较 1 号钻头有所增加.但是,金刚石出刃高度仍不理想,这是由于胎体弱化颗粒浓度设计过低,孔底岩粉的研磨能力仍无法满足金刚石正常新陈代谢要求所致.由图 3d 可以看出,胎体表面存在剥落和粘着的现象,对粘着物进行能谱分析可知,其主要含有 Si, Ca, K 元素,确定为岩屑,证明胎体发

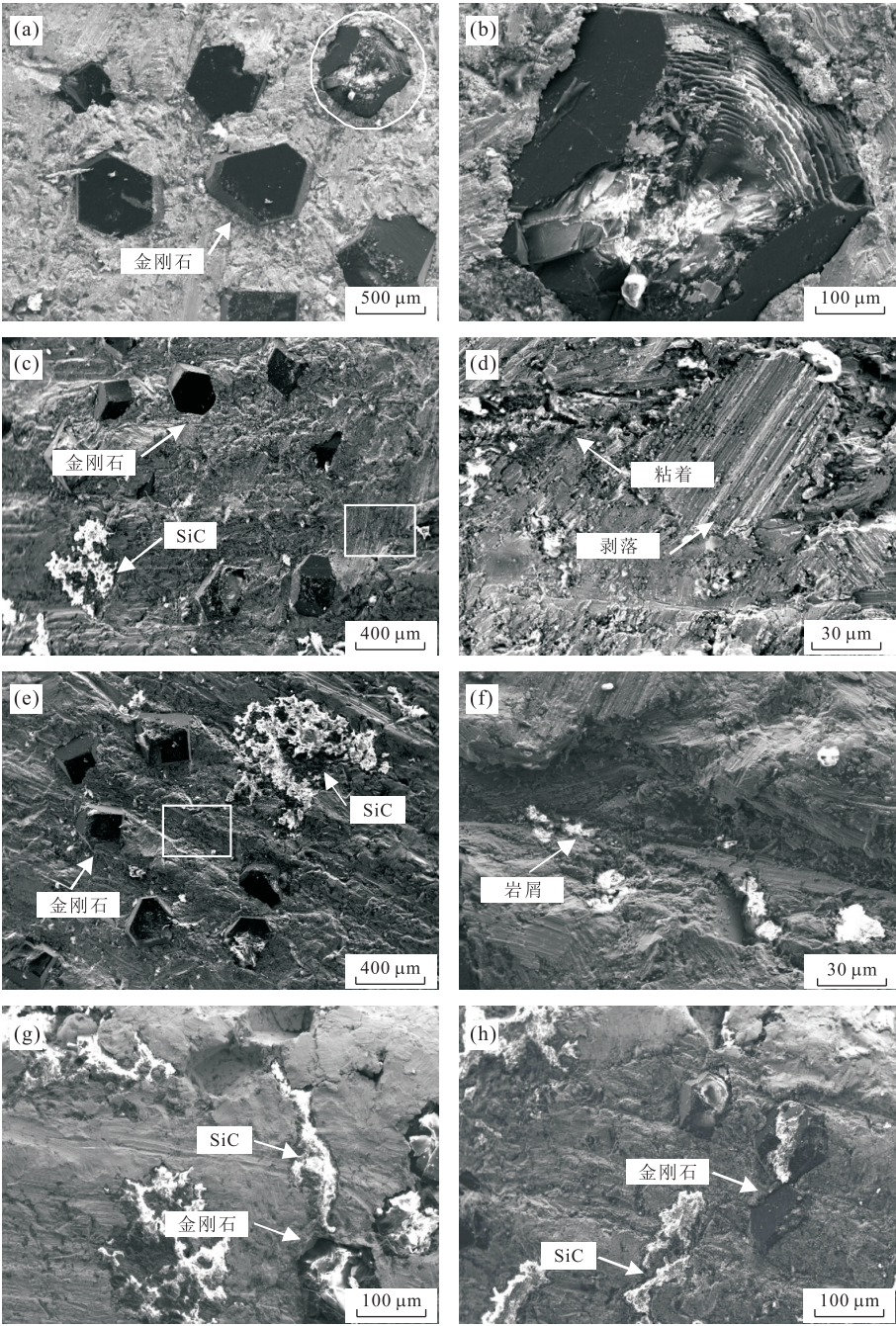


图 3 胎体表面磨损形貌
Fig.3 Wear morphologies of matrix

生了粘着磨损。

图 3e 所示为 3 号钻头的胎体形貌。图 3f 为图 3e 方形框区域胎体放大照片。由图 3e 可以看出 3 号钻头金刚石与胎体结合紧密且出刃高度良好，金刚石磨粒周围形成了明显流沙现象，磨粒的各类磨损状态保持在一定的比例，说明金刚石新陈代谢速度与胎体磨损速度具有较好的匹配性(王传留等，2011)。与 2 号钻头相比，3 号钻头胎体表面发生了典型的磨粒磨损特征。由图 3f 可以看出，磨粒前端及

侧面的犁沟深度较深，有利于残留孔底大颗粒岩屑，提高岩粉的研磨能力。经能谱分析，笔者发现有大颗粒白色磨屑刻入胎体表面。胎体和孔底间隙增大，一方面，有利于金刚石磨粒的充分冷却，提高了单颗粒金刚石的利用率；另一方面，减小了唇面与岩石的接触面积，增大了底唇面的比压，导致岩石破碎穴的直径增加，有利于破碎穴周围微裂纹的纵向扩展，使金刚石切入岩石的深度增加，提高碎岩效率(Zhou *et al.*, 2006; 徐良等, 2008)。因此，3 号钻头取得了较

高的钻进效率和较理想的使用寿命,证明3号钻头的胎体弱化颗粒浓度在本设计中最为合理。

图3g和图3h所示为4号钻头的胎体形貌。由图3g可以看出,胎体表面存在较多脱落坑,深度甚至超过金刚石磨粒直径的2/3;未脱落的SiC颗粒与胎体存在明显的间隙,包镶强度小且SiC颗粒与金刚石颗粒间距过近。由图3h可以看出,胎体中金刚石颗粒发生了互粘的现象。这是因为:由于胎体弱化颗粒浓度设计过高, SiC颗粒浓度过高,一方面,增加了金刚石与SiC颗粒互粘的几率,导致金刚石提前从胎体中脱落,形成较深的脱落坑,降低了单颗粒金刚石的使用率;另一方面,脱落的SiC颗粒不会即时随冲洗液冲离孔底,而是与岩粉一起研磨胎体,导致胎体中的金刚石更容易提前脱落失效,降低了钻头的使用寿命。4号钻头以牺牲寿命为代价,虽然取得了最高的钻进效率,但其综合性能指数并非最高。

4 结论

(1)在胎体中添加适当浓度胎体弱化颗粒,可提高钻头在坚硬致密弱研磨性地层的钻进时效。

(2)胎体弱化颗粒的存在增加了钻头胎体唇面的粗糙度,提高了孔底岩粉对胎体的研磨能力,加快了胎体中金刚石的新陈代谢速度。

(3)胎体弱化颗粒浓度设计存在一个最佳范围,设计过高或过低均不利于提高钻头的钻进效率和保持钻头的使用寿命。

References

de Oliveira, L. J., Bobrovitchii, G. S., Filgueira, M., 2007. Processing and Characterization of Impregnated Diamond Cutting Tools Using a Ferrous Metal Matrix. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(4): 328—335. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2006.08.006

Gao, C., Yuan, J. T., 2011. Efficient Drilling of Holes in Al_2O_3 Armor Ceramic Using Impregnated Diamond Bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(11): 1719—1728. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.013

Jiang, Q. G., Zhang, S. H., 2012. Development of Impregnated Diamond Bit in Deep Drilling. *West-China Exploration Engineering*, 24(12): 58—62 (in Chinese).

Liu, T. L., Li, L. X., Jiang, G. S., et al., 2015. A New Drilling Fluid for Drilling in Marine Gas Hydrate Bearing Sedi-

ments. *Earth Science*, 40(11): 1913—1921 (in Chinese with English abstract).

Lu, H. Z., Liu, X. Y., 2004. Research on Impregnated Diamond Bit for Drilling Slipping Formation. *West-China Exploration Engineering*, (11): 130—132 (in Chinese with English abstract).

Polini, W., Turchetta, S., 2004. Test Protocol for Microgeometric Wear of Sintered Diamond Tools. *Wear*, 257(3—4): 246—256. doi: 10.1016/j.wear.2003.12.008

Shen, L. N., Ruan, H. L., 2011. Some Technical Development of Diamond Bit Both in China and Abroad. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 38(5): 78—80 (in Chinese with English abstract).

Song, Y. Q., Gan, C. Y., Xia, Z. H., et al., 1998. Study on the Weakening of the Diamond Tool Matrix Performance. *Journal of Synthetic Crystals*, 27(4): 368—372 (in Chinese with English abstract).

Song, Y. Q., Gan, C. Y., Xia, Z. H., et al., 1997. Discussion on Weakening of the Diamond Tool Matrix Performance. *Diamond & Abrasives Engineering*, 17(5): 2—5 (in Chinese with English abstract).

Tan, S. C., Fang, X. H., Yang K. H., et al., 2014. A New Composite Impregnated Diamond Bit for Extra-Hard, Compact, and Nonabrasive Rock Formation. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 121(43): 186—192. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2013.11.001

Wang, C. L., Sun, Y. H., Liu, B. C., et al., 2011. Experiment and Rock Fragmentation Mechanism of Bionic Coupling Impregnated Diamond Bit. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 42(5): 1321—1325 (in Chinese with English abstract).

Xu, L., Sun, Y. H., Gao, K., 2008. Efficient Rock Fragmentation Mechanism Analysis of Impregnated Diamond Bionics Bit. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(6): 1015—1019 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L., Yang, K. H., 2003. Progress of the Research on Diamond Drilling Bits for Extra-Hard, Compact and Weak-Abrasion Rock Formation. *Diamond & Abrasives Engineering*, 133(1): 30—32 (in Chinese with English abstract).

Zhang, S. H., Wang, T., 2004. Research on Concentric Segmented Diamond Bit. *Diamond & Abrasives Engineering*, (5): 59—62 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q. H., Zhang, J. H., Sun, D. M., et al., 2002. Study on the Diamond Tool Drilling of Engineering Ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2—3): 232—236. doi: 10.1016/S0924—0136(02)00016—X

Zhou, H., Shan, H.Y., Tong, X., et al., 2006. The Adhesion of Bionic Non-Smooth Characteristics on Sample Surfaces against Parts. *Materials Science and Engineering: A*, 417(1-2): 190-196. doi:10.1016/j.msea.2005.10.049

附中文参考文献

蒋青光, 张绍和, 2012. 深部岩芯钻探孕镶金刚石钻头参数设计机理探讨. *西部探矿工程*, 24(12): 58-62.

刘天乐, 李丽霞, 蒋国胜, 等, 2015. 一种海洋水合物地层钻井用新型钻井液. *地球科学*, 40(11): 1913-1921.

陆洪志, 刘晓阳, 2004. 钻进打滑地层用孕镶金刚石钻设计探讨. *西部探矿工程*, (11): 130-132.

沈立娜, 阮海龙, 2011. 国内外金刚石钻头的部分技术进展. *探矿工程—岩土钻掘工程*, 38(5): 78-80.

宋月清, 甘长炎, 夏志华, 等, 1998. 金刚石工具胎体性能的弱

化问题研究. *人工晶体学报*, 27(4): 368-372.

宋月清, 甘长炎, 夏志华, 等, 1997. 金刚石工具胎体材料的性能“弱化”问题初探. *金刚石与磨料磨具工程*, 17(5): 2-5.

王传留, 孙友宏, 刘宝昌, 等, 2011. 仿生耦合孕镶金刚石钻头的试验及碎岩机理分析. *中南大学学报(自然科学版)*, 42(5): 1321-1325.

徐良, 孙友宏, 高科, 2008. 仿生孕镶金刚石钻头高效碎岩机理. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(6): 1015-1019.

张丽, 杨凯华, 2003. 金刚石钻头钻进坚硬致密弱研磨性岩层的研究现状与进展. *金刚石与磨料磨具工程*, 133(1): 30-32.

张绍和, 王涛, 2004. 自形成同心径向环齿金刚石钻头设计与制造. *金刚石与磨料磨具工程*, 143(5): 59-62.