

内部资料
注意保存

国外金属粉末锻造发展概况

新金属材料编辑部

1973 4 · 北京

金属粉末锻造是六十年代中期以来开始引人注意的一项新工艺。它为粉末冶金工业的迅速发展提供了可能性。近年来，国外发表了许多有关粉末锻造的报告，目前这项工艺在某些国家已开始进入工业化阶段。

我们汇编了国外有关粉末锻造的一些资料，初步介绍粉末锻造的概况、工艺、材料性能和应用，同时也和普通锻造工艺及锻材性能作了一些对比。

由于我们的水平有限，本资料中一定会有不少错误和不当之处，请读者批评指正。

編輯者：新金属材料编辑部
出版者：
地址：北京西直門外太平庄 13 号
資料编号：73-1

代銷单位：中国书店机电产品样本代销处
地址：北京市东城区瑞金路 357 号
印刷者：北京印刷七厂

工本費：0.66 元（函购：0.66 元）

金属粉末锻造工艺

葛昌纯

自六十年代中期以来,粉末锻造工艺开始引起人们很大的注意。它为粉末冶金工业的迅速发展提供了广泛的可能性。几年来,国际上发表了很多关于粉末锻造工艺的报
告,在有的国家,这项工艺已开始进入工业化阶段。本文仅就粉末锻造工艺的基本概念、主要工艺参数的研究、及其发展趋势作一扼要的介绍。

一、粉末锻造和传统粉末冶金工艺的比较

传统的粉末冶金工艺能制造尺寸公差小和形状复杂的制品,因而近年来发展较快,图1是近十余年来英国铁粉消费量的增长情况。然而,如果与锻造工业所用的熔炼钢坯消费量相比,那是微不足道的,见图2。其原因是粉末冶金制品的发展受到三方面的限

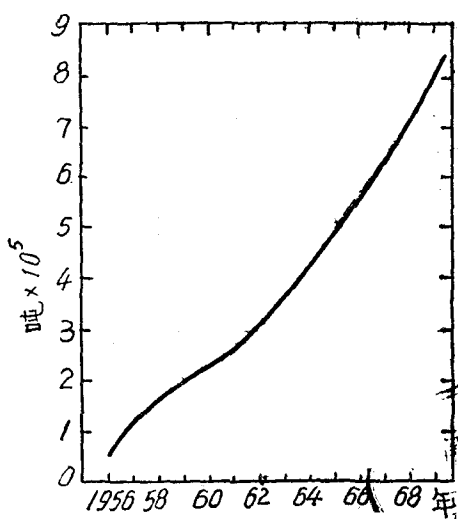


图1 英国烧结制品所需铁粉近年来的近似消耗量

制:(1)粉末价格较高;(2)模压成型使制品形状受到一定限制;(3)物理性能显著低于一般锻造金属。

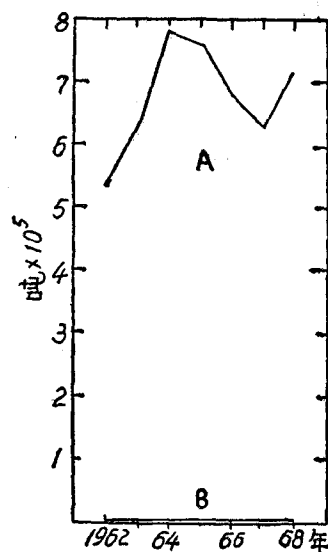


图2 按材料消耗比较落锤锻工业(A)与烧结制品工业(B)的规模

粉末价格将随着工业规模的扩大而下降,形状限制的问题只能得到部份解决,这个问题对于传统的锻造工业也存在。而物理性能低的问题可以通过采用粉末锻造工艺得到满意的解决。粉末冶金结构零件一般只用于低负荷使用条件的状况由于粉末锻造工艺的发展正在迅速改变。

表1为用传统粉末冶金工艺制得的烧结铁基材料的一般性能范围。其中某些是采用合金化和二次压制烧结工艺的。显而易见,随着强度增高,塑性显著下降。除非采用费用高昂的工艺。

限制一般金属烧结制品的应用,使其不

能在高负载条件下应用的基本原因是制品中有残留孔隙度的存在。图3表示对一般铁粉来说，机械性能和烧结后密度之关系。只有当密度接近于100%时才有可能获得良好的塑性。而且，孔洞在循环应力作用下起着裂纹发源点的作用，因而一般烧结制品的疲劳性能是不高的。因此，为使粉末制品能在高负载条件下应用，必须降低孔隙度，最好能完全消除。

烧结铁材料的性能范围 表 1

材 料	处 理	强 度 牛顿/毫米 ²	延伸率 %
Fe	压制和烧结	120~200	5~12
Fe-Cu	压制和烧结	180~350	2~5
Fe-Cu	两次压制 两次烧结	230~400	1~5
Fe-Cu-C	"	500~750	1~2
Fe-Cu-Ni-C	"	450~550	2~5
Fe-Cu-C	渗 浸	370~1200	3~20

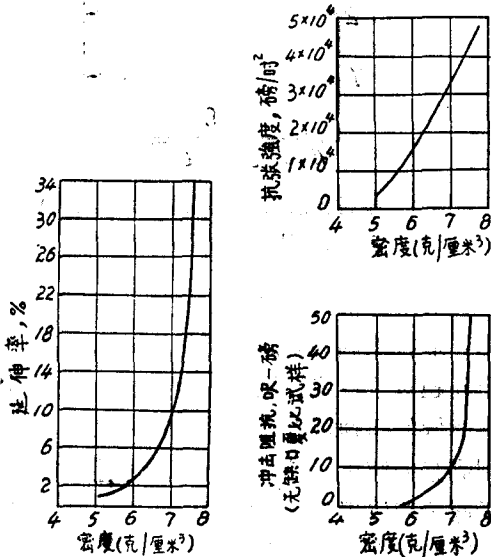


图 3 铁粉烧结密度和性能的关系

长期以来热加工被认为是从任何金属中消除孔隙度的可靠途径。粉末冶金传统的热压工艺也是热加工的一例，但费用昂贵，操作慢而麻烦，不适于大量生产结构零件。而粉末锻造提供了一个满意的替代办法。粉

末锻造工艺的基本操作程序是：先把粉末压制成一预成型坯，在保护气氛下烧结和加热到热加工温度（常常烧结和锻前加热结合为一个工序），很快转移到锻压模子，在炉外进行热锻压（见图4）。这工艺和传统的锻造工艺所不同的是：采用了粉末预成型坯以及操作在闭模中进行，而不是在有余料溢出的通常开模中进行。部件脱模后淬火或在控制气氛中冷却。和传统的粉末冶金工艺所不同的是：粉末锻造制品的性能和尺寸主要由最终的热锻压操作所决定，而不是由粉末成型这一工序的操作所控制。

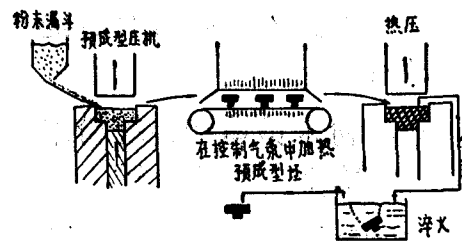


图 4 粉末锻造流程示意图

表2列出采用粉末锻造后性能提高的显著效果。这可以从应力应变曲线的比较中找到答案。图5中表示，由相同粉末制得的一般烧结件和粉末锻件的应力—应变曲线以及三种不同制粉方法制得的粉末由于其成份差异反映在粉末锻件的应力—应变曲线形状的区别。

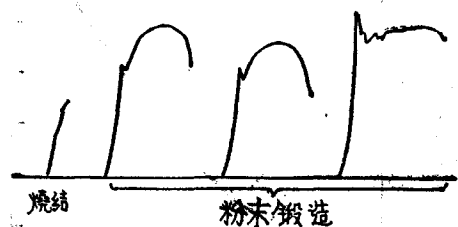


图 5 粉末锻造与烧结铁试样(三种粉末)之应力—应变曲线

和一般烧结材料不同的是，粉末锻造材料的性能主要取决于与组织和成份有关的冶金因素而不是孔隙度的状况。

粉末锻造材料的性能范围

表 2

材 料	碳, %	强 度 牛顿/毫米 ²	延 伸 率 %	面 缩 率 %	20°C冲击值 磅·呎
Fe	0.01~0.04	350~400	30~46	45~75	10~110
Fe	0.35~0.45	530~660	20~31	30~55	5~35
Fe-Ni-Mo	0.30~0.35	750~1000	12~20	45~50	25~35
Fe-Mn-Mo	0.30~0.35	620~1000	9~22	20~55	15~40
Fe-Mn-Ni-Cr	0.03~0.2	400~900	9~30	15~60	8~80

注: 1 牛顿/毫米² = 145 磅/吋² = 0.1 公斤/毫米²

1 磅·呎 = 0.138 公斤·米

二、预成型坯的原料选择 和加工工艺

预成型坯原料的选择是影响成品性能的首要问题。粉末的以下一些特征对预成型坯和成品的性能影响很大:

(一) 粉末纯度和杂质的状况对成品塑性和冲击韧性有显著影响。有些粉末生产方法在粉末中造成非金属夹杂物较多, 例如由铁矿或氧化铁皮用还原法制得的铁粉就是如此。粉末中包含有一些还原不了的氧化物和其他杂质, 在以后加工过程中仍然保留着。用雾化法或电解法制得的粉末纯度较高, 夹杂物较少。图 6 是两种粉末制得的纯铁锻件, 其冲击韧性和密度的关系。雾化法制得的粉末在成品密度接近理论密度时, 冲击韧性显著上升, 而由海绵铁粉制得的锻件由于含有相当数量的夹杂物而显示不出这种改进——没有这种韧性随密度接近理论值而显著上升的特征, 粉末锻造就失去了意义。因此, 采用纯度较高的粉末是粉末锻造的一个基本要求。

(二) 粉末粒度分布对预成型坯和成品性能也有相当影响。这方面的工作做得不多。图 7 表示粉末粒度大小对粉末锻件韧性的作用。虽然总氧含量和最终晶粒大小是相似的, 但在最优热处理温度 760°C 处理后, 由较小粒度制得的试样具有较高冲击韧性, 特别对于较低锻造温度者。造成这种差

别的可能原因是残留氧化物的分散特征不同。对屈服强度和抗张强度也得到类似结果。

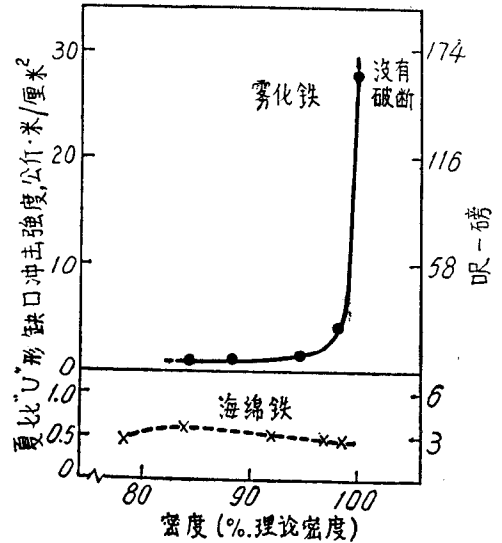


图 6 两种不同类型的铁粉锻件的冲击韧性与密度之关系

(三) 粉末合金化: 粉末锻造制品一般用合金而不是纯金属。如把金属粉末机械混合, 则需要经高温烧结 (往往需要很长的时间) 才能使扩散完全, 而形成真合金。而预合金粉末的缺点是由于单个颗粒强度增加而使压制性下降。但这对于粉末锻造预成型坯说来已不再是什么缺点了。预成型坯只须较低密度, 致密化由热锻来完成。其次, 预合金粉只需较低烧结温度, 较短烧结时间, 与热锻结合在一起, 省去锻前加工程序, 则在

经济上是很利。

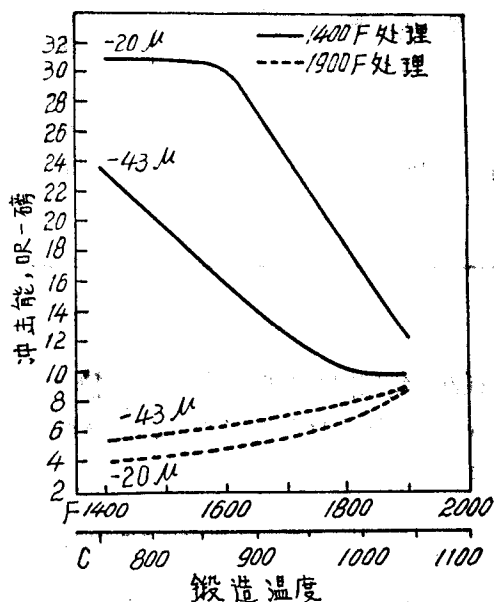


图 7 两种不同的钨颗粒尺寸的材料，其冲击韧性跟锻造温度的关系。材料或是在 1400°F (760°C) 时效 8 小时，炉冷，或是在 1900°F (1038°C) 固溶处理 6 小时，在流动氢中淬火

因此，对铁基合金预成型坯采用高纯度预合金的雾化粉末是合理的。已发展了专用于粉锻制品的预合金粉末的特殊品种。

预成型坯的成型可以采用三种方法：模压、等静压、泥浆浇注。在粉锻初期发展阶段，模压是最通用的，但它的缺点是：单向压力和脱模问题限制了压块形状和高度/直径比值；模压时通常需要在粉末中混入润滑剂，往往导致成品性能下降以及为去除润滑剂而增加烧结费用。而等静压可制较复杂、较大、压制密度较均匀的预成型坯，可不用润滑剂，模具可较快制得，价格也较低，有利于缩短工作周期。等静压方法成型压力较低和尺寸公差较大的缺点对预成型坯的成型倒是无关紧要，但生产率较低，自动化较困难，限制了它的广泛应用。有待于设备设计的不断改进。对一些雾化预合金粉末来说，等静压成型可获得强度较高的压块，这一点

是重要的。泥浆浇注对于用压制性和压坯强度差的粉末制复杂形状的坯件值得重视，目前对一些超级合金的球形预合金雾化粉末正在研究采用。

关于预成型坯的烧结问题，与传统的烧结工艺相比，有以下几点特点：

1. 通常用以烧结结构零件的是连续带式炉，包括用以烧除润滑剂的预热区，用以烧结的加热区和冷却区。有两类预成型坯需要在炉子设计上作必要的修改：一类是采用不加润滑剂的成型工艺所制得的坯料，对此预热区可大大缩短，只要保证合理的加热速度就行；另一类是比通常的粉冶零件更大而重的坯件，对此应采用较大的炉子，较长的烧结时间，减少装料量以适应传送带强度或者改用推入式炉。

2. 技术上合理经济上有利的流程无疑是把烧结和锻前加热结合在一起。坯件烧结在锻压机附近进行，只须把坯件冷却到锻前加热所要求的温度即可锻压。在炉子设计上只需把冷却区重新设计即可。炉子和锻压机的生产能力必须相适应。

3. 工艺进一步改进的一个可能是把烧结温度降低，使接近于锻造所需之温度。铁基材料的烧结通常是在 1120~1150°C，粉末预成型坯的锻造可以在比上述温度低的温度下进行。降低烧结温度可以通过采用预合金粉和控制烧结气氛来达到。后者对碳钢特别重要，有一定碳化位势的气氛有利于烧结温度的降低。

4. 在粉锻工艺中采用感应加热正在被广泛研究中。它的可能的优点是：用通常炉子不能很经济地达到的很高温度用感应加热可以容易地达到，这对采用混合原始粉以制备复杂合金制件是必要的；加热时间很短；节省占地面积；减少设备投资和维修费用；降低对气氛的要求。但对在成型前加润滑剂的坯件，需要采用两段加热，在低温炉中预加热以去除润滑剂，然后把坯件再送入感应

炉中进行烧结。

美国的辛辛纳特 (Cincinnati) 半工业自动生产流程就是在一改进型的 600 吨机械压力机边上配以两组感应加热系统。

但最近有资料报导,采用感应加热制得的粉锻制品其冲击韧性较低。对此应进一步研究。

三、预成型坯的设计和控制在

虽然锻造工序起着使材料密实化、控制成品形状和尺寸的主要作用,但锻造效果在很大程度上取决于预成型坯的设计是否合理。而预成型坯的基本问题是坯件的形状和密度问题。

首先争论的一个问题是:究竟采用不成形的“块状”预成型坯还是采用形状近似于成品的预成型坯?前者形状细节在锻造工序中形成,材料流动量较大,最好用低密度坯件,以减少锻造时的阻抗。这种方法的优点是预成型坯的制造比较容易,便宜。但存在两个问题:(1)在锻造时有时有开裂的趋向。在锻造变形较早阶段发生的裂纹可以在锻造过程中焊上。(2)在锻前加热过程和锻造过程中坯件被内氧化,对于碳钢,造成脱碳。这可以通过在加热时采用适当的保护气氛的方法来避免。当坯件由炉内刚取出后,保护气氛能保留在坯件空隙中,如锻造很快进行,保护气氛能保护坯件内部和表面不受氧化,因保护气氛由内部逸出在坯件周围形成一保护外套。

采用较低密度的预成型坯,可以采用较小的压机成型,比较经济合理,在锻造时比致密体具有好得多的锻造性能,可以充分发挥粉末锻造工艺的优越性。一般说来具有 15~30% (体积) 孔隙度的预成型坯还是允许的。

当然,采用形状接近于成品的预成型坯可以简化热锻操作和所需锻模,可以实现一步锻成(即用一个锻模锻成成品)。但究竟

预成型坯的形状如何选择最合适,需视具体成品特点以及所用预成型和热锻方法而定。

预成型坯形状和密度程度(指与成品接近的程度)与材料对热锻的反应有密切关系。多孔预成型坯在锻造时的一个显著特点是很大一部分的表现应变(或材料移动)是涉及致密化的,而不是固体金属的塑性变形。孔隙体积减少导致工件总体积减少。在高温时为达到基本上致密所需的应力是颇低的,但是,一旦达到理论致密的 95~98% 以后,材料对于进一步致密化的阻抗就颇大(明显的加工硬化)。在锻压操作的结尾时应用显著大的压力以达到完全致密化,这同时伴随着金属实质性的塑性变形。最好的条件是应用为达到完全致密化所必需的压力,同时达到模子良好填充,获得最终形状、尺寸和性能。这就是采用预成型方法的通常的目标:即制得无余量的锻件。

预成型坯的控制和检查对于获得高质量的成品有重要意义,尤其对于烧结与锻前加热合并为一个工序的时候是如此。最关键的因素是控制预成型坯的重量。为达到预期的尺寸、致密化和去除余量,预成型坯重量应控制在 $\pm 1\%$, 预成型坯密度也需正确控制以使热预成型坯的密度和尺寸的波动成为最小。

四、锻造工艺

粉末锻造的工艺流程是很简单的。采用合理的预成型坯孔隙度和形状,通常只须一次加力就能锻成。图 8 是粉末锻造工艺流程和用棒料作原料的传统锻造工艺流程之比较。

与传统锻造工艺相比,除了显著减少所需模具数量外,一个主要区别是在锻造模具方面。粉末锻造不是用通常的带有余量开口的相配刻印式的模子 (matched impression type dies with flash openings), 绝大部分是用“嵌入式”或“进入式”模具 (“in-

section" or "entry" tooling) 即: 向下运动的活塞带有一上模具, 使之进入一模子的空腔, 然后与热的预成型坯相接触。这类似于传统的粉末模压成型用的模具, 它要求严格控制的预成型坯, 并消除了余量。当然, 用这种模具对于成品形状有一定限制。在模具设计上应考虑脱模容易, 可以采用某种型式下模具运动。

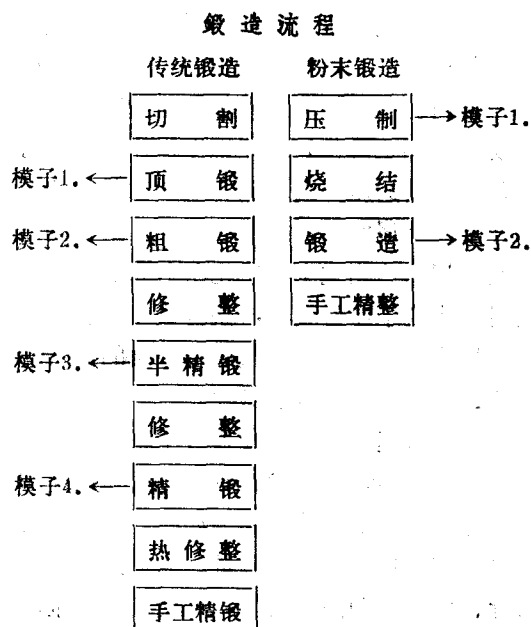


图 8 用棒料的传统锻造工艺和用预成型坯的粉末锻造工艺, 其流程之比较

热锻工艺中另一重要因素是锻造温度的选择。锻造温度过高, 则加热炉投资和加热费用较贵, 炉内碳的控制困难, 并由于增加了模具热疲劳而降低模具寿命。锻造温度过低, 则为达到一定热锻速率需较大锻造压力, 模具受到的冲蚀较大, 这对具有精细形状的零件来说尤须注意。一般对铁基材料来说, 锻造温度范围大致在 $900\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 之间, 锻造压力大致为 $1.8\sim 9$ 吨/公分²。

现有的锻造设备一般说来可以用于粉末锻造。在粉末锻造发展初期用压力机的比用锻锤的还多。当然, 随着粉末锻造的发展, 一些专用于粉锻的设备正在设计制造中。比

较理想的是在预成型坯一开始受一快的起始力的作用使其迅速达到一定的致密程度, 随即以一较慢的高压力借其压榨作用使工件达到最终密度和形状。锻造压力施加的速率对于锻造性能、模子充填、模具寿命以及致密化的影响正在研究中。高能率成型工艺 (HERF) 用于粉末锻造的研究也正在进行中。

五、粉末锻件的结构、性能和质量检查

当前, 粉末锻造工艺应用最广的是用合金钢粉末制造高强度零件, 如连接杆、齿轮和其他各种传动部件。主要用于汽车工业。采用的原料大多是用雾化法生产的4600牌号粉末。这是含Ni $\sim 2\%$, 含Mo $\sim 0.5\%$ 的合金钢粉末。由此制得的粉锻成品性能达到或超过相应的合金结构钢制得的锻钢成品的性能。

用粉末锻造工艺制得工具钢和耐热合金的工作也正在迅速开展。并已成功制得质量显著超过熔炼金属的粉末工具钢和耐热合金。

粉末锻件质量达到和超过一般锻钢件的质量水平是粉末锻造工艺迅速发展的基本原因之一。

粉末锻造制品在冶金结构上的基本特征与普通锻造制品很不相同的有以下四方面: 组织的均匀性; 晶粒大小; 组织的方向性; 杂质的含量和形状。

用雾化预合金粉末制得的粉末锻件具有非常均匀的组织。通常在铸造钢锭中出现的各种偏析以及由此在锻件中出现的带状组织在粉末锻件中完全看不到。这个区别对于含碳化物多的各种合金工具钢以及各种耐热合金就尤为显著, 绝大多数性能的改善都是与此有关的。

原始粉末粒度较小以及在烧结时晶粒不易长大导致在成品中晶粒较细。这对于低温

时强度和塑性的改善是有利的。

传统的锻造工艺伴随着显著的塑性流动，因而在成品中有高度取向的晶粒组织和明显的流线。这造成高度的方向性。在一个方向具有高性能而在其他方向性能较低往往在使用时带来不少问题。如前所述，粉末锻造的真正塑性应变是很有限的，因而粉锻制件具有较等轴的组织，在各方向的性能要一致的多。

用水喷雾法粉末制得的粉锻制品，其氧化物夹杂的状态及其对性能的影响是一个需要进一步研究的课题。水喷雾法粉末表面氧化膜的存在，对于含Ni和Mo的材料可以通过对粉末进行氢中退火的方法使其表面氧化膜还原，但对于含Cr和Mn等其氧化物难于还原的材料来说，通过退火并不能使其氧化膜还原。这种氧化膜保留到成品里，如果以连续或半连续膜的状态存在，则对于塑性将产生显著的影响。图9是一粉锻含1.25%Mn钢中的半连续氧化薄膜，图10是有氧化膜和无氧化膜的两种粉锻Mn-Mo钢，其应力—应变曲线之比较。但是，含Mn和Cr的粉锻钢中的氧化物也并不是必然地以连续膜或半连续膜的状态存在。图11是一含1%Cr的粉锻钢中以小的球形存在的氧化物。在其原始粉末中，许多氧化物质点实际是在粉末颗粒表面层以下存在的（见图12）。在锻造以后，相邻颗粒的氧化物连在一起就形成如图11的形态。这些球形氧化物颗粒有相当数量是

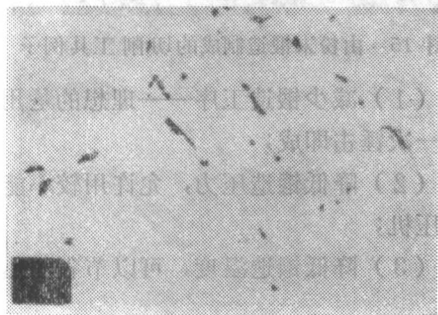


图9 在粉末锻造1.25%Mn钢中的半连续氧化薄膜， $\times 300$

$<1\ \mu$ 的，有可能起到弥散强化的作用。

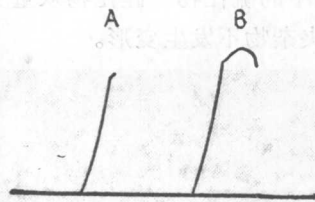


图10 两种粉末锻造钢的应力—应变曲线（A）有氧化膜；（B）无氧化膜；
Mn—Mo钢，50~60吨/时²

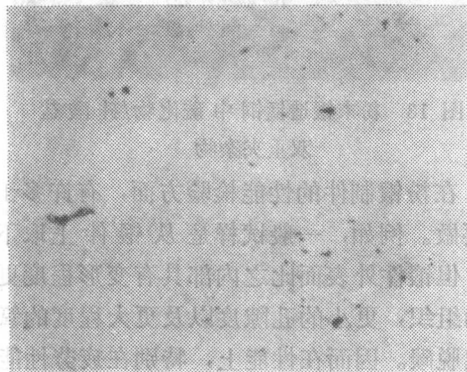


图11 含1%Cr粉末锻造钢中呈现的球形氧化物颗粒， $\times 800$

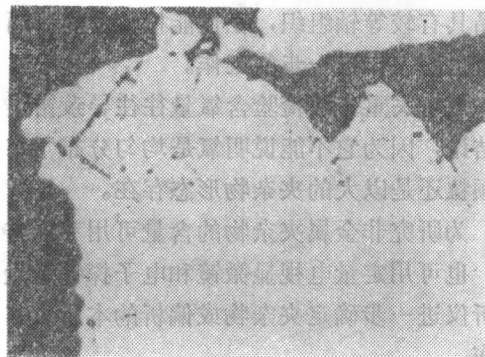


图12 雾化钢颗粒表面下的球形氧化物颗粒， $\times 800$

因此，对于水喷雾法粉末表面氧化物还原的条件，其在粉末和成品中存在的状态及对成品物理性能的影响应进行深入的研究。

在雾化粉末中同样会含有由渣子和耐火材料带进的夹杂物，在有硫和相当量锰存在条件下同样会出现MnS夹杂物，和普通锻钢不同的是它们不在成品中以条带状存在，因

而不造成成品性能的方向性。图13是在一含Mn粉锻钢中的硫化物-硅化物双重夹杂物。很清楚，夹杂物不发生变形。

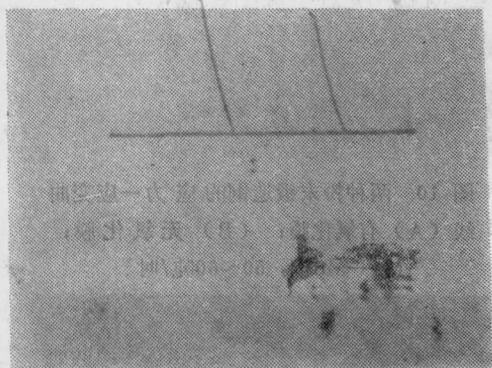


图 13 粉末锻造锰钢中硫化物/硅酸盐
双重夹杂物

在粉锻制件的性能检验方面，有许多工作要做。例如，一般试样是从锻件上取下的，但锻件外表面比之内部具有变形程度更大的组织，更小的孔隙度以及更大程度的氧化或脱碳。因而在性能上，特别在疲劳性能上，可能有明显的差别；需要用金相或其他方法来确定其表面特征。又例如，既然粉锻制品具有较等轴组织，在性能检验上能否简化，也还需作进一步的工作。

用氢失重方法检验含氧量往往导致错误的结论，因为它不能说明氧是均匀分布于每个颗粒还是以大的夹杂物形态存在。

为研究非金属夹杂物的含量可用萃取方法，也可用定量电视显微镜和电子探针微量分析仪进一步确定夹杂物或偏析的本质及其分布。

六、粉末锻造工艺经济上的优点及其未来发展

用粉末锻造工艺取代传统的锻造和车削加工工艺制造部件是当前的一个发展趋势。部件的种类由小的齿轮、连接杆、传动部件直到曲轴那样一类部件。在美国，1971年已开始用粉末锻造工艺生产某些齿轮。英国G.K.N.锻件和铸件公司已试验成功十六种

汽车部件（见图14），其中有第一速度齿轮、差动齿轮、曲轴、驱动轴法兰、环齿轮、链轮等，正在试验其他十种高强度部件。有些在1971年上半年已成批生产。一系列部件正在准备半工业性生产。在日本，已生产一系列热整形的部件，有些小齿轮和切削工具用粉锻工艺制成（见图15）。粉锻制品当前各国还主要用于汽车工业。粉末锻造所以获得如此巨大的发展，经济上的优越性是一个重要因素：

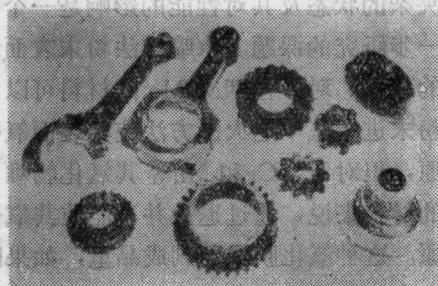


图 14 一部份粉末锻造制件

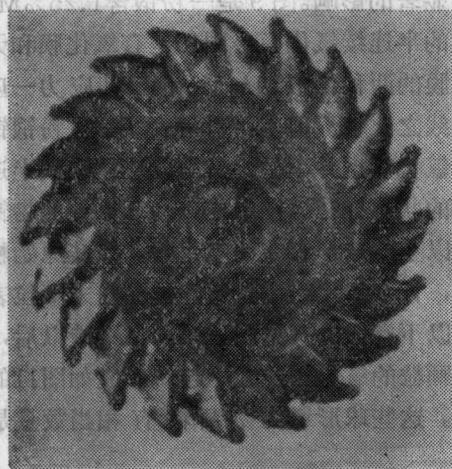


图 15 由粉末锻造制成的切削工具例子

- (1) 减少锻造工序——理想的是用一模具一次锤击即成；
- (2) 降低锻造压力，允许用较小能力的锻压机；
- (3) 降低锻造温度，可以节省加热费用；
- (4) 由于以上因素，节省了模具费用；

(5) 可降低对锻工熟练程度的要求;

(6) 由于是无余量加工, 节约了原材料。对某些部件可节约材料达30%以上;

(7) 减少或完全省去了机械加工, 尺寸公差小, 表面光洁度比一般锻件铸件好得无法比拟。例如, 粉锻制造直径1 $\frac{1}{2}$ "的链轮, 其直径尺寸公差每吋为0.001吋;

(8) 由于预成型坯制造工艺简单, 容易严格控制, 保证了成品质量的稳定;

(9) 可用于熔炼方法不能制造和难以加工的新型合金和双金属制品。

当前, 金属粉末价格较贵是影响粉末锻造工艺迅速推广的一个重要因素。在国际上金属粉末价格约为相当成份熔炼钢坯价格的三倍。在国内则为五倍左右。但是随着粉末锻造工艺的大量应用, 粉末产量将大幅度地提高。据70年7月估计, 美国汽车工业用的铁系粉冶制品使用量将由每年6万吨到1980年发展为50万吨。英国的金属粉末用量也将在这几年内由1.2万吨/年提高到10万吨/年。这将进一步降低粉末锻造制品的成本。

解放以来, 我国的粉末冶金工业获得了

蓬勃发展。在毛主席“自力更生”和“发挥两个积极性”的方针指引下, 地方办粉冶工业的积极性很高, 已初步形成遍地开花的局面。但是, 我国的粉末冶金工业还是很年轻的, 无论在原料粉末还是粉冶制品的数量、质量、品种方面和在国际的先进水平相比差距是大的。要扩大我国粉末冶金的使用范围, 必须解决高强度致密制件的生产工艺问题。而粉末锻造工艺为我们提供了大量生产高强度致密制件的有效途径。大力推广这一先进工艺, 可以在粉末冶金产品范围上引起突破, 特别是与雾化法制各种合金钢粉末的工艺结合在一起以后, 可以大量生产各种具有特殊性能的合金钢致密产品。这就为提高产品性能, 实现一系列产品的工艺革新开辟了广阔的前景。因此, 努力发展粉末锻造工艺和雾化制造各种合金钢粉末的工艺对于发展我国的粉末冶金工业具有重大意义。可以预期, 在毛主席革命路线指引下, 粉末锻造这一先进工艺必将在我国获得迅速的发展和推广, 为我国社会主义建设发挥它应有的作用。

主要参考文献

- (1) «J. of Metfals», Sept, 1970, 21—29.
- (2) «powder Metallurgy», V. 14, No.27, Spring, 1971, 124—143.
- (3) «Metal progress», April, 1971.
- (4) «Powder Metallurgy», V. 13, No.26, 1971.
- (5) «International J. of Powder Metallurgy», V. 7, No.3, 1971.
- (6) «Metal Progress», Dec. 1971.
- (7) «Powder Metallurgy», V. 14, No.28, 1971.
- (8) «Metallurgia and Metal Forming», V. 38, No.8, 1971.

金属粉末锻造材料的性能及其应用

杨 家 媛

金属粉末锻造是最近几年发展起来的一项引人注意的新工艺。日本、美国、瑞典、德国、法国都在积极从事这一工艺的研究。最近二年来有很大进展。据报道,现在国外粉末工厂已能大量供应锻造用的可热处理低合金钢粉,设备制造厂已研究了完整的锻造生产系统,零件制造厂已使粉末锻造工艺突破了小规模试验性阶段,正朝着大规模工业性生产迈进。粉末锻件将代替许多普通锻件。英国的 G.K.N. 锻件公司和美国的古尔德(Gould Inc.), 费德勒尔·莫格尔(Federal Mogul)及伯吉斯·诺顿(Burgess Norton Mfg. Co.) 三家汽车公司都已经能够锻造商品零件。美国的这三家公司预期在今年内,某些零件能投入大规模生产。通用马达公司德尔库·莫雷分公司(Delco Moraine)和辛辛纳特公司(Cincinnati Inco.)于1968年秋联合建立的试验性锻造系统已经锻造了5万件以上预成型坯,据称密度达到理论密度的99%以上,性能优于机械加工另件。日本三菱金属采矿公司新泻厂已经生产粉末锻造铁基零件。

用粉末锻造方法生产的金属制品,既具有相当于或高于普通锻钢的物理和机械性能,又具有烧结制品所具备的形状复杂、表面精度高等优点,尤其是比普通冶炼方法更为经济,所以这一工艺的出现,为粉末冶金开辟了新的领域。

锻材性能

通常粉末冶金制品由于有10~20%的孔隙度,机械性能不高,而粉末锻造,可使零

件密度达到理论密度的99%,从而大大提高烧结材料的性能。与普通锻钢相比,粉末锻件的拉伸和应力破断性能一般可以达到或超过普通锻钢,某些合金的延性可能比普通锻钢要低。粉末锻件组织均匀,性能一致,多呈各向同性,而普通锻钢则为各向异性,有的高速钢纵横向抗弯强度相差达40公斤/毫米²。

夹杂和孔隙度对粉末锻材的性能影响很大,尽管由于粉末性质和工艺条件不同,所产生的影响也会有所不同,但它们是影响性能的重要因素。图1为杂质对冷锻4630粉拉伸强度、延性、冲击强度的影响。本例中夹杂含量对拉伸强度影响不大,而对延性及冲击强度影响显著。然而,夹杂可以通过对制粉过程的控制使之降低。图2为孔隙度对冷锻雾化铁粉预成型坯冲击强度的影响,当密度低于7.8克/厘米³时,冲击强度显著下降。但由于粉末锻件的密度可以达到接近理论密度,所以实际上孔隙度的影响不占主要位置。

对部件所作的试验还证明,某些合金粉末由于非金属夹杂的影响,其疲劳性能比同类的锻钢要低,可是用这种粉末锻成连杆再作试验,这时粉末连杆的持久性能可与锻钢连杆比美。可见粉末锻造连杆的良好表面精度,可以抵销夹杂的部分不良影响。

现在分别就几种材料的性能扼要介绍于下。

铁及铁碳合金:铁粉热锻件的拉伸强度等于或大于同样成份和同样结构的工业锻铁,但延性较低。表1a为几种不同铁粉的

机械性能。表内所列各种铁粉是在 300 磅空气锤下进行热锻，在干氢中于 980°C 预热三分钟，在大量失热前进行三次锤击。经五次锤击保证密度大于 98.5%。预成型坯由加热炉转到锻模不到二秒钟，模子用燃气火焰保护零件不发生内氧化。表 1 为这些铁粉的松

装密度，压坯密度，锻造密度及比表面。表 1b 为这些铁粉的硬度和晶粒度。从表中可以

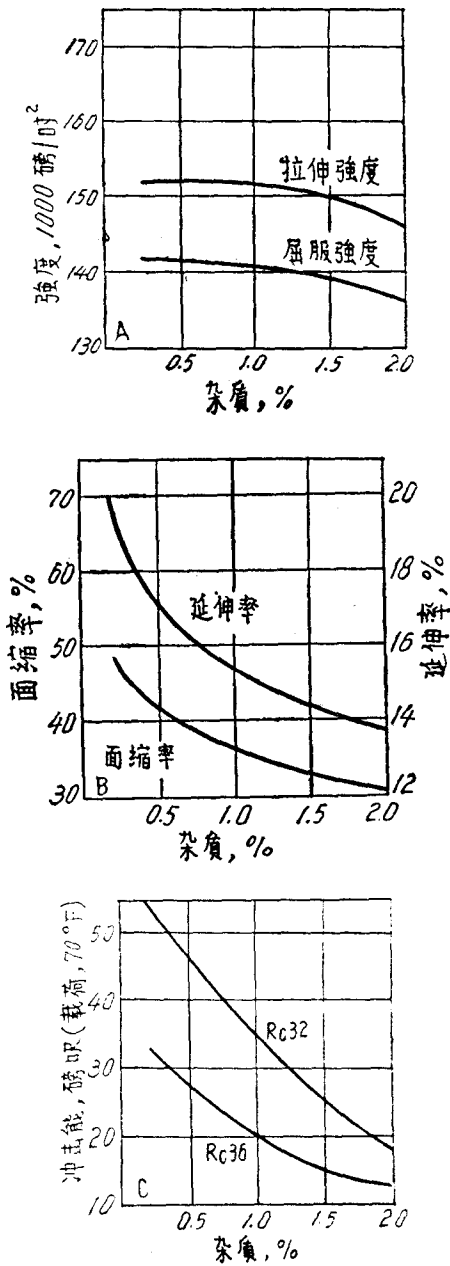


图 1 夹杂对冷锻 4630 粉拉伸强度、延伸性、冲击强度的影响

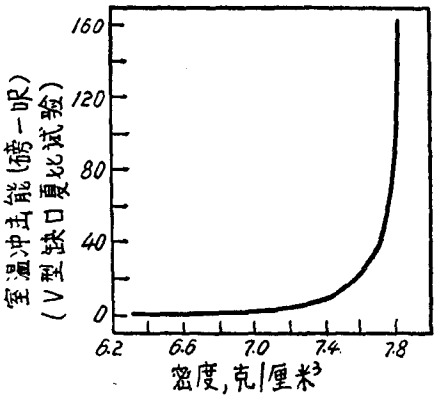


图 2 孔隙度对冷锻雾化铁粉预成型坯冲击强度的影响

表 1
铁粉的松装密度、压坯密度、锻造密度及比表面

粉 末	编号	比表面 (米²/克)	松装密度 (克/毫米³)	压坯密度 (克/毫米³)	锻造密度 (克/毫米³)
海绵					
-100+150	A	.29	1.99	6.93	7.76
-270+325	B	.52	2.14	7.03	7.78
电解					
-100+150	C	.15	2.66	6.91	7.78
-270+325	D	.32	2.63	6.75	7.81
雾化					
-100+150	E	.13	2.64	6.81	7.80
-270+325	F	.35	2.57	6.70	7.81

铁粉锻造和退火后的极限拉伸强度及延伸率

表 1a

粉 末	锻 造		退 火	
	极 限 拉 伸 强 度 公斤/毫米²	延 伸 率 %	极 限 拉 伸 强 度 公斤/毫米²	延 伸 率 %
海绵 A	34.5	18.6	27.7	25.0
海绵 B	37.8	19.0	29	22.3
电解 C	33.4	14.0	27.9	35.7
电解 D	34.9	9.4	30.1	44.5
雾化 E	32.1	19.5	29.2	33.5
雾化 F	36.3	13.4	28.7	31.2

看出，铁粉锻件的极限拉伸强度在32~38公斤/毫米²之间，可与低碳锻铁比美，后者强度接近34公斤/毫米²。

锻态和退火后的硬度和晶粒度 表 1b

粉 末	锻 态		退 火	
	硬 度 (RB)	晶粒度 ASTM	硬 度 (RF)	晶粒度 ASTM
海绵 A	62.6	8	77.1	5
海绵 B	65.4	9	74.9	6
电解 C	59.6	6	68.9	4
电解 D	64.5	7	70.0	4
雾化 E	55.2	5	75.9	4
雾化 F	65.5	7	78.5	5

铁粉锻件的极限拉伸强度随着所用粉末的比表面增加而提高。图 3 示出了铁粉锻件的拉伸强度与比表面的关系。铁粉规格和锻造条件均与表 1 所列铁粉相同。由图看出，当比表面从 0.13 提高到 0.52 米²/克时，极限拉伸强度提高 >18%。比表面与硬度的关系也是这样，随着比表面增大，硬度稳步上升；但是，退火后的拉伸强度和硬度与比表

面的关系似乎不大，见表 1a 和表 1b。

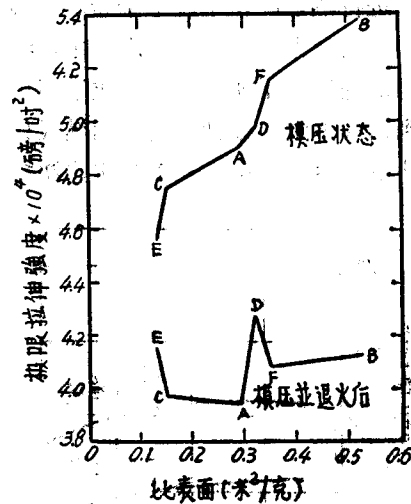


图 3 铁粉锻件拉伸强度与比表面的关系

表 2 为烧结锻造铁和铁碳试样的拉伸和冲击性能。试样是在直径 5.85 厘米的圆模中用双动水压机以 25 英吨力/吋² 压力锻成。粉末规格和压制密度如表 3 所示。试样在 1150°C 氢气氛中烧结 0.5 小时。在烧结过程中，加入的碳失去约 15~20%。烧结后冷却到室温，热压前在惰性气氛中预热到 1000~1100°C。

粉末锻造铁及铁碳试样的机械性能

表 2

粉 末	加 碳 量 %	屈服应力 英吨力/吋 ²	极限拉伸强度 英吨力/吋 ²	延 伸 率 %	面 缩 率 %	夏比冲击值 磅·呎
A	0	16	21	25	40	26
C	0	15	21	29	35	14
C	0.5	21	29	19	22	3
D	0	14	21½	25	47	14
D	0.5	20	29	20	28	3
F	0	19	24	38	71	22
F	0.25	20	28	30	57	10½
F	0.5	30	40	22	51	10½
G	0	14	21½	43	79	19
G	0.5	21½	32	24	45	2½

* 1 英吨力/吋² = 15.4443 × 10⁶ 牛顿/米²，1 牛顿 = 0.102 公斤。

表 2 中的全部铁试样加热到 900~925°C 进行正火，铁碳试样正火温度为 850°C。不同铁粉的拉伸性能实际上是相似的，而冲击

韧性和延性却随粉末种类不同而有变化。铁碳合金的拉伸强度比铁试样有所提高，但冲击韧性显著下降。从显微组织看，铁试样为

粉末规格和压制密度

表 3

粉 末	制 粉 方 法	级 别	松 装 密 度 克/厘米 ²	压制性 * 克/厘米 ²	流 动 性 秒/50克
A	氧化物还原	标准—100目	2.44	6.21	34
B	"	高压制性	2.96	6.40	27
C	氧化物还原	标准—100目	2.39	6.19	32
D	"	高压制性	2.54	6.30	32
E	"	"	2.68	6.45	29
F	水 雾 化	标准—100目	2.96	6.44	35
G	电 解	—300目	2.49	6.40	—
H	氧化物还原	—300目	2.49	6.17	—

* 25英吨力/吋²，无润滑剂。

含有不同数量氧化物的均匀的铁素体细晶组织。铁碳试样为既有珠光体又有铁的粗粒碳化物存在于晶界上的铁素体。

低合金钢：烧结锻造低合金钢的拉伸和疲劳性能高于或相当于普通锻钢，塑性比普通锻钢稍低。表 4 为保护气氛下粉末锻造的 AISI 钢与普通锻钢的性能比较。

古尔德公司对几种低合金钢进行了热锻研究。他们认为预成型坯必须在1120°C下烧结20分钟。用低灰润滑剂与粉末混合，以减少杂质。采用专门的石墨基锻造润滑剂以保证适宜的金属流动。锻造压力在 4 吨/厘米²内，锻造温度为 982°C。这样做得的四种粉

末锻造低合金钢的性能数据见表 5。

粉末锻造 AISI 钢与普通锻

钢的机械性能

表 4

钢号	拉伸强度 公斤/毫米 ²	屈服强度 公斤/毫米 ²	延伸率 %	面缩率 %	硬度 RC
1040	109.7 (87.9)	84.4 (66.1)	12 (20)	35 (56)	40 (40)
4140	151.2 (131.5)	137.8 (123)	10 (15)	39 (52)	40 (40)
4340	142.7 (134.3)	128.7 (123)	12 (15)	48 (54)	42 (42)
8620	75.9 (83.9)	61.2 (54.8)	17 (22)	44 (52)	22 (22)

括弧内为普通锻钢的性能值。

表 5

材 料 (200°C退火)	屈服应力 公斤/毫米 ²	极限强度 公斤/毫米 ²	延 伸 率 %	面 缩 率 %	弹性模量 × 10 ⁶	硬 度 (RC)
1050	58.4	70.3	11.3	17.8	32.0	28
调质4630	135.7	151.2	6.5	10.5	28.0	42
4630	125.1	150.5	6.5	22.0	25.5	42
8630	122.3	163.8	7.0	18.0	26.0	42

氧含量较高的雾化粉由于颗粒表面有氧化物，所以延性和冲击值不高。碳含量高的粉末锻造低合金钢，其冲击韧性低于普通锻钢。现就不同含碳量及热处理制度对粉末锻造低合金钢的机械性能及显微组织的影响分别举例说明于下。

表6为不同含碳量及热处理制度对SAE 4600粉末锻造低合金钢的机械性能的影响。粉末成份如下(重量%)：C 0.01；Si 0.03；Mn 0.12；S 0.015；P 0.008；Ni 1.70；Mo 0.42。粉末松装密度为 3.08 克/厘米³，压制性为 6.30 克/厘米³，流动性为 25秒/50

不同含碳量和热处理制度对SAE4600钢的机械性能的影响

表 6

加 碳 量 %	热处理 *	屈 服 应 力 英吨力/吋 ²	0.2% 试 验 应 力 英吨力/吋 ²	极限拉伸强度 英吨力/吋 ²	延 伸 率 %	面 缩 率 %
0	AC	20	—	27	48	74
0.1	AC	22	—	27½	45½	68
0.125	AC	22½	—	30	30	55
0.2	AC	23½	—	34	20	27
0.3	AC	27½	—	37½	21	55
0.325	AC	—	26½	38	22	51
0.4	AC	—	31	45	19½	51
0.5	AC	—	33	46½	16	47
0.6	AC	—	33	48	14½	32
0	T 600	27	—	30	31	68
0.1	T 600	31	—	35½	25	69
0.2	T 600	—	36½	44	20	57
0.25	T 300	—	38	47	18	48
0.25	T 600	—	37	46	20	60
0.4	T 300	—	50½	68	9	35
0.4	T 600	—	38	50	17½	47
0.5	T 400	—	82	90	10	38
0.5	T 600	—	41	55½	18	54
0.6	T 300	—	105¼	138	3 ½	3
0.6	T 400	—	88½	99½	5	30
0.6	T 600	—	60	72	5 ½	15

* AC=空冷(正火)

T 300=300°C油淬并回火,其余类推。

克。试样是在直径5.85厘米的圆模中用双动水压机制成25英吨力/吋²压力锻成。在1150°C氢气氛中烧结0.5小时。烧结过程中,加入的碳失去15~20%左右。烧结后冷却到室温,热压前在惰性气氛中预热到1000~1100°C。从表4可以看到,由于含碳量和热处理制度不同,拉伸强度可以从28英吨力/吋²提高到138英吨力/吋²。含碳低的合金,延伸率在30~40%之间,面缩率大于60%。拉伸强度提高,延性就下降。拉伸强度为138英吨力/吋²的试样,其延伸率为3%。

图4为不同含碳量的SAE4600在200°C和600°C淬火并回火后的硬度变化。当含碳量>~0.25%时,淬火时出现马氏体组织。碳

含量再增加时,200°C回火试样的硬度显著

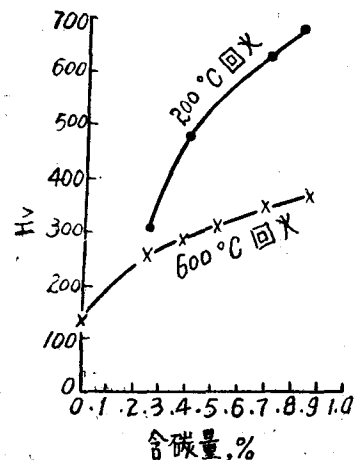


图 4 SAE4600钢的回火硬度

提高。

这些试样的冲击韧性随着碳含量增加而降低。图5为空冷SAE4600的V型缺口夏比试验冲击值。从图中可以看出,低碳合金的冲击值为70~115磅·呎,但随着碳含量的增加而显著下降。

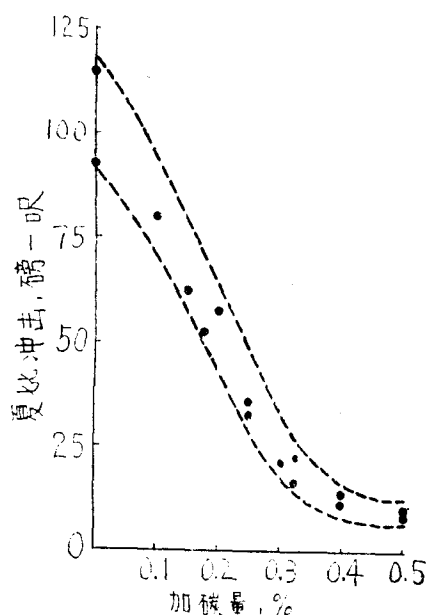


图5 空冷SAE4600钢的V型夏比冲击韧性

图6为回火温度对加入0.25和0.5%碳的SAE4600钢拉伸性能的影响,可以看出,回火温度升高对低碳合金没有什么影响,仅

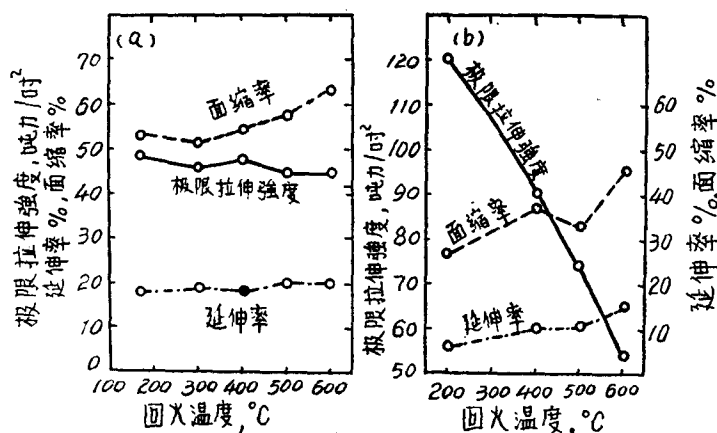


图6 回火温度对加碳0.25% (a) 和0.5% (b) 的SAE4600钢拉伸性能的影响

面缩率略有提高。

从显微组织来看,正火条件下低碳合金的晶粒度为ASTM6~8。低碳淬火试样含铁素体和贝茵体,而碳含量超过~0.25%时,却为马氏体组织,在300°C淬火并回火的含碳0.5%试样,全部为马氏体组织。

高速钢: 粉末锻造高速钢的性能比一般高速钢要好。试验表明,粉末锻造高速钢的工具寿命比一般高速钢高二倍。日本(株)小松制作所技术研究所用SKH-2高速钢雾化粉末热锻成圆形试片,进行抗弯试验,观察显微组织和测定硬度。试验表明,烧结温度在淬火温度附近,即1200~1250°C保温1小时,试件中碳化物分布均匀,晶粒极细。碳化物颗粒平均直径1.3 μ ,最大直径1.9 μ 。抗弯试验结果几乎全是晶粒内部破坏。抗弯强度达到普通锻钢水平。烧结温度高于1300°C时,碳化物粗大化,低于1100°C时,由于雾化粉末颗粒界面粘结较弱,抗弯强度较低。

日本三菱金属采矿公司新潟厂用AISI M-2号高速钢粉末进行了热锻试验。粉末预成型还在干分解氨中于1150~1580°C下烧结60分钟,而后在单向压制模中1150°C下锻造。锻件密度达到理论密度的99%以上。硬度和冲击韧性都接近普通锻钢,抗弯强度比后者提高约30%,切削寿命提高二倍。

不锈钢: 据AMSTED研究所对不锈钢所作的粉末热锻研究表明,用标准的奥氏体、铁素体、马氏体合金可以得到完全致密的锻件。他们用-100目的304、316、410和430型不锈钢粉在各种条件下进行了试验。结果证明,闭模热锻不锈钢粉是完全可行的,而且性能可同普