

金

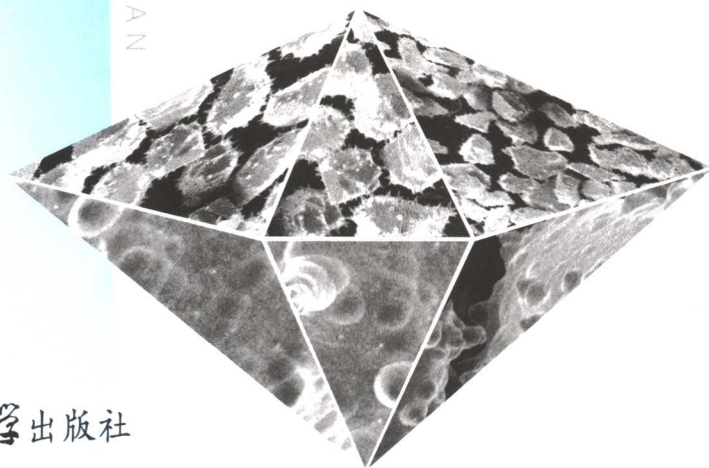
JINGANGSHI

工具制造理论 与实践

刚 石

GONGJU ZHIZAO LILUN YU SHIJIAN

孙毓超 宋月清 等著

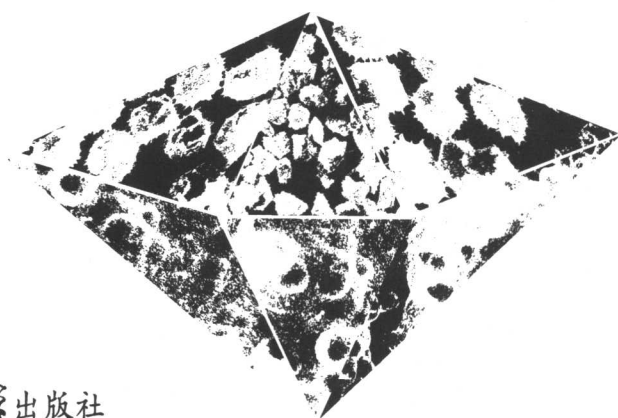


郑州大学出版社

金刚石

工具制造理论与 与实践

孙毓超 宋月清 等著



郑州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金刚石工具制造理论与实践/孙毓超,宋月清等著. — 郑州:郑州大学出版社,2005.5

ISBN 7-81106-062-0

I. 金… II. ①孙… ②宋… III. 金刚石-工具-文集

IV. TG7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 033318 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

郑州文华印务有限公司印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:27

字数:641 千字

版次:2005 年 5 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

1/16

印数:1~3 600

印次:2005 年 5 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-81106-062-0/T·13

定价:70.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

序

我仔细看了孙毓超和宋月清等合写的《金刚石工具制造理论与实践》(以下简称《理论与实践》)一书的内容提要、目录和前言,并通读了全书的初稿,由于自己也是金刚石工具的行业中人,内心感受颇多。

近年来,有关金刚石工具的书籍陆续出版一些,有教科书类,有综述性的参考书类,多为调研总结性的,囊括了国内部分相关工作,对金刚石工具行业的发展进步也起到一定的作用。

《理论与实践》则有不同于其他金刚石工具制造类书籍之处,该书是作者从业以来不同时期的有较强实用性的科研成果的总结汇集,读后有以下感触:

项目的选择具有前沿性。选择项目代表了当时某个领域的前沿工作,有的至今仍不失其新。例如稀土元素在金刚石工具中的应用、金刚石表面金属化的热力学机制、金刚石镀镍刺后的 SEM 形貌、铁基预合金化粉末、胎体性能弱化问题等,都有先人一步的感觉。

本书的实用性较强。书中的个别研究结果澄清了长期以来的模糊认识,有较强的实用性。例如对结合剂中钴的再认识,文中用实验数据澄清了有关钴的耐磨性问题,实际上钴是容易磨损的,而国内出版的许多书籍中都说钴或钴基胎体很耐磨。硬度和耐磨性的关系,只有对于同种材料的粉末冶金制品才有对应关系,对不同的材料硬度高耐磨性不一定高。还有预合金粉末对金刚石的粘结性能研究,框锯焊后基体变形与改善质量问题的探讨等,都有很好的实用价值。

有较强的理论价值。本书中的若干文章对机制的讨论是通过自己的可靠的数据分析讨论得出的,不是仅仅引用别人的结论加以叙述,所以读起来感到很有说服力。如二元铜合金对碳材料的润湿和粘结行为、金刚石与金属化学键合的微观判据、金刚石制品的烧结合金化原理等。

其中作者首次利用透射电镜,成功地对金刚石和胎体结合面进行了选区衍射,这在国内外是首次,充分证明了用低温沉积法进行金刚石表面金属化时,沉积的金属钨在750℃以上和金刚石发生键合反应,生成 MC 和 M_6C 型碳化物,而且能经得起强酸的长时间煮沸,澄清了化学沉积时钨不和金刚石反应的错误提法。

绝大多数研究工作是面向企业的。金刚石工具技术是应用技术,离不开实践离不开企业,那些束之高阁的没有使用价值的技术,企业不喜欢。企业需要可操作性强的实用技术。书含钛金刚石工具的胎体材料研究,金刚石工具切割性能研究,对钻头底唇拉槽变形的几点看法,金刚石出露高度对钻进性能的影响等文章在当时都起到了很好的作用。

书中的技术数据和插图绝大多数来自作者所做的实验,说服力强。哪些是自己的,哪些是引用的,界限十分清楚,让人看了之后清楚地知道作者的工作和别人的工作。

全书以金属材料学为主线,注重微观机制和宏观性能及工具性能间的内在联系,很少涉及切割、切削和磨削机理的研究。

除此之外,书中提供了从业者都比较关心的铁和铁-铜基结合剂的特点(包括优点和不足)、实验合金的性能及做成工具的使用效果、中外文献报道的相关数据,供从业者参考。

从书中可以看出作者较深的技术功底和扎实的学风,书中的有些工作给读者提供了很好的经验和借鉴,把这些工作整理成书对行业的发展进步是很有好处的。

虽然有些工作距现在已近20年,有些是近些年来工作,但现在看来都仍然感到很新,因为至今仍有人看不到这方面的报道。有些文章发表在有关材料方面的杂志上,如《机械工程材料》、《复合材料》、《稀有金属》、《粉末冶金工艺》、《高压物理学报》、《硅酸盐学报》、《人工晶体学报》上等等。

岁月流失,孙毓超教授已近花甲之年,宋月清博士早已逾不惑之年,我们之间的相识相知也已有八九年之久。读其书,便可知其人。他们一向很敬重我,请我作序,讲实在话,我几经推辞,实在难于承担。最终出于对两位作者的敬意和友情,我应了下来。

在结束这篇短序之际,祝两位作者在人生和科技创新之道路上,还会有更壮丽的篇章。企业界继续殷切盼望他们有更多的新作早日问世。

石家庄博深工具集团有限公司董事长



2004年10月于石家庄

前 言

从超硬材料在我国诞生至今已经 40 余年了,在这漫长的岁月里,金刚石行业几经周折,到目前为止金刚石工具产业已具有相当庞大的规模,在工艺技术、设备设计制作、控制精度、原辅材料的质量、金属结合剂的基础研究及引进工艺技术的消化吸收等方面,都取得了长足的进步,让国内外同行刮目相看。

现代金刚石工具已应用到国民经济各个领域,如机械、冶金、电子、地质、建筑、交通、生活民用和国防军工等。近年来金刚石工具业的发展令人瞩目,21 世纪初拥有现代化制作设备、产值超亿元和亿元左右的企业不断涌现。如国内最大的金刚石工具企业石家庄博深工具集团有限公司,资产过亿,外销过亿,总收入两亿多人民币。还有北京安泰昌平金刚石制品有限公司、广东奔朗金刚石制品有限公司、石家庄冀凯金刚石制品有限公司,以及丹阳丰泰公司、石家庄金锋金刚石制品有限公司、武汉团结万帮激光金刚石工具有限公司等,都有相当可观的国际市场份额。福建、浙江、江苏、广东、四川等省份还有一批发展势头很快的企业,中小企业几乎遍布全国每一个省份和地区。其中有的企业的产品的出口销售收入已过亿,例如石家庄博深工具集团有限公司的产品出口网络在美国、欧洲及东南亚地区等已经形成。丹阳地区的企业大多以出口为主,出口额在不断增加。

金刚石工具业的发展强有力地促进了金刚石单晶和聚晶材料的发展,金刚石工具业为金刚石提供了广大的市场和不断发展进步的要求。应当指出,金刚石工具业的快速发展,主要归功于金刚石工具的技术进步和工具质量的普遍提高,特别是一批国有企业、民营企业的企业家和专家、科技人员联手,用集体的聪明才智和辛勤劳动改变了人们意识中长期存在的“金刚石工具技术含量低”的偏见。

国内若干企业已形成了自己的品牌。其中宜昌黑旋风锯业有限公司的产品供不应求,年销售收入过亿;北京有研粉末合金公司是目前国内最大的铜粉生产基地,还生产铁基和铜基预合金粉末;一些民营企业的发展势头迅猛,如郑州卡斯通科技有限公司用化学共沉淀法生产的铁基无钴低成本预合金粉使用结果令人满意,预混合合金粉已具有一定的生产规模,市场不断地扩大;武汉团结万帮金刚石工具有限公司是激光锯片的专业生产厂家,利用国产激光设备,在保证焊接质量的情况下,生产效率大幅度提高,为进口设备的 2~3 倍,而且现用的基体材料 65Mn、50Mn₂V 均可保质施焊;桂林矿产地质研究院自主研发投入生产的绳锯已出现供不应求的局面,亟须扩大生产规模。国产金刚石工具制作设备已占领了相当的市场份额,以郑州金海威公司为代表,正在逐渐地取代进口;江苏、浙江、广东、广西、福建等地的具有一定规模的金刚石工具厂家以其优良的性价比使市场覆盖面逐渐扩大,发展势头良好。

近年来在围绕保证产品质量、降低成本上做了大量有成效的工作,国内市场基本上很少应用钴基和镍基胎体。与此同时铁基和铁-铜基胎体的研发和应用进展很快,在很大范围内铁基结合剂已经取代了钴基结合剂。当然,铁基结合剂的推广还有许多艰苦细致

的工作,还有许多问题须尽快解决,如磨损问题、烧结温度、挠度和韧性等。

本书作者对金属结合剂的基础研究、合金元素在金属结合剂中的作用研究、金刚石表面金属化研究、稀土元素在金刚石工具中的应用研究、金刚石工具相关的预合金粉末研究、新的生产工艺的开发等都投入了较大的精力。

多年来国内对钴的耐磨性的传统认识认为,钴是耐磨的金属,实际上恰恰相反,钴是容易磨损的金属。硬度和耐磨性之间的关系也不像国内各出版物中所写的那样,硬度越高越耐磨,对同种材料来说硬度高说明致密度高,耐磨性好些。对不同材料就不一定了,有些材料很软但很耐磨,例如铅,虽然很软,却很耐磨。本款已被本书作者的基础研究结果所更新,并逐渐被国内外从业者认同。

本书作者完成的在透射电镜下对锯片齿的胎体和金刚石界面的选区电子衍射,发现了 M_6C 和 MC 型碳化物,并能经得起强酸的长时间煮沸而不溶,足可证明碳化物和金刚石之间没有石墨;不久北京科技大学王岚和郭西缅甸的拉曼光谱测定结果也证实了这一点,拉曼光谱对石墨的灵敏度比对金刚石高几十倍。给化学法金刚石表面金属化是金刚石和碳化物形成元素的键合,提供了最有力的微观判据,此项工作国内外至今未见报道。

本书作者在国内最先将稀土元素应用于金刚石工具中,20 世纪 80 年代初开始稀土元素在金刚石工具中的应用研究,首次发现了稀土元素在金刚石工具中的两个重要性能,即降低液相合金的接触角和改善胎体合金的磨损性能(降低耐磨性)。合理控制金刚石工具胎体的磨损性能,对金刚石工具的使用性能来讲是十分重要的。

本书作者根据工作实践,在国内最先(20 世纪 80 年代初)系统地总结出金属结合剂中合金元素的作用,最先用坐滴法测定金刚石工具金属结合剂高温下(液相)对石墨(金刚石)的接触角,被测定的合金有铜锡钛合金、铜镍锰合金、铝基合金、铜锡镍钛合金等 5 种合金。对金刚石工具的金属结合剂的深入研究起到一定的作用。

本书作者在 20 世纪 80 年代中期开始用化学法将金属钨低温沉积到金刚石表面,并使其与金刚石表面发生键合反应,生成 MC 和 M_6C 型碳化物,碳化物层不脱落,并经得起强酸的长时间煮沸,当时国外学者认为钨钼材料是无法用化学法沉积到金刚石表面的。

本书还根据实验数据就胎体材料的弱化、预合金粉末对工具性能的影响、化学法金刚石表面金属化的热力学机制、框锯焊后基体变形的机制和解决方法、钻头工作时唇面的受力分析、工具中金刚石出刃高度的测定方法及对工具性能的影响、现代金相技术在金刚石工具中的应用等进行了讨论和介绍。

本书绝大多数是作者自 20 世纪 80 年代至今陆续发表的与金属结合剂金刚石工具工艺技术有关的研究论文选集。这些论文可以使人们清楚地看到作者从事金刚石工具科研和技术工作的全部历程。

全书选录论文 53 篇,其内容涵盖了常用合金元素的作用、常用结合剂的评述、润湿与烧结合金化、预合金粉末、金刚石表面金属化、稀土应用、电火花烧结、金刚石工具中相关问题的讨论等,共 8 个部分。其中绝大部分是作者科研项目和新产品开发项目,虽然有些项目的研发已事隔多年,但至今对行业仍具有重要价值。

全书每一部分的论文(如稀土元素)根据各阶段研究进展,有不同的侧重,部分研发工作及文章是与他人合作开发和撰写的,在文章首页下部注明了第一作者或其他撰稿人。

本书的编写是在行业同仁的建议和全力支持下完成的, 特别感谢石家庄博深工具集团有限公司、河南卡斯通科技有限公司、河南远发集团公司、湖北鄂信钻石材料有限公司、河南金贝特种金刚石有限公司、有色金属研究总院、工业金刚石信息网等单位对本书的出版发行给予了不同程度的支持, 在这里也要感谢建议和支持我们又不愿公开姓名的朋友。

感谢石家庄博深工具集团有限公司董事长陈怀荣高级工程师在百忙中拨冗为本书作序。如果这本书对读者有一点点启发的话, 就是我们对朋友们最好的酬谢。

我们在金刚石行业里工作了 20 多年, 本书就是我们工作的部分记录。如果这些记录能成为读者工作中的借鉴的话, 将是我们最大的快慰! 由于我们的水平有限, 书中可能会有错误和不妥之处, 敬请读者和业内朋友批评指正。

作者 孙毓超 宋月清
2004 年 6 月 1 日

目 录

第一部分 金属结合剂

金刚石工具胎体中合金元素的作用	(3)
铁基结合剂的功罪	(10)
对结合剂中钴的再认识	(14)
钴基金刚石工具胎体材料的研究	(25)
钴基金刚石工具胎体材料中碳化物形成元素的作用	(31)
金属粘结剂对金刚石的润湿	(38)
含钛金刚石工具胎体合金研究	(44)

第二部分 合金和合金元素对碳材料的行为

三元铜合金对碳材料的若干行为浅析	(59)
二元铜合金对碳材料的润湿和粘结行为	(65)

第三部分 预合金化粉末

预合金粉末(TT15)对金刚石粘结性能的研究	(75)
添加剂对预合金粉末胎体性能及其金刚石工具使用效果的影响	(80)
预合金粉末在金刚石工具中的应用研究	(86)
金刚石工具胎体用预合金粉末的使用性能研究	(94)

第四部分 烧结与烧结合金化

金刚石制品的烧结合金化原理	(101)
烧结过程中金属粉末和金刚石的温度状况分析	(127)
人造金刚石热强特性与烧结工艺	(131)

第五部分 电火花烧结技术

国外电火花烧结技术简介	(139)
电火花烧结地质钻头的现状与前景展望	(147)
电火花烧结人造金刚石钻头是一项有希望的新工艺	(156)
电火花钻头野外钻进试验综合分析报告	(162)
电火花钻头室内台架试验与分析报告	(172)
钻头通电烧结新型模具研究	(182)
电火花烧结对人造金刚石强度的影响	(188)

第六部分 金刚石表面金属化

镀镍刺金刚石的 SEM 显微形貌	(193)
金刚石与金属(或合金)的结合界面分析	(198)
金刚石 Ti、Ni 镀层厚度的最佳化选择	(205)
热压烧结法金刚石与金属键合研究	(208)
金刚石-金属化学键合的微观判据	(214)
金刚石表面金属化的热力学机制研究	(223)

第七部分 稀土元素在金刚石工具中的应用

稀土元素在金刚石工具中应用研究的新进展	(237)
稀土元素铈对金刚石工具胎体作用的影响机理研究	(244)
稀土元素镧在金刚石工具胎体材料中的作用机理研究	(250)
稀土元素 La 对金属胎体/金刚石复合材料粘结性能的影响	(257)
金刚石工具中的稀土元素	(263)
稀土元素在金刚石烧结制品中的应用	(269)
稀土元素铈(Ce)在金刚石工具胎体合金中的行为	(274)
Effects of rare earth element lanthanum on the microstructure of copper matrix diamond tool materials	(284)

第八部分 金刚石工具的若干问题讨论

非金属粉末添加剂在弱研磨性石材切割工具中的应用	(295)
金刚石工具材料选择与工艺中存在的问题	(308)
金刚石的磨损形态对工具切割性能的影响	(312)
金刚石工具胎体材料的性能“弱化”问题初探	(318)

金刚石工具胎体性能的弱化问题研究	(323)
新型烧结式不提钻钻头翼片制造工艺	(330)
金刚石锯片切割性能的研究	(336)
框锯焊后基体变形与改善焊接质量问题的探讨	(342)
钻头金刚石出刃高度对钻进性能的影响	(347)
钻头工作时唇面的压力状况分析	(352)
对钻头底唇拉槽变形的几点看法	(358)
现代金相技术及其应用	(363)
切割石材金刚石用工具胎体材料的优化研究	(383)
谈金属结合剂工具的质量稳定性问题	(389)
浅谈金刚石工具质量的相关因素	(395)
国内外金刚石工具简况	(408)
 后记	 (418)

第一部分 金属结合剂

金刚石工具胎体中合金元素的作用*

摘要 本文介绍几种合金元素在金刚石工具胎体中的主流作用。元素加入量的变化引起胎体性能变化的机理十分复杂,元素在胎体合金中可以在固溶体中,可以在化合物中,如金属间化合物和离子化合物,也可以以单质的形式游离存在。胎体的性能由元素的存在形式决定。

关键词 合金元素 结合剂 相

1 前言

烧结金属结合剂金刚石制品中常用元素主要有:Fe、Ni、Cu、Mn、Sn、Zn、Al、Co、Cr、W、Ti、Ce、La、Si、B等。

在烧结过程中,胎体中的合金元素通过扩散进行合金化,形成固溶体和化合物,其中包括间隙相、间隙化合物和中间化合物。由此使金属和金刚石之间产生适当的粘结,粘结强度取决于金属和合金高温下与金刚石的附着功大小和碳化物形成反应发生的多少。附着功和碳化物的生成量决定胎体合金对金刚石的粘结强度。除此之外,胎体的烧结压制密度也对金刚石在胎体中的固结强度起很大的作用,密度越大固结强度越大。

表1给出胎体中主要元素的性能参数。

表1 胎体中主要元素的性能参数

元素	原子量	密度(g/cm^3)	熔点($^{\circ}\text{C}$)	比电阻($\mu\Omega/\text{cm}$)	线胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	晶体结构
Fe	55.85	7.87	1 535	9.71 (20 $^{\circ}\text{C}$)	11.7	bcc
Cu	63.54	8.96	1 083	1.673	16.6	fcc
Ni	58.69	8.90	1 455	6.84	12.8	fcc
Co	58.93	8.90	1 495	6.24	12.5	hcp
Mn	54.93	7.43	1 245	18.5	23.0	金属型立方
Al	26.98	2.70	660.2	2.65	23.1	fcc
Sn	118.69	7.30	231.9	11.5	23.0	bcc
Zn	65.38	7.13	419.46	5.92	33.0	hcp
Pb	207.2	11.34	327.4	20.65	29.1	fcc

* 原载《2003年郑州国际超硬材料研讨会论文集》,机械工业出版社,2004年9月。作者:孙毓超。

续表 1

元素	原子量	密度(g/cm ³)	熔点(℃)	比电阻($\mu\Omega$ /cm)	线胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	晶体结构
W	183.85	19.30	3 300	5.5	4.3	bcc
Ti	47.9	4.567	1 668	4.2	9.0	hcp bcc
Cr	52.01	7.19	1 890	13.0	6.2	bcc
Si	28.09	2.33	1 430	105	4.2	金刚石立方
La	139.92	6.16	920.55			α hcp β fcc
Ce	140.13	6.77	804			同上
B	10.82	2.34	2 300		8.0	正方斜方晶

2 常用元素作用概说

2.1 Fe

(1) 优点 铁是极廉价的元素,在金刚石工具中的用量日渐增多,铁用在金刚石工具中有如下优点:

- 1) 价格低廉;
- 2) 铁与金刚石有较好的润湿性,接触角为 50° , 优于钴和镍;
- 3) 液相时铁与金刚石的附着功为 $3.4 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$, 也优于钴和镍;
- 4) 可以形成多种碳化物,如渗碳体型(Fe_3C)和 ϵ 型碳化物(Fe_2C),有硼参与可形成 $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ 和 $\text{Fe}_3(\text{CB})$,有 W、Mo 参与时,形成 M_6C 型碳化物(Fe_3W_3)C 和 $(\text{Fe}_3\text{Mo}_3)\text{C}$;
- 5) 与骨架材料的相容性很好,液相时与 WC 的接触角接近于 0 ,对 TiC 的接触角也很低;

6) Fe 具有比 Cu、Ni、Co 低的线胀系数,其值为 $11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,更接近金刚石的线胀系数,对防止冷却裂纹的出现起一定的作用;

7) 烧结时铁对金刚石的轻度刻蚀并不损失金刚石的强度,反而会提高金刚石在胎体中的把持力;

8) 对于铁基合金的性能是否能接近或达到钴基合金的性能,近期工作和有关文献的报道表明,是完全可能的。

(2) 铁在金刚石工具中有如下不足:

- 1) 铁基胎体的变形性大于钴基胎体;
- 2) 铁基胎体的耐磨性高于钴基胎体;
- 3) 铁基胎体中的低熔点金属容易发生流失;
- 4) 铁基胎体的工具不够锋利。

(3) 为了正确地认识铁在金刚石工具中的作用,作如下几点说明:

高温下铁对金刚石的蚀刻率远比镍、钴都高,但是实验表明,1 000 ℃以下烧结,金刚石只被轻度蚀刻,并不影响金刚石的强度;金刚石表面被蚀刻的碳并不以石墨形态分布在金刚石表面,而是扩散到金刚石表面的含铁金属膜中^[1],按一定的规律分布。

使铁(钢)在高速状态下与金刚石对磨,金刚石会被严重磨蚀加工。利用这一特性,可以加工天然钻石^[2]。

铁基金刚石工具不锋利的原因是铁比钴耐磨,比钴变形大。

铁基结合剂工具烧结流失是由于铁与铜基合金中的低熔点金属的溶解度过低造成的,适量加一些互溶性好的元素即可减少流失。

2.2 Cu

(1)铜在结合剂中有如下优点:

- 1)电解铜粉成型性好,广泛用于冷压成型后烧结,压坯不易塌落;
- 2)某些元素的微量加入可以使铜对碳材料从不润湿变成润湿^[3];
- 3)纯铜对碳化物和骨架材料的相容性很好,如W、WC等;
- 4)纯铜的耐磨性优于青铜,可烧结性好;
- 5)铜可与Sn、Zn、Mn、Ni、Ti等制成性能优异的合金,例如Cu-Sn-Ti、Cu-Ni-Mn、Cu-Ni-Zn及6-6-3青铜等。

(2)铜的缺点如下:

- 1)纯铜的变形性大,不宜制成高质量的工具,铜基合金会有某种程度上的改观;
- 2)铜、铁间的互溶性不好,彼此溶解度很低,这将对铁基结合剂的应用和推广带来一定的麻烦;
- 3)由于铜的强度低,对碳材料的润湿性差,所以对金刚石的把持力和粘结力都不高;
- 4)铜与锡、钛在大气中的可烧结性不好,氧化严重,必须在真空或保护气氛下烧结,使工具成本增加。

2.3 Co

(1)优点

- 1)钴的抗弯强度高,钴也可提高铜基胎体和铁基胎体的抗弯强度;
 - 2)钴具有易磨损性^[4],或者说钴具有适度的磨损性能,使综合切割性能大幅度地提高;
 - 3)钴对碳材料和骨架材料都具有较低的接触角和较大的附着功,略次于铁和镍,即和金刚石有较大的亲和力;
 - 4)钴与镍相比,钴的存在有利于碳化钨(WC)的生成,钴、钨也可与金刚石生成M₆C型碳化物;
 - 5)钴和钴基胎体的变形性小(挠度小)^[5],提高切磨加工质量;
 - 6)还原钴粉的可烧结性、成型性好,适于激光焊接片;
 - 7)由于钴具有易磨损性能和小的变形性,纯钴和钴基工具更具有广谱性。
- (2)不足 价格昂贵,松比太小必须制粒。

2.4 Ni

(1) 优点

1) 适于制作重载荷和冲击载荷作用下的工具, 镍和镍基胎体具有一定的耐磨性和韧性;

2) 镍与钴、铁适量搭配可以得到令人满意的综合性能, 如小的变形性和适度的耐磨性, 接近或达到钴基胎体的性能;

3) 镍可以减少铁铜基含锡锌胎体的烧结流失;

4) 镍可以改善 Cu - Sn - Ti 结合剂砂轮的磨削性能。

(2) 不足 成本高、变形性大、锋利度差。

2.5 Sn

(1) 优点

1) 有力地改善可烧结性;

2) 易形成金属间化合物, 可以改善磨损性能和降低变形性(降低挠度);

3) 适于添加到冷压成型胎体中, 靠液相在固体粉末中的虹吸现象产生的毛细管力使胎体收缩;

4) 降低液态合金的表面张力, 降低内界面张力, 降低接触角;

5) 改善铁基胎体的磨损性能和变形性, 这是因为锡在铁基胎体中可以形成 Fe_3Sn 和 $\text{Fe}_{70}\text{Sn}_{15}\text{C}_{15}$ 金属间化合物和复式碳化物。

(2) 不足

1) 加入量控制不当容易流失;

2) 不利于激光焊接, 工具的非工作层必须单独设计(不含锡);

3) 与钛、铜一起组成的胎体, 在大气中的可烧结性极差, 必须采用无氧或隔氧烧结。

2.6 Zn

(1) 优点

1) 降低铜合金熔点, 有利于工具的烧结和浸渍;

2) 易形成金属间化合物, 可以改善变形性和磨损性能, 例如和铁可以生成 $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ 、 FeZn_9 、 FeZn_3 等, 其他元素也有类似的情况, 如 Cu - Zn、Mn - Zn、Ni - Zn、Co - Zn 适量地加入都有利于胎体性能的改善。

(2) 不足

1) 含量控制不当, 烧结时易发生流失;

2) 锌的蒸气压高, 烧结温度高时易发生汽化, 对环境有害;

3) 无化合态的锌高于 900 °C 烧结会汽化, 影响胎体合金质量。

2.7 Al

(1) 优点