

磁性磨料的烧结法制备及其加工特性的分析研究

摘 要

磁性研磨加工技术是光整加工的新工艺、新技术，由于其独特的加工特点，即磁性磨料自锐性好，与加工表面适应性好及磁性磨料磁刷柔性好，所以磁性研磨加工技术不断获得发展并在生产领域得以迅速推广。而作为磨具的磁性磨料是磁性研磨加工的关键所在，为此，本文分析研究了磁性磨料磨粒的磨削机理，并在此基础上提出了磁性研磨加工技术对磁性磨料性能的要求。在对磁性磨料的组成成分、结构形状、规格大小、研磨压力的形成以及磁性磨料的制备方法进行分析研究的基础上，提出烧结法制备磁性磨具。作者从理论上揭示了原料粉末的特性和粉末冶金生产工艺中各个环节对烧结而成的磁性磨料性能的影响，为如何确立制备方案提供了理论依据。并通过实验证明了烧结制备磁性磨料的可行性。而且就所烧制的磁性磨料进行了加工特性的实验研究，确定了最佳的实验参数，分析了磨料的不同材料、不同配比成分、不同磨料粒度、以及不同烧结温度的加工特性，比较了烧结磁性磨料和粘结磁性磨

料的加工效果，并对其经济性进行了分析，最终获得了影响烧结磁性磨料加工效果的实验资料。进而为磁性研磨加工的推广应用获得了有实际参考价值的工艺参数。

关键词： 光整加工 磁性研磨 磁性磨料 烧结 制备

THE ANALYSIS AND RESEARCH ON SINTERING PREPARATION AND FINISHING CHARACTERISTIC OF MAGNETIC ABRASIVE GRAINS

ABSTRACT

The technology of magnetic abrasive finishing (MAF) is new technics and new technology of finishing machining. The technology of magnetic abrasive finishing will achieve development and be rapidly spreaded in the product domain ,because of its especial machining way ,which is good own sharpness of magnetic abrasive grains 、fine own applicability of magnetic abrasive grains and workpiece 、good flexibility of magnetic abrasive grains . By way of grinding tool, magnetic abrasive grains are key of magnetic abrasive finishing, so the paper analyses and researches grinding mechanism of magnetic abrasive grains and bring forward capability requirement of magnetic abrasive grains for magnetic abrasive finishing on the basic of it. In the paper,

following items on MAGs have been analyzed: composition, structure, shape, size, finishing pressure in grinding process and the preparation way of magnetic abrasive grains, then sintering preparation of magnetic abrasive grains is brought forward.

So the author seriously studies the related knowledge of powder metallurgy and sintering theories, and the author theoretically open out influence of every tache for sintering magnetic abrasive grains in powder metallurgy production. These offer theoretically basis for establishing preparation scheme. The author makes lots experiment to making sure key technology parameter in the technologic process, and prove good to sinter magnetic abrasive grains by experiment. And the author studies machining characteristic of sintering magnetic abrasive grains by experiment. The first proper experiment parameter is made sure. Then the paper analyses machining characteristic of different material abrasive grains、different distributing

composition、different granularity of abrasive grains and different sintering temperature. Machining effect is compared on felting and sintering magnetic abrasive grains. So experiment information is gained on affecting machining effect of sintering magnetic abrasive grains. These offer usefully technologic parameter for widely spreading of technology of magnetic abrasive finishing.

Keyword: finishing machining magnetic abrasive
finishing magnetic abrasive grains sintering
preparation

第一章 绪论

1.1 引言

现代科技的快速发展和人民生活质量的不断提高,使得作为国民经济各部门提供技术装备的机械工业,无论在加工技术还是加工设备的各个方面都要求取得飞速发展。人们对许多产品的性能、质量都提出了越来越高的要求,期望以低廉的价格,获取功能齐全、性能良好、使用可靠的优质产品。光整加工技术的宗旨正是以提高零件表面质量为目的,该技术在保持或提高零件型面加工精度的前提下,可以降低零件表面的粗糙度值。经过光整加工的零件表面具有低的表面粗糙度和良好的表面微观几何形貌,不仅具有良好的外观质量,而且还有耐磨、防腐蚀和抗疲劳等作用。就外观质量来说,对于一些产品尤其是承受冲击和交变载荷的产品来说,一般其表面粗糙度值降低,其使用寿命可以显著提高。如滚动轴承来说,如果使其滚道的表面粗糙度值由 $Ra0.4\mu m$ 提高到 $Ra0.04\mu m$,其使用寿命可以提高4倍以上,并能消除波纹度、减小轴承的振动和噪声。可见光整加工对于提高产品的质量和性能具有至关重要的作用。

国际上目前采用的光整加工的方法主要有:手工抛光、机械研磨抛光、超声波抛光、化学与电化学抛光、电化学机械光整加工、磁性研磨等。手工抛光是最常用的光整加工方法。这种方法不仅劳动强度大,加工效率低,而且对工人的技术熟练程度要求高。超声波抛光也是一种手工操作的辅助抛光方式,主要用于槽、缝、边角等人的手指难触及的部位的抛光,这种抛光方式的加工效率非常低。相比之下,化学、电化学抛光和电化学机械光整加工的加工效率则要高的多,由于这三种加工方

式属于腐蚀和溶解加工，对材料的硬度、韧性和强度等几乎不受任何限制，目前已经在内外圆柱表面的镜面加工中获得应用。虽然化学、电化学和电化学机械光整加工方法有着很高的加工效率，但由于影响它们的加工因素很多，难于控制，对环境 and 工人的健康也有一定程度的危害，其应用范围受到很大的制约，目前还仅能用于一些简单型面或小的复杂工件的光整加工上。磁性研磨加工技术是一种有效的光整加工方法之一，这种加工方法具有高效率、高精度和高表面质量的特点，适合于平面、球面、圆柱面和其他复杂形状零件的加工，并能控制研磨效率和研磨精度。值得一提的是磁性研磨加工技术可以很好的与数控机床，加工中心和机器人结合，以实现光整加工的自动化。因此磁性研磨加工技术越来越得到重视。

随着磁性研磨加工技术的日益成熟和在更大范围内的推广应用，磁性研磨加工的一磁性磨料的开发研究变的越来越迫切。目前，国内外许多科技人员都致力于该方面的研究，而且国外已有一些厂家可实现批量生产，但价格昂贵，应用范围不广。国内一些高校也在从事磁性磨料的研究，但目前国内没有较完善的磁性磨料制备工艺，多数仍处于实验研究阶段。因此，对磁性磨料的深入研究将为磁性研磨加工技术的进一步广泛应用打下坚实的基础。

1.2 磁性研磨加工技术及其发展概况

1.2.1 磁性研磨的加工原理

所谓磁性研磨加工，就是在强磁场作用下，填充在磁场中的磁性磨料将沿着磁力线的方向排列起来，吸附在磁极上形成“柔性磁刷”，通过与磁场中工件的相对运动来实现对工件表面的光整加工。作为介质的

磁性磨料，必须具有对磁场的磁感应性质，同时又具有对工件的切削能力。磁性磨料是一种平均直径大约为 $150\mu\text{m}$ 的粒状体，由磁化率大的铁粉和磨削能力强的氧化铝粉或碳化硅粉等按一定比例混合而成的组合体。图 1-1 所示是磁性研磨的加工原理图。目前，已对零件的内圆面、外圆面、平面、成型面以及形状复杂的中小型零件表面进行了磁性研磨加工的开发研究。从原理上讲，它可以对任何几何形状的表面进行精密光整加工。因此，有着十分广阔的应用前景，必将产生良好的经济效益和社会效益。

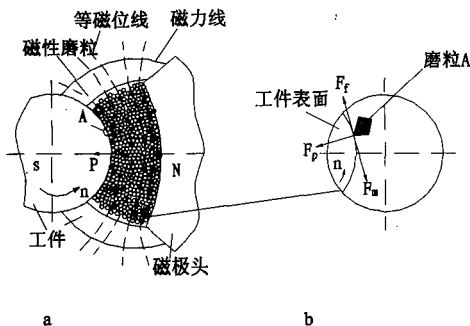


图 1-1 磁性研磨的加工原理

a- 磁性磨料的磁刷及研磨压力的形成

b- 加工区域内单颗磨粒的受力分析

1.2.2 磁性研磨加工的装置

尽管目前国际上应用的磁性研磨加工装置种类繁多，但如果按其磁场的形式划分有两种，第一种可以形成恒定的磁场（图 1-2、图 1-3、图 1-4），在该磁场作用下，当磁性磨料和工件发生相对运动时实现加工；第二种是产生交变的或旋转的磁场（图 1-5，图 1-6），在该磁场作用下，磁性磨料与加工面形成相对运动，从而达到到光整加工的目的。

第一种磁性研磨加工装置的特点是磁性磨料移动的距离小,通常,光整加工靠加工表面与磁极的同时运动来完成(图 1-2、图 1-3、图 1-4)。不过图 1-3 的情况是一个例外,它的磁性磨料靠气体动力驱动,产生与工件表面相对运动。第一种装置均含有一个作为磁场源的电磁线圈或永

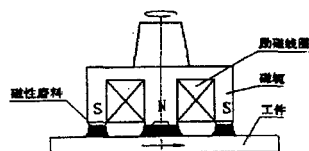


图 1-2 平面的磁性研磨

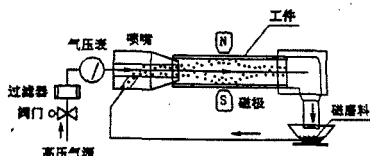


图 1-3 磁粒喷射加工

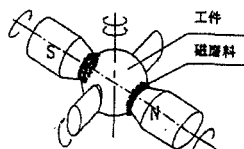


图 1-4 球型阀的磁粒光整

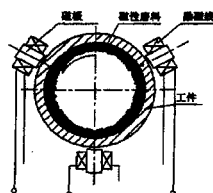
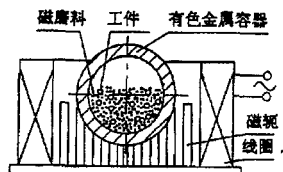


图 1-5 用旋转磁场加工管内表面

久磁铁、带磁极的磁扼和在磁极与工件之间充有铁磁性磨料的工作区。

第二种装置(图 1-5、图 1-6),磁性磨料的运动靠一个交变或者运动的磁场来实现,有时也靠加工零件的运动来实现。



1-6 用交变磁场加工小零件

值得一提的是,日本的 Shinmura 等人新近开发的旋转磁场磁性研磨加工装置(图 1-5),由于可以包括弯管在内的管的内壁的光整加工,解

决了真空管、卫生管内壁抛光这一传统加工方法难以解决的加工难题。这种加工装置由于没有运动部件,其运行非常可靠。图 1-6 采用交变磁场的加工装置也是如此,它常用于小零件整个外表面的光整加工。

旋转磁场磁性研磨加工装置虽然非常有效,但就它的应用对象来说,其截面形状必须是圆形,对于截面是方形和其它形状工件的加工则无能为力。1997 年由韩国的 Jeong-Du Kim 等人提出了一种新的磁性研磨加工装置—磁粒喷射加工装置(图 1-3)。这种装置的原理是将混有磁粒的气流喷射进被加工的管内,磁粒在高压气流作用下向前飞速移动,磁粒在前移的过程中,由于受到磁场的作用而贴向管的内壁,沿管的内壁前移并与之发生摩擦,从而起到对工件内壁的光整加工作用。这种新的磁性研磨加工装置,不仅可以加工截面形状圆形的工件内壁,对其它截面形状的工件内壁也可以进行非常有效的加工。

1.2.3 磁性研磨加工中研磨压力的产生

a) 单颗磨粒的受力分析

以加工磁性材料的外圆表面为例,如图 1-1(b)所示为加工区域内单颗磨粒的受力状况。加工区域内的磨粒被磁化后,沿着磁力线方向排列成刷状,将工件置于磁场的“磁刷”中,工件与“磁刷”的前端磨粒相互吸引,使前端磨粒在磁力作用下紧压于工件表面。取一前端磨粒 A 讨论受力状况。其受力有:磁场作用力 F_p ,由工件旋转而产生的切向摩擦力 F_n ,磁性磨粒之间的相互吸引力亦称为磁场保持力 F_m 。各力的表达式如下:

(1) 单颗磨粒的磁场作用力 F_p

$$F_p = (V_0 B_i \text{grad} B_i) / \mu_0 \quad (1-1)$$

其中, μ_0 —真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$; V_0 —单颗磨粒中铁粉的体积; B_i —单颗磨粒所在位置的磁感应强度梯度。

(2) 工件回转表面对单颗磨粒产生的切向摩擦力 F_f

$$F_f = K f F_p \quad (1-2)$$

其中, f —单颗磨粒与工件的摩擦系数; K —磨粒粒度、形状修正系数。

(3) 单颗磨粒的磁场保持力 F_m

$$\vec{F}_m = \vec{F}_x + \vec{F}_y \quad (1-3)$$

$$\text{其中, } \vec{F}_x = V_o \mu_r H \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1-4)$$

$$\vec{F}_y = V_o \mu_r H \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1-5)$$

式中, V_o —单颗磨粒中铁粉的体积; μ_r —单颗磨粒的相对磁导率; H —磁场强度; $\frac{\partial H}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial H}{\partial y}$ —磁场强度在磁力线、等磁位线方向上的变化率。

磁性研磨过程中, 单颗磨粒在磁场作用力、磁场保持力和切向摩擦力的共同作用下, 使磨粒稳定地保持在加工间隙中, 实现对工件表面的研磨加工。同时处在加工区域外部的磁性磨料磨粒由于受磁场力的作用, 将自动向加工区域汇集, 填充于磁极和工件之间参与加工, 形成一个完整和连续的加工过程。

b) 研磨压力的产生

加工过程中, 由于磁场保持力 F_m 作用, 加工间隙中的各个磨粒沿着磁力线方向相互衔接形成“磁刷”, 产生一个指向工件表面的合力 P , 这个合力 P 作用于工件表面形成“研磨压力” P_o 。如图 1-1(a)。

假定单颗磨粒形状为球状体, 外圆表面研磨时的研磨压力 P 为

$$P = \frac{B^2}{4\mu_o} \times \frac{3\pi(\mu_r - 1)W}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)W} \quad (1-6)$$

式中, B —磁感应强度 (T); μ_0 —真空磁导率 (H/m); μ_r —磨粒的相对磁导率; W —磨粒中铁的体积百分比 (%)。

由 (1-6) 式可知, 研磨压力的大小主要与磁场磁感应强度有关, 改变磁场磁感应强度的大小, 就会改变研磨压力的大小。其次, 还与磨料中铁的含量 W 有关, W 的多少体现了磁性磨料“磁”的这一特性。因此, 在配制中 W 的多少将是磁性磨料的一个主要性能指标。

1.2.4 磁性研磨加工的特点

与传统的研磨、抛光加工工艺相比, 磁性研磨光整加工工艺具有许多优点:

(1) 在磁场中磁化的磨粒, 靠磁场的作用力可彼此非刚性地固结在一起形成磨料刷, 由于磁性研磨的“磁刷”是柔性的, 它的形状在加工的过程中能够随工件形状的变化而变化, 因而具有很好的自适应性。

(2) 加工中磁极和工件的相对运动使磨料沿加工面滑动时同时出现滚动, 磁性磨料之间不断的更换位置, 使磁性研磨加工具有极好的自锐性, 和普通砂轮加工相比, 不存在堵塞现象, 在很大程度上提高了磁性研磨加工的效率。

(3) 通过调节励磁电流的大小可以改变磁场强度, 实现控制研磨压力大小的目的, 同时可以调节磁性磨料的磁场保持力和加工状态中的其他有关参数。

(4) 磁性研磨的切削深度小, 研磨温升和工件变形相对较小, 加工表面光洁平整。

(5) 适用范围广, 磁性研磨加工不仅可以加工磁性材料, 如钢件、铸件, 还可以加工非磁性材料, 如陶瓷、玻璃、塑料、铝合金等; 磁性研磨加工不仅可以加工平面、内外圆柱面、薄板件、球面, 还可以用来加工复杂曲面, 甚至能加工普通加工手段无法进入和加工的表面, 如各

种模具以及管道的内表面等。

(6) 磨削能力强, 加工时间短, 生产效率高。

(7) 在对工件进行光整加工的同时, 不仅可以去除机加工和磨削加工产生的残余拉应力, 而且能够形成 160~210Mpa 的预留压应力, 这可以大大提高工件的抗疲劳强度。

(8) 加工装置简单, 象机床的配件一样, 可以借助通用机床或旧机床改造而成。

(9) 磁性磨料可快速更换。

磁性研磨加工的众多优点使得它在精加工领域显示出独特的魅力。特别是磁性研磨良好的柔性和自适应性, 为其与数控技术结合起来进行复杂曲面的光整加工创造了条件, 使得磁性研磨加工的自动化得以实现。

1.2.5 磁性研磨加工技术的发展概况

磁性研磨加工技术 (MAF-Magnetic Abrasive Finishing) 最早出现在前苏联, 它的概念首次由苏联工程师 Kargolow 于 1938 年提出。随后 50 年代及 60 年代末, 前苏联的 Konovalov Hulev、Baron 和 Sakulevich 等人一直致力于磁性研磨的研究和推广工作。而后, 保加利亚从 70 年代中期起一直在发展 MAF 技术, (例如 Makedonsky 等), 并在其国内举办了多次国际性的专题学术会议。

日本是从 80 年代初开始对磁性研磨加工进行研究的, 并开发出了多种磁性研磨加工设备。其中有代表性的研究学者有日本宇都宫大学的 Takeo Shinmura、Toshio Aizawa, 日本东京大学的 Masahiro Anzai、Koichi Masaki 等, 其中 Takeo Shinmura 研制开发了多种加工铁磁性工件和非铁磁性工件的磁性研磨加工装置, 如平面、圆柱内外表面、球面等磁性研磨加工装置, 并分别对它们的光整加工特性进行了研究。这些加工装置有的采用永久磁体来产生恒定磁场, 有的则采用电磁体来形成强度可以

控制的磁场；有的采用工件移动外加一定振幅和频率的振动来实现磁性研磨加工；有的采用磁性装置的移动外加一定振幅和频率的振动来进行加工；有的则采用产生旋转磁场的办法实现磁性研磨加工。Takeo Shinmura 在研制各种形式磁性研磨加工设备的同时，对各种场合的加工工艺进行了较深入的理论分析和实验研究，如磁场强度、加工间隙、磨料与工件的相对移动速度、磁性磨料的成分和粒度等因素对加工质量和效率的影响以及它们之间的相互关系。

韩国近几年来也在致力于磁性研磨光整加工的研究，例如韩国先进科学技术研究所 Jeong-Du Kim、Youn-Hee Kang 等发明的磁性磨料喷射光整加工装置，该装置为非圆截面管子内壁的光整加工提供了有效的加工方法。

另外，美国 Oklahoma 州立大学的 Komandmi 等人也开始有关方面的研究工作；德国已经出版了有关方面的论文；英国的几家公司也生产了用于修饰性加工和去毛刺的磁性研磨设备。迄今为止，国外的磁性研磨技术已成功地应用在多个方面。如不锈钢净气瓶的内壁研磨，研磨修正超硬磨料砂轮，研磨塑料透镜，细长轴类陶瓷加工，轴承环及内外圈滚道，液压机械用的滑阀、泵齿轮、球阀，家用不锈钢器皿，螺纹轧棍，滚珠丝杠，滚珠轴承保持架，盘形制动器，缝纫机零件，活塞，凸轮轴，叶片等异型零件的去毛刺与抛光加工等。

我国对磁性研磨光整加工技术的研究是从 80 年代中期开始的，起步比较晚，由于投入的人力有限，不论是研究的深度还是广度与国外均有比较大的差距，所以现在仍处于试验阶段，实际应用的不多。一直以来，国内的研究多限于比较简单的平面、圆柱面的磁性研磨光整加工工艺，不过近几年许多科研单位或高校（如太原理工大学、哈尔滨理工大学、大连理工大学等）也已开始对磁性研磨加工技术向深度和广度进行研究，

他们也开始对曲面磁性研磨加工工艺和设备进行研究，并且已取得了一定的成就，不过远远不够深入，特别是在磁性磨料制备方面的研究一直很少，至于磁性研磨加工技术的推广应用更是微乎其微。

磁性研磨加工技术之所以没有在国内得到推广应用的原因在于国外磁性磨料的制备工艺多为企业的商业秘密，因此有关这类的报道很少，而国内没有完善的磁性磨料制备工艺，并且磁性磨料制作成本较高、没有形成批量生产，以及工件的装夹与去磁问题尚未得到解决。以上诸多因素导致我国在磁性研磨加工技术上比较滞后。要使磁性研磨在国内进入实际生产使用阶段并获得较好的社会效益和经济效益，目前急需解决的首要问题就是开发研究制备工艺简单而成本低、寿命长、切削效率高的优质磁性磨料。

1.3 课题的背景和意义以及本文的主要内容

1.3.1 课题的背景和意义

随着工业产品的不断发展和技术水平的不断提高，人们对机械产品质量的要求越来越高，因此对加工出来的机械零件的几何精度和表面质量的要求相应也越来越高。而光整加工是所有机械零件加工的最终工序，其加工质量直接影响着机械产品本身的质量、寿命和使用性能。

磁性研磨加工作为一种很有前途的光整加工方法，为复杂曲面的光整加工带来了希望。尽管多年以来已有不少人对该技术和相应的装置进行了系统的开发和研究，但迄今为止很少有人对磁性磨料的进行专门深入的研究。而磁性磨料作为磁性研磨加工中不可缺少的介质，对它的开发和研究就变的越来越重要了。一旦磁性磨料的问题得以完善解决，磁性研磨加工技术就可迅速在生产中的得到广泛的应用。

1.3.2 本文的主要内容

磁性研磨加工中最值得重视的是磁性磨料在加工中的的柔性和适应性,这种特性使之在复杂多变的型腔和曲面的加工中能够适应表面的形状变化。因而,开发研究出用于型腔和曲面加工的磁性加工技术可以解决在精加工和抛光作业仍以手工为主的落后局面。磁性研磨加工因其固有的优点逐渐在生产中被广泛的采用。目前制约磁性研磨加工更深入发展的主要因素之一就是磁性磨料的制备技术跟不上发展的要求。现在国内生产中使用的磁性磨料多为国外进口的,因其价格昂贵,由此导致磁性研磨加工的成本也比较高,这就阻碍了磁性研磨加工的广泛应用。尽管国内也有少数人研制出一些种类的磁性磨料,但由于其使用性能不理想、寿命短或者由于其生产成本太高,只用于实验使用。因此寻找一种理想的制备磁性磨料的方法成为磁性研磨加工发展中的首要任务。

本论文就是在这种情况下产生的。本文的宗旨是应用烧结法作为一种制造磁性磨料的方法,制造出性能良好的磁性磨料,研究烧结法制备磁性磨料的制备理论和制备工艺,以及其影响因素,并对烧结法制备的磁性磨料进行实验研究。

第二章 磁性磨料磨粒的加工原理与 磁性磨料的制备方法

2.1 磁性磨料磨粒的加工原理

2.1.1 微量切削作用

由磨料的组成成分可知，磨料磨粒的硬度比工件材料硬度高，在研磨压力作用下和相对运动状况下，磨粒刃尖将对工件表面产生切削作用，如图 2-1(a)所示，假设磨料切削刃为圆锥形时的微量切削模型。如前所述，暂且不考虑磁场保持力的作用，单颗磨粒在工件表面的作用力可分为法向力 F_p 和切向摩擦力 F_f ，法向力 F_p 使磨料压向工件表面，如测试硬度一样，在表面形成压痕，对表面形成了一定的挤压作用，能够改变工

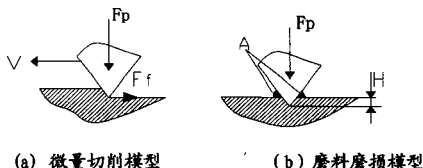


图 2-1

件表面的应力状况。磨粒向前推进时产生切向摩擦力 F_f 。当磨粒的形状和方向适当时，磨粒就如刀具的切削刃一样，在工件表面进行微量切削而产生切屑。该切削作用的强弱与磁性磨料磨粒的形状、位置、磨粒工作角度及磁场特性等工艺参数有着密切的关系，控制这些参数就可以控制磨粒的切削作用，达到微量去除的目的。同时由于磨粒在磁场中构成了柔性“磁刷”以及磁场分布的不均匀性，磨粒随机地变换方位进行磨削。对每个磨粒而言，其切削过程是随机的和不连续的，而且在加工过程中磨粒的切削刃不断的在更新。在金属切削机理研究中，占有重要地

位的就是刀具的几何形状和切削角度,其中前角是影响刀具切削性能的关键因素,由于磨粒切削刃前刀面方向很不规则,负前角比较大,在磁场作用力 F_p 作用下,其吃刀量非常小,一般切入工件表面的切痕不超过 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$,切深小于前道工序加工后留下的缺陷。因此,所产生的切屑很小,切屑变形很小,工件加工面弹塑性变形区域小,加工变质层极薄,残余应力也很小,并为压应力。而且,作为切削加工中产生表面粗糙度的主要因素—理论残余面积高度和切削刃复印性等磨料的微量切削过程中也很小。因此,这种加工方法可以获得非常好的加工表面,粗糙度 R_a 值可达 $0.2 \mu\text{m}$ 以下。

2.1.2 多次塑变磨损作用

具有较高硬度的磁性磨粒群体所形成的弹性磨具在磁场作用下吸附在磁极头,当工件与磨粒作相对运动时,与加工面接触的磨粒就产生接触滑移,被加工表面于是就被磨损,由此实现了光整加工。对于这种磨粒与工件表面发生的机械作用,可根据磨粒磨损原理之一的犁刨理论来解释。假定磨粒的切削刃形状为圆锥形,其磨粒磨损模型如图 2-1 (b) 所示。在磁场作用力 F_p 作用下,刃尖被压入深度为 h ,由于工件材料相对较软,使得磨粒棱边外有材料被挤压堆积,即图中 A 所示区域,当磨粒与工件表面存在相对运动后,就形成了磨粒对工件的“犁刨”作用。另外,根据磁性研磨加工中工件被磨粒磨损作用的形式:即既有硬磨粒与摩擦表面(工件表面)对磨的磨损(即二体磨粒磨损);又有弹性磨具与工件表面以及接触面上存在着较松散磨粒和磨屑的共同磨损(即三体磨粒磨损)作用。同时,由于磁性研磨的磨料颗粒一般集中在磁感应线密集的表面不平轮廓峰附近,因而表面不平的微凸体处磨损相对较大,使得不平度下降加快。所以,磁性研磨过程中的磨粒的磨损作用能使工件表面较快地得到光滑的加工表面。但是产生如前所述的切削过程并不是

唯一的。有时磨粒会在工件表面上产生其他几种磨削现象。一带而过的滑擦摩擦，在工件表面仅留下一条痕迹；或者发生塑性变形，擦出一条两边隆起的沟纹；或者犁出一条沟槽，两边翻出飞边。当磨粒形状较圆钝时，或磨粒的棱角而不是棱边对着运动方向，或者磨粒和工件之间的夹角太小时，或者工件表面材料的塑性很高时，磨粒在工件表面滑移后，经常发生后两种磨削现象。在磁性磨料的连续加工过程中，已出现塑性变形或飞边堆积的表面层金属将发生反复的塑变，产生加工表面硬化作用，最后剥落成为磨屑。这就是所谓“擦伤式”的犁削现象和“碾压式”的滚擦现象共同作用的结果。值得提出的是由于磁性研磨时磨粒一般都集中在磁力线密集的表面凸起的微小轮廓峰附近，因而表面不平的微凸体处的塑变磨损相对较大，使得该不平度下降加快。因此磨粒的多次塑变磨损作用可以较快地获得光滑的工件表面，而不影响工件的尺寸和形状精度。

2.1.3 电化学磨损作用

在磁性研磨中同样也存在着化学磨损，当工件表面被磨粒摩擦、刻化时，纯净的金属就暴露在空气中，被加工表面上新形成的区域内金属会与外部介质产生相互化学反应，表面迅速被氧化形成一层极薄的氧化膜。一般地，这种氧化膜对工件基体的附着力较弱，而且氧化膜与工件基体的膨胀系数也不同，在研磨温度变化的影响下产生内应力，在摩擦过程中较易从表面脱落。因而在连续研磨过程中，工件表面层金属不断的被氧化→脱落→再氧化→再脱落，提高了研磨效率。另外，由于工件回转，在加工过程中使沿磁力线排列的导电磨粒链产生运动而偏离磁力线，形成磁场梯度，在这一磁场梯度作用下，磨粒链两端就产生一个微小电动势，使工件表面产生一微小电流，在研磨中，表面微电流使工件表层快速被磨损掉。如果磁场是由交变励磁电流产生时，工件在两磁极

间受一个交变励磁作用，导电的磁性磨料产生的电动势反复使工件表面充电，强化了工件表面的电化学反应，进一步提高研磨效率。

2.1.4 磨粒的切削轨迹

以加工磁性材料的外圆表面为例，为了使磁性研磨获得更好的加工效果，加工时，工件在产生圆周运动的同时，还应附加一个轴向振动。这是因为由于工件的振动，单位时间内使工件表面的研磨路程增大；同时由于工件表面的研磨方向不断发生变化，切削方向上出现多向性效果，结果在工件表面上呈现出切削刃的切削轨迹为交叉而不重复的网纹状，产生叠加效果，促使磨粒在工件间隙中的翻滚和搅拌作用增强，磨粒的加工位置频繁变动，使磁性研磨过程中磁性磨粒的自锐性加强，工件表面得到更充分的加工，实现对表面的高效优质研磨加工。

由此可知，从单个磨粒切削刃到无数个磨粒切削刃构成的切削轨迹形成一交叉而不重复的网纹状表面。以工件的回转运动和轴向振动（或是磁极携带磨料相对工件的振动）共同构成一个交叉角 θ 。正是由于交叉角的存在，才使得研磨后工件表面被加工成网纹状，从而实现了加工，提高了加工质量。磁性磨料的切削轨迹如图 2-2 所示。

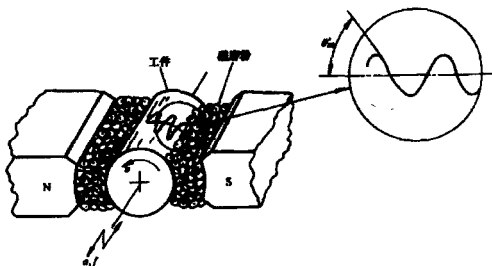


图 2-2 磁性磨料的切削轨迹

θ_m 是由磨粒切削刃轨迹与工件回转方向上的夹角。计算公式为:

$$\theta_m = \arctg (0.12 \pi a f / V) \quad (1-7)$$

式中, V —工件的回转速度(m/min); f —工件的轴向振动频率(Hz);

a —工件的轴向振动振幅(mm)。

在实际加工时, 由于“磁刷”为柔性的弹性磁链, 受到磁磨阻力后极易变形, 所以加工中工件表面上磨粒的实际轨迹与理论上不同。其交叉角为 θ'_m , 且 $\theta'_m < \theta_m$ 。

2.2 磁性磨料

磁性磨料作为磁性研磨加工的工具, 它是一种复合材料, 它的构造如图 2-3 所示。由于磁性磨料在磁场中能够被磁化并受到足够强的磁场力的作用, 这就不仅要求它有普通磨料所具有的高硬度、能够切削金属, 而且要求它应有较强的导磁性能。但是对于磁性磨料并不要求整个颗粒都具有很高的硬度, 普通磨料在加工中常常是以磨料的棱角进行切削, 因此可以用在较软的磁性基体表面散布有许多硬的质点的颗粒作为磁性磨料磨粒。

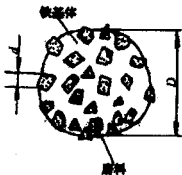


图 2-3 磁性磨料磨粒的构造

磁性磨料的种类很多, 最简单的是人们所熟知

的硬质合金粉末和具有铁磁性质的金属氧化物(陶瓷结构), 如 Fe-C 、 Fe-Al-C 、 Fe-Ti 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 Cr_2O_3 等。硬质合金粉末由于硬度较低, 通常只用来研磨抛光软质合金或有色金属, 也用于去除软的氧化膜或氧化皮。具有铁磁性质的金属氧化物也有较好的光整加工能力, 如将 Cr_2O_3 、 Fe_3O_4 和铁粉混合, 能对 Si_3N_4 进行磁性研磨光整加工, 并可获得 $Rz0.05 \mu\text{m}$ 的表面质量, 其缺点就是加工效率较低。为了对硬度较高的工件进行

高效率的磁性研磨加工, 前苏联、保加利亚等国发明了许多具有不同结构的复合磁性磨粒, 其微观几何结构如图 2-4 所示。这些复合磨粒都是由铁磁体相和硬质磨料相组成的, 其中的铁磁体相通常是铁、钴、镍及它们的合金, 耐磨相则常是一些金属的耐火化合物、硼化物和 Al_2O_3 等, 在特殊的场合下, 也可采用金刚石作为耐磨相。

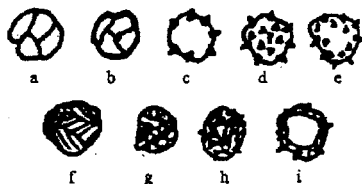


图 2-4 铁基磁性磨粒的微观结构
(白色: 铁磁体相; 黑色: 磨料相)

a-纯铁磁体金属或它的固溶体的化合物; b-完全由磨料包覆的磁磨粒; c-磨料仅分布在粒子表面的磁磨粒; d-磨料均布在粒子表面的磁磨粒; e-磨料呈层状分布的磁磨粒; f-以铁的共晶合金为基础的磁磨粒; g-带有磨料粘结相的磁磨粒; h-以共晶合金为填料的磁磨粒; i-以纯铁体合金为中心, 四周由含有磨料的共晶合金所覆盖的磁磨粒;

2.3 磁性磨料的发展及应用

2.3.1 磁性磨料的国外研究现状

从磁性研磨的国内外发展状况及应用现状来看, 磁性研磨技术的发展潜力很大, 应用范围极广, 有着广阔的市场前景。磁性研磨加工中需要大量的磁性磨料来实现切削加工, 具有良好性价比的磁性磨料是提高加工效率和加工质量最重要的一环, 也是解决磁性研磨技术在更大范围内推广应用的关键所在, 同时也是降低加工成本的先决条件之一。传统的磁性磨料原料是纯铁粉加磨料粉(Al_2O_3 、 SiC 等)。制备方法是将一定粒

度的纯铁粉与较小粒度的磨料粉混合，然后在高温高压下、真空或惰性气体介质中烧结，再粉碎筛选，制成一定尺寸的磁性磨料磨粒。这种传统的磨料制备方法需要高温高压装置，磨料制备较为复杂困难，成本很高，目前国外已有一些厂家可实现批量生产，但每公斤的价格高达 800 元人民币左右。因此，许多专家学者一直致力于磁性磨料的制备工艺研究。70 年代，前苏联的研究人员研制了多种磁性磨料，并对复合磁性磨料进行了广泛的研究。许多文献也曾先后报道了一些磁性磨料的研究开发动态，例如，具有不同磨料材料的磁性磨料的性能研究，磁性能的标定；Fe-TiC 磁性磨料的微观、宏观结构对研磨性能的影响；原位反应吹粒法的条件不同对磁性磨料宏观形貌的影响及形成炭化物合成元素的不同对微观结构的影响；自蔓延燃烧合成法的工艺问题研究；80 年代保加利亚和日本的研究人员开始进行复合磁性磨料的研究。

2.3.2 磁性磨料的国内研究现状与应用价值

国内科技人员在早期研究工作中大多数采用粘结法制备磁性磨料，但由于粘结强度不高，粘结剂不能耐高温等问题一直未能取得进展。90 年代初，南京航空航天大学就复合镀层制造磁性磨料作过大量试验工作。目前，大连理工大学正在研究用等离子喷涂法制造磁性磨料；上海交通大学和兄弟院校合作用原位反应复合法及粉末冶金法制备磁性磨料；长沙铁道学院探讨了激光烧结磁性磨料的工艺；许多高等院校和科研机构的博士生也正在致力于磁性研磨加工技术和磁性磨料制备工艺的开发研究。

随着磁性研磨加工技术的日益成熟和在更大范围内的推广应用，磁性磨料的开发研究也就变的越来越迫切。但目前国内没有较完善的磁性磨料制备工艺，多数仍处于实验研究阶段。几年来，太原理工大学精密表面光整加工技术科研组，就磁性研磨加工及其开发应用的课题研究已

取得了一定成果，获得一项国家发明专利，其中对磁性磨料的研制开发和系列化也获得了可喜的成果。这一研究课题对于生产实践来说具有十分重要的现实意义。

2.4 磁性磨料的制备方法

众所周知，在磁性研磨加工中起主要作用的是磁性磨料，磁性磨料是铁基颗粒增强型复合材料。复合材料是由两种或两种以上的材料通过复合工艺组合而成的一种多相材料，其性能在特定方面明显优于原材料，而且复合材料必须具有其单个组元所没有的优良性能。现代科学中复合材料学的快速发展，使得磁性磨料的制备技术也相应得到发展。目前在国际上应用的磁性磨料的制备方法有多种，概括介绍如下：

2.4.1 等离子粉末熔融法

日本的真崎浩一和安齐正博进行了一种称为“等粒子高温熔融烧结”方法的研究，如图 2-5 所示。这种方法的原理是将硬质磨料颗粒和铁粉按一定体积预先混合，然后从等离子喷涂设备中喷出，借助等离子弧的高温将两者熔融在一起。这种方法虽然在很大程度上解决了磨料和铁的相

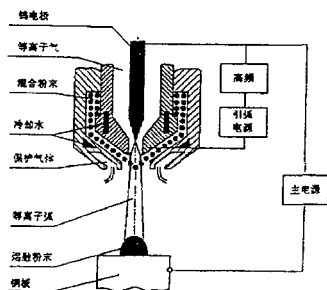


图 2-5 等离子粉末熔融法制作磁性磨料

容性问题，但研究发现，并不是所有的硬质磨料都适合于这种方法，如 Al_2O_3 、 SiC 、 WC 等，它要求磨料的密度和铁的密度必须差别很小，否则在喷涂的过程中，磨料将浮于熔融状态的铁基体的表面上，而不是均匀地分散于其中。与铁的密度比较接近的磨料只有 NbC ，但 NbC 的价格昂贵。

因此该方法有太大的局限性。

2.4.2 激光烧结法

激光烧结磁性磨料是一种新工艺。它的产生既拓宽了激光的应用领域，又推动了磁性研磨技术的发展。激光烧结是将一定粒度的铁粉与磨料，按一定的比例进行混合。为了防止物料氧化和氧化膜的生成，烧结必须在还原氛围中进行，因此，实验前应尽量排除容器内的活性气体，防止激光辐射时与物料发生反应。实验中进、排气阀都打开，使高压氮气在管内流动，在 Y 行管处的另一支路形成负压，将混料抽运出来喷射到密闭室中，并在激光束的焦斑附近，与激光相遇而发生烧结现象。这种方法制备的磁性磨料寿命比较长，它的磨料相与铁磁体相有很好的结合强度，但需要昂贵的激光烧结设备，生产成本比较高，难以应用于实际生产中。

2.4.3 机械压嵌法

机械压嵌法是制造磁性磨料的方法中最简单的一种。这种方法是将铁粉和磨料均匀地撒在硬板上进行滚压，滚压出来的磁性磨料是在磁性铁核的外面包有一层磨料外壳。这种方法制造出来的磁性磨料中磨料的分布不够均匀，而且铁基体相与硬质磨料相之间的结合强度也很小。所以效果较差。

2.4.4 自蔓延高温合成法

自蔓延高温合成 (Self-propagating High-temperature Synthesis, 简称 SHS) 法，是近三十年来发展起来的制备材料的新方法，属高新技术领域。该方法是利用高效放热反应的能量使两种或两种以上物质压坯的化学反应自动持续地蔓延下去，生成金属陶瓷化合物的方法。其最大特点是利用反应物内部的化学能来合成材料。一经点燃，燃烧反应即可自我维持，一般不再需要补充能量。整个工艺过程极为简单、能耗低、生产率高、

产品纯度高。同时,由于燃烧过程中高的温度梯度及快的冷却速率,易于获得亚稳物相。在制备磁性磨料时,将磨粒相颗粒形成元素的粉末和铁基粉末按一定比例混合均匀,压实除气后制成压坯,置于有保护气氛的装置中,通过强热点火或加热至燃点,使其进行自蔓延燃烧过程。之后升温至铁基熔点吹制成粒。

2.4.5 雾化快凝法

雾化快凝是将铁的氧化物和磨料粉混合在雾化装置中引燃,使混合物发生固相反应制成由 Al_2O_3 、 $\gamma\text{-Fe}$ 、 $\text{Fe-Al}_2\text{O}_3$ 冰晶石三相构成的球状的磁性磨料。该法制的磁性磨料是属于弥散型的,工艺过程不易控制,而且制的磁性磨料成分分布也不是很均匀。

2.4.6 复合镀层法

用复合电镀或复合化学镀的方法,将某种磨料颗粒均匀地夹杂到金属镀层中,而形成的特殊镀层即为复合镀层。复合镀层法经过 30 年的发展,目前已成功地应用在不少科技领域中。将复合镀层工艺应用到磁性磨料的制备技术中,需注意两个工艺问题:

- (1) 原始纯铁粉颗粒的去污活化;
- (2) 磨料颗粒在纯铁粉颗粒表面的均匀沉积。

目前,第二个问题的解决办法是磁搅拌。用这种方法最易解决硬度比的关系,但使用寿命与镀层厚度有关。当前大批量生产还难以实现,而且考虑环境污染还存在镀液处理问题和生产成本问题。

2.4.7 铸造法

铸造法是将磨料直接加入到液态铁磁材料中,并使颗粒在基体中均匀分布,然后制粒而成。因此,铸造法制备磁性磨料的关键是使磨料颗粒在液态金属中均匀分散,并最终弥散分布于随后吹制而成的固态磁性磨料中。而要作到这一点,必须满足两个基本条件:

(1) 磨料颗粒与液态铁磁材料的润湿性好;

(2) 两种物料的密度差尽量小。

大多数情况下上述两个条件难以满足, 科研工作者已研制出多种工艺措施改善颗粒的分布均匀性。铸造法成本低, 在工艺得到改善后可望大量生产。

2.4.8 原位反应复合法

以上几种方法制备磁性磨料的主要不足之一是物料颗粒不可避免地带有表面污染和附着物, 相容性差, 界面结合不良。80 年代中后期原位复合材料得以全面研究。原位反应复合法的基本原理: 在一定条件下, 通过元素与元素或元素与化合物之间的化学反应, 在基体内原位合成一种或几种高硬度的陶瓷增强相。原位反应复合法主要有气——液反应法, 液——液反应法和自蔓延燃烧合成法。

2.4.9 热压法

热压烧结的工艺特点是压制与烧结同时进行。它的工艺过程是将充分混好的粉末混合物经准确称量后装入选定的石墨磨具中, 置于热压机上下压板之间, 在不断加压的同时, 通过上下压板导入电流进行加热, 一般在压力达到最高时接近烧结温度在此压力温度条件下保持一定时间(一般在几分钟之内), 然后冷却并在稍后减掉压力, 冷却到一定温度即可取下。该工艺使用设备相对简单, 操作方便, 工艺周期短易于工艺调整, 可实现较高的自动化, 其缺点是热压过程中温度测量准确性较差, 温度不均匀, 最终质量往往受粉末原始氧化程度影响较大, 另一影响因素与填装重量的准确度、磨具尺寸稳定性及压力等因素有关。

2.4.10 粘结法

粘结法是制造磁性磨料中一种制备方法简单、加工成本低的有效方法。它是用粘结剂将一定比例的、混合均匀的铁粉和磨料粘结为一体,

然后通过粉碎制成磨料。磁性磨料的粘结方法根据粘结剂的不同，可分为有机粘结剂和无机粘结剂两种方法。

由于在磁性研磨加工中，磁性磨料与工件之间存在着高速的相对运动，切削和摩擦会有大量的热产生，造成磁性磨料温度的急剧升高。要使磁性磨料在较高的温度下保持良好的加工性能，有机粘结剂必须具有耐高温的特性。目前常用的耐高温有机粘结剂主要有：聚苯并咪唑、聚酰亚胺、聚喹恶啉、聚芳砜、聚次苯基硫醚和酚醛改性机硅等。

与有机粘结剂相比，无机粘结剂的显著特点是耐高温、胶结强度优良、成本低廉（如硅酸盐胶结剂价格仅为环氧粘结剂的二十分之一）、耐久性强。目前常用的无机胶结剂主要有磷酸盐类、硅酸盐类、硼酸盐类、陶瓷类、硫酸盐类等。其中以磷酸盐或硅酸盐为主体的无机粘结剂历史悠久，应用较广泛。磷酸-氧化铜粘结剂是我国于六十年代初独创的磷酸盐胶结剂，具有优异的性能。它是一种双组分室温固化粘结剂甲组分为特制的氧化铜粉，乙组分系磷酸溶液或磷酸-氢氧化铝溶液。

粘结法制备磁性磨料工艺过程如下：

（1）选取粘结剂。粘结剂可使磁性磨料既有良好的磨削性能，又不使机体与磨料分离的性能。对其要求如下：①与基体和磨料的粘结性好；②具有一定的韧性；③具有一定的耐热性，在高温下不被软化。

（2）制取混粉。将一定粒度的纯铁粉与一定粒度的磨料粉（氧化铝或碳化硅等），分别按一定质量比混合，要求混合均匀，尽可能减少偏析。

（3）凝固、干燥。将混粉与粘结剂按一定质量比充分混合，然后使其凝固、干燥。

（4）粉碎。

（5）筛分。

粘结法制作的磁性磨料，由于不需要预先压制成块，不需要含有惰性气体的电炉、激光机等设备，因此成本低。本课题组已对其进行了成功的研究，利用该磁性磨料对外圆、内圆表面、成形表面进行加工试验，以及对磁性材料和非磁性材料加工的试验，均收到理想的加工效果。目前，该课题组研制的粘结磁性磨料已经通过山西省的鉴定，获得国家发明专利。不过粘结的磁性磨料由于其固有的工艺过程以及现有粘结剂耐高温性的局限，使磁性磨料的寿命不如其它部分方法的长，而且当温度高时，粘结的磁性磨料使加工的表面发暗黑色，原有的光亮表面被污染破毁。因次这也就是本课题进行开发研究的原因所在。

2.4.11 烧结法

电炉烧结是以粉末冶金方法为基础，将一定比例的铁粉和磨料混合均匀后压制成具有较高密度的压坯，再在高温下烧结后粉碎制成。在烧结过程中，混合均匀的铁粉和磨料粉在电炉的惰性气氛或真空中、低于铁粉熔点的温度下，使铁粉处于融而不化的状态烧结而成。电炉烧结将硬度较高的磨料结合于导磁的铁基体内，并能达到所需的机械强度。

磁性磨料的使用性能，很大程度上决定于磨料与铁粉的结合强度。一般情况下，制作后的磁性磨料成分之间的配比，与混料时的配比有一定的变化。在坯体压碎、筛分的过程中，有相当部分的磨料与铁粉产生分离。这种分离在以后的研磨加工中继续产生，导致加工效果逐渐降低，使磁性磨料的耐用度减少。因此提高磁性磨料中各成分之间的连接是力是相当重要的。生产中采用一定压力的压制法。通过施加压力，可使铁粉与磨料混合物颗粒之间的孔隙得到填充，接触面积增大，使其更加紧密。在压制坯体的过程中，铁粉颗粒发生弹塑性变形，磨料颗粒部分产生分裂，并使其与铁粉颗粒之间形成紧密的机械连结。其致密度由压力决定，一般模压力 $p \leq 50 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 。

为了进一步增大铁粉颗粒与磨料颗粒之间的结合强度，防止铁的氧化和氧化薄膜的生成，烧结必须在还原介质（氨、氩气等）或真空中进行。烧结既加强了铁粉颗粒之间的结合能力，又弥合了压制后形成的毛孔。烧结温度一般采用铁基体熔化温度的 0.7 倍左右。对于铁基体，必须从 900℃ 增加到 1300℃，这样可保证磁性磨料的强度。对于磨料，若达到其熔化温度时，将使切削刃烧结，磨削性能变坏。因此，磨料成分的熔化温度，必须明显地高于铁基体的熔化温度。

电炉烧结磁性磨料，对使用的设备要求、烧结温度、烧结时间、烧结气氛及粉末性能都有较高的要求，价格相对也高。但磨料的耐用度高、使用寿命长，可以优质高效地实现加工，这也正是该论文进行的制备磁性磨料的方法。

第三章 粉末冶金的基本知识

3.1 金属粉末

磁性磨料的原材料是铁粉和氧化铝粉末或碳化硅粉末。由于金属粉末的纯度、生产过程及粉末的特性对磁性磨料原料粉末的压制和烧结影响很大，因而这些都给最终烧结的磁性磨料的性能以很大的影响，所以有必要对其进行研究。

3.1.1 金属粉末的制造方法

在用烧结法制备磁性磨料的过程中，粉末的纯度和粉末的特性对制备的磁性磨料的性能影响很大，而粉末的制备方法又与粉末的纯度和粉末的形状特性有直接的关系，所以有必要对粉末的制造方法有一初步的了解。粉末的制造大致可分为机械粉碎法与物理化学制粉法，还可细分成多种。机械粉碎法包括：捣磨法、球磨法、切剥磨法、涡流粉碎法、超细粉碎法、雾化法；物理化学制粉法包括：冷凝法、热分解法、还原法、沉淀法、置换法、电解法、合金分解法、有机溶媒法。在制备磁性磨料中所采用的是还原铁粉，该种铁粉成本低，生产中形状和颗粒大小易控制，最主要的是用还原法制的该铁粉具有很好的压制性和烧结性。

3.2 粉末的特性

当烧结磁性磨料时，充分了解粉末的性质是极重要的。作为属于粉末特性的物理性能，有粒度、粒度分布、粒子形状及结构、粉末的密度、流动性、压制性和成型性等。

3.2.1 粉末的粒度、分布及形状

1) 粒度

研究粒子大小时, 确认比分子大的为胶体, 关于这些超显微镜的粒子在此处不加叙述。其次, 是用显微镜及眼睛能看得见的大粒子。粉末冶金生产中所应用的粉末, 其粒子大小的范围 $10^{-1} \sim 10^3 \mu\text{m}$ 。用电子显微镜特别是碳复型法观察微粒时, 既可查明, 通常所想象的一个粒子是由很多小粒子完全分散开。因此, 我们所测定的粒度一般不是原始粒子, 而是其聚集体二次粒子的大小。

通常用平均粒径表示粒子大小, 但粒子形状一般并不是球形, 而是各种各样的形状, 因此, 这种方法不仅不是绝对的, 而且是相当不确切的, 这是难免的。粉末粒度的测定方法很多, 但最简便的测定烧结构件用 Fe 基或 Cu 基粉末的常用方法是筛分法。此法是以通过的网目数表示粒度。即在一定距离内用所拉上的细丝数目来表示, 成为多少目。

实际应用的金属粉末大小可大致区分为能筛分的和全部通过最小目数筛子的两种。制取一般烧结构件所用粉末属于前者, 制取难熔金属、硬质合金、铁氧体所用粉末及石墨等粉末属于后者。这种大小的粒子称为超筛分粉。进一步, 将小于 10 微米的粉末称为超细粉末。筛分过的粉末粒度的叫法是, 例如将能通过 80 目而不能通过 100 目的粒度称为 -80+100 目。

超筛分粉的比表面非常大, 制取压坯时, 其粉末粒子相互间的接触面积十分大, 内聚力较强, 易于成型和烧结。可是, 将细粉进行充填和成型时, 伴随着大量空气。其比表面积愈大, 空气含量愈多。并且, 在加压时, 这些空气将会沿着与加压方向垂直的面跑掉, 因而, 其压坯边缘易于产生层状结构, 往往不能制出良好的压坯。这种现象在本课题进行 1000 目氧化铝为原料的压制中也曾见到, 所以在压制中需要特别加以注意。

2) 粒度分布

由于组成粉末的无数颗粒不属于同一粒径，因此又用不同粒径的颗粒占全部粉末的百分含量来表征粉末颗粒大小的状况，称为粒度的分布，又称粒度分布。因此，粒度仅指单颗粒而言，粒度分布则指整个粉末体。但通常所说的粒度包含有粉末平均的意思，也就是粉末的某种统计学平均粒径。

充填粉末进行成型时，粉末粒子间的间隙愈小，愈能制成好的压坯，烧结也容易。当使用全部是大小相同的正六方体的粉末粒子进行填充时，在理论上是可以达到无间隙、完整无缺的理想状态的充填，可是实际上这是不可能的。

将粉末粒子设想为球形和实际有距离，而且理想填充也是不可能的，因而，使孔隙成为零的那种填充是达不到的。然而，适当地将各种粒度的粉末混合，利用适当的选择粒度分布来减少孔隙，是能制出良好的产品。什么样的粒度分布最合适，这将随粉末粒子形状及粉末种类等条件而不同。

3) 粒子形状

粒子的形状是指粉末粒子的几何形状。可将粉末试样均匀分散在玻璃试片上，用放大镜或各式显微镜进行观察。也可以用图象分析仪进行分析。粉末粒子的形状是粉末的一个重要特性。它对粉末的工艺性能，如松装比重、粉末的流动性、压制性和烧结均有很大的影响。压坯的强度、渗透性以及压坯性能的各向同性都与粉末粒子的形状在技术条件中有所规定。

粒子形状可以笼统地划分为规则形状和不规则形状两大类。规则形状的粒子外形可近似地用某几种形状的名称描述，它们与粉末生产方法密切相关。表 3-1 描述了粒子形状和生产方法之间的关系。粉末粒子外形如图 3-1 所示。

表 3-1 粒子形状与粉末生产方法的关系

粒子形状	粉末生产方法	粒子形状	粉末生产方法
球形	沉淀法	树枝状	电解法
近球形	雾化法、置换法	多孔海绵状	金属氧化物还原法
片状	塑性金属机械粉碎	碟状	金属涡流法
多角形	机械粉碎	不规则形	雾化法, 机械粉碎, 化学沉淀

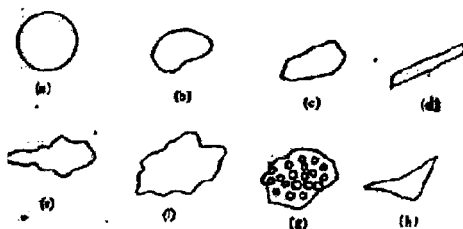


图 3-1 粉末颗粒形状

- (a) 球形; (b) 近球形; (c) 多角形; (d) 片状; (e) 树枝状;
(f) 不规则形; (g) 多孔海绵状; (h) 碟状

一般说来, 准确地描述粉末粒子的形状是很困难的。在测定和表示粉末粒度时, 常常采用表面形状因子、体积形状因子和比形状因子。直径为 d 的均匀球体, 其表面积和体积分别为 $S = \pi d^2$ 和 $V = \frac{\pi}{6} d^3$, 其中的系数 π 和 $\frac{\pi}{6}$ 就称为球的表面形状因子和体积形状因子。对于任意形状的粒子, 其表面积和体积可以认为与某一相当的直径的平方和立方成正比, 而比例系数则与选择的直径有关。而且形状愈复杂, 则比形状因子就愈大。颗粒的形状对粉末的流动性、松装密度以及压制和烧结均有显著影

响。

3.2.2 粉末的密度

1) 粉末的几种密度

对粉末的密度有必要加以特别研究。将粉末装入容器时，其粒子之间有很多孔隙，其孔隙的总量随粉末的装法而不同。由此粉末的密度也有如下不同的几种：（1）松装密度：它是粉末试样自然地充满规定的容器时，单位容积的粉末质量。（2）振实密度：它是指将粉末装入振动容器中，在规定条件下经过振实后所测得的粉末密度。（3）压坯密度：当给上面的粉末加上一定压力时，其单位体积的粉末重量称为压坯密度。

2) 影响松装密度和振实密度的因素

松装密度是粉末自然堆积的密度，因而取决于颗粒间的粘附力、相对滑动的阻力以及粉末体孔隙被小粒子填充的程度、粉末体的密度、粒子形状、粒子密度和表面状态、粉末的粒度和粒度组成等。

（1）粉末粒子形状愈规则，其松装密度就愈大；粒子表面愈光滑，松装密度也愈大。

（2）粉末粒子愈粗大，其松装密度就愈大。相反，细粉末形成拱桥和互相粘附妨碍了粒子相互移动，故粉末的松装密度减小。

（3）粉末粒子越致密，松装密度就越大。表面氧化物的生成提高了粉末的松装密度

（4）粉末粒度范围窄的粗细粉末，松装密度都较低。当粗细粉末按一定比例混合均匀后，可获得最大松装密度。此时，粗粒子之间的大孔隙可被一部分细粒子所填充。

总的来说松装密度对粉末填充操作和烧结有着极为重要的关系。通常，对粉末进行压制成型时，松装密度不同时，压坯尺寸不同，压坯的孔隙度也不同。这与模具设计有很大关系。

因此,在现场,松装密度是极重要的粉末特性

3.2.3 粉末的流动性

与气体和液体的流动性不同,粉末的流动性是指 50g 粉末从标准流速的漏斗流出所需要的时间,单位为 s/50g。流动性是一个非常重要的工艺性能,它综合体现了粉末的多种性能,对生产工艺的稳定、生产流程的设计、产品质量的优劣都有影响。通常粉末颗粒越大,颗粒形状越规则,颗粒组成中极细粉末所占比例越小,流动性越好。

3.2.4 粉末的压制性与成型性

粉末冶金工艺中,粉末的重要特性有成型性和压制性。压制性是在一定实验条件下,以规定压坯的相对密度来比较粉末最终压紧的难易程度。成型性是指粉末压制后,压坯保持既定形状的能力。制造压坯时,都希望粉末能布满模具的各个角落,然后进行成型。压坯的强度也需保证烧结前操作及运送时,其外形不崩坏、不缺损。另外,粉末压制成型时,在一定压力下尽量使其致密,因而,获得密度大的压坯是制取良好烧结件所必需的。从这些方面考虑,称成型性和压制性是粉末的特性是理所当然的。

影响成型性和压制性的主要因素有粒子的塑性和粒子形状。当压坯密度较高时,可明显看到塑性金属粉末比硬、脆材料粉末的压制性好。金属粉末中含有合金元素或非金属夹杂时,会降低粉末的压制性。粒子的形状和结构也明显影响压制性,例如雾化粉比还原粉的松装密度高,压制性也较好。凡是影响粉末密度的一切因素也都对压制性有影响。成型性受粒子形状和结构的影响最为明显。粒子松软,形状不规则的粉末,压紧后粒子的联结增强,成型性好,例如还原铁粉的压坯强度就比雾化铁粉高。

在评价粉末的压制性时,一般来说,成型性好的粉末,往往压制性差;

压制性好的粉末，成型性差。例如，松装密度高的粉末压制性好，但成型差；细粉末成型性好，而压制性却较差。

3.3 粉末冶金法的生产过程

3.3.1 粉末的混合

在粉末冶金工艺中，即使是使用同一类型的粉末时，为了得到适当的粒度分布，也需要混以数种不同粒度的粉末。当然，也有混入异种金属粉末的情况。另外，为了达到起粘结剂和润滑剂等特殊目的，可混入各种粉末。混合时必须均匀，这是不言而喻的。正如在本课题实验中，为了起到粘结和润滑的作用也要加入添加剂，并且最终要混合均匀。

一般情况下，混合是在大气下进行，但为了防止氧化，有时是在真空或液体中进行。混合时，有时粉末粘附在混合机的内壁上，也可能粉末粒子相互粘结成块。为防止粘壁及结块现象，必须根据不同粉末来选择混合时的适当气氛。在磁性磨料的制备中，混合时就通入氮气来防止还原铁粉被氧化。

混合时间长短根据各种不同情况决定，有时约 10 分钟即很充分，但有时，即使几十小时还不充分。通常，长时间混合并不好。如长时间混合时，则粉末粒子产生加工硬化或由于摩擦而被粉碎。如发生粉碎，则粒度分布就出现异常。因此，在制备磁性磨料时以混合大约 30 分钟为宜。

粉末混合在粉末冶金工艺中虽是最重要的工序之一，但识别其混合是否充分的好方法至今仍未确立。实际上以检查烧结制品的长年经验作基础，在一定条件下，常以混合时间来判断。通常，混合可分为两类，混合同一成分而粒度不同的粉末称为和批，混合异种成分的粉末称为混合。

3.3.2 粉末的压制成型

为了得到烧结制品并具有良好的特性，将粉末进行压制成型是极重

要的工序。加压粉末得到压坯是为了制成所要求的形状，并且在搬运时不破损，而且以不防碍烧结操作作为目的。为了获得好的烧结制品，必须作到压制成型过程中密度均匀分布。加压使粉末固化，经过压力有可能使粒子中的很多原子，在原子引力所能及的范围内互相接触，从而使粒子间产生粘附力。另外根据粒子形状，在加压中，也有因滑动、转动等原因，其粒子之间机械地相互咬合在一起而成为维持其形状的里。也有时由于粒子表面相互摩擦，将粒子表面上的氧化膜或杂质膜破坏，而出现清浄的粒子表面，并容易粘附。

制作压坯时加压力的大小依粉末种类、形状及各种条件而有很大差异，常温压制时，一般需要约 1 吨/厘米²以上的压力。压制压力过大时，加压工具经受不住。另外，由于加压方式的关系，有时压坯上发生层状裂纹、伤痕和缺陷等。这些缺陷是由于粉末中包含的空气不能跑出留下或是由于粉末过度硬化而产生的，也可能是由于弹性应力松弛时体积增加所引起的。压制压力的最大限度为 12~15 吨/厘米²。

3.3.3 烧结

将混合好的粉末经压制成型后，在低于基体组分熔点下进行加热，使粉末颗粒间产生原子扩散、固溶、化合和熔接，致使压坯收缩并强化的过程称为烧结。

烧结是粉末冶金的关键工序，对粉末冶金生产起着很重要的作用，成型所得坯块，相对于粉末体而言，颗粒间的接触有所增加，但只有通过烧结，压坯变成了“晶体结合体”后才具有一定的物理机械性能，可满足使用要求。此外，在烧结以前所有工序存在的一些缺点和问题，如粉末粒度组成的波动，压制成型压力和压坯尺寸的波动，以及成型的变化等，在一定范围内，可以通过对烧结工艺条件的调整进行纠正或弥补，也可以控制金相组织。

烧结大致可以分为固相烧结和液相烧结。前者是在低于压坯组分的最低熔点温度以下进行，主要是通过粉末颗粒之间的扩散作用使压坯收缩并得到强化的；后者是在高熔点组分与低熔点组分之间的温度下进行，它主要是通过熔结、化合等方式，使熔化组分包在高熔点固体组分颗粒周围，使压坯收缩并强化的。磁性磨料的烧结属固相烧结。

烧结中的主要影响因素有：温度、时间和周围介质。

第四章 烧结理论

4.1 烧结的概念与分类

烧结是指粉末或压坯在一定的外界条件和低于主要组元熔点的烧结温度下,所发生粉末颗粒表面减少、孔隙体积降低的过程。实际上,在烧结过程中,还要发生添加剂的挥发、变形颗粒回复与再结晶、颗粒之间的物质扩散、流动、溶解、化合以及合金化等一系列的物理化学变化。烧结的结果是粉末颗粒的密度增大,强度显著增加。对金属烧结体来说,导电率和延伸率也明显增加。

用粉末烧结的方法可以制得各种纯金属、合金、化合物以及复合材料。烧结体按粉末原料的组成可分为:由纯金属、化合物或固溶体组成的单相系;由金属-金属、金属-非金属、金属-化合物组成的多相系

根据烧结过程中有无液相产生,可将烧结分为两类,即固相烧结和液相烧结。

固相烧结包括:

- (1) 单元系烧结 如纯金属、化合物以及预合金粉末的烧结;
- (2) 多元系固相烧结 是有两种或两种以上的组元构成的固相烧结体系。

液相烧结都是多组元参与,烧结温度高于低熔点或低熔共晶物的熔点。根据液相的存在情况可将烧结分为两种:

- (1) 烧结过程始终有液相存在的体系;
- (2) 烧结后期液相消失的体系。

4.2 烧结过程的热力学

4.2.1 烧结的热力学

烧结是粉末特有的现象，特别是微细的粉末，如羰基铁粉，只要没有被氧化，那么即使在室温条件下长时间的保存，也都会有粘结或者结块的倾向。粉末这种自发的变化，从热力学的观点来看，是因为粉末体比同一物质的块状材料具有多余的能量，所以它的稳定性较差，这种多余的能量就是烧结过程中的原动力。因此要认识粉末的烧结现象，就必须了解烧结时所需能量在粉末中存在的形式，以及其对烧结过程所起的作用。

作为烧结的能量，首先被考虑到的当然是粉末的表面能。金属粉末具有较大的表面积，由于表面积大，相对地具有的表面能也就较高。粉末粒度愈小，其粉末的表面积就愈大。

金属粉末除表面能外，还有各种形式的晶格缺陷所贮存的能量。晶格缺陷会因粉末制造方法的不同而有显著的差异。此时，粉末粒度越细，表面越不规则，其表面能就越大，所贮存的能量也就越高。这样的粉末要释放能量使其变为低能状态的趋势也就越大，在烧结过程中要释放一定的能量，力图恢复其正常位置。当然，并不是所有这些能量都能用于烧结。设 ΔU 为粉末所具有的全部过剩能量，其中一部分 ΔA 将成为其自发进行烧结的能量。设 T 为绝对温度， ΔS 为粉末状态与烧结状态的熵差，则可得到热力学方程式：

$$\Delta A = \Delta U - T \Delta S \quad (4-1)$$

当 $T=0$ 或 $\Delta S=0$ ，则 $\Delta A=\Delta U$ 。实际上，烧结过程是在相当高的温度下进行的，绝对温度不可能为零；而熵的变化 ΔS 实际也是存在的。一般认为表面能是发生烧结原动力。

4.2.2 烧结的基本过程

粉末烧结后，烧结体的强度增加，首先是粉末颗粒间的联结强度增

高。烧结时，在粉末体内，由于高温的作用，原子的运动加剧，使有更多的原子进入颗粒间的接触面，形成粘结面。并且，随着粘结面的扩大，烧结体强度也提高。粘结面扩大形成烧结颈，使原来的颗粒界面形成晶粒界面，而且随着烧结的继续进行，晶界可以向颗粒内部移动，导致晶粒的长大。

烧结体的强度增高还反映在孔隙体积和孔隙总量的减少，以及孔隙形状的变化方面。随着烧结颈的长大，总孔隙体积的减少，颗粒间距离的缩短，烧结体的致密化过程才真正开始。因此压坯可以致密化、收缩；表面积会减少；强度能增高，以及导电性增加，烧结体变硬。这些参数提供了叙述烧结过程的可能性。在多数情况下，烧结是伴随着烧结体尺寸减小的（叫做收缩）。

粉末的等温烧结过程大致可分为三个界限不十分明显的阶段（图4-1）。

（1）开始阶段—烧结的初期，或称粘结阶段。颗粒间的原始接触点或接触面转变成晶粒结合，即通过形核、长大等原子迁移过程形成烧结颈。这阶段中，主要发生金属的回复，吸附气体和水分的挥发，压坯内成形剂的分解和排除。

（2）中间阶段—烧结颈长大阶段。原子向颗粒粘结面的大量迁移使烧结颈扩大，颗粒间距离缩小，形成连续的孔隙网络，并且孔隙大量消失。密度和强度增高是这个阶段的主要特征。

（3）最终阶段—闭孔隙球化和收缩阶段。此时，多数孔隙被完全分离，闭孔隙数量大为增加，孔隙形状趋于球形而且不断缩小。这个阶段中，整个烧结体仍可缓慢收缩。

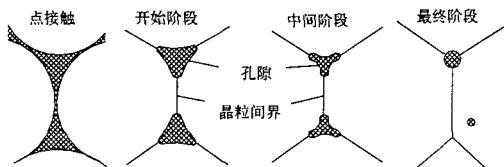


图 4-1 烧结阶段的示意图

4.2.3 烧结原动力

烧结过程中孔隙大小的变化，使粉末总表面积减小。因此，无论在烧结的中间阶段或最终阶段，孔隙表面自由能的降低，始终是烧结过程的原动力。但由于烧结过程的复杂性，欲从热力学计算原动力的具体数值几乎是不可能的。热力学条件只能定性地说明这种原动力的存在。

为了讨论问题的方便，我们应用了库钦斯基的理想烧结模型，见图 4-2。(a) 是球-平面模型；(b)、(c) 是双球模型的两球相切，球中心距不变，(c) 模型表示烧结时有收缩出现。可以应用库钦斯基的简化烧结模型推导烧结原动力的计算公式，根据理想的两球模型 ((d)) 作用于烧结颈向外的应力为：

$$\sigma_n = \gamma (1/x - 1/\rho)$$

因 ρ 远小于 x ，故 (4-2)

$$\sigma = - \frac{\gamma}{\rho} \quad (4-3)$$

式中 γ — 表面张力； ρ — 烧结颈的曲率半径。

负号表示作用于曲颈上的应力是张力，方向朝外，其效果是使烧结颈扩大。

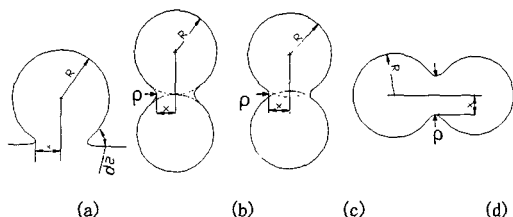


图 4-2 库钦斯基的烧结模型

由上式表示的烧结动力是表面张力造成的一种机械力，它垂直作用与烧结颈曲面上，使烧结颈向外扩大，而最终形成孔隙网。这时孔隙中的气体会阻止孔隙收缩和烧结颈的进一步长大。因此，孔隙中气体的压力与表面应力之差才是孔隙网生成后对烧结起推动作用的有效力。

按照晶体缺陷理论，物质扩散是由空位浓度造成化学位的差别所引起的。如果具有过剩空位浓度

ΔC_v 区域仅在烧结颈表面下以 ρ 为半径的圆内（图 4-4），则当发生空位扩散时，过剩空位浓度的梯度就是：

$$\Delta C_v / \rho = -C_v^0 \times \gamma \Omega / \kappa T \rho^2 \quad (4-4)$$

式中 C_v^0 —无应力区域的平衡空位浓度；

γ —表面张力； Ω —原子体积；

κ —玻耳兹曼常数； T —绝对温度。

上式表明，过剩空位浓度梯度将引起烧结颈表面下微小区域内的空位向球体内扩从而造成原子朝相反方向迁移，使颈部得以长大。因此，

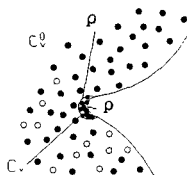


图 4-3 烧结颈曲面下的空位浓度分布

该式就是烧结原动力的热力学表达式，是研究烧结机构的基本公式。

烧结颈表面（凹面）与颗粒表面（凸面）之间存在的蒸气压之差，将导致物质向烧结颈迁移。因此，烧结体内，各处的蒸气压之差就成为烧结过程中通过物质蒸发转移的原动力。

4.3 烧结动力学

在烧结过程中，烧结颈的形成与长大、孔隙的球化与收缩都是以物质迁移为前提的，烧结动力学就是研究烧结过程中各种可能的物质迁移速率的。表 4-1 列举了烧结过程中各种物质迁移方式。实际上，物质迁移方式还可能包括吸附与脱附、溶解与析出、化合等。

表 4-1 烧结过程中物质的迁移方式

迁移方式		迁移情况
粘合		物质迁移不明显或不发生迁移
流动传质	粘滞流动	发生物质迁移，但质点移动较长的距离
	塑性流动	
	蒸发与凝聚	
	表面扩散	
	体积扩散	
	晶界扩散	
再结晶与晶粒长大		发生物质迁移，但质点移动距离较短

4.3.1 粘合作用

粘合是固体表面具有的普遍性质，它起因于表面张力。当两表面靠近到表面力场的作用范围时就要发生粘合作用，粘合力的大小取决于固体表面张力和接触面积。颗粒的粘合即使在温度较低的情况下也能产生。所以粘合作用是烧结早期的主要特征。

4.3.2 流动传质

高温时，粉末物质的塑性和液体性质大大增加。因此，在表面张力作用下，粉末物质有可能通过剪切变形、流动而发生迁移。属于流动迁移机构的有粘性流动和塑性流动。

1) 粘性流动

我们知道，在一定温度下，晶体内总存在一定的平衡空位浓度。随着温度的升高，空位浓度也增加，质点热振动加剧，并可能发生依序向相邻的空位移动。在某种外力场（如表面应力）的作用下，质点（或空位）就会优先沿表面应力作用的方向移动并形成类似粘性液体的物质流。它符合牛顿粘性流动

2) 塑性流动

在烧结温度下，金属粉末的塑性大大增加，屈服强度显著下降。因而，烧结外力场的作用有可能会超过材料的屈服应力，导致粉末晶体产生位错，使得物质以晶面滑移或整排运动形式迁移，这样的烧结机构被称为塑性流动。与粘性流动不同，塑性流动只有当外应力超过材料屈服点时才能产生。塑性流动服从于宾哈姆流动规律

$$\sigma - \sigma_y = \eta \, dv/dx \quad (4-5)$$

4.3.3 扩散传质

扩散传质是指质点（或空位）借助于浓度梯度的推动而迁移传递的。

质点可以从高能阶的凸表面蒸发，通过气相扩散到低能阶的颈曲面在凹面上凝结下来，使烧结颈得以长大。这一过程被称为蒸发-凝聚过程。

表面张力能造成烧结颈曲面处的空位浓度高于颗粒内部及表面的空

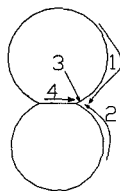


图 4-4 扩散传质的路径
1-蒸发与凝聚；2-表面扩散

位度，从而使空位由颈曲面不断地向颗粒内部及表面扩散，而质点则逆向朝颈部扩散，形成烧结颈长大。一般来说，空位进行扩散分别叫做表面扩散、晶界扩散和体积扩散（见图 4-4）。

1) 蒸发与凝聚

烧结过程中发生的物质蒸发与凝聚，可以使烧结颈长大，但并不引起颗粒的距离收缩，故可用烧结模型图 4-2（b）来研究蒸发-凝聚机构的特征方程。它的特征方程为：

$$x^3/r = 3 \pi M v (M/2 \pi r t)^{1/2} p_a / d^2 R T t \quad (4-6)$$

可见，按蒸发与凝聚机理烧结时，烧结颈半径的三次方与烧结时间成线性关系。

2) 表面扩散

表面扩散只涉及到质点的表面迁移，颗粒之间并不发生收缩，故仍应用模型图 4-2（b）来讨论。

多数学者认为：在较低和中等烧结温度下，表面扩散的作用十分显著，而在更高温度时，逐渐被体积扩散所取代。烧结早期，大量的连通表面扩散使总的孔隙数量和体积减少，同时有明显收缩出现。然而，在烧结后期，形成隔离闭孔后，表面扩散而对孔隙的消失和烧结体的收缩不产生影响。

3) 体积扩散

空位由烧结颈曲面出发，经由颗粒内部向空位阱扩散，即形成体积扩散。库钦斯基用模型图 4-2（a）导出了烧结初期基于体积扩散机理的动力学方程

$$x^5/r^2 = (10 D_v \delta^3 / K T) t \quad (4-7)$$

式中： D_v —体积扩散系数； δ —一个原子的厚度。

在烧结后期，体积扩散主要发生在孔隙表面过剩空位向邻近晶界的迁移

过程中。

4) 晶界扩散

烧结时，在颗粒接触面处形成稳定的晶界，特别是细粉末颗粒，烧结后能形成许多与孔隙交错的网状晶界。由于晶界上质点排列不规则，能量较高，其扩散所需的激活能较小，大约只有体积扩散并聚集成空位团，此即所谓被晶界吸收。晶界扩散的结果是使烧结颈长大，颗粒相互靠近。

4.3.4 再结晶与晶粒长大

粉末颗粒是由晶体或多晶体构成的。经过压制成形，粉末颗粒受到了一定的加工变形，因此在烧结时粉末颗粒就像铸锻金属一样要发生再结晶和晶粒长大。粉末的粒度、形状和表面状况、成形压力以及烧结的温度和时间均对再结晶和晶粒长大有显著影响。在粉末压坯中首先发生形变的地区是颗粒间的接触面上。因此，粉末颗粒愈细，粉末颗粒相互接触的点和面就愈多，再结晶的核心也就愈多，再结晶后的晶粒有可能愈细。形核后的晶粒长大是通过吸收形变过的颗粒基体来进行的，可以使晶界由一个颗粒向另一个颗粒移动。

再结晶以后，金属中晶粒的长大通常是通过晶界的移动来进行的。在长大过程中一些晶粒消失了，而另外一些晶粒长大了，某一颗粒会由于长入相邻的晶粒而变大，与此同时，相邻的晶粒则会变小直至消失。然而留下来的晶粒平均尺寸却在增大，一直达到某一平衡值。孔隙、粉末颗粒表面薄膜、第二相夹杂以及晶界等因素都可以阻止晶界的移动和晶粒长大。

4.4 固相烧结

4.4.1 单元系烧结

单元系烧结是指纯金属、有固定化学成分的化合物或均相预合金粉

末的烧结，烧结过程中不产生新的物相和凝集状态的改变，故也称单相烧结。

单元系烧结的主要机构是扩散和流动，此外，还发生再结晶和晶粒长大，但由于实际烧结过程是连续烧结，即温度逐渐升高达到烧结温度后再保温，因此，各种烧结反应和现象都有可能伴随出现。一般把单元系的烧结划分成下列三个 段：

a) 低温预烧结阶段 ($\leq 0.25T_{\text{熔}}$)

这一阶段主要发生金属回复，吸附气体和水份的挥发，添加剂的分解和排除。这一阶段坯体基本上不发生收缩，有时可能还略有膨胀；另一方面，挥发份的排除致使金属粉末颗粒间的接触有所改善，坯体的导电有所增加。

b) 中温升温烧结阶段 ($0.4 \sim 0.55T_{\text{熔}}$)

颗粒内变形的晶粒开始重新结晶，改组为新晶粒，颗粒表面氧化物逐渐被还原，颗粒接触面处开始形成烧结颈，产生金属联结，故坯体强度迅速提高，导电率进一步增加，但收缩仍不明显。

c) 高温保温烧结阶段 ($0.5 \sim 0.85T_{\text{熔}}$)

这是烧结的主要阶段。在这一阶段，各种主要烧结机构能充分地进行；烧结颈继续长大，晶粒也开始长大，连通孔隙逐渐闭合、球化和收缩，孔隙总数明显减少，坯体收缩显著，密度迅速增加，坯体强度也显著增加，硬度和延展性也有所增加。保温足够长时间后，各种性能变化渐趋增缓，但长时间保温会导致韧性和延伸率有所下降，同时还可能造成晶粒异常长大。

4.4.2 多元系固相烧结

多元系固相烧结要比单元系烧结复杂一些，它除了单元系烧结的现象都可能外，还会发生异组元颗粒间的粘结、溶解和化合等过程，而这

些都是靠组元间的互扩散来实现的。互扩散是十分缓慢的过程。因此，要使多元系烧结达到一定的致密和相组织要求时，所需的烧结时间会更长一些。

尽管多组元的固相烧结比较复杂，但烧结过程和最终产品的性能主要还是取决于基本组元的烧结行为，而均相多元合金粉末、包覆粉末的烧结，则完全与单元系烧结相同。下面讨论的都是混合粉末的固相烧结。

1)互溶系固相烧结

互溶系混合粉末烧结时，在不同组元颗粒间发生的扩散与合金化过程，取决于合金化的动力学因素：粉末粒度，颗粒形状，接触状态，晶体缺陷与结晶取向，组元间的互扩散，生成相的性质，生成次序和分布，但主要还是取决于固态下的扩散动力学。因此，凡是促进扩散的一切条件，如采用细粒度粉末、减少杂质含量、添加某些元素、加入一定量预合金或包覆粉末、提高坯体成型压力、提高烧结温度和延长烧结时间等均有利于烧结过程，其中以烧结温度影响最为显著。我们在烧结磁性磨料时正是抓住了这一主要影响因素才不至于多走弯路得以成功的。

2)互不溶系固相烧结

互不溶系混合粉末固相烧结时，组元间既不互溶也不发生反应，互不溶系固相烧结多是弥散强化符合材料，这些符合材料有个共同的特点就是金属组元的熔点低、塑性好、导热性强、烧结性好，在烧结符合材料时起粘界相的作用，而弥散相则具有高熔点、高硬度和较高的高温性能。

互不溶系固相烧结制品的组成是一种机械混合物，因而兼有两种不同成分的性能，而这恰是复合材料所要求的。

为了提高互不溶系混合粉末的烧结性能，可添加某些活化元素，这些元素能与互不溶系颗粒表面起反应或生成液相，提高原子的活性，加

速烧结过程，我们在烧结磁性磨料的过程中也添加了一些活化元素。

4.5 液相烧结

尽管我们在烧结磁性磨料时，它是属于固相烧结而不是液相烧结，但液相烧结作为烧结的一种也是有必要了解的，这样我们才能更好的理解整个烧结理论。

固相烧结难以获得高致密的产品，采用液相烧结，则在生成的液相的参与下，通过粘性流、润湿、溶解、沉淀等快速物质迁移过程，最终消除几乎所有的孔隙，因此，可获得高密度、高性能的烧结产品。液相烧结包括不溶系和互溶系液相烧结，前者是指固相颗粒在液相中不溶解或溶解度很小，其特点是等温烧结过程中自始至终有液相存在；后者指固相颗粒在液相中有一定的溶解度，这时若液相量较少，固相又能大量溶解形成固溶体或化合物，则可能造成烧结保温后期液相消失。

4.5.1 液相烧结的基本过程

液相烧结过程大致可以分为三个不十分明显的阶段。在实际中，任何一个系统，这三个阶段都是互相重叠的。

(1) 生成液相和颗粒重新分布阶段。在此阶段中，固相颗粒发生较大的流动，这种流动使粉末颗粒重新分布和致密化。

(2) 溶解和析出阶段。物质的迁移是通过液相的扩散来进行的。在此阶段，由于相邻颗粒中心的靠近而发生收缩。

(3) 固相的粘结或形成刚性骨架阶段。这阶段以固相烧结为主，致密化已显著减慢。

4.6 影响烧结过程的主要因素

影响烧结过程的因素是多方面的，由前几节讨论的各种烧结机构的动力学方程可以看到，烧结温度、烧结时间和粉末粒度是三个直接的影响因素。此外，尚有许多间接的因素如颗粒形状、表面状态、粒度组成、添加剂及烧结气氛等。影响烧结的各种因素见表 4-2。下面主要就烧结温度、烧结时间、烧结气氛、粉末性能、添加物以及压力等主要影响因素进行讨论。

表 4-2 影响烧结过程的主要因素

内在因素	结晶构造，异晶转变，晶格缺陷，晶粒尺寸，粒度分布，颗粒形状，表面状态，氧化膜，粉末内杂质，界面能，粘滞系数，临界界面剪切应力，蒸气压，扩散系数
外在因素	粉末的制取方法，添加物，冷压成型工艺，预热压，烧结升温速率，烧结温度，烧结时间，冷却速率，烧结气氛，烧结压力，烧结炉结构，烧结操作

4.6.1 烧结温度的影响

烧结温度是影响烧结的最主要因素。随着烧结温度的升高，粉末物料的粘度和屈服极限降低，蒸气压增大，扩散系数增大，从而促进了物质的迁移流动过程；另一方面，一切阻碍烧结的因素均随温度的升高而迅速减弱，如吸附气体及添加剂的挥发、夹杂的溶解、氧化物的被还原和颗粒塑性的提高。这些均能使颗粒间接触增大，原子的活性提高，对粉末的烧结过程是有利的。

由于原子互扩散系数随温度的升高而显著增大，故提高烧结温度能促进多元粉末烧结的合金化，对一些能形成金属间化合物的多组元烧结，升高温度还有利于化合反应，从而促进了烧结。

根据界面化学反应的湿润热力学理论，升高温度有利于液相界面反应，尤其对吸热型界面反应，升高温度能降低液相固相之间的润湿角，

从而提高液相烧结的速率。另外，升高液相烧结温度能促进固相颗粒的溶解，有利于形成固相骨架和提高烧结致密度。

烧结体的最终性能也随着烧结温度的升高而提高，图 4-5 反映了在压制压力、烧结时间和烧结气氛在一定的情况下，烧结温度对粉末烧结体的各种性能的影响。由图可知，升高温度的影响是有限的。若烧结温度达到接近熔点温度，则制品将会发生软化，产生歪曲和变形，晶粒变得粗大，强度显著下降。特别是液相烧结，温度过高会造成固相颗粒大量溶解，液相数量增多，不能保证制品的形状和尺寸，有时还使液态金属从制品中渗出；另外，液相烧结温度过高，粘结金属大量挥发，改变了最终制品的成分和合金组织。由于烧结温度过高造成的废品叫“过烧”废品。“过烧”的情况在烧结磁性磨料时，我们也曾遇到如，在 1210℃ 烧结时就出现过。

烧结温度也不能过低，因为温度过低，相应地需要延长烧结时间，导致生产效率降低；另外更重要地还会使烧结过程中所发生的各种致密化行为无法充分进行，产品性能达不到要求，造成制品的所谓“欠烧”。不过，制品的“欠烧”一般可以通过改变烧结工艺如提高烧结温度、延长烧结时间等来消除。“欠烧”的现象在烧结磁性磨料时也有，如在 1150℃ 烧结时就出现“欠烧”的现象。

一般来说，各种粉末材料都有一个相应的最佳烧结温度范围。粉末起始烧结温度的确定多以导电率和抗拉强度出现明显变化的温度来反映。对于一般金属粉末，起始烧结温度大约为熔点温度的 40%~50%，这恰

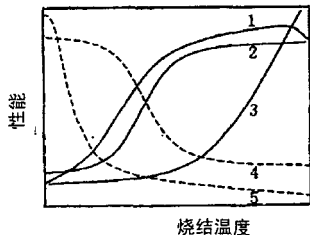


图 4-5 烧结温度对各种性能的影响
1-抗拉强度；2-密度；3-晶粒度；4-孔隙率；5-电阻率

好也是金属的再结晶温度，比较适合烧结温度为 $(2/3 \sim 4/5) T_{\text{再}}$ ，其下限高于再结晶温度，而上限则要从技术和经济上考虑，粒度粗、塑性差的粉末，烧结温度可适当高些，粒度细、粒度组成适当的粉末或塑性好、经过低温还原的粉末，烧结温度应控制得低些。

4.6.2 烧结时间的影响

烧结时间是指在烧结温度下的等温烧结时间，它对烧结过程所起的作用与烧结温度常常是一致的，延长烧结时间会促进烧结的完成。但是时间的影响没有温度影响的大，它仅在烧结保温初期对烧结体的性能有较大的影响，图

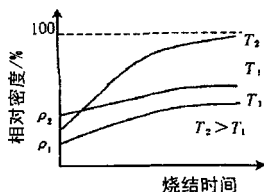


图 4-6 密度与烧结时间的关系曲线

4-6 中的曲线反映了这一点。当烧结密度达到一定值后，再延长烧结时间对密度的提高不明显，相反，还会加剧晶粒长大和二次再结晶，造成制品强度下降，严重时形成过烧废品；另外，从经济上来说也是不经济。选择烧结时间的一般原则是：烧结温度高，烧结时间可适当缩短；烧结温度低，烧结时间长。

4.6.3 烧结气氛的影响

烧结气氛对于保证烧结的顺利进行和产品质量十分重要。然而，气氛对烧结的影响却是复杂的，它不仅影响粉末颗粒本身的烧结，也会影响添加物的作用效果；同一种气氛对于不同粉末物料的烧结，也往往表现的不同，甚至相反的效果。例如 CO_2 、水蒸气对铜粉的烧结是中性的，而对含碳烧结钢的烧结则是氧化性和脱碳性的。从作用机理上看，气氛的作用主要有以下几个方面：

(1) 防止和减少环境对烧结体的有害反应 如氧化、脱碳等，保证烧结的顺利进行和产品的稳定；

(2) 排除有害杂质 如流动的气体能够排除吸附气体和挥发份, 还原性气氛能将制品表面的氧化膜还原成活性金属原子, 从而起到净化和活化烧结的作用, 加速烧结;

(3) 维持或改变烧结材料中的有用成分 这些成分常常能与烧结金属生成合金, 有利于烧结体强度的提高。

使用还原性气氛时, 应能保证在烧结过程中, 烧结腔内的气氛始终保持还原性, 这就需要不断地向腔体中补充新鲜的气氛来得以维持。真空是一种安全、廉价的保护气氛, 但应注意的是, 对于具有高蒸汽压的金属或合金的烧结时, 会造成一定的挥发损失, 甚至改变制品的最终成分和组织, 因此, 在可能的条件下, 可以让易挥发组元过量或降低真空度、缩短烧结时间。由于挥发主要发生在烧结后期, 因此也可以在后期关闭真空泵, 使炉内压力回升, 或充入惰性气体以提高炉压。我们在烧结磁性磨料时就采用的是真空下烧结。

4.6.4 粉末性能的影响

粉末性能包括晶格构造、异晶转变、晶格缺陷、残余应变、晶粒大小以及粉末粒度、粒度组成、颗粒形状、表面状态、粉末塑性和杂质含量等。

在其它条件一定时, 起始烧结温度是随晶格点阵对称性增高而降低的, 因此, 立方晶系的金属粉末的烧结性要优于六方和四方晶系。但 Pb、Sn、Zn、Cd 等低熔点金属, 因为表面生成一层极难除掉的氧化膜, 掩盖了烧结性的优劣, 不符合这一规律。由于异晶转变往往伴随着体积变化, 故能改变颗粒间接触情况, 导致孔隙变化, 使制品的密度和强度发生变化。如果是体积胀大, 还可能引起坯体开裂。

粉末颗粒的晶格缺陷越大, 则晶格的活性越大, 对再结晶和烧结的促进作用也就越大。与此同时, 晶格缺陷和残余应变则得到回复。一般

来说, 减慢升温速率有利于回复和在结晶的充分完成。

颗粒内晶粒大小对烧结过程也有一定的影响, 晶粒愈细, 形状和结构愈复杂, 则比表面能愈大, 同时压制时颗粒的接触性愈好, 从而有利于扩散烧结和合金均匀化。另外, 粉末粒度减小将使开始烧结的温度降低, 坯体收缩率增加。但减小粒度会使烧结体的密度有所降低。采用合适的粒度组成, 由于小颗粒充分填充在大颗粒的空隙处, 使颗粒接触面增大, 因而也有利于烧结和制品密度的提高, 如果粉末粒度粗, 形状简单, 表面光滑, 则烧结性较差。

4.6.5 添加物的影响

粉末中的添加物包括两类: 一类是临时添加剂; 另一类是能促进烧结过程和强化烧结体性能的添加元素。

临时添加剂指的是润滑剂和粘结剂。润滑剂能使粉末颗粒间以及粉末与成型模具之间的摩擦作用减弱, 改善了粉末的压制性, 减少坯体的密度不均匀和模具间的磨损。常用的润滑剂有硬脂酸锌、石蜡、石墨粉和二硫化钼等。粘结剂又叫成型剂, 主要用于成型性比较差的细粉末、球形粉末和硬脆粉末, 也用于低压成型。它能提高粉末的成型性, 使压坯具有一定的强度。除石墨和二硫化钼外, 临时添加剂在烧结升温过程中一般要分解或挥发, 因而会阻碍烧结体的收缩, 在升温较快时还会因来不及排出而造成产品鼓泡, 这种不利的影响随添加剂含量增加而加剧, 故一般控制润滑剂的加入量在 0.2%~1.0%, 粘结剂加入量在 1%~5%。

多元烧结时, 添加某些金属元素可以促进合金化。另外, 还可以通过添加元素来控制组织。对于加入某些弥散相, 则可起到细化烧结体晶粒和强化烧结体性能的作用。

液相烧结时, 常添加一些表面活性元素以改善其润湿性。表面活性元素降低固-液界面能, 从而减少润湿角, 即提高润湿程度。

4.6.6 压力的影响

成型压力对烧结的影响主要表现在压力增大时,坯体中颗粒堆积就较紧密,接触面积增大,同时颗粒表面氧化膜产生变形或破坏,从而加速了烧结过程,烧结密度也随着明显提高。但是,若压制压力超过 500Mpa 以上,则坯体中产生较大残余应变,烧结时这种较大残余应变急剧消除将会导致坯体膨胀,同时由于坯体太致密,内部气体难以排出,阻碍了收缩,反而使烧结密度降低;另外,采用极高压力成型的压坯,由于孔隙率低,烧结时还很容易产生晶粒异常长大。对于液相烧结,成型压力大,致密化反而低,这是因为颗粒原始接触面大,妨碍和影响了液相的流动。

烧结时若施加外压,则原子的迁移激活能将降低,从而起到活化烧结的作用。在适当大的外力作用下,可使原子的迁移机构由扩散转变成滑移、粘性流动或塑性流动,大大提高了致密化速率;另一方面,由于外力提供了额外推动力,使封存有气体的孔隙继续收缩,导致最终制品密度接近理论密度。

第五章 烧结法制备磁性磨料

5.1 制备工艺

5.1.1 原料的配制

实验地点：制粉车间

实验设备：电子秤（CAW 6kg-1g）

准备好纯铁粉、氧化铝粉、碳化硅粉以及添加剂。用电子称按重量比 4: 1 或 3: 1 称量所需的铁粉、氧化铝粉或碳化硅粉以及添加剂。

配料时，配料的比例和粉末的粒度对磁性磨料的制造影响较大。铁粉和磨料粉的粒度应相差不大，粒度越大，粉末的混合越均匀，压制性能和烧结性能也越好，配料中，磨料的含量越多，压制越困难，烧结时需要更高的温度和更长的保温时间，但粉碎时则要容易些。

5.1.2 原料的混合

实验地点：混料室

实验设备：V 型混合机

将原料以及添加剂装入 V 形混合器，同时为防止铁粉氧化，通入氮气对其进行混合。混合应尽量均匀，这样不仅使压制和烧结有利，而且制出的磁性磨料中磨料的分布比较均匀。

5.1.3 压制

实验地点：压制车间

实验设备：双向自动磁场成型压机

将混合好的粉末加润滑剂后，根据压模的容量装入一定量的粉末。对其进行压制后，真空包装。

5.1.4 等静压

实验地点：等静压车间

实验设备：等静压机

用等静压机对压制好的坯体进行等静压处理，使其颗粒进一步致密化。

5.1.5 烧结

实验地点：京宇烧结实验室

实验设备：高温真空烧结炉

把等静压后的坯体放入槽钢中，根据实验要求的不同，坯体可放在不同的位置。由于烧结温度、烧结时间、保温时间、降温时间对烧结的效果影响较大，所以应根据具体实验要求来确定这些参数。

5.1.6 破碎、粉碎、筛分

实验地点：太原理工大学光整加工实验室

实验设备：鄂式破碎机（规格型号 100×60）、制样机（标准牌 FZ-150 型）、分选筛

将烧好的坯体放入鄂式破碎机中进行粗破碎，然后将破碎后的小块料放入制样机中进行进一步的粉碎，使其成细粉，再通过筛分得到所需的粒度，最后将剩余的大颗粒再进行粉碎，筛分。如此反复进行，直至不必要的大粒度粉末不存在为止。

5.2 实例及其现象分析

实验 1

原料：纯铁粉、氧化铝粉、添加剂 A 和 B

烧结温度：1150℃

烧结时间：5 小时

保温时间：2 小时

实验现象：

烧结的坯体是直径大约为 13mm、长约为 55mm 的小圆柱体，外观看，颜色为灰色，外表不很光滑。破碎后发现中间有灰白色，颗粒分布松散，硬度不够，没有烧透。坯体破碎和粉碎时都较容易，而且落下的 120 目以上的微粉较多。所获的磁性磨料用永磁铁吸附发现有少许无法被吸起。粗粒度的磨料粉比细粒度的磨料粉烧成的坯体硬度更差，废料更多，加工效果更次。另外，添加 A 的比添加 B 的加工效果要好，对细磨料粉加入 A 的磨料在对导磁工件进行 9 分钟磁性研磨实验后，工件表面的粗糙度 R_a 由 $1.39\mu\text{m}$ 降至 $0.33\mu\text{m}$ ；加入 B 的磨料在相同实验条件下，将 R_a 从 $0.84\mu\text{m}$ 降至 $0.33\mu\text{m}$ 。

实验 2

原料：同上

烧结温度：1180℃

烧结时间：5 小时

保温时间：2 小时

实验现象：

烧结的坯体尺寸和实验 1 的相同，坯体比较光滑，其色为银灰色有金属光亮，而且磁铁对坯体吸附效果良好。同时有少数的坯体端部有几个很小的金属球，这是由于温度高，过烧所致。破碎时较实验 1 的坯体难，其断面为暗灰色，颗粒分布均匀，且有金属亮点。由于坯体较硬，所以破碎下的颗粒也较大，落下的废微粉很少，而且粉碎时也比较难，获得的磁性磨料用磁铁吸附效果很好。同实验 1 的一样在加工中添加 A 的磁性磨料比添加 B 的加工效果要好；同样粗粒度的磨料粉比细粒度的磨料粉烧结制得磁性磨料加工效果差。在对导磁工件进行 9 分钟磁性研磨实验后，粗粒度的磨料制的磁性磨料使工件表面的粗糙度 R_a 由 $1.38\mu\text{m}$ 降至 $0.22\mu\text{m}$ ；用细粒度制的磨料在相同实验条件下，将 R_a 从 1.39

μm 降至 $0.20\mu\text{m}$ 。

实验 3

原料：同上

烧结温度： 1210°C

烧结时间：5 小时

保温时间：2 小时

烧结的坯体尺寸和实验 1 的相同，但坯体不如实验 2 的坯体光滑，坯体的端部为淡黄色，其余为银灰色有金属光亮，而且磁铁对坯体吸附效果良好。有的坯体为还粘附着大片的熔化的铁。这可能由于温度高，过烧所致。破碎时较实验 2 的困难，其断面为暗黑色，颗粒分布均匀，且有金属亮点，有的坯体中有熔化的铁珠颗粒，这也是温度太高所导致的。因为坯体较硬且有熔化的铁，所以破碎下的颗粒也较大，落下的废微粉很少，同时粉碎时也较难。最终获得的磁性磨料用磁铁吸附效果很好。同实验 1, 2 的一样在加工中添加 A 的磁性磨料比添加 B 的加工效果要好；同样粗粒度的磨料粉比细粒度的磨料粉烧结制得磁性磨料加工效果差。在对导磁工件进行 9 分钟磁性研磨实验后，粗粒度磨料粉制的磁性磨料使工件表面的粗糙度 R_a 由 $1.95\mu\text{m}$ 降至 $0.25\mu\text{m}$ ，细粒度磨料粉制的磁性磨料使工件表面粗糙度 R_a 由 $1.95\mu\text{m}$ 降至 $0.18\mu\text{m}$ 。

实验 4

原料：纯铁粉、碳化硅、添加剂 A 和 B

烧结温度： 1150°C

烧结时间：5 小时

保温时间：2 小时

烧结的坯体尺寸和实验 1 的相同，坯体粗糙且坯体不完整。其颜色为灰色。较易破碎，其断面为灰黑色，颗粒分布松散，内部没有烧透，

硬度不够，用手就可掰开，铁粉与磨料粉没有烧到一起，所以废料比较多。添加 A 的磁性磨料比添加 B 的加工效果要差；同样粗粒度的磨料粉比细粒度的磨料粉烧结制得磁性磨料加工效果差。

实验 5

原料：同上

烧结温度：1180℃

烧结时间：5 小时

保温时间：2 小时

烧结的坯体尺寸和实验 1 的相同，坯体比实验 4 的光滑。其颜色为灰黑色。相对难破碎，其断面为灰黑色，颗粒分布均匀且有少数黑色亮金属色，硬度足够。破碎时颗粒较大，落下的微粉不多；粉碎时也难，获得的磨料用磁铁都吸附起。添加 A 的磁性磨料比添加 B 的加工效果要差，在对导磁工件进行 9 分钟磁性研磨实验后，添加 A 的磨料使工件表面的粗糙度 R_a 由 $0.79\mu\text{m}$ 降至 $0.34\mu\text{m}$ ；添加 B 的磨料使工件表面的粗糙度 R_a 由 $1.11\mu\text{m}$ 降至 $0.28\mu\text{m}$ 。同样粗粒度的磨料粉比细粒度的磨料粉烧结制得磁性磨料加工效果差。

实验 6

原料：同上

烧结温度：1210℃

烧结时间：5 小时

保温时间：2 小时

烧结的坯体尺寸和实验 1 的相同，但坯体不如实验 5 的坯体光滑。其颜色为灰黑色，有金属亮点。比实验 5 的难破碎，其断面为灰黑色，颗粒分布均匀且有黑亮金属色，有熔化的铁颗粒粘附在坯体内外，而且坯体比实验 5 的硬。破碎时颗粒较大，落下的微粉很少；粉碎时也难，

获得的磨料用磁铁都吸附起。添加 A 的磁性磨料比添加 B 的加工效果要差；同样粗粒度的磨料粉比细粒度的磨料粉烧结制得磁性磨料加工效果差。

5.3 实验方案的确立

通过磁性研磨加工实验验证认为：烧结温度、烧结时间、保温时间是决定烧结效果的关键因素（烧结温度与烧结时间的关系如图 5-1 所示），从以上的几次实验中可以总结出烧结温度应取在

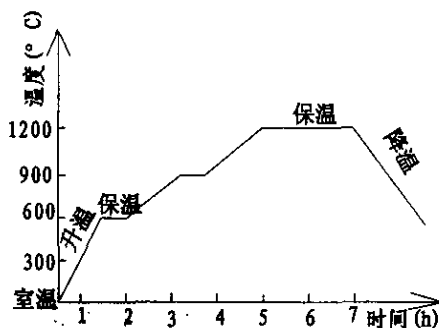


图 5-1 烧结温度与时间的关系

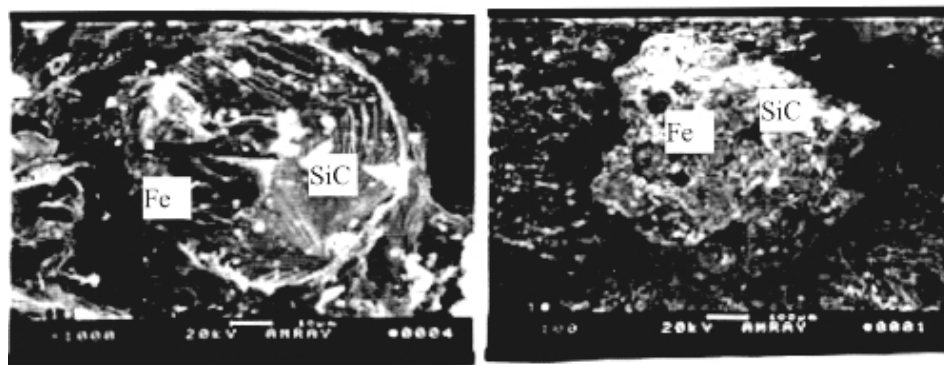
1180℃~1210℃之间，另外从本课题以前所做的实验以及参考可取的烧结温度得出烧结温度取 5~6 个小时，保温时间取 2~3 个小时。当然所有的这些参数都可根据实际情况而变，不过它们所遵循的原则是温度越高，烧结时间、保温时间相应可以缩短；烧结温度低，烧结时间、保温时间相应加长。分析发现磨料为氧化铝时加入添加剂 A 后比加入添加剂 B 所制得磁性磨料效果好；相反磨料为碳化硅时加入添加剂 A 后比加入添加剂 B 所制的磁性磨料效果差。这些特性由对磁性磨料所拍摄的 SEA 照片（图 5-1）也可验证。

总结上面结论后，确立了最后方案并进行了大量实验制备。确定铁粉与磨料的配比为 4:1，烧结温度为 1200℃，烧结时间为 5 个半小时，保温时间为 2 个小时。在这种情况下，制的三种磁性磨料分别为 1 号（由 1000 目氧化铝制得）、2 号（由 325 目氧化铝制得）、3 号（由 325 目碳化硅）。这些磁性磨料为进一步分析烧结制备的磁性磨料作了充分准备。

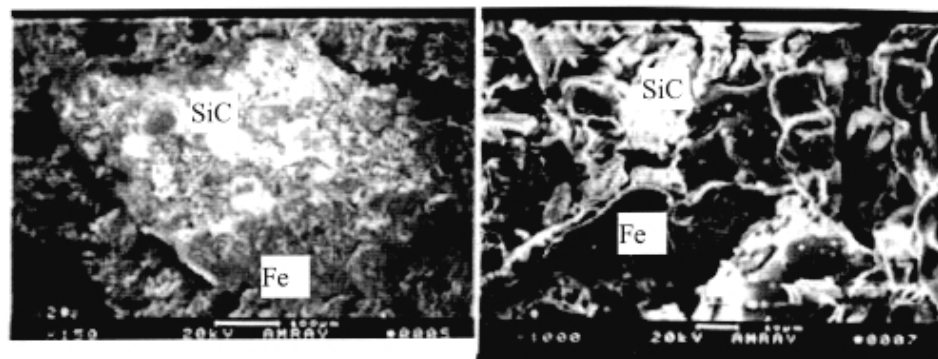
图 5-2 所示为烧结磁性磨料的 SEA 照片。

图 5-3 所示为该课题组用粘结法制备的磁性磨料的 SEA 照片。

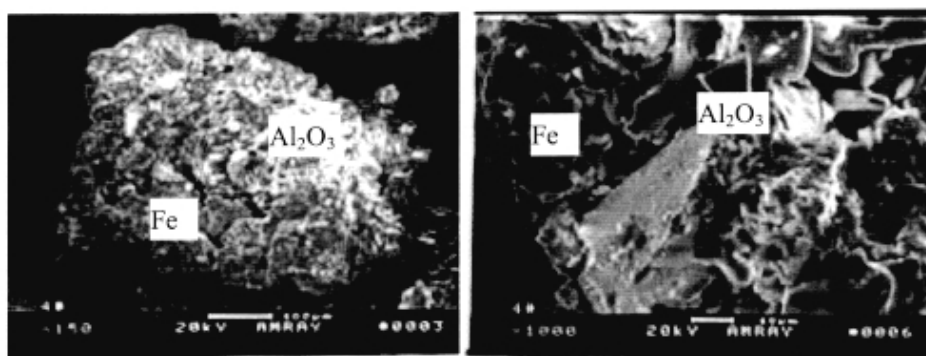
图 5-4 所示为烧结法制备的部分磁性磨料系列产品的照片。



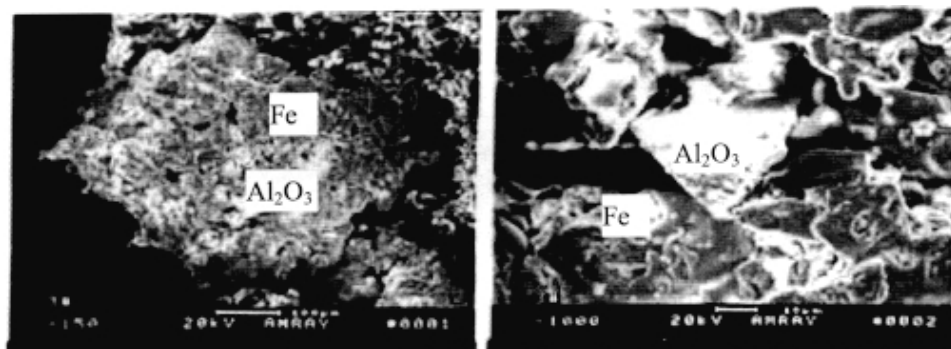
a- (Fe+SiC+A) 磁性磨料磨粒



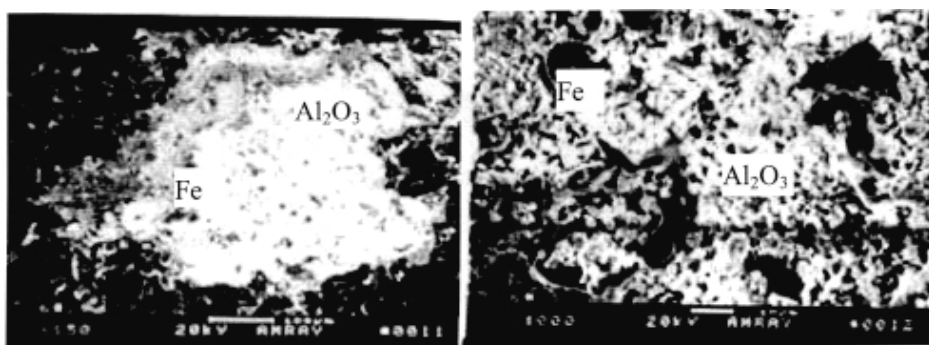
b- (Fe+SiC+B) 磁性磨料磨粒



c- (Fe+Al₂O₃(325 目)+A) 磁性磨料磨粒



d- ($\text{Fe}+\text{Al}_2\text{O}_3(325\text{ 目})+\text{A}$) 磁性磨料磨粒

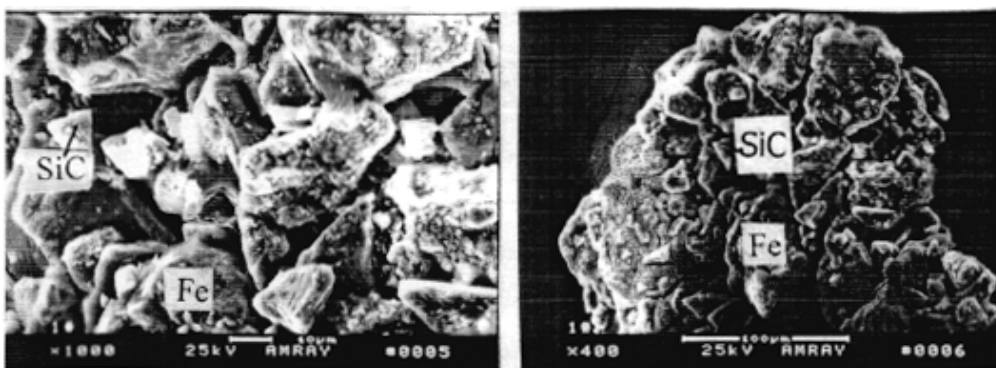


e- ($\text{Fe}+\text{Al}_2\text{O}_3(1000\text{ 目})+\text{A}$) 磁性磨料磨粒

图 5-2 烧结磁性磨料的 SEA 照片



a- ($\text{Fe}+\text{Al}_2\text{O}_3$) 粘结磁性磨料磨粒



b- ($\text{Fe}+\text{SiC}$) 粘结磁性磨料磨粒

图 5-3 粘结磁性磨料磨粒的 SEA 照片。



图 5-4 烧结制备的部分磁性磨料产品的照片。

通过图 5-2、图 5-3 磁性磨料的 SEA 照片的比较可以看出烧结的磁性磨料比粘结的磁性磨料的微观结构分布要好，铁对磨料的包裹较好，而且切削棱角似乎也要些。由图 5-2 (e) 可知作为原料的磨料越细，烧结的磁性磨料在加工时参与研磨加工的磨料磨粒越多。图 5-4 为作者在本课题进行中研究出的部分烧结磁性磨料。

第六章 烧结磁性磨料的加工特性及实验分析

要研究烧结磁性磨料的加工特性，首先应知道影响磁性研磨加工的因素，这些也正是影响磁性磨料加工特性的主要影响因素。至于影响磁性研磨加工的因素很多，但其中最主要的几个影响因素是：加工区域的磁感应强度，磁极头与加工面之间的间隙，磁极头与工件之间的相对转速，加工时间，磁性磨料的成分、结构和粒度，烧结磁性磨料的温度，所用磨料的粒度，磁极头的形状，以及工件的材质等。由此看来要提高磁性磨料的加工效率和加工质量，增强磁性研磨加工技术的实用性，必须对这些影响因素作深入的研究，从而找出它们加工影响的规律性，找到提高加工质量和加工效率的措施。本章将分别就上述影响磁性磨料加工特性的各种因素进行实验和分析，从而为磁性磨料的制备技术提供有参考价值的工艺参数，进而使磁性研磨加工技术的应用和推广得以早日实现。

6.1 烧结磁性磨料的加工实验条件

该磁性研磨实验所需的设备和仪器如下：

- (1) 卧式研磨装置 由普通车床改制的磁性研磨装置。该磁性研磨装置包括以下几个部分： a. 磁场发生装置； b. 磁极头和磁极的振动装置；
- (2) 整流器；
- (3) 测量仪器：粗糙度仪、游标卡尺、天平、钢尺；

图 6-1 为磁性磨料在磁场中形成的磁刷；图 6-2 为磁性研磨的加工状态。图 6-3 部分被加工的工件；图 6-4 为工件在加工后的外

观图。加工过的地方非常光亮，可以清晰地映出背景上的文字，表面粗糙度值 R_a 为 $0.13\mu\text{m}$ 左右，基本达到了镜面。



图 6-1 磁性磨料在磁场中形成的磁刷

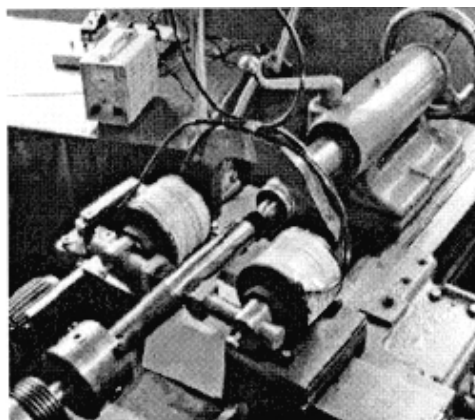


图 6-2 磁性研磨的加工状态。

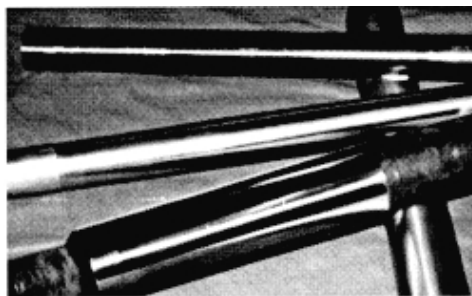


图 6-3 部分被加工的工件



图 6-4 工件在加工后的外观状况

6.2 磁性研磨加工的工艺参数的确定

在不考虑磁性磨料性能的条件下，影响磁性研磨加工的主要工艺参数有：磁感应强度 B (T)、加工间隙 Δ (mm)、工件回转速度 n (r/min)、振幅 a (mm)、振动频率 f (Hz)。

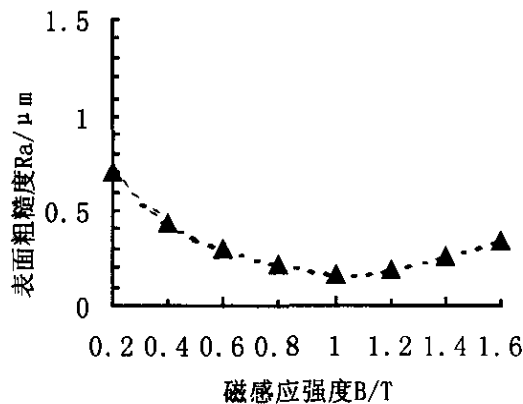


图 6-5 磁感应强度和表面粗糙度的关系曲线

6.2.1 磁感应强度 B 的确定

在磁性研磨加工中，磁场的磁感应强度是影响加工效果的主要因素之一。如图 6-5 所示，改变磁感应强度，会使工件获得不同的加工效果。由图知，当磁感应强度较小时，工件表面粗糙度值较大。这是由于磁感应强度较小，导致了磁场保持力较弱，不能形成对工件有效的磨削，因而金属表面的去除量较小。随着磁感应强度的增加，磁场保持力增大，研磨压力增大，磨削能力加强，因而金属去除量增大，表面粗糙度值下降加快，但当继续加大磁感应强度时，在磁场保持力加大的同时，磁刷的刚性增强，对表面的划伤也趋严重，表面粗糙度的值反而要增加。

另外,在确定磁感应强度大小时,要防止“磁饱和”现象的产生。例如实验中,工件为 45 钢时对磁场发生装置的磁感应强度的测量如图 6-6 曲线所示。

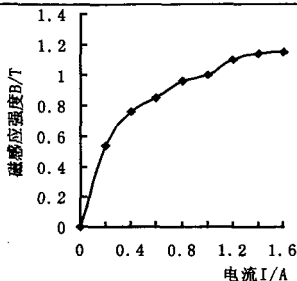


图 6-6 磁感应强度与电流大小的关系曲线

因此,根据以上加工实验结果,当加工工件为磁性材料时,磁感应强度确定为 $B=(1.0-1.4)T$ 时为宜。

6.2.2 工作间隙 Δ 的确定

图 6-7 所示的是加工间隙对磁性工件表面粗糙度的影响,由图可以看出:当加工间隙 $\Delta=3.0mm$ 时,可获得较小的表面粗糙度值。过大过小的

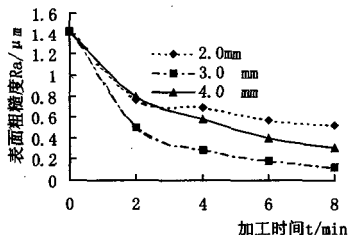


图 6-7 加工间隙对表面粗糙度的影响曲线

的工作间隙,都将使表面粗糙度值 R_a 增大。这是因为磁性磨料在加工间隙中的磁刷存在一个刚性大小的问题。在一定的工作条件下,当加工间隙较小时,磁刷的刚性较大,加工时容易在工件表面形成划痕,使工件表面的粗糙度值反而加大;而加工间隙较大时,磁刷的刚性小,柔性好,但切削能力弱,工件表面的粗糙度得不到大的改善。另外,同样条件下导磁工件比非导磁工件的间隙应略大。因此在磁性研磨加工中,加工间隙大小的选择至关重要,加工间隙选择合适可以有效提高磁性研磨的加工效率和工件最终表面质量。

6.2.3 工件回转速度 n 的确定

由于磁性研磨加工是一种微刃加工，都是依靠磨粒与工件之间的相对运动来实现加工目的。在正常的工作条件下，磁性磨料与加工表面之间的相对运动速度提高，单位时间内的相对位移量越大，加工的效率越高。因此从增大加工效率的角度来说，磁性磨料与加工面的相对运动速度越高越好。但由于回转工件转速越高，磁性磨料所受的离心力越大，当工件的转速增大到一定值后，磁性磨料就会挣脱磁场的束缚而飞散出去。另外，当转速增大时，由于切削热、涡流热的增大，导致加工表面温度升高影响了加工质量，使工件的表面机能受到破坏。

以上说明工件回转速度的选择是很重要的。为了达到理想的加工效果，实验表明工件（直径取 $d=30\sim 50\text{mm}$ ）转速选择 $n=500\sim 800\text{r/min}$ ，比较合适。

6.2.4 磁极的振幅 a 和振动频率 f 的确定

由磁性磨料的加工机理可知，磁性研磨加工过程中工件在产生圆周运动的同时，还应附加一个轴向振动（或者磁极附加一轴向振动），不但可以改善加工效果，而且可以提高生产效率。本实验所用的振动装置为磁极的轴向振动装置，它是在试验基础上确定的。振幅 $a=15\text{mm}$ ，振动频率 $f=2.3\text{Hz}$ ，因此实验条件确定为此值。

6.2.5 研磨时间的确定

工件的表面粗糙度随加工时间的增加而下降，在研磨初期下降较快，在研磨后期趋于平缓。由上面多次实验，看出对于表面要求不是很高的—般加工 3 分钟即可，而对表面要求很高的一般加工 6~9 分钟，此时工件表面粗糙度的值达到最小而基本保持不变。如果继续加工，当超过磁性磨料的寿命后，表面粗糙度值反而会增加，所以应该根据加工要求选择合适的加工时间。

6.2.6 磁性磨粒的粒径大小的确定

每一个磁性磨粒对工件的作用力与磨粒粒径大小密切相关。磨粒粒径越大产生的作用力越大,一方面,磨粒之间的保持力越大;另一方面,每个磨粒切入工件表面的深度增加,加深了切削深度。这两方面都将直接影响到被加工工件表面粗糙度值的大小。

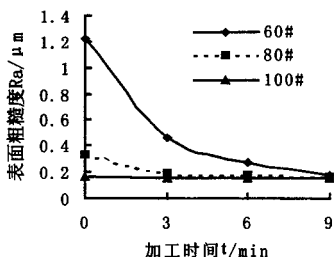


图 6-8 磁性磨粒的粒径大小对加工效果的影响

理论上来说在原始粗糙度相同且不太大时,随着磨粒粒径的减小,工件表面最终的粗糙度值也应逐渐减小。不过由图 6-8 可以看出,这一现象并不明显,特别是在原始粗糙度值较大时,即使大粒径磁性磨料的原始粗糙度相对更大时,最终加工后的 R_a 值几乎差不多。这是因为当粒径减小到一定程度后,由于切削刃已很微小,加之磁性磨料因粒径减小导致磨损严重,而出现磨料与铁基体的分离现象,使工件的表面粗糙度值不再下降,有时反而上升。根据实验结果表明,一般选取磁性磨料粒度为 60#,在表面质量要求较高时也可接着用 80#的进行加工。

6.2.7 结论

综上所述,磁性磨料特性的测试实验条件选取如表 6-1, 6-2 所示。

表 6-1 磁性研磨技术在加工磁性材料时的工作条件

I (A)	Δ (mm)	n (r/min)	a(mm)	f(Hz)
1.0	3.0	610	15.0	2.3

表 6-2 磁性研磨技术在加工非磁性材料时的工作条件

I (A)	Δ (mm)	n (r/min)	a(mm)	f(Hz)
1.2	2.8	610	15.0	2.3

在确定磁性研磨工作条件的实验过程中,为了保证实验结果的准确性,所用磁性磨料的参数完全相同。同时,本实验的工艺参数是在一定的工作条件下确定的,当改变加工要求和工件的初始条件时,工艺参数要随之发生变化。

6.3 烧结磁性磨料的加工特性

6.3.1 原料不同的磁性磨料其加工特性测试实验

据磨料手册及相关文献介绍,目前常用的磨料为 Al_2O_3 、 SiC 、 WC 、 B_4C 等,而其中 Al_2O_3 、 SiC 这两种材料价格便宜,货源充足,经济性好。一般情况下, Al_2O_3 为原料制得磁性磨料适合加工钢材,因为 Al_2O_3 不会与铁和碳起化学反应。但它不宜加工硅酸盐材料(如玻璃、陶瓷、混凝土、耐火材料等)、铸铁或钛。因为硅或硅酸盐会与氧化铝在磨削高温下发生反应。 SiC 为原料制得磁性磨料的磨削适用性恰好与氧化铝相反。碳化硅不宜用于磨削钢材,因为 $SiC+Fe \rightarrow FeSi+Fe_3C$ 。然而,碳化硅能较好地研磨铸铁(特别是 Si 、 C 含量的铸铁)。这是因为铸铁中有较高的碳含量和硅含量,它们以 Fe_3C 和 $FeSi$ 的形式存在,降低了碳化硅与金属之间发生反应的可能性。所以碳化硅适合于磨削许多非金属,如玻璃、陶瓷等,也适合于磨削某些有色金属,如锌、铜及合金、硬质合金等。因此课题研究中选择它们作为磨料材料。为了定性分析两种磨料研磨性能的优劣,进行了下面的实验。

工作条件如表 6-1、6-2 示。工件参数如表 6-3 所示。图 6-9(a)为氧化铝(325 目)所制磁性磨料的加工曲线。(b)为碳化硅(325 目)所制磁性磨料的加工曲线。

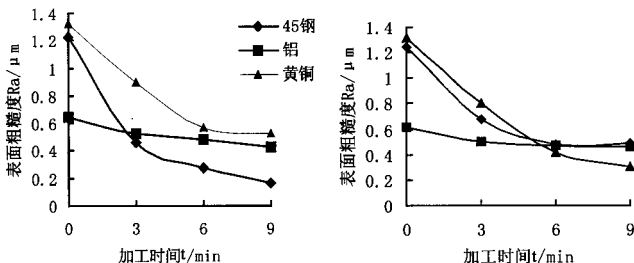


图 6-9 原料不同的磁性磨料的加工特性

(a) 氧化铝磁性磨料

(b) 碳化硅磁性磨料

表 6-3

工件参数

工件材料	45 钢	铝	黄铜
工件直径	$\phi 30 \text{ mm}$	$\phi 35 \text{ mm}$	$\phi 32 \text{ mm}$
原始粗糙度	$1.22 \mu\text{m}$	$0.64 \mu\text{m}$	$1.32 \mu\text{m}$

由图 6-9 可以看出, 加工 45 钢和铝时 Al_2O_3 系列磨料的磨削性能好于 SiC 系列磨料, 而对于黄铜来说, SiC 系列磨料优于 Al_2O_3 系列磨料。为此, 磨料材料应根据被加工工件材料的不同分别选择。

6.3.2 不同配比的磁性磨料的加工特性测试实验

工作条件同前。试件为上面所用的 45 钢。实验结果见图 6-10 所示。

磁性磨料的主要成分是纯铁粉和磨料粉, 而研磨压力的大小由纯铁粉含量决定。组成中若纯铁粉的含量过多, 将使研磨压力的增大, 造成表面粗糙度值的增大而降低了加工的表面质量; 如果纯铁粉含量较少, 研磨压力也减小, 会使研磨时间增加, 此时磨料含量相对增多, 可以得到较小的表面粗糙度。但若纯铁粉含量太少时, 由于磁场保持力的大幅减小, 使磁性磨料飞离加工区域而失去研磨能力。

由实验曲线图 6-10 可以看出, 随着磁性磨料中铁的重量百分比的增加, 表面粗糙度的变化趋势并不是特别明显。不过从分析看出配比为

4:1 的要略优于 3:1 的, 而且从相关的文献看也选 4:1 的配比为好。

6.3.3 烧结温度对磁性磨料加工特性的测试实验

工作条件、工件同上面的一样。

由图中的曲线可以看出, 当保温时间一样而烧结温度在 1210℃、1200℃、1180℃时所制磁性磨料的加工效果都比较好。1200℃时制得磁性磨料加工效果略好于其它两种, 而且它比 1210℃的废料少; 1180℃虽然经济性比较好, 但加工效果不如其它两种好。从实验中发现烧结的温度越高, 保温时间越长, 铁的迁移和扩散越充分, 坯体中的孔隙越少, 对磨料的包裹也越好, 结合的性能也越好, 因而烧结的温度越高, 保温的时间越长, 磁性磨料的耐用度也越高。

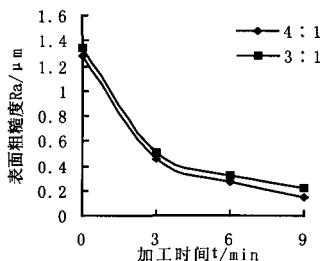


图 6-10 不同配比的磁性磨料的加工特性

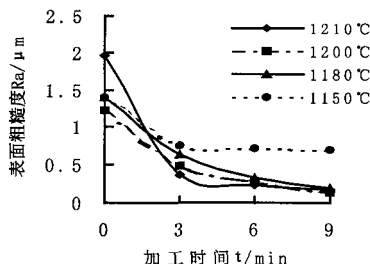


图 6-11 不同的烧结温度对磁性磨料加工特性的影响

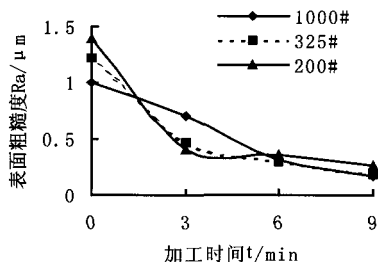


图 6-12 磨料粒度对磁性磨料加工特性的影响

6.3.4 磨料粒度对所制磁性磨料加工特性的影响

工作条件、工件同上面的一样。

图 6-12 中, 三种磁性磨料的组成中纯铁粉的粒度是相同的, 磨料的粒度是不同的。由图中可以看出, 磨料越细, 最终工件表面的质量越好, 但磨料细时加工的表面原始粗糙度值不能太大, 因为它比粒度大的更是微量切削, 所以下降的幅度没粒度大的更明显。以上说明所用的磨料应根据加工的要求而定, 对最终表面粗糙度值要求更小的应该选用粒度更细的磨料所制取的磁性磨料。

6.4 烧结磁性磨料与粘结磁性磨料之比较

6.4.1 烧结、粘结两种制备工艺所制磁性磨料加工特性比较

工作条件、工件同上面的一样。

图 6-13 所示为烧结、粘结两种工艺所制磁性磨料的加工特性比较。从实验结果可以看出, 烧结制备的磁性磨料要优于粘结法制备的磁性磨料。烧结制备的磁性磨料对工件进行加工时, 不仅可以达到很低的粗糙度值 (目前最小可为 $0.13\mu\text{m}$), 而且加工的表面比较光亮没有污染色, 并且烧结所制的磁性磨料的使用寿命比较长, 一般加工导磁材料时为 18 分钟左右, 加工非导磁材料时为 25 分钟左右; 同一条件下, 粘结法制备的磁性磨料对工件加工时, 可达到的理想粗糙

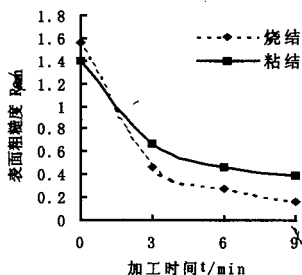


图 6-13 烧结、粘结两种工艺所制磁性磨料加工特性比较

度值仅为 $0.3\mu\text{m}$ 左右, 由该磨料加工的表面常常因加工发热粘结剂熔化而造成表面发黑被污染, 而且此时还伴有熔化的粘结剂气味, 对空气也造成一定的污染, 这种情况特别是在加工转速高和加工时间较长时更易出现, 当这一现象出现时, 磁性磨料的磨削能力下降、寿命缩短, 一般情况下它的最长寿命为 15~18 分钟。

6.4.2 烧结磁性磨料与粘结磁性磨料的成本核算比较

目前, 国外多采用烧结法制备的磁性磨料, 虽然可以实现大批量生产。但是, 由于受多种因素的影响, 磁性磨料的成本较高, 在日本每公斤高达 1 万日元, 折合 800 元人民币。而国内至今尚没有完善的磁性磨料生产工艺, 这在很大程度上制约了磁性研磨技术在更大范围内的推广应用。而本课题组研制的粘结磁性磨料正好填补了这方面的空白, 不过因其当前粘结剂性能的制约, 该法制的磁性磨料尚有不足, 所以该课题又开发了烧结法制备的磁性磨料。根据前面的实验已经证明, 该课题开发研制的烧结磁性磨料完全可以满足生产实际的需要, 已经获得了令人满意的加工效果。这也说明了烧结法制备磁性磨料的工艺是比较合理的, 为了使这种磁性磨料能够尽快地进入生产应用阶段, 满足磁性研磨加工技术的需求。首先必须进行成本核算和经济性分析。

1) 磁性磨料的成本核算

产品的成本核算方法很多, 但一般情况下各企业厂矿均不予公开。因此, 这方面的资料很少。根据会计学原理, 通常产品的生产成本原则上包括五个部分:

- (1) 材料。包括构成产品实体的各种原料及主要材料, 以及虽不能构成产品实体, 但有助于产品形成的各种辅助材料;
- (2) 固定资产折旧。指工艺过程用机器设备等的折旧;
- (3) 水电费。指工艺过程用机器设备的耗水耗电耗气等费用。

(4) 工资及福利费。指直接参与产品生产的生产工人的工资及福利费；

(5) 管理费用。指因管理生产和为生产服务而发生的各种费用。

本文根据烧结磁性磨料在研制过程中所使用的材料、设备和能源消耗等项目，进行成本的粗略分析和计算。这一方面的工作还有待进一步的深入调查研究。

根据以上讨论，烧结法和粘结法制备磁性磨料所需的材料、设备和能源消耗项目一览表对比如表 6-4 所示。

根据表 6-4 所列项目进行初步计算，然后将其他各项折合成一定的系数计入产品生产成本，得出如下结果。烧结磁性磨料的生产成本为 240 元/千克左右；粘结法磁性磨料的生产成本为 180 元/千克左右（由该课题已得的参考数值）。该成本计算只是粗略的估算，仅供参考。

表 6-4 制备磁性磨料所需的材料、设备和能源消耗项目一览表

产品制作方法			粘结法	烧结法
成本项目				
1	原 料	纯铁粉	√	√
		磨料粉	√	√
		粘结剂	√	×
		添加剂	√	√
2	设 备	称量装置	√	√
		混合设备	√	√
		压制和等静压设备	×	√
		烧结设备	×	√
		粉碎设备	√	√
		筛选设备	√	√

3	水 电 费	混料工序用电	√	√
		搅拌工序用电	√	√
		压制与等静压工序用电	×	√
		烧结工序用电	×	√
		破碎工序用电	√	√
		加工中用气氛	×	√

2) 磁性磨料的经济性分析

任何一种产品要获得良好的经济效益,不仅要考虑产品的生产成本,同时要考虑产品在实际生产中消耗量的大小,进行产品的单件加工成本费用核算。因此有必要就磁性研磨加工中对磁性磨料的损耗加以探讨,确定研磨单件产品时所需磁性磨料的成本费用。

实例 1 加工标准试件,加工部位外圆表面。

零件材料 45 钢, $\phi=30\text{mm}$, $L=260\text{mm}$, 加工长度 $l=80\text{mm}$, $n=610\text{r/min}$, $a=15\text{mm}$, $f=2.3\text{H}_2$, $\Delta=3\text{mm}$, $t=3\text{min}$ 。

工件原始表面粗糙度 $Ra=1.1\mu\text{m}$, 加工后工件表面粗糙度 $Ra=0.5\mu\text{m}$ (达到要求) (同条件下,用烧结的磁性磨料加工后的值略低于 $0.5\mu\text{m}$)。

磁性磨料取量为 $g=10\text{g}$, 粘结磁性磨料可以加工零件 5 件, 烧结磁性磨料可以加工零件 6 件, 那么研磨单件产品时所需磁性磨料的成本费用为:

烧结磁性磨料:

$$Q = \frac{240 \times 10 / 1000}{6} = 0.4 \text{ 元/件};$$

粘结磁性磨料:

$$Q = \frac{180 \times 10 / 1000}{5} = 0.36 \text{ 元/件};$$

实例2 加工一个管件，加工部位外圆表面。

零件材料铝合金， $\phi=35\text{ mm}$ ， $L=380\text{mm}$ ，加工长度 $l=80\text{mm}$ ，管厚

$\Delta d=2\text{mm}$ ， $n=610\text{r/min}$ ， $a=15\text{mm}$ ， $f=2.3\text{Hz}$ ， $\Delta=3\text{min}$ ， $t=3\text{min}$ 。

工件原始表面粗糙度 $Ra=1.1\text{ }\mu\text{m}$ ，加工后工件表面粗糙度 $Ra=0.5\text{ }\mu\text{m}$ (达到要求) (同条件下，用烧结的磁性磨料加工后的值略低于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$)。

磁性磨料取量为 $g=20\text{g}$ 。粘结磁性磨料可以加工零件 5 件，烧结磁性磨料可以加工零件 7 件，那么，研磨单件产品时所需磁性磨料的成本费用为：

烧结磁性磨料：

$$Q = \frac{240 \times \frac{20}{1000}}{7} = 0.69 \text{ 元/件。}$$

粘结磁性磨料：

$$Q = \frac{180 \times \frac{20}{1000}}{5} = 0.72 \text{ 元/件；}$$

根据上述结论，本课题开发的烧结磁性磨料在加工导磁材料时，比同一条件下，用粘结法制得磁性磨料加工时所得 Ra 效果略高，尽管成本略高一点；在加工非导磁材料时，两种方法制得磁性磨料加工费用较加工导磁材料偏高，不过烧结磁性磨料比粘结磁性磨料加工费用低，且同条件下，加工所得 Ra 略低。

当然，上面磁性磨料经济性的分析只是粗略的，实际上对于加工单件产品时所需磁性磨料的成本费用与所加工产品的加工表面大小有关，如果在同一加工条件下加工几个不同的产品，所要加工的表面积越小，该单个产品所耗磁性磨料的成本越低。虽然以上只是粗略的估计，但是也可以看出在加工质量要求高时，烧结磁性磨料要好于粘结磁性磨料。有关这一方面的详细内容有待在今后的实际生产中不断总结和完善。

6.5 小结

由于磁性研磨本身属于精密表面光整加工，它是微量切削，金属去除厚度很微小，一般在 $1\mu\text{m}$ 数量级以下，有时甚至只有 $(0.2-0.3)\mu\text{m}$ 或更小，因此在实际生产中，用金属去除量 G 的大小作为衡量磁性磨料加工效果的好坏，操作起来很不方便，而且不适合生产实际状况的需要，所以上面在测试烧结磁性磨料加工特性时都没有测试金属去除量，而主要是用加工质量（表面粗糙度）来衡量加工效果的好坏。

本章通过实验对影响磁性研磨加工的几个因素进行了深入的探索和研究，并找到了一些规律，在满足这些因素下通过对烧结磁性磨料进行实验可以看出烧结制备的磁性磨料是可行的，这些从烧结所制的磁性磨料与粘结所制的磁性磨料比中也可以看出，烧结法制备的磁性磨料在加工质量、使用寿命上都优于粘结法制备的磁性磨料。因而烧结法制备磁性磨料为制备性能优良的磁性磨料开辟了很好的道路。

第七章 结论

本文所完成的研究工作是针对当前光整加工存在的问题及其发展趋势而开展的,是山西省留学归国人员基金资助项目(批准号:101033)和山西省自然科学基金的部分研究内容。作者在导师张银喜教授的悉心指导下,进行了大量的实验和理论分析工作,对磁性研磨加工、烧结制备磁性磨料及其加工特性进行了系统而深入的研究,取得了可喜的研究成果。

磁性研磨加工以其良好的柔性、自适应性、自锐性等突出的加工优点,在平面、曲面的精加工尤其是光整加工方面表现出了巨大的优势。目前,磁性研磨加工的推广应用在很大程度上仍然受到磁性磨料的制约,具有高的性能价格比的磁性磨料的制备,仍然是迫切需要解决的主要问题。为了解决磁性磨料制备技术的难题,本文在阅读大量文献的基础上,通过理论分析和大量的实验,对磁性研磨加工技术和烧结制备磁性磨料进行了大量有益的工作。概括如下:

(1) 从磁性研磨的机理入手,深入研究了与磁性磨料加工效果都有关的研磨压力和磁性磨粒的磨削机理。这为进一步了解磁性磨料及其性能、制备磁性磨料打下基础。

(2) 在收集并研究了制备磁性磨料的几种方法后,提出了烧结制备磁性磨料。为此作者认真研究了与此相关的粉末冶金知识和烧结理论,从理论上揭示了原料粉末的特性和粉末冶金生产工艺中各个环节对烧结而成的磁性磨料性能的影响,为如何确立制备方案提供了理论依据。

(3) 在此基础上顺利地开发出烧结磁性磨料,填补了我国在这一领域的空白。创造性地研究出烧结磁性磨料的工艺规程和主要影响因素。影响磁性磨料烧结质量的主要因素是:烧结温度、保温时间、制坯压力

等。

(4) 在对烧结磁性磨料进行加工特性进行分析研究的同时,对烧结磁性磨料和粘结磁性磨料进行了研究比较。研究得出烧结磁性磨料耐用度高、加工效率和加工得到的表面质量较好,但成本要略高;粘结法制的磁性磨料结合强度低、容易破碎脱落,使用性能差,但成本低。

(5) 本文通过大量的实验,找出了影响磁性磨料加工效果的各种因素对加工质量和效率的影响规律,为磁性研磨加工技术的推广应用获得了有实际参考价值的工艺参数。

通过本课题的理论与实践环节的研究,得出了上述一些有价值的结论,为实际光整加工的广泛应用提供理论依据和实践基础。在磁性磨料制备技术取得突破性进展的情况下,磁性研磨技术将更进一步使产品质量得以提高,制造成本得以降低。另外,由于本课题的研究内容多,范围广,同时还受到作者知识面、经验能力等影响,以及实验设备、测试仪器等制约,研究过程中难免存在一定的局限性,而且还有许多问题有待进一步研究。作者认为与本课题相关的研究还需进一步努力:

(1) 深入研究粉末的性能以及各制备工艺与烧结磁性磨料的性能的具体关系。

(2) 进一步分析研究烧结温度、升温速度、保温时间、降温速度对烧结磁性磨料的性能影响关系。

(3) 进一步完善磁性磨料系列,开发新品种。形成批量生产,投放市场,以满足磁性研磨加工技术发展的需要。

参考文献

- [1]杨世春等. 表面质量与光整技术.北京. 机械工业出版社. 1999.12
- [2]王盘鑫. 粉末冶金学. 北京. 冶金工业出版社. 1997.5
- [3]王秦生. 金刚石烧结制品. 北京. 中国标准出版社. 2000.11
- [4]张惠民. 普通磨料制造. 北京. 中国标准出版社. 2001.2
- [5][苏]H.M.费多尔钦科. 粉末冶金原理. 北京. 冶金工业出版社. 1974.5
- [6][日]松山芳治等. 粉末冶金学. 北京. 科学技术出版社. 1978.4
- [7][波兰] J.卡兹马来科. 切削、磨料及腐蚀加工原理. 北京. 机械工业出版社.1985.12
- [8]果世驹. 粉末烧结理论. 北京. 冶金工业出版社. 2002.6
- [9]郑林庆. 摩擦学原理. 北京. 高等教育出版社. 1994.11
- [10]进村武男. 磁气研磨法 研究. 精密工学会志.1986. (52): 851
- [11]陈敏. 磁性研磨技术的研究. 机械工艺师. 1996.2:20-21
- [12]全永昕等 .摩擦磨损原理. 浙江大学出版社. 浙江. 1988.
- [13]李学全. 磁性磨料制备技术. 金刚石与磨料磨具工程. 1999.5 (113): 20-22
- [14]赵玉刚等. 新型的复杂曲面磁粒光整加工机床. 机械工程学报. 2000.3(36):100-103
- [15]张雷. 磁性研磨加工技术. 电加工. 1998(1):38-43
- [16]万亚兰. 镜面光整加工中磨料轨迹的分析研究. 华中冶金学院学报. 1996.13(4):333-336
- [17]廖月明. 激光烧结磁磨粒新工艺. 电加工. 1998(3):38-40
- [18]郭燕莹. 磁性研磨的加工特性. 太原工业大学学报. 1997(3):92-95
- [19]王明智等. 真空-保护气热压烧结及设备. 金刚石与磨料磨具工程. 2000. (115): 12-16

- [20]方建成等. 电化学磁粒光整加工实验. 制造技术与机床. 2000(12):34-35
- [21]Geeng-Wei Chang a, Biling-Hwa Yan a,*, Rong-Tzong Hsu b.
Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives.
MACHING TOOLS& MANUFACTURE. 42(2002) 575-583
- [22] Hitomi Yamaguchi*, Takeo Shinmura. Study of an internal magnetic abrasive finishing using a polerotation systemDiscussion of the characteristic abrasive behavior. PRECITON ENGINEERING. 24(2000) 237-244
- [23] V. K. Jain., Prashant Kumar, P. K. Behera, S. C. Jayswal. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process. WEAR. 250(2001)384-390
- [24]陈红玲. 磁性磨料的开发研制及其加工特性的实验研究. 硕士学位论文. 太原. 太原理工大学. 2000. 8
- [25]赵玉刚等. 磁粒光整加工技术的应用与发展. 山东工程学院学报. 2002. 3. vol. 16. No. 1
- [26] J. L. GUICHARD, O. TILLEMENT, A. MOCELLIN. Preparation and characterization of alumina - iron cermets by hot-pressing of nanocomposite powders. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 32 (1997) 4513 - 4521
- [27]T. Shinumura. K. Takazawa. E. Hatano. Study on Magnetic Abrasive Finishing-on process principle and a few Finishing Characteristics. J. OF jspe. 1986. 52(5):851-857
- [28]T. Shinumura. K. Takazawa. E. Hatano. Study on Magnetic Abrasive Finishing-Effects of Various Types of Magnetic Abrasive on Finishing characteristics. Bull. of JSPE. 1987. 21(2):139-141
- [29]Kiymby M. D. Magnetic Abrasive on Finishing. Metal Finishing. 1993.

(7):21

[30]T.Shinumura. Study on Magnetic Abrasive on Finishing- Characteristics of Finishing Surface. 1987. 53(11):1791-1793

[]Nalivka C D et al. powder Materials for Magnetic Abrasive Treatment. Poroshkovaya Meatllurgiya. 1976. 15(12):63

[31]Kumagi K, Kamia O, Morita T. Magnetic effects on grinding Of ferromagnetic materials-effect of magnetic field on stock removal and grindind force. JSEP 1992, 58(10):1679-1683

[32]Chan C L, Mazumder J, Chen M M. aterialsscience and technology, 1987(3):306-311

致 谢

本文的选题、课题研究及论文的撰写工作是在导师张银喜教授的悉心指导下完成的。导师宽广渊博的知识、严谨的治学态度、开拓创新的思想、认真负责的工作态度给我留下了深刻的印象，导师三年来的谆谆教诲必将使我终身受益。值此谨向导师致以崇高的敬意和衷心的感谢。

在论文的进行过程中得到了杨世春教授、汪鸣铮教授、郭燕莹教授、王明珠教授、杨胜强教授、陈红玲副教授、曹明让副教授以及丁艳红老师、姚新改老师的指导和帮助，提出了许多有参考价值的建议。在此向各位老师致以最诚挚的谢意。

在课题的实验过程中，得到了许永娃、张峪生、崔建伟等师傅以及安家宪老师的无私帮助，他们给了我不少宝贵的启迪，在此论文完成之际特向他们表示深深的谢意。同时也要感谢王兴祥、卫俊峰等同学给予的帮助。

在实验进行中，山西京宇磁性材料有限公司为本课题提供了实验设备，使我的课题得以顺利进行，在此向该厂的领导和师傅表示感谢。

衷心感谢所有在生活和学习上给予我关怀和帮助的各位老师和同学，特别是我的家人。

作者在攻读硕士期间发表的论文

1. 活塞裙部中凸变椭圆异型面磁性研磨新工艺的研究. 制造自动化技术研究与应用（全国高等学校制造自动化研究会第十届学术年会论文集），成都，2002，5（第二作者）
2. 强永磁材料钕铁硼在磁性研磨中的开发研究. 山西机械，山西，2003，1（第一作者）