

提高金刚石钻头工作能力的试验研究

汤凤林 杨凯华 段隆臣 邹庆化

(中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

摘要: 根据实验研究结果建议从金刚石镀膜、胎体添加稀土元素两个方面来提高金刚石的热稳定性、胎体对胎体的包镶能力及其使用性能。这两个措施为实现以铁代替胎体材料中的钴创造了有利条件。

关键词: 金刚石镀膜; 添加稀土元素; 以铁代钴。

中图分类号: P634.5⁺3 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)03-0324-05

作者简介: 汤凤林, 男, 教授, 博士生导师, 1933年生, 俄罗斯自然科学院外籍院士、俄罗斯工程院外籍院士, 主要从事探矿工程和基础工程方面的教学和科研工作。

地质钻探工程中, 特别是固体矿产勘探中, 金刚石钻探得到了广泛的应用。在市场经济条件下, 金刚石钻探服务领域正在不断地扩大。金刚石工具在地质钻探、工程勘察、石材加工、机械加工等行业的需求量日趋扩大。但是, 由于我国尚未找到大的天然金刚石矿床, 而且人造金刚石的质量不断提高, 产量足以满足需要, 因此在金刚石钻进和金刚石工具中主要使用人造金刚石。

钻头上的金刚石是破碎岩石的工具, 因此金刚石的强度非常重要; 但是金刚石, 特别是人造金刚石的热稳定性很差, 即金刚石的强度随温度的升高而急剧下降, 而在钻进过程中, 特别是在非正常钻进过程中, 孔底温度是非常高的。因此, 如何提高金刚石的热稳定性是一个非常重要的问题^[1,2]。

钻头胎体材料应能牢固地包镶金刚石, 并保证其所需的出刃。但金刚石是非金属, 与一般金属或合金的界面能很高, 其表面不易被低熔点金属或合金所浸润, 金刚石颗粒被机械地卡固在胎体中, 在工作中易与胎体分离, 甚至脱落, 大大降低了金刚石工具的寿命和性能, 甚至造成事故, 而且对钻头强度, 特别是针对不同性质岩石和不同碎岩方式(耐磨性、抗弯强度等)也提出了不同的要求。此外, 还有一个如何利用国内廉价资源, 以降低钻头(胎体材料)成本

的问题^[3], 为此我们进行了下列研究。

1 金刚石金属化(镀膜)

金刚石镀膜研究是在中国地质大学(武汉)钻探实验室用两种方法——化学镀方法和真空镀方法进行的。为了便于对比, 选用了能够形成碳化物的3种金属: Fe, W, Ti。由于硼能提高金刚石的热稳定性, 故在化学镀时采用了 Ni-Fe-B 和 Ni-W-B。镀膜 Ti 采用了真空法。把这3种金属化的金刚石和未镀膜的金​​刚石于不同温度下烧结成制品, 然后用王水分解制品, 清洗出金刚石, 对其进行强度测试, 结果示于图1上^[1]。从图1可见, 镀覆有 Ti-Cr 的金刚石的热稳定性最好, 镀覆有 Ni-W-B 和 Ni-Fe-B 的金刚石分别次之与再次之, 但都比未镀膜的金​​刚石好。

在轴载力 P 作用下, 采用张力环方法测量了胎体对金刚石的包镶能力, 测量结果见表1。

从表1可见, 未镀膜金刚石的胎体平均包镶能力为 96.1 MPa, 镀覆 Ni-Fe-B 金刚石的胎体包镶能力为 101.3 MPa, 镀覆 Ni-W-B 金刚石的胎体包镶能力为 105.4 MPa, 而镀覆 Ti-Cr 金刚石的胎体包镶能力为 159.2 MPa, 即胎体对镀膜金刚石的包镶能力比未镀膜金刚石的包镶能力分别提高了 6.5%, 9.8% 和 65.7%, 说明镀覆 Ti 的效果是最好的。

表 1 胎体对不同类型金刚石包镶能力的测量结果

Table 1 Measured results of cohesive ability of matrix materials to diamonds metallized with different elements

种类	未镀膜金刚石制品		镀覆 Ti-Cr 金刚石制品		镀覆 Ni-Fe-B 金刚石制品		镀覆 Ni-W-B 金刚石制品	
	P/kN	σ /MPa	P/kN	σ /MPa	P/kN	σ /MPa	P/kN	σ /MPa
1	2.56	96.7	4.14	156.4	2.17	81.9	2.54	95.8
2	2.25	84.9	4.74	179.1	2.92	110.4	2.89	109.4
3	2.79	105.4	3.71	140.3	2.74	103.6	3.04	114.9
4	2.57	97.3	4.26	160.9	2.89	109.4	2.68	101.3
平均值	2.54	96.1	4.21	159.2	2.68	101.3	2.79	105.4
比率	1.00	1.0	1.657	1.657	1.055	1.065	1.098	1.098



图 1 从不同温度烧结制品中回收的镀膜与未镀膜金刚石强度对比

Fig.1 Comparison of strength of metallized diamonds with nonmetallized diamonds from different temperature hot-pressed and sintered diamond products

×. 镀覆 Ti-Cr 金刚石; ○. 镀覆 Ni-W-B 金刚石; △. 镀覆 Ni-Fe-B 金刚石; ●. 未镀膜金刚石

为了弄清金刚石热稳定性和胎体包镶能力提高的原因,对化学镀金刚石(经 950 °C, $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa, 保温 20 min 热处理)和真空镀金刚石分别进行了 X 射线衍射分析(XRD)研究,其结果见图 2.

从图 2 可见,在镀覆金属的金刚石表面上分别形成了由碳化物 Fe_3C , WC, TiC 等组成的镀膜. 这种镀膜减少了氧对金刚石的氧化作用,增加了金刚石与胎体金属的连接强度,从而提高了金刚石的热稳定性,提高了金刚石的碎岩能力. 同时表明,用真空法镀覆金属(形成 TiC)的金刚石热稳定性最好,胎体包镶金刚石的能力最强,这就说明这种方法是一种非常好的、非常有前景的镀膜方法.



图 2 镀覆金属的金刚石的 X 射线衍射分析

Fig.2 XRD of diamonds metallized with Ni-Fe-B (a), Ni-W-B (b) and Ti-Cr (c)

a. 镀覆 Ni-Fe-B; b. 镀覆 Ni-W-B; c. 镀覆 Ti-Cr

2 胎体添加稀土元素

我国稀土资源工业储量丰富,占世界储量的 80% 左右,亟待开发利用. 稀土在硬质合金中的应用

取得了突破性进展,因此为了提高胎体(钻头)的性能,特别是使用性能(硬度、抗弯强度等),我们对胎

体中添加稀土元素问题进行了探索. 采用了掺杂法和共沉淀法, 对胎体添加稀土元素(La, Ce, Gd 等)进行了试验. 稀土元素添加量较小, 一般不超过胎体金属总量的百分之一.

对用上述方法添加稀土元素的胎体和金刚石复合材料制品进行了热压烧结, 测定了有关性能, 测试结果见表 2 和表 3^[3].

表 2 添加稀土元素铈(Ce)的 Co 基和 Fe 基胎体性能测量结果

Table 2 Measured results of Co-based and Fe-based composites adding rare earth element Ce

试样号	胎体类别	抗弯强度 均值/MPa	硬度 均值/HRC
37, 38, 39	$w(\text{Ce})=0$, Co 基	578	28
40, 41, 42	$w(\text{Ce})=0.3\%$, Co 基	644	29
31, 32, 33	$w(\text{Ce})=0.3\%$, Fe 基	710	33

表 3 添加稀土元素镧(La)的 Co 基和 Fe 基金刚石复合材料性能测量结果

Table 3 Measured results of Co-based and Fe-based diamond composites adding rare earth element La

试样号	复合材料类别	抗弯强度 均值/MPa	硬度均 值/HRB
1	$w(\text{La})=0, 35\%$ Fe, 加镀膜金刚石	301	71
2	$w(\text{La})=0, 35\%$ Co, 加镀膜金刚石	590.8	89
3	$w(\text{La})=0.3\%, 35\%$ Fe, 加镀膜金刚石	591	91

从表 2 和表 3 可见, 添加稀土元素的纯胎体和金刚石复合材料(含金刚石胎体)的抗弯强度和硬度均有所提高. 与未添加 La 的相比, 添加 La($w(\text{La})=0.3\%$)35%Fe 基的金刚石复合材料抗弯强度提高了近一倍, 与 35% Co 基相近, 硬度也提高了 28.25. 与未添加 Ce 的相比, 添加 Ce 的 Co 基纯胎体抗弯强度提高了 11.4%, 添加 Ce 的 Fe 基纯胎体抗弯强度提高了 22.8%, 硬度提高了 17.8%. 可见, 通过添加稀土元素的办法来提高纯胎体和金刚石复合材料的性能, 是非常有效的.

为了查明性能提高的原因和进行对比, 对镀覆纯 Fe、纯 Co、纯 Ni 的金刚石, 纯 Fe、纯 Co 和加稀土的 Fe, 纯 Fe、纯 Co 和加稀土的 Ni, 未加稀土的 35% Fe, 35% Co 基复合粉料和加稀土的 35% Fe 基复合粉料进行了热分析. 热分析是用 DTA-7 分析仪进行的, 整个分析过程的测量、分析和处理全用计算机控制. 测得的镀覆 Fe, Ni, Co 金刚石的 DTA-7 曲线图, 纯 Fe、纯 Co 和加稀土 Fe 的 DTA-7 曲线图,



图 3 镀覆 Fe(3), Ni(1), Co(2)金刚石的 DTA-7 曲线
Fig. 3 DTA-7 diagram of diamonds metallized with Fe (3), Ni (1) and Co (2)



图 4 纯 Fe(1)、纯 Co(3)、加稀土 Fe(2)的 DTA-7 曲线
Fig. 4 DTA-7 diagram of pure Fe (1), pure Co (3) and Fe adding rare earth element (2)



图 5 纯 Ni(1)、纯 Co(3)、加稀土 Ni(2)的 DTA-7 曲线
Fig. 5 DTA-7 diagram of pure Ni (1), pure Co (3) and Ni adding rare earth element (2)

纯 Ni、纯 Co 和加稀土 Ni 的 DTA-7 曲线图以及 35%Fe 基复合材料、35% Co 基复合材料和加稀土



图 6 35% Fe 基复合粉(1)、35% Co 基复合粉(3)和加稀土的 35% Fe 基复合粉(2)的 DTA-7 曲线

Fig. 6 DTA-7 diagram of 35% Fe-based composites (1), 35% Co-based composites (3) and 35% Fe-based composites adding rare earth element (2)

的 35% Fe 基复合材料的 DTA-7 曲线图分别示于图 3~6 中.

上述 DTA-7 曲线图实质上反映了定压热容 C_p 、相变临界点、过冷度与相变潜热等热物理性质, 其 C_p 值由下式确定^[4]:

$$C_p = C_{pc} \left[\frac{m_c}{m} \right] \left[\frac{dT/dt - dH_e/dt}{dH_c/dt - dH_e/dt} \right], \quad (1)$$

式中: dH/dt 为放热或吸热功率 (mW), 也是 DTA-7 曲线图的纵坐标, m 为样品质量, mg, 下标 c 代表参比物 (Al_2O_3) 的有关参量, 下标 e 代表空试样皿的有关参量. C_{pc} , m , m_c , dH_c/dt 以及 dH_e/dt 均为已知常量. 而材料热容 C_p 与热线膨胀系数 α 的关系如下表示^[4]:

$$E = \frac{\gamma C_p}{\alpha(1 + 3\alpha T \gamma)}. \quad (2)$$

式中: γ 为格林埃森参数, E 为弹性模量, 此二参数都是比较稳定的. 当温度 T , γ , E 一定时 C_p 愈大, 则 α 愈大. 金刚石在 20 °C 时, α 值为 $(0.8 \pm 1) \times 10^{-6}/\text{°C}$, 100~900 °C 时上升到 $1.5 \times 10^{-6} \sim 4.8 \times 10^{-6}/\text{°C}$. 如果包镶金刚石的胎体材料也有 C_p 高时 α 增大、 C_p 低时 α 减小的特性, 就会使金刚石与胎体之间不产生过大的内应力, 使胎体对金刚石的包镶力大为提高, 从而达到提高钻头整体强度的目的. 胎体材料高低温时的热容 C_p 差值 ΔC_p 愈大, 则差值 $\Delta \alpha$ 愈大, 因而胎体材料收缩值 ΔL 值愈大. 一般认为, 胎体对未镀膜金刚石的包镶力是由钻头烧后期冷却时形成的收缩力 P 决定的, 这个 P 如下计

$$算: P = \frac{\Delta LAE}{D}, \quad (3)$$

式中: P 为胎体对金刚石的包镶力 (daN); ΔL 为胎体的收缩量 (mm); D 为金刚石直径 (mm); A 为金刚石断面积 (mm^2); E 为胎体弹性模量 (MPa).

从上式可见, ΔC_p 愈大, $\Delta \alpha$ 愈大, 则 ΔL 愈大, 故收缩力 P 愈大, 胎体包镶金刚石的能力愈大. 从图 3~6 曲线可见, 凡是添加稀土元素的地方, 一般均程度不同地增大了 ΔC_p 的变化量, 因而 $\Delta \alpha$ 变化大, 导致胎体材料收缩量 ΔL 增大, 收缩力 P 提高了; 因此, 胎体对金刚石的包镶能力增加了, 胎体致密度增加了, 硬度 (耐磨性) 提高了, 抗弯强度提高了, 钻头强度提高了. 由此可见, 胎体中添加稀土元素是提高金刚石胎体性能的一个非常有效的措施.

3 金刚石钻头实验台试验结果

针对两种岩石 (花岗岩和大理石) 利用前述镀膜金刚石和添加稀土元素的胎体配方制造一组钻头, 利用未镀膜金刚石和未添加稀土元素的胎体配方制造另一组钻头, 在我校钻探实验台进行了钻进实验, 钻进结果见表 4.

表 4 不同类型钻头钻进岩石试验结果

Table 4 Tested results of rock drilling with different type diamond bits

岩性	钻头类型	钻速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	比率	钻头 寿命/m	比率	成本/ ($\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$)	比率
大理石	镀膜、加稀土	6.12	1.02	30.7	1.17	1.83	1.0
	未镀膜、未加稀土	6.0	1.0	26.2	1.0	2.09	1.14
花岗岩	镀膜、加稀土	4.51	1.07	25.8	1.19	2.18	1.0
	未镀膜、未加稀土	4.21	1.0	21.6	1.0	2.55	1.17

从表 4 可见, 金刚石镀膜、添加稀土元素钻头的钻进速度比金刚石未镀膜、未添加稀土元素钻头提高幅度不大 (2%~7%), 但钻头寿命提高了 17%~19%, 每米钻探成本降低了 14%~17%. 可见, 试验研究是成功的, 将会取得很大的社会效益和经济效益, 是有推广前景的.

4 以铁代钴问题

我国钴的产量不足,必要时需要进口,价格昂贵,而铁粉价格低廉,铁与钴同属铁组元素、性能相近,因此提出了以铁代钴问题.但在钻头烧结过程中,铁对金刚石的侵蚀性比钴大得多,且有使金刚石碳化的趋势,因而降低了金刚石的强度,此外,铁作为胎体材料对骨架金属的浸润性和包镶金刚石的能力不如钴,因此,以铁代钴效果不够理想.针对存在的问题,根据试验研究结果建议从两个方面入手加以解决:一是金刚石镀膜,二是胎体中添加稀土元素.从上述资料可见,这两个措施为成功实现以铁代钴创造了有利条件,可以使以铁代钴的胎体性能基本上达到钴基胎体的性能,使以铁代钴变成可能.

5 结论

(1)金刚石镀膜减少了氧对金刚石的氧化作用,增加了金刚石与胎体金属的连接强度,从而提高了金刚石的热稳定性,提高了金刚石的碎岩能力.用真空法镀覆金属 Ti 的金刚石热稳定性最好,胎体包镶金刚石的能力最强,说明这种方法是一种非常好的、

非常有前景的镀膜方法.

(2)在胎体中添加稀土元素,使胎体对金刚石的包镶能力增加了,胎体致密度增加了,硬度(耐磨性)提高了,抗弯强度提高了,可见,胎体中添加稀土元素是提高金刚石胎体性能的一个非常有效的措施.

(3)试验表明,利用上述两个措施可以取得很大的社会效益和经济效益,并为实现以铁代钴创造了有利条件,可使以铁代钴的胎体性能基本上能够达到钴基胎体的性能,使以铁代钴变成可能,应该引起我们足够的重视.

参考文献:

- [1] 段隆臣. 新型镀覆金刚石工具的研制[D]. 武汉: 中国地质大学, 1997.
- [2] ГАН Фуньлинь, Дуан Лунцэн, ЯН Кайхуа. Экспериментальные исследования металлизированных алмазных породоразрушающих инструментов [J]. Сборник научных трудов ВИТРа (Методика и техника разведки, 1999(9-10): 96~111.
- [3] 邹庆化. 铁基稀土金刚石工具胎体材料[D]. 武汉: 中国地质大学, 1999.
- [4] 金属材料物理性能手册编委会. 金属材料物理性能手册(第一册)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.

EXPERIMENTAL RESEARCH INTO INCREASE OF WORKING EFFICIENCY OF DIAMOND DRILLING BITS

Tang Fenglin Yang Kaihua Duan Longchen Zou Qinghua

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, two technical methods: the diamond coating and the addition of rare earth elements to matrix materials, are proposed, in line with the results derived from the experimental research, to improve the thermal stability of diamonds, the cohesion of matrix materials to the diamonds and their corresponding performance. These two technical methods can serve as favorable conditions for the substitution of Fe for Co in the matrix material.

Key words: diamond coating; addition of rare-earth elements; substitution of Fe for Co.