

文章编号: 1006 - 852X(2006) 03 - 0071 - 05

## 金刚石制品的金属胎体的研究现状

谢志刚<sup>1</sup> 贺跃辉<sup>2</sup> 王智慧<sup>1</sup> 向波<sup>2</sup> 黄艳华<sup>2</sup>

(1. 桂林矿产地质研究院, 桂林 541004; 2 中南大学, 长沙 410012)

**摘要** 对金刚石制品的金属胎体的研究归纳为金刚石与金属胎体的结合机理、金属胎体体系、金属胎体材料制备方法以及金属胎体的性能表征及评价体系四方面的研究。对各方面的研究现状进行了较详细的分析,指出了存在的问题,提出了解决这些问题的对策,尤其提出了独特的且有效的金属胎体性能表征方式和评价体系,可为金属胎体的深入研究的提供有力的参考。

**关键词** 金刚石制品;金属胎体;把持力

**中图分类号** TQ164 **文献标识码** A

### Research progress of metal bond of diamond tools

Xie Zhigang He Yuehui Wang Zhuhui Xing Bo Huang Yanhua

(1. Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, China;

2. Central South University, Changsha 410012, China)

**Abstract** Research on metal bond of diamond tools includes four aspects: bonding mechanism between diamond and metal bond, metal bond system, preparation of metal bond, and performance characterization and evaluation system of metal bond. Status on these four aspects were elaborately analyzed, some existing problems were put forward and solutions were also suggested, especially, an unique and effective system of performance characterization and evaluation of metal bond was put forward which provided potent reference for further research on metal bond.

**Keywords** diamond products; metal bond; retention

金刚石是目前所发现的自然界中硬度最高的物质,属于极性材料,因而金刚石被广泛应用于地质钻探以及硬脆材料的切割、磨削及钻孔等加工,如珠宝、石材、陶瓷、硬质合金、半导体晶体、磁性材料等<sup>[1-3]</sup>。由于金刚石都是细小颗粒状,一般需要使用胎体材料将其制成一定形状且具有一定机械力学性能的制品后才能得以使用。在金刚石制品中,作为最基本组分的金刚石是切削元件,但胎体是不可缺的组成部分,其对金刚石能否充分、有效地发挥作用起决定性的作用。作为胎体,其功能主要为两个:一是“包镶”切削元件,二是与切削元件(金刚石)“匹配”磨损。制品质量在很大程度上取决于其胎体的性能,而胎体的性能主要取决于胎体材料。常见的胎体材料有树脂、金属和陶瓷三种,其中金属胎体以良好的机械性能而得到最广泛的应用<sup>[4]</sup>。金属胎体的金刚石制品约占金刚石制品总量的80%。

金属胎体金刚石制品是采用粉末冶金方法,将金刚石颗粒与金属粉末混合后经压制烧结所制得。由于金刚石存在:一、热稳定性较差,即在900℃温度下受热后强度会明显下降,进而要求金属胎体的烧结温度

尽可能在900℃以下;二、金刚石与金属之间存在很高的界面能,金属对金刚石的润湿性差,金刚石与金属之间很难形成化学冶金结合,导致很难获得高的金刚石与金属界面结合强度<sup>[5]</sup>;三、金刚石与金属胎体的耐磨性很难匹配。这给金属胎体材料的设计和选择带来极大困难。因此,要设计出最佳性能的金属胎体绝非易事。多年来,国内外许多研究者开展了大量关于金属胎体的研究,但时至今日继续存在大量难点没有解决好,仍需广大研究者们进一步努力。

### 1 国内外研究现状

国内外对金属胎体的研究众多,概括起来大致可分为:一、金刚石与金属胎体的结合机理的有关研究;二、金属胎体体系的研究;三、金属胎体材料制备方法的研究;四、金属胎体的性能表征及评价体系的研究。

#### 1.1 金刚石与金属胎体的结合机理的有关研究

金刚石与金属胎体的结合机理的研究涉及到金属胎体与金刚石界面结合状态以及烧结过程中界面元素的扩散情况。它的研究既能揭示金刚石与金属胎体之间的结合力性质,又能为金属胎体材料的设计提供依

据。结合剂对金刚石的把持力不外乎有三种:机械镶嵌力、物理吸附力和化学结合力。在这三种力中,物理吸附力很小,可以忽略不计;机械镶嵌力的大小取决于胎体的烧结合金化程度、孔隙率及胎体的强度和硬度等;化学结合力最强,但前提是金属胎体与金刚石界面形成化学冶金结合状态。国内外研究者们经过研究发现,具有共价键的金刚石和金属之间有很高的界面能,一般金属胎体与金刚石之间较难形成化学冶金结合,而是以机械镶嵌作用为主,其结果是胎体对金刚石没有足够的把持力,使用过程中金刚石磨粒较易脱落,而造成金刚石提前失效,不但缩短了金刚石工具的使用寿命,而且影响加工效率。提高胎体对金刚石把持力的关键在于改善胎体和金刚石的界面结合状态,使胎体和金刚石之间形成强力键合。改善界面结合状态的措施概括起来主要有添加强碳化物形成元素和金刚石表面金属化<sup>[5]</sup>。这些措施实现后会在金刚石表面形成一个碳化物过渡层,过渡层是由金刚石反应生成的,它和金刚石能形成化学结合。同时,胎体材料对过渡层有好的润湿性,经烧结后能形成冶金结合,进而提高胎体对金刚石的把持力。

根据反应能可知,有一些元素和碳容易发生反应生成碳化物,称之为强碳化物形成元素,通常有 Ti、Cr、W、Mo、Zr等,在胎体中添这些元素后,烧结时这些元素会向金刚石表面富集且与金刚石反应生成碳化物,从而提高金刚石与胎体的界面结合强度<sup>[6-9]</sup>。但这种方法也存在一些不足,一是反应温度较高,使金刚石热损失较大,常常出现金刚石与胎体的结合强度提高了,但金刚石本身的强度明显下降了,这个矛盾的存在严重影响了该项技术的有效性;二是这些元素与金刚石反应并不能在金刚石与胎体界面生成连续完整的过渡层,导致结合强度的提高十分有限;三是添加元素都是微量加入,很难在胎体中分散均匀,造成不同的金刚石颗粒与胎体的结合强度存在差异,影响了使用效果;四是添加的强碳化物元素通常也是强氧化物元素,在生产过程中常常出现在碳化之前已被氧化的现象,增加了工艺实施难度。

金刚石表面金属化就是采用物理气相沉积、化学气相沉积、甚至是化学镀、电镀的方法,预先在金刚石表面形成一层金属膜或碳化物膜,然后再与胎体材料混合来制作制品。该方面研究在国外起步较早,目前获得了较好的应用效果,常见的涂复层是 Ti、Cr、W、Mo<sup>[10]</sup>。近年来国内也广泛开展了该项研究工作,尽管取得了一些成效<sup>[11-18]</sup>。但使用效果还远没有国外的水平,也就是说制品的工作效率和使用寿命均比国外产品要低。目前金刚石表面金属化方法还存在一些难点有待解决:表面金属化过程中如何尽量降低金刚石的强度损失;如何防止表面金属化后形成的过渡层

在制品制作过程中出现裂纹甚至分层现象。

此外,在胎体中无论添加活性元素还是金刚石表面金属化处理需要特别注意:一是在热压的条件下,金刚石表面不能发生石墨化,否则强碳化物形成元素不能直接和金刚石反应产生碳化物,只能与石墨层反应生成碳化物,将使结合强度大大降低;二是要有足够的热压时间,让强碳化物形成元素充分扩散到金刚石表面富集,然后与金刚石反应、生长;三是烧结温度要达到强碳化物形成元素与金刚石碳原子可以发生反应生成碳化物层的温度。

在机理研究过程还发现,当胎体中含有溶碳性元素(如铁)时,在一定温度(超过 800 )下烧结时,金刚石会以碳的形式扩散到胎体当中,导致金刚石强度降低。如果对金刚石表面预先金属化,在烧结过程金刚石就会与金属胎体隔离,就可防止胎体对金刚石的侵蚀<sup>[19]</sup>。

## 1.2 金属胎体体系的研究

金属胎体包含粘结剂、添加剂及微量活性元素,其中粘结剂主要是指 Cu、Sn、Zn等熔点低、硬度低的金属。这些金属在烧结过程中较早熔融,成为液相,使结合剂具有液相烧结的特征,在较低的温度下发生位移、扩散、致密化、合金化等一系列烧结过程中的物理化学变化,从而得到我们希望的烧结体。因此,粘结金属起着必不可少的重要作用。添加剂通常是指胎体中硬度高、熔点高的添加成分。它可以提高胎体的强度、硬度、耐磨性以及调节胎体的韧性。微量活性元素主要是改善金刚石与胎体界面结合状态,进而提高两者的界面结合强度。

金刚石进入工业应用的历史并不长,其胎体技术一开始是引用钎焊和硬质合金技术,则最初应用的胎体体系为青铜基和 WC-Co基。随着研究范围的拓宽及技术的发展,到现在常用的胎体体系有青铜基、钴基、铁基以及 WC-Co基<sup>[9]</sup>。青铜基有较低液相温度,能在较低温度下实现液相烧结,能较好地保护金刚石,降低金刚石热损失。因此,该体系对采用低品级金刚石的制品十分有利,现在青铜基胎体主要用作金刚石砂轮、大理石锯片等制品。但青铜基胎体的强度及耐磨性都较低,无法保证金刚石完全充分的发挥作用,有必要在体系中加入其它提高强度和耐磨性的成份,如镍、钴、碳化物等物质。钴基是目前高品质金刚石制品中应用最多的体系。钴在所有金属元素中,是对金刚石润湿性相对较好的元素,而且钴具有其他金属所没有的低温粘结特性,在比其熔点低得多的温度下,高钴基体就可获得很好合金化程度,使其对金刚石形成很高的机械镶嵌力,同时钴对金刚石的侵蚀作用小,能够有效的保护金刚石<sup>[20]</sup>。此外钴具有好的耐磨性且较易设计出和金刚石磨损匹配性较好的配方,从而能

保证金刚石较充分地发挥作用。钴基胎体还有较好的高温性能,金刚石制品在工作过程中,难免会出现局部温度过高的现象,此时钴基胎体红硬性好的优势就会充分发挥作用,避免金刚石制品出现瞬间磨损快而寿命严重降低的现象,也可防止胎体强度硬度下降而无法支撑金刚石,造成切割效率下降的局面。在钴基胎体中,钴的含量低于 35% Wt 后,胎体性能急剧下降<sup>[20]</sup>。由于钴的价格昂贵且资源匮乏,严重妨碍其大量推广应用,目前主要限于高档金刚石制品中使用,因此,许多研究者积极研究在胎体中取代钴的元素,但到目前为止还没有找到完全可以替代钴的物质。

铁与钴同处 Ⅷ 族,许多性能和钴相近,铁资源丰富且价格便宜,是十分经济的胎体体系,因此,铁基胎体是近年来胎体研究的热点。但因铁基胎体存在着烧结温度高(900~1100)、可控工艺范围窄,在高温下金刚石被铁严重侵蚀而产生石墨化现象,削弱了胎体对金刚石的镶嵌作用,同时使金刚石的强度降低,从而严重限制了铁基胎体推广应用<sup>[20~22]</sup>。另外,铁的耐磨性及红硬性也不及钴。在铁中添加磷,能促进烧结,使胎体合金的烧结温度降低到 840~800,并拓宽了热压工艺范围,还能缓解铁对金刚石的热侵蚀作用,改善了该合金的显微结构和力学性能,提高胎体对金刚石的镶嵌能力和改善工具的自锐性,从而能提高了金刚石制品的使用寿命和切削效率<sup>[23]</sup>。也有研究者采用雾化、共沉淀——还原等预合金方法,将铁与其它添加元素制作成预合金粉,可明显降低烧结温度,提高最终制品的胎体合金化程度<sup>[21,24]</sup>。若采用铸铁粉作为原料,在烧过程中可有效降低铁对金刚石的侵蚀程度<sup>[25]</sup>。添加稀土元素能提高铁基胎体的综合性能,且有效地减轻铁对金刚石的侵蚀<sup>[24,26]</sup>。将金刚石表面金属化后再与铁基胎体混合烧结,能将金刚石与胎体完全隔离,可以阻止铁对金刚石的侵蚀<sup>[10]</sup>。经过这些基础研究后,铁基胎体已经在低品质金刚石制品中得到了应用,尤其在石材切割用金刚石工具中大量使用,取得了较好的经济效益。

WC-Co 基胎体的烧结温度高,胎体硬度高及耐磨性强,所制成的锯片的自锐性最差,对金刚石有一定的化学作用,因此要求高耐热性金刚石与之配合使用。适用于加工研磨性很强的材料。

近几年来,高温钎焊技术引入到金刚石制品业,该技术虽然引入的时间不长,但已显示出了其大幅度提高金刚石制品性能的可行性。钎焊与传统方法(电镀、烧结)相比,可把金刚石的最大允许出刃高度从 0.3D 提高至 0.7D,这表明大幅度提高了胎体对金刚石的把持力。就本质而言,钎焊和烧结均属于粉末冶金范畴,钎焊的作用是把金刚石(母材)加胎体材料(母材)与钎料(也属胎体材料)焊接在一起,达到冶金

化学结合的目的。对金刚石来说,要实现良好包镶的先决条件,也是技术的关键点是粘结料需成液相,并能很好地润湿金刚石。而目前的钎焊材料(也可称为胎体材料)不是不能很好地润湿金刚石,就是液相温度太高,要想得到广泛推广应用还有必要进行深入研究,开发适合金刚石特性的钎焊材料。

### 1.3 金属胎体材料制备方法的研究

金刚石进入工业应用后,人们对金属胎体缺乏系统研究,没有建立详细确定的胎体配方甚至胎体体系,因此,在相当长的时间内都采用元素粉末机械混合法制备胎体料,直到现在该方法仍在大量使用。不同元素粉的常用生产方法也不同,钴粉、铁粉、钨粉采用还原粉,铜粉、镍粉、锰粉一般是电解粉,锡粉常用雾化粉。随着技术的进步,人们发现该方法存在许多不足:烧结工艺范围窄,对升温速度、烧结温度等参数敏感性强;不利于标准化、规范化生产;混合的工艺、元素粉末的初始状态等因素会对金刚石制品最终性能产生较大影响,增加了生产过程控制难度;很难获得非常均匀的胎体混合料;单质粉末易氧化等。到上世纪八十年代一些研究者提出采用预合金方法<sup>[27,28]</sup>制品胎体材料,预合金粉末是由多于一种金属元素,经过湿法冶金等方法制成的十分均匀的合金粉,它具有:易于调节胎体性能,能降低烧结温度,提高致密性和均匀化,改善金刚石制品胎体的磨损状态,提高胎体对金刚石的包镶能力,并且抗冲击性能好,能够防止低熔点金属的烧损或偏析,粉末不易氧化,适于大批量自动化生产,简化制造工艺,能取得较好的经济效益等优异特性,因此,预合金粉很快就在金属胎体中得到推广应用。这一时期的预合金粉主要采用雾化法生产,雾化法生产的预合金粉末合金化程度高,流动性好,能有效调整胎体耐磨性,且生产效率高,成本亦较电解等生产方式低<sup>[29,30]</sup>。到上世纪九十年代中期,国外首次提出了金刚石制品中使用超细预合金粉末新概念,并于 1998 年预合金粉作为钴基胎体的替代品真正应用在金刚石工具中。超细预合金粉粒径小于 10 微米,这些微小颗粒构成的集合体属于微观粒子与宏观物体之间的过渡区域,具有一系列特殊的物理和化学性能。超细预合金粉末具有优良的烧结性能,是现在普遍采用的元素混合粉末甚至雾化预合金粉末所不具备的,在较低的烧结温度就可以达到很高的致密度和烧结硬度<sup>[31]</sup>。超细预合金生产方法通常有共沉淀法和金属蒸气合成法。

### 1.4 金属胎体的性能表征及评价体系的研究

金刚石制品对胎体性能的核心要求是两点:一是胎体能牢固地把持住金刚石,不让金刚石在使用过程中过早脱落;二是制品使用过程中胎体磨损和金刚石的磨损相匹配,既保持制品应有锋利度,同时使制品的

设计性能得到保证。目前金属胎体的性能表征都还是采用抗弯强度、硬度、冲击韧性等指标,而这些指标不能反应胎体对金刚石的把持力以及两者磨损的匹配性,更不能和金刚石制品的最终使用性能建立直接对应关系。而仅仅能检验制作过程的工艺参数是否在设计范围,因为通常一个具体的胎体配方在精确的工艺条件下压制烧结后,其强度、硬度、冲击韧性等力学性能是稳定的。但由于实际生产过程中影响因素较多,各因素的影响能此长彼消,在不同的工艺条件下可以获得相近的力学性能指标,但两个相近的力学性能指标不一定对应相同的使用性能。更何况,制品加工的对象也会存在差异,相同的力学性能的金剛石制品在不同的使用条件下也会得到差异较大的使用结果。由此看来,目前常用的胎体性能表征方法不适合金剛石制品的金属胎体性能的表现。

因此,研究者在积极探讨力学性能和胎体的应用性能的关系,但相关的报导并不多见。有研究者认为目前金属胎体金剛石制品中,胎体对金剛石还主要是机械啮合,金剛石工具在切削工件时,金剛石颗粒会受一切削阻力,此力超过胎体的屈服强度后,胎体的变形会明显增大,即胎体夹持金剛石的凹槽会变形,被拉长,因而造成金剛石从胎体中脱落。如果胎体的 $\sigma_b$ (为胎体的抗拉强度)不变,增大 $\sigma_s$ (为胎体的屈服强度),可提高胎体夹持金剛石的能力;如 $\sigma_s$ 不变,胎体的 $\sigma_b$ 越大,胎体与被加工工件接触部分,即金剛石制品的唇面部分的金剛石,在切削工件过程中越不易从胎体中脱落,胎体的自锐性会降低。因此,胎体的 $\sigma_b$ 越高, $\sigma_s$ 越低,即 $\sigma_b/\sigma_s$ 越接近1,金剛石制品的寿命才能越高,自锐性才会更好<sup>[32]</sup>。这一观点仅仅是从屈服强度和抗拉强度的角度出发,其实胎体的 $\sigma_b$ 和 $\sigma_s$ 发生变化时,它的硬度、耐磨性等其它机械力学性能会发生变化,即使 $\sigma_b/\sigma_s$ 接近1,也不一定胎体的综合使用性能好。

还有研究者认为金剛石在与岩石接触过程中,产生的磨擦热使金剛石与岩石接触点达到非常高的温度,一旦冷却不好,就会使金剛石马上石墨化。尽管有冷却剂冷却,但金剛石及其四周包镶的胎体仍具有较高的温度<sup>[33-35]</sup>。任何金属和合金在一定的温度下,都会产生软化作用,而胎体是各种金属粉末热压而成的假合金,其软化的温度则更低。胎体的磨损主要是岩粉与胎体的互相研磨作用,而在实际锯切过程中,都是在高温条件下岩粉同胎体的研磨,因此胎体高温性能的好坏,与胎体的耐磨性密切相关,胎体的高温强度越好,胎体的高温耐磨性也就越好,相应胎体的耐磨性也越好。由此可知,可用胎体的高温软化点表示胎体的耐磨性好坏<sup>[36]</sup>。这一观点仅仅涉及到耐磨性本身,其实胎体的耐磨性并不一定是越高越好,它必须与金剛石的磨损相匹配。另外它也不能反映胎体对金剛石的

把持力。当金剛石制品得到充分冷却,金剛石和工件接触点温度不高时,胎体耐磨性就和它的高温软化点关系不大。

时至今日,金属胎体性能的表现仍是国际性难点和热点,性能表征方式没有落实,就无法建立胎体性能评价体系,这是目前乃至今后几年金剛石制品领域的研究重点。

## 2 存在的不足及拟解决的措施

通过对金剛石制品金属胎体国内外研究现状的分析可知,金属胎体的研究从金剛石与金属胎体结合机理到胎体性能表征等方面都还存在明显不足,概括如下:

一、金剛石与金属胎体的结合机理研究不够深入,两者之间的界面反应及过渡层形成机制不明了,所需条件不明确。可以应用热力学和动力学来揭示两者的反应过程,探明影响两者反应的各种因素以及各因素与外界条件的关系,从而确定所需的控制条件。

二、金属胎体材料的设计缺少理论计算,添加成份、活性元素以及表面金属化元素的选择缺乏理论依据,没明确是哪些因素导致金剛石表面金属化效果的差异。要解决这一问题,必须结合金剛石自身的特点,运用热力学、动力学、材料学以及粉末冶金的原理,清楚阐述金属胎体材料的设计依据;同样,运用上述原理计算出各活性元素(含表面金属化元素)与碳、氧等元素的反应能,明确各反应的难易程度,严格控制活性元素与氧的反应,从而确保活性元素与碳的反应顺利进行。同时要控制活性元素与碳反应的一致性,使添加活性元素及金剛石表面金属化的效果尽可能充分发挥。

三、缺少对预合金化方法、粉末预处理以及使用工艺要求的研究,导致预合金粉末的优势没有完全发挥。象雾化法等方法制得的预合金粉可能存在氧等杂质含量偏高的现象,这些杂质的存在严重妨碍后期的烧结,降低胎体的合金化程度,必须通过预处理降低杂质;同时一些预合金化方法制作的粉末成球形,松装比重大,不利于胎体粉与金剛石混合料的制粒,影响金剛石制品制作工艺过程的顺利实施,有必要改善它们的制粒性。因此,有必要进行一系列对比试验,建立不同预合金化方法、预合金粉的不同预处理工艺与最终产品的使用性能的对对应关系,同时探明各种预合金粉末的最佳使用工艺。

四、没有找到准确而又直接的胎体使用性能表征方法,也没有建立科学的性能评价体系。大量研究表明,胎体强度、硬度、冲击韧性、耐磨性等机械力学性能指标只能作为胎体使用性能的辅助表征方法。我们通过众多研究发现金剛石制品的最大出刃高度(就是测

定经过软砂轮开刃后的金刚石制品中金刚石的最大出刃值)及工作出刃高度(就是测定工作状态下金刚石制品中金刚石的最大出刃值)和胎体的两大基本性能有直接关系。胎体对金刚石的把持力大,允许金刚石的最大出刃值就高,反之亦然;胎体与金刚石的磨损匹配,金刚石制品的工作效率就高,金刚石的工作出刃高度肯定要高,反推也能成立。同样,这两个出刃值大,金刚石制品的使用性能也会好。建立金刚石的最大出刃高度和工作出刃高度测定的手段,再辅以建立金刚石制品切割试验台和磨损试验台,就可建立金刚石制品性能评价体系。

五、迄今,钴基胎体仍是综合性能最优的胎体体系,还没有找到完全替代材料,导致高品质的金刚石制品的成本仍然居高不下。通过大量研究可以看出,单一元素替代钴的难度十分大,但采用多元合金粉末替代钴的可能性很大。

总之,金刚石制品的金属胎体的研究还有许多不足,但现在已经具有较好的研究基础和试验、检测条件,只要深入细致地开展好各项研究工作,不久的将来就可建立起金属胎体的科学体系。

#### 参考文献

- Jeenings M, Wright D. Guidelines For Sawing Stone [J]. Industrial Diamond Review, 1989, 49: 70 ~ 73
- Collins A T. New Diamond Science And Technology [J]. Industrial Diamond Review, 1989, 49: 24 ~ 27
- Niccolai R. Versatile Diamond Drilling & Sawing [J]. Industrial Diamond Review, 1989, 49: 262 ~ 263
- Nadagawa T, Hanawa K, Miyazawa K, Hagiyuda Y, Karikomi K in: E. N. Aqua, C. I. Whitman (Eds), Modern Developments in Powder Metallurgy, 1984, Vol 17, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1984, p. 221.
- 戴秋莲. 金属结合剂对金刚石把持力的增强措施及增强机制评述 [J]. 材料科学与工程, 2002, 20 (3): 465 ~ 468
- 刘雄飞. 镀膜对金刚石与结合剂之间结合性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11 (3): 465 ~ 468
- 李晨辉. Cr在金刚石工具胎体材料中的作用 [J]. 粉末冶金技术, 2001, 19 (6): 343 ~ 347
- 李岳. 金刚石界面金属碳化物过渡层强度的研究(金刚石焊接机理研究之二) [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2001 (2): 58 ~ 60
- 王秦生. 金刚石锯片使用性能与结合剂之间的关系 [J]. 郑州工业高等专科学校学报, 2002, 18 (3): 1 ~ 3
- Steven W. Webb. Diamond retention in sintered cobalt bonds for stone cutting and drilling [J]. Diamond and Related Materials, 1999, 8: 2043 ~ 2052
- 林增栋. 金刚石表面金属化技术 [P]. 中国发明专利. CN85 1 00286 2
- 彭希林. 金刚石表面渗覆金属处理的研究 [J]. 粉末冶金技术, 1992 (1): 3 ~ 7
- 高巧君, 胡毅飞, 林增栋等. 金刚石表面生成碳化铬的物理机制 [J]. 磨料磨具与磨削, 1991 (1): 2 ~ 7
- 王艳辉. 镀 W 金刚石与金属结合剂界面成分、结构及结合性能 [J]. 人工晶体学报, 1993 (1): 68 ~ 72
- 裴宇韬. 镀膜金刚石的耐热性及其镀层作用机制 [J]. 人工晶体学报, 1994 (3): 195 ~ 201
- 李晨辉, 吕海波, 牟一兵. 镀 Mo 金刚石与结合剂之间的结合状态研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2000 (1): 9 ~ 11
- 李晨辉. 镀 TiN 金刚石与结合剂之间的结合状态研究 [J]. 粉末冶金技术, 1999 (4): 243 ~ 247
- 臧建兵, 赵玉成, 王明智等. 超硬材料表面镀覆技术及应用(续) [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2000 (4): 7 ~ 12
- Yu Zan Hsieh, Shun Tianlin. Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices [J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 72: 121 ~ 125
- 修稚萌. 合金化铁粉对金属/金刚石复合材料性能的影响 [J]. 粉末冶金技术, 2004, 22 (2): 67 ~ 70
- 隆威. 金刚石锯片铁基胎体研制. 非金属矿 [J]. 1996 (6): 56 ~ 57.
- 陈霞, 李晨辉. 金刚石圆锯片用铁基结合剂的研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1999 (1): 2 ~ 6
- 肖俊玲. 高磷铁基金刚石工具胎体合金的研究 [J]. 湖南冶金, 2001 (6): 21 ~ 26
- 邹庆化, 汤凤林, 杨凯华等. 稀土在以 Fe 代 Co 金刚石工具材料中的应用 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001 (4): 6 ~ 10
- 肖俊玲. 金刚石工具铁基结合剂的应用及展望 [J]. 湖南有色金属, 2002, 18 (1): 21 ~ 26
- 段隆臣. 金刚石工具富铁胎体掺杂稀土的研究 [J]. 地质科技情报, 2002, 21 (3): 101 ~ 103
- 宋月清, 甘长炎, 夏志华等. 预合金粉末在金刚石工具中的应用研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1997 (1): 2 ~ 7
- 曾克里. 金刚石制品用预合金胎体粉末 [J]. 金刚石制品与石材加工信息通报, 1996 (3): 21 ~ 29
- 张绍和, 杨凯华. 金刚石工具预合金胎体粉末制备技术 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001 (2): 26 ~ 29
- 徐浩翔, 麻洪秋, 罗锡裕等. 雾化预合金胎体粉末的制备及其在金刚石工具中的应用 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004 (1): 45 ~ 48
- 万新梁. 新型超细预合金粉在金刚石工具中的应用 [C]. 第四届郑州国际超硬材料及制品研讨会, 2003. 149 ~ 152
- 张鹰. 金刚石制品金属结合剂配方设计的探讨 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2000 (2): 9 ~ 11
- Platner H. Primary sawing of granite with circular diamond [J]. Industrial Diamond Review, 1978, 7: 244 ~ 247
- Wright D N and Cassapi U B. Factors influencing stone sawability [J]. Industrial Diamond Review, 1985 (2): 84 ~ 89
- Ertingshaw Ser W. Wear processes in sawing hardstone [J]. Industrial Diamond Review, 1982 (5): 284 ~ 290
- 胡焕校. 金刚石锯片胎体的耐磨性 [J]. 中国有色金属学报, 2000 (3) 403 ~ 409

#### 作者简介

谢志刚,男,1967年生,现为桂林特邦新材料有限公司高级工程师。

收稿日期:2006-2-5

(编辑:王孝琪)

本社有创刊以来所有期刊内容电子(光盘)版,有需求者请联系 0371 - 67640348