**一、金刚石及金刚石工具概论(Introduction to diamond & its tools)**

**1.1. 金刚石及其复合超硬材料(Diamond and Composite Super-hard Materials)**

**1.1.1 天然金刚石(natural diamond)**

（1）钻石的形成条件：一般压力在4.5-6.0Gpa（相当于150-200km的深度）；温度为1100-1500℃

（2）钻石的存在方式

主要出现在橄榄岩和榴辉岩中；含钻石的橄榄岩主要包括两种：金伯利岩(kimberlite)和钾镁煌斑岩(lamproite)

（3）天然金刚石的来源

* 天然金刚石原生矿主要产于金伯利岩中。
* 这种岩筒是地壳的裂隙，往下去可能与地幔相通。岩筒中的金伯利岩是金刚石矿床的母岩。
* 关于天然金刚石的成因，目前尚未定论。一种较为普遍的看法认为，天然金刚石是在地壳深处的超基性岩浆（按照多元论提法）中结晶形成的，深度大约在地表下100~300Km。最适宜的结晶条件是5~7GPa压力，1200~1800℃。早在火山爆发以前，金刚石就已经在深部岩浆中，并成为金伯利岩、橄榄岩这类超基性岩的组成部分。随着火山爆发，金伯利岩浆把金刚石晶体携带到地表来。因此可以认为金伯利岩是地幔派驻地表的使者。

（4）天然钻石主要产区

* 全世界钻石的储量和生产概况：已探明天然钻石储量约25亿克拉，其中澳大利亚6.5亿克拉，扎伊尔5.5亿克拉。
* 全球钻石年产量一亿克拉，产量前五位的国家是澳大利亚、扎伊尔、博茨瓦纳、俄罗斯、南非，钻石产量占全世界钻石产量的90%左右。我国第10名，年产量在20万克拉，钻石主要在辽宁瓦房店、山东蒙阴和湖南沅江流域。

（5）宝石级天然钻石(natural gem grade diamond)

* 有工业开采价值的金刚石在0.1ct/t矿石以上
* 单位：1克拉（ct，carat）= 0.2克=100分
* 克拉一词源自希腊语中的克拉(keration)，指长角豆树（或稻子豆carobseed），一克拉即等于一粒小角树种子的重量

（6）彩钻颜色的形成原因

* 纯净的钻石为无色透明
* 钻石在生成的过程中因含化学微量元素不同和内部晶体结构变形而呈现不同的颜色

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| * 黄钻 | 呈浅黄、金黄色 | 当氮原子取代钻石晶体中的某些碳原子时，开始吸收蓝，紫色光线所致 |
| * 蓝钻 | 呈淡蓝色、艳蓝色 | 吸收微量硼元素所致 |
| * 红钻 | 呈粉红色、红色 | 晶格结构扭曲所致 |
| * 绿钻 | 呈淡绿、艳绿色 | 受到自然辐射而改变晶格结构所致 |
| * 黑钻 |  | 由深色的内含物包裹体所致 |

（7）钻石加工

（8）工业级天然金刚石(Natural industrial grade diamond)

**1.1.2 人造金刚石(man-made diamond/synthetic diamond)**

（1）单晶金刚石(mono-crystalline diamond)

* 世界：1954年美国GE公司
* 我国：1963年12月6日，以高纯石墨粉为原料，以镍铬合金为触媒研制成功了我国第一颗人造金刚石
* 六面顶合成技术世界领先，全球金刚石垄断集团戴比尔斯集团的元素六(Element Six)公司从我国进口六面顶压机

（2）聚晶金刚石(poly-crystalline diamond, PCD)

* 金刚石微粉Diamond powder：36/54微米，（300目）
* 是由细小的金刚石颗粒、粘合剂烧结成较大颗粒、各种形状的多晶金刚石

（3）金刚石复合片(poly-crystalline diamond compact, PDC)

* PDC是由一层金刚石聚晶薄层、一层较厚的硬质合金层复合而成
* 目前国内已有Φ19~Φ25mm，今后要开发Φ40mm以上的复合片，大尺寸复合片还靠国外进口
* 除了尺寸之外，还要注意提高现有产品的耐热度，国外产品已达到800℃以上

（4）人造金刚石及其应用简介(Introduction to diamond and its application)

1）金刚石工具的应用范围：

1. 地质勘探、石油钻井、工程勘察；
2. 石材加工；
3. 机加工行业；
4. 建筑装璜；
5. 其它硬脆材料加工行业（玻璃、陶瓷、宝石、印刷电路板、半导体材料、混凝土）

2）目前主要领域：石材、建筑、公路、铁路、地质等

3）高新技术领域：

1. 航空仪表轴承、光学器件等精密仪器的加工
2. 单晶硅、多晶硅0.1-0.2mm厚度片的切割加工
3. 计算机芯片等大规模集成电路的微细精密加工等

4）金刚石制品制造工艺发展概况：

①表镶法： 1862年

②粉末冶金法：1945年，无压浸渍法、热压烧结法、冷压烧结法

③电镀法： 1970年，镀镍、镀铜、镀铁，各种合金电镀

④钎焊法： 1990年

**1.2. 金刚石工具分类(diamond tools classification)（按加工方法）**

**1.2.1、钻drilling——金刚石钻头(diamond bit)**

地质勘探钻头(Drill bit for mining and geological prospecting)

（1）金刚石钻头分类(Classification of diamond bits)

①按金刚石的镶嵌状态分：表镶、孕镶；

②按生产方法分： 电铸、粉末冶金（热压、冷压、无压）、焊接；

③按金刚石类别分： 单晶、聚晶、复合片；

④按钻进功能分： 取心钻头、不取心（全面破碎）钻头；

⑤按钻头唇面结构分： 平底、高低齿、同心圆、阶梯、齿轮等等；

⑥按胎体材料类别分： WC-Cu基、Fe基、Ni基等

（2）大陆科学钻探CCSD-1井(5158m)使用钻头

* 表镶天然金刚石钻头(Natural diamond-set bit by non-pressure infiltration)
* 热压孕镶人造金刚石钻头(Impregnated diamond core bit by hot-press sintering)
* 电镀孕镶人造金刚石钻头(Electroplated impregnated diamond core bit)

（3）复合片钻头(Polycrystalline diamond compact bit, PDC钻头)

* 热稳聚晶钻头(Thermal Stable Polycrystalline Diamond bit, TSP钻头)
* 金刚石扩孔器(Diamond reamer)

①无压浸渍扩孔器(Infiltration process with vibration)

②电镀扩孔器(Electroplated reamer)

**1.2.2、切sawing——金刚石锯片/绳锯(diamond saw blade/diamond wire saw)**

冷压/烧结/焊接(cold-pressing/sintering /welding)

（1）金刚石锯片分类—按用途(diamond saw blade-classification according to usage)

1. 石材切割锯片
2. 光学玻璃切割锯片
3. 宝石等工艺品切割锯片
4. 硅、锗等半导体材料切割锯片
5. 工程切割片
6. 耐火材料、电瓷材料、陶瓷材料切割锯片
7. 塑料、层压板、有机玻璃切割锯片
8. 实验室用超薄锯片

（2）金刚石绳锯(diamond wire saw)

1. 金刚石绳锯的应用：①石材矿山；②桥梁维修与拆迁；③大型管道
2. 金刚石绳锯水下切割
3. 钎焊金刚石工具

**1.2.3、磨grinding——金刚石砂轮/磨盘(diamond grinding wheel/disk)**

* 砂轮：有金刚石砂轮和CBN砂轮。
* 金刚石砂轮是环保型，它在使用过程中的粉尘比普通SiC砂轮低得多，很受用户欢迎。
* 当前磨玻璃、磨陶瓷的砂轮市场销路好、效益好，特别是有些特种砂轮，经济效益非常可观。

**1.3. 金刚石性质及预处理(Diamond properties and its pre-treatment)**

**1.3.1 金刚石的性质(properties)**

（1）金刚石晶体结构

* 等轴晶系面心立方晶格构造。碳原子位于四面体的角顶及中心，具有高度的对称性
* 单位晶胞中碳原子间以同极键相连结，距离为0.155nm，角度为109°28′

（2）金刚石和石墨是同素异形体

* 石墨和金刚石都是由碳原子形成的单质，但它们的性质却不相同，这是由于它们的晶体结构不同的缘故。
* 石墨晶体是层状结构，在每一层内，碳原子排成六边形，每个碳原子都与其他3个碳原子以共价键结合，形成平面的网状结构；在层与层之间，是以分子间作用力相结合的。
* 由于同一层的碳原子间以较强的共价键结合，使石墨的熔点很高。
* 但由于层与层间的分子间作用力较弱，容易滑动，使石墨的硬度很小。
* 像石墨这样的晶体一般称为过渡型晶体或混合型晶体。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 金刚石(C) | 石墨(C) |
| 结构 |  |  |
| 色态 | 无色、透明、正八面体形状的固体，加工琢磨后有夺目光彩 | 深灰色细鳞片状固体，有金属光泽 |
| 硬度 | 最硬 | 软、滑，在纸上滑过可留痕迹 |
| 熔点 | 很高 | 高、耐高温 |
| 导电性 | 不导电 | 高、耐高温 |
| 导热性 | 好 | 良好 |
| 用途 | 钻探机钻头、刻刀、装饰品 | 润滑剂、铅笔芯、电极等 |

（3）金刚石的结晶形态：常见晶形有八面体、菱形十二面体、立方体、四面体和六八面体等。

（4）金刚石的主要性质

①物理性质physical properties：密度在3.47~3.55(无色钻石为3.52g/cm3)；人造金刚石一般呈淡黄色(含氮和金属触媒)

②机械性质mechanical properties(硬度，弹性模量，耐磨性)

* 钻石的摩氏硬度为10，新摩氏硬度15，显微硬度10000kg/mm2，显微硬度比石英高1000倍，比刚玉高150倍
* 金刚石硬度有方向性，八面体晶面硬度大于菱形十二面体晶面硬度，菱形十二面体晶面硬度大于六面体晶面硬度
* 弹性模量为900GPa
* 具有极高的耐磨性，超过刚玉90倍，而高出其它磨料千倍

③热学性质thermal properties：导热性好，线胀系数小，金刚石的熔化温度高。金刚石的热导率一般为136.16w/(m·k)

④光学性质optical properties：良好的折射率和色散性能，所以有明亮的光泽和色彩。折射率为2.417，色散率为0.044

⑤电磁性质electro-magnetic properties：导电磁性能差，有一种结构的是半导体，天然金刚石不具磁性

⑥化学性质chemical properties：化学性质稳定，极难溶于酸碱，铁族、铂族元素高温时溶解它。具有疏水性

（5）人造金刚石质量检测

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | De Beers | 美国GE | ΓOCT-9206 | 日本东明 | 中国JB/T 7989-1997 |
| 粒度组成 | △, PPC\* | △ | △ | △ | △ |
| 抗压强度 |  | CFS\* | △ |  | △ |
| 冲击韧性 | △ | △ |  | △ | △ |
| 堆积密度 | △ | △ |  | △ | △ |
| 比表面积 | △（表面状态） | △ |  |  |  |
| 形状 |  | ECC, τ\* | 形状系数 | △（微粉） | △（微粉） |
| 热稳定性 | TTI\* | TTI\* |  | △ |  |
| 磨削试验 |  |  | 研磨能力（微粉） | △ |  |
| 杂质含量 |  |  | △ |  | △ |
| 湿度 |  |  | △ |  |  |
| 加工粗糙度 |  |  | △（微粉） |  |  |

①金刚石粒度组成：筛分法，PPC(Particles Per Carat，每克拉金刚石的颗粒数)

* 筛网目数：1英寸（25.4mm）长度内网孔的个数
* (超硬磨粒的粒度标准 GB/T 6406-1996 图略)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| GE公司产品的PPC值 | | De Beers公司 SDA+产品的PPC值 | |
| 粒度 | PPC | 粒度 | PPC |
| 18/20 | 150 | 20/30 | 260±10 |
| 20/25 | 250 | 25/35 | 400±20 |
| 25/30 | 440 | 30/40 | 660±30 |
| 30/35 | 720 | 35/40 | 1075±50 |
| 35/40 | 1380 | 40/50 | 1850±80 |
| 40/45 | 2650 | 45/60 | 3000±150 |
| 45/50 | 5000 | 50/70 | 4800±240 |
| 50/60 | 8300 | （De Beers工业金刚石部2002年后更名为元素六） | |
| 60/70 | 14000 |
| 70/80 | 13000 |
| 18/20 | 150 |

②抗压强度：单颗人造金刚石在静压作用下，发生破碎时的负荷值，以牛顿（N）表示

* ；n—负荷超过平均值2倍的颗粒数
* (金刚石单颗粒抗压强度标准 JB/T 7989-95 图略)

③冲击韧性TI(toughness index)：又称冲击强度

* 金刚石磨料，尤其是锯切和钻探用的高品级金刚石，在使用过程中受到冲击、剪切、研磨等多种力的作用而破碎
* 所以要求金刚石不仅要有高强度、高研磨性，还要有一定的抗冲击韧性
* 取一定量金刚石连同钢球一同装入试样管，冲击后求得未破碎率，以其为50%时的冲击次数表征样品的冲击韧性

④热冲击韧性TTI(thermal toughness index)：

* 衡量金刚石耐热性的指标，其数值大小表示热稳定性的高低
* 将金刚石放在充有惰性气体的专用设备里加热(加热温度一般为900℃或1100℃，时间10min) 后测得的TI值

**1.3.2 人造金刚石品种(classification)**

* 采用按用途划分品种和命名的原则。产品按适用结合剂种类或加工对象划分。
* 每个金刚石品种取主要用途的英文第一个字母大写排在前面，金刚石用D写在后面进行标记：

1. 树脂或陶瓷结合剂用金刚石标记为 RVD：Diamond grains for Resin and Vitrified bond
2. 金属结合剂用金刚石标记为 MBD：Diamond grains for Metal bond tool
3. 锯切用金刚石标记为 SMD：Diamond grains for Metal bond Saw
4. 修整工具用金刚石标记为 DMD：Diamond grains for Metal bond Dressing tool

**1.3.3 金刚石预处理(pre-treatment)**

* 金刚石预处理就是把有缺陷的金刚石通过机械或物理化学方法进行处理
* 使之达到较理想的形状和表面状态，减少金刚石内应力，活化金刚石表面，以提高强度和粘结性或满足其它要求

（0）固液相润湿：衡量物质的润湿程度常用润湿角来度量

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

* 液相对固相的润湿性取决于两者的亲和性。云母为亲水物质，石腊为疏水物质。
* 金刚石属于疏水物质，但对某些金属或合金则具有良好的湿润性。
* 润湿角的大小与三相界面张力的定量关系：
* 当，cosθ=1，θ=0，固体完全被润湿
* 当，1>cosθ>0，固体部分被润湿
* 当，cosθ<0，固体完全不被润湿
* 过渡族金属元素如W，Ti，Cr，Zr，Mo等对金刚石的润湿性较好，固它们或它们的合金常作金刚石表面镀覆金属

（1）机械处理

①整粒：剥离金刚石边角薄弱部分和裂纹较明显的部分

②浑圆化处理：将不规则的金刚石颗粒毛尖磨钝,达到近似圆粒

③抛光处理：表面粗糙的金刚石表面易碳化，增加了摩擦力

（2）金刚石表面金属化处理

①金属化处理的意义(粘结力，强度)

②金属化处理的原理(C-MeC-Me)

（3）金属化处理的方法

①真空熔浸法：

* 真空条件下，将对磨粒有活性的金属或合金使之加温呈熔融状态而浸润磨粒表面，并在毛细管力的作用下渗入晶粒的微孔隙和裂纹中，在磨粒表面形成一层金属或合金化合物薄膜。
* 该方法可选氯化物（如氯化锌）作为表面活性剂。

②真空混料沉积反应：

* 该方法是将金属粉末和金刚石混合，加热至一定温度使金属蒸发（汽化）而沉积在金刚石表面，并在两相界面生成MeC-Me薄层，覆层厚度为0.5-10微米，薄膜与金刚石的结合强度达(9-17)×107N/m2。

③化学镀：

* 在不外加电流的情况下，利用还原剂使溶液中的金属离子在金刚石表面上还原析出金属，使磨粒表面具有一导电薄膜在化学镀后，通常需进行电镀。
* 常用金属镍。用在树脂结合剂金刚石工具中。
* 化学镀镍后的金刚石微粉（图略）
* 配方：硫酸镍30g/L，次亚磷酸钠30g/L，柠檬酸钠20g/L，pH：9.0，T：30℃
* 金刚石的抗压强度、冲击韧性结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 试样 | 抗压强度/N | 抗压强度提高率/% | 冲击韧性(TI)/% | 冲击韧性提高率/% |
| A | 164.6 | 14.3 | 36 | 25 |
| B | 188.2 |  | 45 |  |

* 锯片A、B现场锯切结果

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 锯片 | 切割寿命/  m/片 | 切割寿命提高率  /% | 切割速度  /m/min | 切割速度提高率  /% | 处刃高度 | 金刚石脱落率  /% |
| A | 612 | 33.7 | 1.8 | 27.8 | 低于金刚石直径1/3 | ~50 |
| B | 818 |  | 2.3 |  | 金刚石直径的(1/3~1/2) | ~30 |

*注：A用普通金刚石；B用镀钛金刚石*

（4）金刚石表面裹覆硬质颗粒

①裹覆白刚玉、碳化硅颗粒：

* 树脂结合剂金刚石工具，陶瓷基金刚石工具。增强胎体对金刚石的包镶强度，减少烧结过程中金刚石的热损失

②裹覆硬质合金粉：

* 弱包镶（热压、电镀），解决打滑地层钻进中金刚石的难出刃问题；提高金刚石工具出刃，提高金刚石的使用性能
* 单晶体、多晶体与非晶体的区别
* 晶体是经过结晶过程而形成的具有规则几何外形的固体，晶体中原子或分子在空间按一定规律周期性重复的排列
* 晶体性质：均匀性、各向异性、固体熔点、规则外形、对称性
* 非晶体是与晶体对应的原子或分子无规则排列，无周期性、无对称性的固体，如玻璃，非晶碳
* 晶体的原子在长程范围内在三维空间中都保持有序而且重复的结构，一组原子的重复单元叫晶胞

如果晶胞在三维方向上是整齐重复排列的就叫单晶，比如象一块一块的整齐排列的砖

如果晶胞不是有规律的整齐排列就叫多晶，比如象一堆杂乱无序的砖

**三、粉末冶金基础知识与热压金刚石工具制造**

* 粉末冶金步骤：①Raw powder→②Formed product→③Sintered product

第一章：概述(introduction)

第二章：粉末的性能(properties of powder)

第三章：成形(shaping)

第四章：烧结(sintering)

第五章：热压法制造金刚石钻头(diamond bits made by hot-press)

第六章：冷压法制造金刚石钻头

第七章：无压法制造金刚石钻头

作业(assignments)

**3.1. 概述**

**3.1.1 粉末冶金的含义**

粉末冶金(powder metallurgy)是制取金属粉末或用金属粉末（或金属粉末与非金属粉末的混合物）作为原料，经过成形和烧结，制造金属材料、复合材料以及各种类型制品的工艺技术。

粉末冶金法与生产陶瓷有相似的地方，因此也叫金属陶瓷法。

**3.1.2 粉末冶金的特点（同普通熔炼法相比）**

1. 能控制制品的孔隙度（可生产各种多孔材料，多孔含油轴承）；
2. 能利用金属和金属、金属和非金属的组合效果，生产各种特殊性能的材料

（W-Cu假合金型的电触头材料，金属和非金属组成的摩擦材料）；

1. 能生产各种复合材料（由难熔化合物和金属组成的硬质合金、金属陶瓷、弥散强化复合材料）；
2. 高合金粉末冶金材料的性能比熔铸法生产的好；
3. 生产难熔金属材料或制品，一般要依靠粉末冶金法。

**3.1.3 粉末冶金的不足**

粉末成本高，粉末冶金制品的大小和形状受到一定的限制，烧结零件的韧性较差

**3.2. 粉末的性能(properties of powder)**

**3.2.1 粉末的制取（机械法、物理化学法）(production of powder)**

（0）固体物质按分散程度划分

* 致密体*d*粒径＞1mm
* 胶体微粒0.1μm＞*d*粒径
* 粉末体1mm＞*d*粒径＞0.1μm

（1）机械法：将原材料机械地粉碎，而基本不改变其化学成份

（1.1）机械法—雾化法：直接击碎液体金属或合金而制得粉末的方法

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

* 水雾化/气雾化：借助高压水流或气流的冲击来破碎液流
* 雾化过程是一个复杂过程，既有物理机械作用，又有物理化学变化
* 高速的气流或水流，既是破碎金属液的动力又是金属液流的冷却剂，即雾化介质同金属液流有能量和热量交换
* 液态金属的粘度和表面张力在雾化和冷却过程中会不断发生变化；
* 液态金属与雾化介质会产生化学作用（氧化、脱碳）
* 气雾化可以获得球形粉末颗粒，而水雾化所得的颗粒形状是不规则的
* 雾化介质的压力对雾化粉末的粒度和粒度组成也有影响：气体压力愈高，水压愈大，则所得粉末愈细
* 表面张力愈小，粘度愈低，即阻碍破碎的内力较小，易得到较细的粉末颗粒→金属液流直径愈细，所得细粉末愈多

（2）物理化学法

（2.1）还原法：通过还原金属氧化物及盐类以生产金属粉末的一种方法。如用固体碳还原制取铁、钨等粉末

* 用还原剂还原金属氧化物及盐类来制取金属粉末是一种广泛采用的制粉方法
* 还原剂可呈固态、气态或液态；被还原的物料也可以采用固态、气态或液态物质

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 被还原物料 | 还原剂 | 举例 | 备注 |
| 固体  固体  固体 | 固体  气体  熔体 |  | 固体碳还原  气体还原  金属热还原 |
| 气体  气体  气体 | 固体  气体  熔体 |  | 气相氢还原  气相金属热还原 |
| 溶液  溶液  溶盐 | 固体  气体  熔体 |  | 置换  溶液氢还原  金属热还原 |

（2.2）电解法：水溶液电解法（锡粉、铜粉）、熔盐电解法

* 在一定的条件下，粉末可以在电解槽的阴极上沉积出来。
* 一般说来，电解法生产的粉末成本较高，因此在粉末生产中所占的比重是较小的
* 电解粉末具有吸引力的原因是它的纯度高
* 电解法制取粉末主要采用水溶液电解和熔盐电解
* 水溶液电解可以生产铜、铁、镍、银、锡、铅、铬、锰等金属粉末
* 在一定条件下也可以使几种元素同时沉积而制得铁-镍、铁-铬等合金粉末
* 从所得的粉末特性来看，由于电结晶，粉末形状一般为树枝状，压制性较好
* 电解法还可以控制粉末粒度，因而可以生产超细粉末

|  |  |
| --- | --- |
|  | Ⅰ----电解粉末区域  Ⅱ----过渡区域  Ⅲ----良好镀层区域 |

**3.2.2 粉末的化学成份(chemical compositions of powder)**

（1）粉末的化学成分组成：包括主要金属的含量和杂质的含量

（2）粉末的杂质成分：杂质主要指

1. 与主要金属结合，形成固溶体，化合物的金属或非金属成份，如还原铁粉中的硅、锰、碳、硫、磷和氧
2. 从原料和粉末生产过程中带进的机械杂质，如二氧化硅，三氧化二铝及难熔金属或碳化物等酸不溶物
3. 粉末表面吸附的氧，水汽和其它气体

**3.2.3 粉末的物理性能(physical properties)**

（0）物理性能：包括颗粒形状与结构，颗粒大小和粒度组成，比表面积，颗粒密度，颗粒硬度等

（1）粉末的颗粒形状：主要由粉末的生产方法确定

* 球形——气相沉积、液相沉积
* 近球形——气体雾化，置换溶液
* 片状——塑性金属机械研磨
* 多角形——机械粉碎
* 树枝状——水溶液电解
* 多孔海绵状——金属氧化物还原
* 不规则状——水雾化、机械粉碎，化学沉淀

Tips：颗粒形状直接影响粉末的流动性、松装密度、气体透过性，另外对压制性与烧结体强度也有显著影响

（2）颗粒密度

① 真密度：粉末材料致密体的密度

② 似密度：（又称比重瓶密度）它是颗粒质量用包括闭孔在内的颗粒体积去除求出的

③有效密度：即用颗粒质量除以包括开孔和闭孔在内的颗粒体积而得出的密度值，其值比上述两种密度值都小

（3）粉末的比表面积

* 粉末比表面的定义为1克质量的粉末所具有的总表面积，用m2/g或cm2/g表示；一般用透过法进行测量
* 比表面属于粉末的一种综合性质，由单颗粒性质和粉末体性质共同决定
* 比表面与粉末的许多物理，化学性质，如吸附、溶解速度、烧结活性等直接相关

**3.2.4 工艺性能(technical properties)**

（0）粉末的工艺性能包括：松装密度、摇实密度，流动性，压缩性和成形性

（1）松装密度：粉末试样自然地充填规定的容积时，单位容积内粉末的质量（可用松装密度测定装置测定）

（2）摇实密度：在规定的振动或敲击条件下，粉末充填规定容积后所测得的密度（可用振实装置测定）

（3）流动性 ：50克粉末从标准的流速漏斗流出所需的时间，单位为秒/50克（可用流动性测定仪测定）

（4）压缩性 ：标准模具中，粉末在规定的润滑条件和单位压力下所达到的压坯密度（可用定位垫支撑的模具操作）

（5）成型性 ：用粉末得以成型的最小单位压力，或者用压坯的强度表示（可用矩形压坯法或圆柱形压坯法测定）

Tips：实践证明：压缩性和成型性之间是逆向的。如电解铜粉的压坯强度就比雾化铜粉的高。

**3.2.5 粉末粒度的表示方法**

（0）粉末颗粒的大小简称粒径或粒度，直接影响粉末的工艺性能

（1）粒度分布：用具有不同粒径的颗粒占全部粉末的百分含量表示粉末的粒度组成

（2）粉末粒度：一般以粉末的平均粒径表示

（3）粉末的测定：一般采用筛分析法筛网标准，目前国际标准采用泰勒筛制

①筛网目数：指筛网一英寸上的网孔数（一般目数均标注于筛框上，故俗称筛网号）

若以M代表目数，a代表网孔尺寸（mm），d代表丝径（mm），则有以下关系式：

②泰勒筛制：筛制的分度是以200目的筛孔尺寸0.074mm（基筛）为基准

乘以主模数(，依次得到150、100、65、48、35目；除以主模数(，可依次得250、270、325、400目

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 目数m/ | 筛孔尺寸a/mm | 网丝直径d/mm |
| 32 | 0.495 | 0.300 |
| 35 | 0.417 | 0.310 |
| 42 | 0.351 | 0.254 |
| 48 | 0.295 | 0.234 |
| 60 | 0.246 | 0.178 |
| 65 | 0.208 | 0.183 |
| 80 | 0.175 | 0.142 |
| 100 | 0.147 | 0.107 |
| 115 | 0.124 | 0.097 |
| 150 | 0.104 | 0.066 |
| 170 | 0.089 | 0.061 |
| 200 | 0.074 | 0.053 |
| 250 | 0.061 | 0.041 |
| 270 | 0.053 | 0.041 |
| 325 | 0.043 | 0.036 |
| 400 | 0.038 | 0.035 |

Tips：频度分布曲线；累积分布曲线

**3.3. 成形(shaping)**

* 成形：使金属粉末密实成具有一定形状、尺寸、孔隙度和强度的坯体的工艺过程
* 模压法：作为金刚石工具，成形大都采用模压法实现，模具是金属或石墨。
* 成形过程中，粉末与粉末、粉末与模冲、模壁之间存在着摩擦，使压制过程中力的传递和分布发生改变

压力分布不均匀，造成了压坯各个部分密度和强度分布的不均匀

成形过程中要研究的就是如何克服这种不均匀情况

**3.3.1 成形前的原料预处理(pretreatment of raw materials before shaping)**

* 原料预处理内容：粉末退火、筛分、混合、制粒、加润湿剂
* 原料预处理目的：改善成型性能及最终产品的质量

（1）退火

* 粉末的预先退火，兼有使氧化物还原、降低碳和其它杂质含量、消除粉末的加工硬化，稳定粉末晶体结构的作用
* 用还原法、机械研磨法、电解法、喷雾法等制得的粉末通常都要退火处理
* 退火温度为金属熔点的0.5-0.6T，退火一般用还原性气氛

（2）混合

* 混合是指将两种或两种以上不同成分的粉末混合均匀的过程
* 混合的方法有机械法和化学法两种，金刚石工具制造中常用的是机械混合法
* 机械混合的均匀程度对产品的成形及最终产品的性能影响颇大，因此必须引起高度的重视
* 混合均匀程度取决于：

1. 混合组元的大小和形状
2. 组元的比重
3. 混合时所用介质的特性
4. 混合设备种类
5. 混合工艺参数（装料量、球料比、时间、转速等）

（3）筛分和制粒

* 筛分目的是把颗粒大小不同的原始粉末进行分级（金刚石工具制造中的粉末一般按粒度购进，无需进行筛分）
* 制粒的目的是将小颗粒粉末制成大粒或团粒，用以改善粉末的流动性和组成成分的均匀性

**3.3.2 金属粉末的压制过程**

（1）金属粉末压制现象

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1-阴模；2-上模冲；3-下模冲；4-粉末 具有侧壁的压坯的密度分布 | |

* 压力经上模冲传向粉末时，粉末力图向各个方向流动，于是引起了垂直于压模壁的压力——侧压力
* 但与液体的各向均匀受压情况有所不同，粉末在压模内所受压力的分布是不均匀的
* 因为粉末颗粒之间彼此摩擦，相互楔住，使得压力沿横向（垂直于压模壁）的传递比垂直方向要小得多
* 并且粉末与模壁在压制过程中也产生摩擦力，此力随压制压力而增减
* 因此压坯在高度上出现显著的压力降，接近上模冲端面的压力要大得多
* 中心部位与边缘部位亦存在压力差
* 结果，压坯各部分的致密化程度也就有所不同

（2）金属粉末压制时的位移与变形

* 压制过程中，粉末间的孔隙度大大降低，彼此的接触大大增加，即粉末在压制过程中出现了位移和变化
* 所以粉末在压模内受压后，变得较为密实，并且有一定形状和强度

①粉末的位移

* 拱桥效应：粉末在松装堆积时，由于表面不规则，彼此有摩擦，颗粒相互搭架而形成拱桥、孔洞现象
* 粉末因拱桥效应具有很高的孔隙度，当施压时则遭到破坏，粉末颗粒便彼此充填孔隙，重新排列位置，增加接触

②粉末的变形

* 弹性变形：外力消除后，粉末形状又恢复原形；
* 塑性变形：压力超过粉末的弹性极限，变形不能恢复原形；
* 脆性断裂：压力超过强度极限时，粉末发生粉碎性破坏（难熔金属如W、Mo及其化合物WC、MoC等脆性粉末）

（3）金属粉末的压坯强度

* 在粉末体成型过程中，随着成形压力的增加，孔隙减少，压坯逐渐致密化
* 形成的压坯内的粉粒间的联结力大致可分为两种：
* 粉粒间的机械啮合力——粉末形状越复杂，表面越粗糙，这种啮合作用越明显，压坯的强度越高
* 粉末颗粒原子之间的引力
* 金属粉末的压坯强度主要靠机械啮合力，因此要想得到较高的压坯强度，需要使粉末颗粒的形状复杂，表面粗糙
* 压坯强度：指压坯反抗外力作用保持其几何形状和尺寸不变的能力（可测压坯抗弯强度和边角稳定性）

①压坯抗弯强度试验法

|  |  |
| --- | --- |
|  | P——破断负荷，公斤  L——试样支点间距离，25.4mm  s——试样长度，31.75mm  b——试样宽度，12.7mm  h——试样高度，6.35mm |
| 压坯抗弯强度 | |

②压坯边角稳定性的转鼓试验法

将Φ12.7×6.35mm试样装入14目制金属网鼓筒中，以87r/min的转速转动1000转，测定压坯的重量损失率

压坯强度表征为重量损失率 （A—试样的原始重量，g；B—试样的最终重量，g）

（4）金属粉末压制时压坯密度的变化规律

粉末受压时产生位移和变形，在压制过程中随着压力增加，压坯相对密度出现有规律的变化——可划分为三个阶段

|  |  |
| --- | --- |
| 压坯密度成型压力 | 第Ⅰ阶段：位移充填孔隙阶段。  第Ⅱ阶段：密度已达到一定值，孔隙度不能减少  第Ⅲ阶段：粉末颗粒开始变形 |

**3.3.3 压制过程中力的分析**

（1）压制压力作用在粉末体上之后分为两部分，总压力

* P1—— 净压力：用来使粉末产生位移、变形和克服粉末的内摩擦
* P2——压力损失：用来克服粉末颗粒与模壁之间外摩擦的力

（2）侧压力和模壁摩擦力

* 侧压力：粉末体在受压时压力向各个方向传递，模壁因此返还给压坯的一个大小相等方向相反的反作用力
* 由于压力不是均匀地全部传递，传到模壁的压力将始终小于压制压力P
* 把粉末压制过程简化成在弹性范围内有横向变形，不考虑粉末的塑性变形和粉末的特性及模壁变形的影响，则

P—垂直压制压力；Pc—侧压力；ξ—侧压系数；ν—泊松比

* 脱模压力与压制压力的比例，取决于摩擦系数和泊松比
* 若除去压制压力之后，若压坯不发生任何变化，则脱模压力应等于粉末与模壁的摩擦力损失
* 一般情况是压力消除后发生弹性膨胀，压坯沿高度伸长，侧压力减小，脱模压力减小
* 另外，要考虑模具收缩的影响

（3）弹性后效

* 弹性后效：压制过程中，除去压制压力并把压坯压出压模之后，由于内应力的作用，压坯发生弹性膨胀的现象
* 弹性后效与粉末性质、压制压力大小及速度、压模材质有关

**3.3.4 压坯密度的分布**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

（1）压坯中密度分布的不均匀性：压力传递不均匀导致压制过程中，压坯在高度方向和横断面上的密度分布亦不均匀

（2）影响压坯密度分布的因素

* 压力损失是在普通钢模压制过程中造成压坯密度分布不均匀的主要原因
* 实践和理论证明，增加压坯的高度会使压坯各部分的密度差增加；而加大直径则会使密度的分布更加均匀
* 即高径比越大，密度差别越大，为了减少密度差别，降低压坯的高径比是适宜的，从而使压坯密度分布更加均匀
* 实践和理论表明，采用模壁光洁度高的压模并在模具壁上涂润滑油，能够减少外摩擦系数，改善压坯的密度分布
* 压坯中密度分布的不均匀性可用双向压制法来改善：与模冲接触的两端密度较高，中间部分的密度较低

**3.3.5 影响压制过程的因素**

（1）粉末性能对压制过程的影响

①粉末物理性能的影响

Ⅰ. 粉末本身的硬度和可塑性

* 软金属粉末在压缩时变形大，粉粒间的接触面积增加，压坯密度易于提高
* 可塑性差的硬金属粉末在压制时必须利用成形剂，否则易产生裂纹等压制缺陷

Ⅱ. 金属粉末的摩擦性能

* 由于硬金属粉末的摩擦系数大，压制硬金属粉末易于使压模的寿命缩短
* Ag-CuO、Fe、WC依次难于压制，须加润滑剂和成形剂

②粉末纯度的影响

* 粉末纯度越高越易压制
* 因为粉末中的杂质多以氧化物形态存在，而金属氧化物多是硬而脆，且存在于金属粉末表面
* 压制时使得粉末的压制阻力增加，压制性能变坏，并且使压坯的弹性后效增加
* 若不使用润滑剂或成形性来改善其压制性，结果必然降低压坯密度和强度

③粉末粒度及粒度组成的影响

* 一般来说，粉末越细，流动力越差，压缩性较差，成形性较好，粗粉末，流动性和压缩性较好，成形性较差
* 因此在压制时使用混目金属粉末，压坯密度和强度增加，易于得到高密度的合格压坯

④粉末形状的影响

* 粉末形状对压制过程及压坯质量都有一定的影响，具体反映在装填性能、压制性等方面；对装填模腔的影响最大
* 表面平滑规则的接近球形的粉末流动性好，易于充填模腔，使压坯的密度分布均匀
* 形状复杂的粉末充填困难，容易产生拱桥现象，使得压坯由于装粉不均匀而出现密度不均匀
* 粉末形状对压制性能也有影响，不规则形状粉末在压制过程中接触面比规则形状粉末大，压坯强度高，成形性好

⑤粉末松装密度的影响

* 松装密度小：模具和模冲尺寸大，密度容易不均匀，但压坯强度高
* 松装密度大：模具尺寸小，利于制造高密度压坯

（2）润滑剂和成形剂对压制过程的影响

* 金属粉末在压制时由于模壁和粉粒间，粉末和粉末之间产生摩擦出现压力损失，造成压力和密度分布不均匀
* 为了得到所需的压坯密度，必然要使用更大的压力
* 压制过程中减少摩擦的方法有两种：采用高光洁度的模具或用硬质合金模代替钢模；使用成形剂或润滑剂
* 成形剂可改善粉末成形性能，可以增加压坯的强度
* 润滑剂可降低粉末颗粒与模壁和模冲间摩擦、改善密度分布，减少压模磨损和有利于脱模

①润滑剂和成形剂的种类及选择

* 不同的金属粉末必须选用不同的物质作为润滑剂和成形剂
* 铁基粉末冶金制品常用润滑剂：硬脂酸、硬脂酸锌、硫磺、二硫化铜、石墨粉和机油等
* 硬质合金常用的成形剂有合成橡胶、石腊、聚乙烯等
* 粉末成形用润滑剂或成形剂一般应满足下列要求：
* 具有适当的粘性和良好的润滑性且易于和粉末料混合均匀。
* 与粉末料不发生化学反应，预烧（干燥）或烧结时易于排除且不残留有害杂质。
* 对混合后的粉末松装密度和流动性影响不大。
* 烧结后对产品性能和外观没有坏影响。

②润滑剂的加量

* 润滑剂和成形剂的加入量与粉末种类和粒度大小、压制压力和摩擦表面值有关，一般细粉末比粗粉末的加入量多
* 压制粉末时，硬脂酸锌的最佳含量0.5～1.5%（重量），压制硬质合金时，橡胶或石腊的添加量1～2%（重量）

（3）压制方式对压制过程的影响

①加压方式的影响：压力损失导致了压坯密度的不均匀性，且生产中往往采用双向压制及多向压制或改变压模结构

②加压速度的影响：高速冲击成形所得的压块密度分布比用缓慢加压所得的更加均匀

1. 压制压力由静压变成动压时，粉末体除受到静压力的作用还受动量mv的作用：冲击力F=mv/t，t很小，故F很大
2. 在冲击成形时粉末体受冲击力后的变形速度很快，一般大于粉末体因受力作用所发生的加工硬化速度，此时粉末体变形便不受加工硬化作用的影响，因而，冲击成形时变形所需的应力比静压时变形所需的应力要小得多
3. 粉末体是以大量的点线接触为主的复杂接触，当受到外力冲击作用时，接触区域因迅速变形而放出大量的热，这种瞬时放出的热能必然使接触部分的温度升高，导致粉末的塑性增加而易于变形
4. 但形状复杂的制品若加压速度太快，由于最上层粉末瞬时分散，也可造成密度分布的不均匀

3）加压保持时间的影响：保压对于粉末压制效果影响很大，尤其对于形状较复杂或体积较大的制品来说尤为重要

保压使压力传递得均匀，有利于压坯中各部分的密度分布均匀，使粉末孔隙中的气体有足够的时间通过模具的缝隙逸出；给粉粒之间的啮合以时间，有利于应变驰豫的进行

4）振动压制的影响：压制时从外界对压坯施以一定的振动对致密有良好的作用

* 实验指出，YT30硬质合金混合料，若需得到5.8g/cm3的压坯密度，静压需1200kg/cm2，而振动压制仅需6kg/cm2
* 振动压制对于Cu、Al、Co、Fe等一类软粉末的效果远不如TiC、WC等硬而脆的粉末，粗粉末振动压制效果较好
* 振动压制的缺点：对操作者有害（噪音）、对设备和材质要求较高

**3.4 烧结(sintering)**

**3.4.1 烧结的概念及分类**

（1）烧结的概念

粉末或粉末压坯，在适当的温度和气氛中受热,发生一系列物理和化学的变化，粉末粒的聚集体变成为晶粒的聚结体，从而获得具有所需物理、机械性能的制品或材料。从工艺上看，烧结常被看作是一种热处理，即把粉末或粉末毛坯加热到低于其中基本成分熔点的温度下保温，然后以各种方式和速度冷却到室温。

（2）烧结的结果：颗粒之间发生粘结，烧结体的强度增加，而且多数情况下，密度也提高

（3）烧结体系：（由粉末烧结可以制得各种纯金属、合金、化合物及复合材料）按粉末原料的组成分类

* 由纯金属、化合物或固溶体组成的单相系组成的单相系
* 由金属—金属、金属—非金属，金属—化合物组成的多相系

（4）烧结的分类：通常按烧结过程有无明显的液相出现和烧结系统的组成进行分类

①单元系固相烧结：纯金属（如难熔金属和纯铁软磁材料）或化合物（Al2O3、B4C、BeO、MoSi2等），在其熔点以下的温度进行的固相烧结过程。

②多元系固相烧结：由两种或两种以上的组元构成的烧结体系，在其低熔成分的熔点温度以下所进行的固相烧结过程

根据系统的组元之间在烧结温度下有无固相溶解存在，又分为

* 无限固溶系：在合金状态图中有无限固溶区的系统，如Cu-Ni、Fe-Ni、Cu-Au、Ag-Au、W-Mo等。
* 有限固溶系：在合金状态图中有有限固溶区的系统，如Fe-C、Fe-Cu、W-Ni等。
* 完全不溶系：组元之间既不互相溶解又不形成化合物或其它中间相的系统，如Ag-W、Cu-C等所谓“假合金”。

③多元系液相烧结：以超过系统中低熔成分熔点的温度进行的烧结过程

由于低熔成分同难熔固相之间溶解或形成合金的性质不同，液相可能消失或始终存在于全过程

* 烧结过程始终存在液相的系统 如WC—Co、TiC—Ni、W—Cu—Ni，W—Cu、Fe—Cu（Cu>10%）等。
* 烧结后期液相消失的系统，如Cu—Sn、Cu—Pb、Fe—M—Al，Fe—Cu（0＜Cu＜10%）等。

**3.4.2 烧结的基本过程**

* 粉末特别是极细的粉末有自动粘结或成团的倾向，高温下结块十分明显，室温下经过相当长的时间也会逐渐聚结
* 粉末受热，颗粒之间发生粘结；粉末烧结后，烧结体的强度增加，而联结面上原子间的引力增大

（0）粉末的等温烧结过程，按时间大致可以划分为三个界限不十分明显的阶段

（1）粘结阶段（烧结初期）：

* 颗粒间的原始接触点或面转变成晶体结合，即通过成核、结晶长大等原子过程形成烧结颈
* 颗粒间的晶粒不发生变化，颗粒外形也基本未变，整个烧结体不发生收缩
* 密度增加极微，但是烧结体的强度和导电性由于颗粒结合面增大而有明显增加

（2）烧结颈长大阶段：

* 原子向颗粒结合面的大量迁移使烧结颈长大，颗粒间距离缩小，形成连续的孔隙网络
* 晶粒长大，晶界越过孔隙移动，晶界扫过的地方孔隙大量消失
* 烧结体收缩，密度和强度增加是这个阶段的主要特征

（3）闭孔隙球化和缩小阶段

* 烧结体密度达到90%以后，多数孔隙被完全分隔，闭孔数量大为增加，孔隙形状趋近球形并不断缩小
* 整个烧结体仍可缓慢收缩，但主要是靠小孔的消失和孔隙数量的减少来实现
* 这一阶段可以延续很长时间，但是仍残留少量的隔离小孔隙不能消除

Tips：温度低，可能仅出现第一阶段；温度愈高，愈早出现第二甚至第三阶段；生产中应至少保证第二阶段接近完成

|  |
| --- |
|  |
| （a）烧结前颗粒的原始接触；（b）烧结早期的烧结颈长大；（c）（d）——烧结后期孔隙球化 |

**3.4.3 烧结原动力**

* 粉末体相比固体材料具有很大的比表面，从而有很高的表面能
* 表面能与相变和化学反应的能量相比很小，因而不能成为烧结推动力而使烧结自发进行，必须加热

（0）依据热力学条件定性推导出的各种烧结原动力

（1）表面张力：烧结的理想的两球模型（库钦斯基）→作用于烧结颈的应力为：

（-：表示作用于曲颈面上的应力是张力，方向朝外，效果是使烧结颈扩大；γ：表面张力；ρ：烧结颈曲率半径；）

（2）空位扩散：分析作用在“颈”部弯曲表面上的力···

Tips：扩散途径：空位扩散（优先由颈表面接触点，其次由颈表面内部扩散）；原子扩散：与空位扩散方向相反

（3）蒸发—凝聚传质

* 传质机理：物质从颗粒表面（凸面）蒸发，通过汽相传质在颈部（凹面）凝聚，从而使颈部填充
* 存在范围：高温下蒸汽压较大的系统，例如盐釉

**3.4.4 烧结中的物质迁移**

* 在烧结过程中，存在着两种类型的物质迁移机构：物质的表面迁移和体积迁移

（1）蒸发—凝聚机构

* 两粉末颗粒相接触时，颗粒外表面的曲率半径与接触颈部的曲率半径是不相同的，两处的蒸气压因此存在着差异
* 这样物质就可能由接触点以外的表面蒸发，在接触点处凝聚而发生迁移，使烧结颈部长大
* *x*——烧结颈半径，*r*——颗粒半径，*t*——烧结时间
* 此类传质，延长时间可使烧结颈长大；
* 颗粒粒度越小，烧结速率愈大；
* 烧结时颈部扩大，气孔形状改变，但双球之间中心距不变，因此坯体不发生收缩，密度不变；
* 具有较高蒸气压的物质才可能发生蒸发—凝聚，因此不是大多数金属的主要烧结机构

（2）体积扩散机构

* 在热平衡条件下，晶体的晶格点阵中，原子并没有占据所有的晶格点阵，因而在晶格点阵中出现空位
* 扩散理论认为晶格点阵中原子的迁移是原子连续迁移与空位交换位置的结果
* 在金属粉末的烧结过程中，空位及其扩散起着很重要的作用
* 在烧结的体积扩散机构中，以烧结颈为扩散空位“源”；
* 而由于存在不同的吸收空位的“阱”，空位体积的扩散可以采取不同的途径和方法···

（3）表面扩散机构

* 由于金属粉末颗粒的表面是凹凸不平的，烧结过程中颗粒的相互联结，首先是在颗粒表面上进行的
* 粉末比表面较大的微细粉末或超细粉末，在较低温度烧结时，表面扩散的现象就十分明显
* 不少的实验数据表明，在低温烧结时占优势的不是体积扩散而是表面扩散，因为表面扩散温度<<体积扩散温度

（4）晶界扩散机构

* 空位扩散时，晶界可以作为空位“阱”
* 如果两个粉末颗粒的接触表面形成了晶界，那么靠近接触颈部的过剩空位就可以通过晶界进行扩散，原子则沿空位扩散的相反方向流入接触颈部表面，这样就使接触颈部通过晶界扩散而长大，两个颗粒中心相互靠近

**3.4.5 液相烧结**

（1）液相烧结的条件（同液相性质有关的3个基本条件）

①湿润性：液相对固相颗粒的表面湿润性好（重要条件之一，对致密化、合金组织与性能的影响极大）

|  |  |
| --- | --- |
|  | * 完全湿润时： * 不湿润时： * 部分湿润时： * 液相烧结需满足的湿润条件就是湿润角 |

②溶解度：固相在液相中有一定溶解度

* 因为固相有限溶解于液相可改善湿润性；
* 固相溶于液相后，液相数量相对增加；
* 固相溶于液相，借助液相进行物质迁移；
* 溶在液相中的组分，冷却时如能析出，可填补固相颗粒表面的缺陷和颗粒间隙，从而改善固相颗粒分布的均匀性

③液相数量：一般认为，液相量以占烧结体体积的20~50%为宜

* 超过→不能保证产品的形状和尺寸
* 少了→烧结体内将残留一部分未被液相填充的孔隙；而且固相颗粒将因直接接触而过分长大

（2）液相烧结过程

①液相的生成与颗粒的重新排列阶段

* 随着液相的生成，固相颗粒在液相内近似悬浮状态，受液相表面张力的推动而发生移动，从而发生快速致密化
* 颗粒间孔隙中液相所形成的毛细管力以及液相本身的黏性流动，使颗粒调整位置、重新分布以达到最紧密的排列

（毛细管力造成的烧结推动力很大，0.1～1μm的颗粒中间充满硅酸盐液相，其ΔP = 1.23～12.3MPa）

* 此阶段虽然孔隙的消除和颗粒的重新排列进行得很迅速，致密化的速度很快，但由于颗粒靠拢到一定程度会形成拱桥，对于液相的流动阻力增大，因此，在该阶段不可能达到完全致密

②固相的溶解—再沉淀阶段

* 小颗粒及颗粒表面的棱角和凸起部分（具有较大的曲率）优先溶解
* 小的颗粒趋向减少，颗粒的表面趋向平整光滑
* 溶液中一部分过饱和的原子在大颗粒表面沉析出来，使大颗粒趋于长大
* 这一过程使颗粒更加靠拢，整个烧结体发生收缩，此阶段致密化速度已显著减慢

③固相骨架的形成阶段

* 经过前面的两个阶段，颗粒之间互相靠拢、接触、粘结并形成连续骨架，剩余液相充填于骨架的间隙
* 固相骨架的刚性阻碍了颗粒更进一步地重新排列，该阶段的致密化速率明显减慢
* 固相骨架形成后的烧结过程与固相烧结相似
* 该阶段扩散作用导致固体颗粒之间的接触长大，大多数液相烧结材料的性能将随着该阶段烧结时间的延长而降低

（3）液相烧结与固态烧结比较

* 共同点：烧结的推动力都是表面能；烧结过程也是由颗粒重排、气孔填充和晶粒生长等阶段组成
* 不同点：流动传质速率比扩散快，液相烧结的致密化速率高，使坯体在比固态烧结温度低得多时获得致密烧结体

**3.4.6 热压烧结**

（1）热压烧结：在烧结的同时加上一定的外压力（热压烧结对提高材料的致密度和降低烧结温度有显著的效果）

（2）热压的致密化过程：复杂且难统一，但有很多学者认为致密化过程大致有三个连续过渡的阶段

①微流动阶段：在热压初期，颗粒相对滑移、破碎和塑性变形，类似常压烧结的颗粒重排，此阶段致密化速率最大

②塑性流动阶段：类似常压烧结后期闭孔收缩阶段，以塑性流动性质为主，致密化速率减慢

③扩散阶段：此时已趋近终点密度，以扩散控制的蠕变为主要机构

**3.4.7 烧结气氛**

（1）气氛的作用

* 防止或减少周围环境对烧结产品的有害反应
* 排除有害杂质，加快烧结速度，改善产品性能
* 维持或改变烧结材料中的有用成分

（2）气氛种类：①还原性气氛（氢气）；②惰性气体（氮气）；③真空

（3）粉末冶金法生产金刚石工具的方法

* 热压烧结法：压制和烧结同时进行
* 无压浸渍法：在粉末烧结时不施加压力（有利于制造形状复杂的工件）
* 冷压浸渍法：压制成型与烧结分开，首先冷压成型，然后进行烧结

**3.5 热压法制造金刚石钻头**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 热压法制造金刚石钻头的工艺流程图 |  |

**3.5.1 模具和钢体设计**

（1）模具材料：模具材料采用高强度致密石墨（石墨为良好的电阻发热材料）

高性能致密石墨性能：抗压强度>45MPa；比重>1.7；线膨胀系数=5.4×10-6；电阻系数<16Ω·mm/m；灰分=0.01%

①石墨模具的优良特性

* 机械强度高，耐高温：抗压强度一般在30MPa以上，石墨强度在2500℃前随温度提高而加强
* 导电性好：作为一种很好的发热材料加热钻头胎体
* 良好的导热性：导热系数比一般非金属大100倍，比碳素钢大2倍，在工作时整个模具传热均匀，且发热快
* 石墨的线膨胀系数极小：一般为5.4×10-6 （900~1000℃时），模具可经受温度的急剧变化而不裂开
* 石墨与金属不浸渍：热压时金属不会粘住模具，不污染胎体粉末，模具可重复使用
* 石墨的布氏硬度很低：很易机械加工，可制成各种形状的模具
* 化学性能：石墨在常温下较稳定，高温不易氧化，在空气中被氧化的温度为450一500℃

②常用石墨

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 名称 | 抗压强度MPa | 比电阻Ω·mm2/m | 孔隙率% | 密度g/cm3 | 线胀率(900-1000℃) |
| 电极石墨 | 20-30 | 8-14 | 27-32 | 1.5-1.7 | — |
| 人造致密石墨 | 35 | 10-28 | 20-25 | 1.7 | — |
| 高纯石墨 | 45 | <16 | 16-20 | 1.8 | 5.4×10-6 |

（2）模具结构：唇面形状形状不复杂的钻头模具一般由底模和心模组成；唇面复杂的钻头由底模、心模和模套组成

（3）模具设计

①结构设计：主要解决温度分布的均匀性、易于装保径聚晶和胎体粉末，便于脱模，便于加工等

②部件设计：主要确定部件的形状、尺寸、精度等，模具由底模、模套、芯轴三部分组成

（4）钻头钢体制作：钻头钢体一端热压上金刚石层，另一端车上丝扣与钻杆连接

①材质：45#无缝厚壁管或45#圆钢

②结构：为增加与胎体的连接牢度，与胎体焊接的钢体的一端需加工成一定形状，增大与胎体层的接触面积

Tips：钢体外径Ds与底模内径Di之间要有一定间隙，以防止烧结过程中将底模胀裂

**3.5.2 钻头成形料的计算（锯片与钻头的成形料的计算类似）**

（0.1）部分金属碳化物性质

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 金属碳化物 | 熔点℃ | 密度g/cm3 | 显微硬度MPa | 弹性模量MPa | 导热率W/m·K | 热胀系数×10-6 |
| HfC | 3890 | 12.60 | 29100 | 35900 | 6.28 | 5.6 |
| TaC | 3880 | 14.30 | 16000 | 291000 | 22.19 | 8.3 |
| ZrC | 3530 | 6.90 | 28360 | 355000 | 17.58 | 6.73 |
| NbC | 3500 | 7056 | 20550 | 345000 | 14.23 | 7.8 |
| TiC | 3250 | 4.93 | 31000 | 350000 | 16.74 | 7.4 |
| WC | 2630 | 15.50 | 17130 | 720000 | 29.30 | 5.2 |
| VC | 2830 | 5.81 | 20940 | 276000 | / | / |
| W2C | 2750 | 17.20 | 30000 | 428000 | / | / |
| Cr2C2 | 1875 | 6.68 | 13000 | 194000 | 20.93 | 6.15 |
| SiC | 2700 | 3.21 | 2200~2900 | 11600/14500 | 15.49 | 4.3~4.8 |
| B4C | 235 | 2.52 | 60000 | 292500 | / | 4.5 |

（0.2）部分金属材料性质（密度g/cm3、熔点℃）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 金属 | Sn | Cd | Pb | Zn | Sb | Al | Ag | Cu | Mn | Ni | Co | Fe | Cr | W | Cu |
| 密度 | 7.298 | 8.65 | 11.3 | 7.14 | 6.68 | 2.7 | 10.5 | 8.93 | 7.43 | 8.9 | 8.7 | 7.85 | 7.1 | 19.3 | 8.82 |
| 熔点 | 231.9 | 321.03 | 327.35 | 419.4 | 630.5 | 658.0 | 960.8 | 1083 | 1244 | 1452 | 1492 | 1537 | 1903 | 3370 | 800 |

Tips：663Cu（Sn6%+Zn6%+Pb3%+余铜）——密度8.82g/cm3、熔点800℃

Tips：CuSn （Sn10% +余铜）——密度8.73g/cm3

（0.3）某些金属对石墨和金刚石的湿润角和粘附功

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 粘结剂分类 | 粘结剂成分 | 石墨 | | | 金刚石 | | | 气氛 |
| 温度℃ | 湿润角 | 粘附力10-7g/cm2 | 温度℃ | 湿润角 | 粘附力10-7g/cm2 |
| Ⅰ | Cu | 1100 | 140 | 316 | 1150 | 145 | 235 | 真空 |
| Ag | 98 | 136 | 255 | 1000 | 120 | 455 |
| Au | / | / | / | 1150 | 150 | 92 |
| Ge | 1100 | 149 | 98 | 1150 | 116 | 360 |
| Sn | 900 | 156 | 45 | 1150 | 125 | 192 |
| Ln | 800 | 143 | 106 | 800 | 138 | 102 |
| Sb | 900 | 140 | 84 | 900 | 120 | 180 | 氢气 |
| Bi | 800 | 136 | 94 | / | / | / |
| Pb | 800 | 138 | 96 | 1000 | 110 | 136 |
| Ⅱ | Si | 1450 | 0 | 1720 | / | / | / | 真空 |
| Fe | 1550 | 50 | 3040 | / | / | / |
| Ni | 1550 | 57 | 2704 | / | / | / |
| Co | 1550 | 68 | 2550 | / | / | / |
| Pb | 1560 | 48 | 2138 | / | / | / |
| Ⅲ | Cu+10Ti | 1150 | 0 | 2680 | 1150 | 0 | 2680 | 真空 |
| Cu+10Cr | 1200 | 5 | 2640 | / | / | / |
| Cu+50Mn | 1100 | 10 | 2615 | / | / | / |
| Ag+5Ti | 1000 | 0 | 1802 | / | / | / |
| Ag+2Ti | / | / | / | 1000 | 5 | 1817 |
| Sn+Ti | 1150 | 24 | 989 | 1150 | 10 | 893 |
| (Cu+10Sn)+3Ti | 1150 | 10 | 1042 | 1150 | 0 | 1050 |
| (Cu+20Sn)+2Ti | 1150 | 14 | 1084 | 1150 | 0 | 1100 |

（0.4）某些液态金属对金属碳化物的湿润性，由表可见，Co、Ni、Fe对WC表面的湿润性为最好

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 固体表面 | 液态金属 | 温度 | 润湿角 | 气氛 |
| WC | Co | 1500 | 0 | 氢气 |
| Ni | 1500 | ~0 | 真空 |
| Fe | 1490 | ~0 | 真空 |
| TiC  WC/TiC(30:70) | Ag | 980 | 108 | 真空 |
| Ni | 1450 | 17 | 氢气 |
| Co | 1500 | 36 | 氢气 |
| Fe | 1550 | 49 | 氢气 |
| Cu | 1100~1300 | 108~70 | 真空 |
| WC/TiC(22:78) | Ni | 1500 | 21 | 真空 |
|  | Co | 1420 | 21 | 真空 |

（1）确定结合剂料的理论密度：假定结合剂整体中各组分接触没有空隙的理论密度

（2）金刚石层料的计算：金刚石层体积计算→金刚石用量计算→胎体料用量计算→水口料用量计算

（3）非金刚石层料计算：非金刚石层料体积计算→非金刚石层料重计算

**3.5.3 胎体配方**

* 胎体配方：指选择与确定胎体材料的成分和其含量（金刚石工具的胎体性能主要取决于胎体配方）
* 胎体成分类：骨架成分（在胎体中起硬质点的作用）；粘结成分（使骨架成分和金刚石粘结起来）

（1）骨架成分：一般为难熔金属的碳化物，它们具有熔点高、硬度大、且具有金属的特性，主要要求为

* 具有足够的硬度，以防止金刚石在工作中位移；
* 具有良好的冲击韧性，以能承受复杂多变的载荷；
* 导热性好，线胀系数尽量和金刚石接近；
* 成形性好，以满足胎体能形成各种形状。

Tips：WC作为骨架成分较为理想（导热率最高，热胀系数接近金刚石，弹性模量最高，硬度较高，成形性好）

（2）粘结成分：要求为

* 能很好地润湿碳化物和金刚石；并且散布在碳化物颗粒表面
* 两相界面能形成一种牢固的结合
* 具有优良的机械性能，以保证粘结金属连续和薄膜能承受碳化物颗粒传给的应力
* 熔点低（低熔材料）
* 湿润角为0，粘附功大

（3）金属的湿润角和粘附功

①湿润角越小，湿润性能越好：当角θ=0°时，固相完全被液相润湿

②粘附功愈大，界面结合愈牢固

* 第Ⅰ类中的金属元素不能单独作为粘结成分
* 第Ⅱ类和Ⅲ类根据对胎体性能的要求可以选用它们作为粘结成分，或者Ⅱ和Ⅲ混合作为粘结成分

（4）胎体配方的设计与举例

①岩石的性质与胎体性能的关系

Ⅰ. 岩石的分类

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 岩石级别 | 压入硬度 | 岩石类别 |
| 1 | ≤100 | 软 |
| 2 | 100~250 |
| 3 | 250~500 | 中软 |
| 4 | 500~1000 |
| 5 | 1000~1500 | 中硬 |
| 6 | 1500~2000 |
| 7 | 2000~3000 | 硬 |
| 8 | 3000~4000 |
| 9 | 4000~5000 | 坚硬 |
| 10 | 5000~6000 |
| 11 | 6000~7000 | 极硬 |
| 12 | >7000 |

Ⅱ. 钻头胎体的硬度与所钻岩石的对应关系

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 代号 | 级别 | 胎体硬度HRC | 推荐配方代号 | 适用岩层 |
| 0 | 特软 | 10~20 | 781 | 坚硬致密、弱研磨性 |
| 1 | 软 | 20~30 | 35、36 | 坚硬、中等研磨性 |
| 2 | 中软 | 30~35 | 36、63、804 | 硬、中等研磨性 |
| 3 | 中硬 | 35~40 | 63、3、804 | 中硬、中等研磨性~强研磨性 |
| 4 | 硬 | 40~45 | 632、25 | 硬、强研磨性 |
| 5 | 特硬 | >45 | 8401、204 | 硬~坚硬、强研磨性；硬、脆、碎 |

②材料硬度测试分类

* 岩石压入硬度：仅用于测试岩石的压入硬度
* 洛氏硬度(HRA/HRB/HRC)：用于各种金属、非金属材料，一般试样比较厚，如烧结制品和热处理金属件硬度测试
* 维氏硬度（显微硬度）：用于各种金属、非金属材料，一般用于较薄试样硬度的精确测试，如电镀镀层硬度测试

Tips：洛氏硬度(Rockwell Hardness)测量方法

1. 在规定的外加载荷下，将钢球或金刚石压头垂直压入待试材料的表面，产生凹痕，载荷解除后读出凹痕深度
2. 利用洛氏硬度计算公式计算出洛氏硬度（洛氏硬度值显示在硬度计的表盘上，可以直接读取）

* K为常数，金刚石压头时K=0.2mm，淬火钢球压头时K=0.26mm；
* H为主载菏解除后试件的压痕深度
* C也为常数，一般情况下C=0.002mm
* 一般用代号HRA、HRB、HRC来表示材料的硬度，其中
* HRA表示试验载荷588.4N（60kgf）使用顶角为120度的金刚石圆锥压头试压；
* HRB表示试验载荷980.7N（100kgf）使用直径1.59mm的淬火钢球试压；
* HRC表示试验载荷1471.1N（150kgf）使用顶角为120度的金刚石圆锥头试压。
* 对于硬度较高的制刀材料，制刀界通用HRC来表示刀锋硬度，比如HRC60
* 压痕越浅，HR值越大，材料硬度越高（同时抗磨损能力也越高，脆性也越大）
* 硬度最高不超过HRC60，通常一把好刀的刀刃硬度应在洛氏硬度HRC50~ HRC60

Ⅲ. 锯片胎体硬度与所锯切岩石（钻头胎体硬度与锯片胎体硬度）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 适用范围 | 硬度HRB | 密度g/cm3 | 附注 |
| 1 | 切割中软大理石 | 85~87 | 8.64 | 小直径锯片 |
| 2 | 切割中硬大理石 | 91~94 | 8.54 | 大直径锯片 |
| 3 | 切割硬花岗岩 | 104~108 | 8.9 | 高耐磨锯片 |
| 4 | 切割硬花岗岩 | 98~102 | 8.6 | 高效率锯片 |
| 5 | 切割中硬花岗岩 | 88~92 | 8.4 |  |

③胎体配方的举例与设计

Ⅰ. 胎体配方的举例—某厂地质取芯钻头配方

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | WC | YG6 | 663Cu | Ni | Mn | Co | HRC | 备注 |
| 1 | 40 | 15 | 35 | 5 | 5 |  | 38±3 | 63# |
| 2 | 40 | 15 | 30 | 5 | 5 | 5 | 47±3 |  |
| 3 | 40 | 15 | 30 | 7 | 5 | 3 | 43±3 |  |
| 4 | 64 |  | 20 | 8 | 3 | 5 | 50±3 |  |
| 5 | 45 |  | 40 | 7 | 5 | 3 | 50±3 |  |
| 6 | 20 | 50 | 20 | 2 | 8 |  | 硬胎体45±3 | 25# |

Tips：WC、YG6为骨架材料，余下的为粘结成分

Ⅱ. 胎体配方的设计及试验：岩石性质→选用胎体硬度及机械性能→调整骨架材料和粘结成分的比例以改变机械性能

Ⅲ. 钻头胎体技术要求

* 胎体耐磨性指标
* 胎体抗冲蚀性指标
* 胎体线胀系数
* 抗弯强度：热压法及冷压法制造的胎体抗弯强度不能低于700MPa；无压浸渍法抗弯强度不低于500MPa
* 金相要求：试样在金相显微镜下观察，骨架金属、粘结金属应分布均匀，无特殊要求的胎体的孔隙度≤0.6%
* 抗冲击韧性：胎体抗冲击韧性≥3J/cm2（用于—回转钻探≥3J/cm2；冲击回转钻探≥4.5J/cm2；破碎地层≥5.5J/cm2）

**3.5.4 孕镶金刚石钻头结构参数的设计与选择**

|  |  |
| --- | --- |
| tgs新钻头7 | 钻头结构图.bmp |

（1）钻头组成与工作层的尺寸：钻头的组成；钻头的唇面壁厚；工作层与非工作层

（2）钻头端面形状/唇面形状（唇面形状设计需要解决的问题——破碎岩石、唇面冷却、保护岩心、排除岩屑）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | ICDP-BIT-4 | 桂林厂GL-02多阶梯钻头 | j5 |
| Flat-crown diamond bit  平底形 | Circle set diamond bit  同心圆尖齿 | Multiple step diamond bit  阶梯尖齿 | Multi-step bottom-jet diamond bit  阶梯底喷式唇面 |
|  |  | j2 | j9 |
| 半齿形唇面 | 齿轮形唇面 | Non-coring diamond  不取芯钻头唇面 | |

Tips：钻头唇面结构设计：模型分析（采用ANSYS fluent等软件对不同结构钻头进行碎岩效率、水力学结构分析）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| pingdi | gaodichi | tongxinyuan |

（3）钻头的工作层

* 国内外学者对金刚石与胎体的磨损规律进行了研究——金刚石出刃越小，金刚石磨损小，周边的胎体磨损大
* 在正常工作条件下，金刚石的磨损方式主要为脆性破坏和磨粒磨损
* 金刚石的磨损类型与金刚石本身质量、岩石力学性质、钻进规程、钻头结构等多因素有关
* 金刚石的磨损程度可按照公式计算：
* 为了使工作层中的金刚石能“自锐”，金刚石的磨损程度应等于胎体的磨损程度：

（Wd—金刚石的磨损程度，mm3/N·m；Wm—胎体的磨损程度，mm3/N·m；f—金刚石与胎体的体积比例系数）

* 目前国内外对于胎体的耐磨性没有统一的测定方法，暂用HRC来表示胎体的性能

Tips：唇面金刚石出刃和磨损是钻头设计和研究的重点

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | IMG_0155.JPG |  | IMG_0089.JPG |
| 金刚石磨平（胎体太硬） | 金刚石脱落（胎体包镶差） | 金刚石破碎+内径提前磨损 | 金刚石分布不均匀 |

Tips：金刚石分布均匀性评价与措施

* 金刚石在胎体中的分布形态直接影响着金刚石工具的质量
* 理想的情况是，金刚石在胎体中均匀分布
* 然而，在普通金刚石工具中，实际情况往往是金刚石在胎体中呈随机分布，甚至产生偏聚
* 在金刚石偏聚区域，单颗金刚石受力小而容易被抛光，同时易于阻碍岩屑的排除，致使加工效率下降
* 在金刚石稀少的区域，金刚石也不能有效碎岩，因为金刚石承受工作负荷过大，易于碎裂与脱落
* 因此，金刚石分布不均常常导致降低加工效率、缩短工具寿命的问题
* 金刚石分布均匀性的措施：金刚石表面裹覆金属团粒化，混合方式等

Tips：体视显微镜观察出刃形貌，三维共聚焦显微镜定量分析出刃，可得到金刚石分布、出刃高度的统计数据

（4）金刚石品级与粒度

①金刚石选择：岩石越硬，金刚石选用品级高，粒度细

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Rock feature | Medium hard & abrasiveness | Hard-brittle-fractured rock | Very Hard and compact rock |
| Diamond mesh | 45/50-50/60 | 50/60-60/70 | 70/80 |
| Diamond quality | MBD6(JR4) | MBD8(JR5) | MBD12 |
| Diamond concentration | 75-100% | 100-120% | 50-75% |

②金刚石粒径的选择：粒径与地层硬度/研磨性成反比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 研磨性一般的地层 | ——————————→ | 研磨性较强的地层 |

（5）金刚石浓度和金刚石在唇面上的排布

①金刚石浓度和单位唇面上的金刚石数量(ns)、单位切削线上的金刚石数量(ms)成正比

②前苏联A.A.布加耶夫提出了理论计算公式：

（*K*：石体积浓度；*Z*：金刚石粒度，st/car；*da*：金刚石的平均线性尺寸，mm）

（6）钻头保径：W内环﹥W外环﹥W中环

|  |  |
| --- | --- |
| DSCF3427 | 5-335-33 |

（7）水路系统：水口（面积和个数）与水槽

* 水口总面积占钻头底唇整个环状面积的比例与地层的性质有关：
* 对于中硬-硬地层，1/5~1/4；
* 对于软地层，2/5~1/2
* 每个水口面积与钻头底唇面积之比：
* 对于中硬-硬地层，2.5~3.5%
* 对于软地层，5~6%
* 最终设计的水口参数需要使环状间隙的上返速度在0.45~1m/s，钻头水口处的流速在4~8m/s左右

**3.5.5 装模与烧结**

（1）装模

装模步骤：芯模粘于底模上→插上水口挡圈→混合结合剂和金刚石→视水口数分成若干等分→投入模腔→搅匀捣实→在金刚石层上部粘保径聚晶→提出水口挡圈→投水口料并捣实→套上模套→投非金刚石层料→刮平压实→套上钢体→用锤敲等

Tips：注意事项

①装模前首先要检查模具的质量情况，如有无损伤、氧化程度、配合是否良好等

②注意别让让金刚石掉入水口料中；

③聚晶位置离水口线位置3—4mm，离工作层1.5—2.5mm

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| P9220086 | P9220102 | P9230126 | P9230124 |
| P9220091 | P9220105 | P9220104 | P9230130 |
| P9230128 | P9230132 | P9240139 | P9240138 |

（2）烧结

①热压烧结设备

Ⅰ. 热压电阻炉

热压电阻炉作用原理：工频电流通过大电流变压器，变成低电压大电流，高电流通过石墨电极压头和石墨模具，瞬间产生高热，加热胎体料，使其很快达到烧结温度。

Ⅱ. 中频感应加热炉（Hz：500—1000Hz，由中频电源、中频变压器和感应圈三个主要部件组成）

中频感应加热的基本原理：将石墨模具放入紫铜管绕制的线圈中,给感应圈通以交变电流，则在线圈内产生一个相应的交变磁场，根据电磁感应定律，在石墨模具组件内则产生感应电动势，因此在组件内产生电流，该电流叫做感应电流或涡流，该涡流在组件内流动就产生热量而使之升温。

优点：非接触式加热；加热快且效率高；易控制温度；可局部加热；可自动化控制；减少占地、噪声、热辐射

②热压烧结影响因素：热压烧结中影响产品质量的主要因素是烧结温度、保温时间、压力及出炉温度等

Ⅰ. 温度

* 胎体配方决定烧结温度的高低和决定升温速度：骨架材料含量、粘结金属含量及熔点
* 钻头规格影响升温速度的选择：直径越大，许用升温速度越慢
* 设备能力决定升温速度，影响保温时间：升温速度一般以250～300℃／min为宜，保温时间3～5min

Ⅱ. 压力

* 金刚石钻头的加压分阶段进行，一般分预压和全压两个阶段：预压一般取全压的1／4～1／3
* 全压的确定要考虑胎体配方、烧结温度、保温时间等因素，一般取值为15—18 MPa，加全压必须是在保温阶段

Ⅲ. 降温：材料收缩系数不一致产生内应力，一般在700℃左右出炉，出炉后放置于保温材料中缓冷

③热压操作步骤：装模→置于热压板上待烧→施预压→升温→施全压→保温并不断补压→降温→卸压出炉

④烧结工艺：升温速度；烧结温度；烧结压力；保温保压时间；冷却速度和环境

**3.5.6 钻头的最后加工**

（0）钻头加工步骤：

测水口处硬度→车外圆达要求→粗车内圆留0.5mm余量→车长度达要求→精车内圆达要求→车连接端丝扣→以钢体外圆为基准磨胎体内、外圆→刨（磨）水口→刻字→交检→入库

**3.6 冷压浸渍法金刚石制品制造工艺**

冷压浸渍法制造钻头的工艺过程，是先将配好的骨架粉末碳化钨装入金刚石钻头钢制压模中(金刚石用临时粘剂粘于钢模壁上)，经加压制成一定形状和尺寸的胎体，并与钻头钢体连结成一体。然后装模，送入二带钼丝炉或真空炉中烧结，使粘结金属(如铜镍合金)渗透到骨架金属孔隙中去，形成具有一定耐磨性的假合金胎体。

**3.6.1 成形**

（1）装模：冷压浸渍钻头的压模结构与热压孕镶钻头十分接近，但也有所区别，主要考虑到浸渍的特性需要

|  |
| --- |
|  |
| 冷压浸渍钻头模具结构：1-钢体；2-模芯；3-模套；4-底模；5-非金刚石层；6-金刚石层 |

（2）压制：压制在压力机上进行；金属粉末在压制过程中，由于粒度较细，坯体压制后的弹性较大，因而施压要慢，待压到规定的尺寸后，保压1~2min，卸压出模后可获得较好的坯体

**3.6.2 烧结**

|  |  |
| --- | --- |
| Threshold at 128, of img043.jpg | img044.jpg |
| 带有热压装置额钼丝炉  1-上压头；2-加热钼丝；3-下压头；  4-活塞；5-水封；6-模具 | 一带卧式钼丝炉  1-钼丝发热体；2-刚玉炉管；3-钢管；4-保护气体入口；  5-保护气体出口；6-冷却水入口；7-冷却水出口；8-冷却水套 |

（1）装舟

先将石墨盒底部洒一层铝氧粉，放上石墨芯，小心地将钻头头部(胎体)朝下，套住石墨芯放下，然后将钻头外围空余部分填满铝氧粉并轻轻搅实，芯部周围也放入少许铝氧粉，并使其稍高于金刚石层，最后在钻头钢体内石墨芯上部放入一定数量的粘结金属。

|  |
| --- |
| img042.jpg |
| 装舟示意图：1-钻头刚体；2-浸渍金属；3-石墨芯；4-胎体；5-铝氧粉；6-石墨盒 |

（2）粘结金属加入量的确定

* 粘结金属的加入量主要取决于钻头胎体空隙体积：胎体体积不变时，压制密度愈大，孔隙体积愈小，加入量也愈小
* 粘结金属的加入量可以下式求得（骨架金属为纯WC，粘结金属为铜镍合金时：

（3）烧结工艺的确定：烧结工艺主要包括升温速度、最终温度、保温时间和冷却速率等

**3.7 无压浸渍法金刚石制品制造工艺**

先将定量的骨架粉末（一般为烧结碳化钨）装入粘好金刚石的石墨模具内，放入钻头钢体，经适当敲振后使骨架粉末达到所需密度，然后装入适量的粘结金属（多为铜镍、铜锌合金），在箱式电炉中烧结，当达到一定温度后，粘结金属熔化，靠毛细作用渗入骨架粉末中，使之形成一种假合金，能牢固地包镶金刚石并与钻头钢体粘牢。

特点：多用于油井钻头制作；钻头胎体粉末烧结时不施加压力，有利于制作形状复杂的钻头

|  |
| --- |
|  |
| 无压法制造表镶金刚石钻头的工艺流程 |

**3.7.1 石墨模具**

1. 石墨模具经车制后，首先在底模上划线定位(包括金刚石位置、水路位置)
2. 底模划线后，则在底模上进行旋眼，旋眼时按金刚石不同的粒度用牙钻球齿铣头扩至相应直径
3. 在定位眼中涂以稀胶体用空气吸笔将金刚石放入小孔中
4. 将水槽材料放到模具内（材料为特殊粘土：在高温下不与胎体发生作用，烧结后很容易将其清洗干净）
5. 最后配装芯模

**3.7.2 钢体与胎体**

* 钢体材料为35CrMo或45钢车制而成
* 胎体骨架粉末和浸渍金属成分的配比必须按试验成熟的配方制备，有相应的烧结工艺
* 国内的钻头制造单位用过的配方和烧结温度——不同骨架成分、浸渍金属与浸渍温度、硬度表：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 骨架成分 | 浸渍金属成分 | 浸渍温度（℃） | HRC |
| 1  2 | W2C(80~200目)  W2C5%，Co5% | Cu54%，Ni36%，Mn10%  Cu54.5%，Ni20%，Mn20%  Si0.5%，Sn5% | 1220~1240  1100 | 35~38  32~42 |

**3.7.3 组装**

按设计胎体高度、厚度计算的骨架粉末装入模具内，边装边振动，以求达到给定的装料密度，然后将钢体放入模中，并保证胎体和钢体有较高的同心度。为了防止钢体熔蚀，可以在模壁上涂一层Al2O3胶液。然后装入适量的浸渍金属和硼砂，最后盖上石墨盖即成。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | b2b_20120003095952757144.jpg | 06_00-d331 |
| 1-石墨盖；2-硼砂；3-石墨浸渍套；4-浸渍金属；5-芯模；6-钢体；7-胎体骨架粉末；8-金刚石；9-石墨底模 | | |

**3.7.4 烧结**

烧结钻头一般采用硅碳棒高温箱式电炉，为了预防金刚石和胎体成分氧化，在石墨模中放入碳屑或通入保护气氛。其烧结温度必须使浸渍金属熔化，靠毛细管作用使浸渍金属渗入骨架粉末中，使胎体致密化，烧结温度取决于浸渍金属熔点，它比浸渍金属熔点高15~20℃。保温30~50min即可出炉。

**3.7.5 机加工**

Tips：车钢体的丝扣注意保证丝扣与胎体端面的垂直度和对胎体内外径的同心度

|  |
| --- |
| Threshold at 128, of img047.jpg |
| 扩孔器无压浸渍烧结——模具组装结构图：1-刚体；2-压模；3-胎体骨架料；4-型模；5-粘结金属料；6-底模套 |

**3.8 三种金刚石工具制造方法优缺点对比**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 热压烧结法 | 无压浸渍法 | 冷压浸渍法 |
| 工件形状  胎体形状 | 钻头胎体形状不宜复杂  厚薄、高度相差不宜悬殊 | 能制造复杂形状的钻头  可借助振动使骨架粉末达到预定密度 | 可以制造形状复杂的钻头 |
| 烧结温度  保径时间 | 温度较低，有利于保护金刚石，时间短 | 烧结温度须超过粘结金属熔点30-60℃  烧结温度一般比热压法高得多，时间较长 | 烧结温度较高，且延续时间长，对金刚石热损伤较严重 |
| 制造成本 | 成本较高 | 成本较高 | 适于大批量生产、成本低 |
| 模具 | 石墨模具 | 石墨模具 | 金属和石墨模具 |

**作业**

1. 粉末冶金法可以制造哪些类制品？
2. 试从工艺角度论述电解法制取金属粉末和电解法生产金刚石工具的区别与联系？
3. 粉末的工艺性能包括哪些？并简述。
4. 说明金属粉末筛分析中表达式－150＋200的意义。
5. 试推导在混料过程中球磨筒的临界转速。
6. 如何改善压坯密度分布的不均匀性？
7. 简述烧结的概念、粉末的等温烧结过程。
8. 阐述液相烧结的条件、液相烧结的过程。
9. 金刚石工具粉末冶金法制造中的三种方法：热压法、无压浸渍法、冷压浸渍法分别是各有什么特点？先分别介绍各种方法，再进行优缺点分析。
10. 设计Φ75/57的钻头工作层高6mm，水口8个、8mm宽（按矩形计算），设金刚石浓度为80%，胎体配方为WC30%、Fe20%、Cu50%（质量浓度），试计算该钻头工作层中金刚石的用量和金属粉末各自的用量。金刚石密度3.52g/cm3；WC15.7g/cm3；Fe 7.85g/cm3；Cu8.9g/cm3。
11. 若给定岩石，如何设计胎体的配方？
12. 结合孕镶金刚石钻头的碎岩机理，论述金刚石、胎体、岩石三者的关系。
13. 试述影响热压金刚石钻头质量的烧结工艺因素。
14. 试述孕镶金刚石钻头的结构要素及其确定的基本原则

岩石可钻性——百度百科

[https://baike.baidu.com/item/%E5%B2%A9%E7%9F%B3%E5%8F%AF%E9%92%BB%E6%80%A7](https://baike.baidu.com/item/%E5%B2%A9%E7%9F%B3%E5%8F%AF%E9%92%BB%E6%80%A7/5525279?fr=aladdin)

表1 岩石十二级分级表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 岩石  等级 | 岩石  类别 | 代表性岩石 | 可钻性  m/h | 回次长度  m |
| Ⅰ | 松软疏散的 | 次生土、土壤、矽藻土 | 7.50 | 2.80 |
| Ⅱ | 较软疏散的 | 黄土、粘土、冰 | 4.00 | 2.40 |
| Ⅲ | 软的 | 风化变质的页岩、千枚岩、泥灰岩、褐煤、烟煤 | 2.45 | 2.00 |
| Ⅳ | 较软的 | 页岩类、较致密泥灰岩、岩盐、火山凝灰岩 | 1.60 | 1.70 |
| Ⅴ | 稍硬的 | 泥质板岩、细粒石灰岩、蛇纹岩、纯橄榄岩、无烟煤 | 1.15 | 1.50 |
| Ⅵ | 中等硬度 | 微矽化石灰岩、千枚岩、石英云母片岩、辉长岩 | 0.82 | 1.30 |
| Ⅶ | 中等硬度 | 矽质灰岩、石英二长岩、含长石石英砂岩、角闪石斑岩、玢岩 | 0.57 | 1.10 |
| Ⅷ | 硬的 | 矽卡岩、千枚岩、微风化花岗岩 | 0.38 | 0.85 |
| Ⅸ | 硬的 | 高矽化石灰岩、粗粒花岗岩、矽化凝灰岩 | 0.25 | 0.65 |
| Ⅹ | 坚硬的 | 细粒花岗岩、花岗片麻岩、坚硬的石英伟晶岩 | 0.15 | 0.50 |
| Ⅺ | 坚硬的 | 刚玉岩、石英岩、含铁矿碧玉岩 | 0.09 | 0.32 |
| Ⅻ | 最坚硬的 | 未风化致密的石英岩、碧玉岩、燧石 | 0.045 | 0.16 |

表2 金刚石岩心钻探岩石可钻性分级表 （压入硬度和摆球硬度）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 岩石级别 | 岩石物理力学性质 | | | 钻进时效指标  (m/h) | | |
| 压入硬度/ | 摆球硬度 | |
|  | 弹次 | 塑性系数 | 金刚石 | 硬合金 | 钢粒 |
| 1～4 | <1000 | <30 | >0.37 |  | >3.90 |  |
| 5 | 900～1900 | 28～35 | 0.33～0.39 | 2.90～3.60 | 2.50 |  |
| 6 | 1750～2750 | 34～42 | 0.29～0.35 | 2.30～3.10 | 2.00 | 1.50 |
| 7 | 2600～3600 | 40～48 | 0.27～0.32 | 1.90～2.60 | 1.40 | 1.35 |
| 8 | 3400～4400 | 46～54 | 0.23～0.29 | 1.50～2.10 | 0.80 | 1.20 |
| 9 | 4200～5200 | 52～60 | 0.20～0.26 | 1.10～1.70 |  | 1.00 |
| 10 | 5000～6100 | 59～68 | 0.17～0.24 | 0.80～1.20 |  | 0.75 |
| 11 | 6000～7200 | 67～75 | 0.15～0.22 | 0.50～0.95 |  | 0.50 |
| 12 | >7000 | >70 | <0.20 | <0.60 |  |  |

表3 金刚石岩心钻探岩石可钻性分级表 （微钻钻速）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 岩石级别 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 微钻钻速/ | 216～259 | 135～215 | 85～134 | 53～84 | 34～52 | 21～33 | 14～20 | 9～13 | 6～8 | ≤5 |