

高负载粉末冶金齿轮选择性表面致密化

韩凤麟

(中国机协粉末冶金分会,北京100825)

摘要: 本文评述了当前高负载粉末冶金齿轮的发展状况。表明,经选择性表面致密化加工的粉末冶金钢齿轮,其齿的弯曲疲劳强度与接触疲劳强度都和常规钢的相应齿轮相同,完全可替代钢齿轮,如汽车变速器中的钢齿轮。特别是,描述了预成形件的设计与辗压后齿轮中的相应密度分布。最后,表明用选择性表面致密化制造的粉末冶金钢齿轮,既具有相应钢齿轮的使用性能,又具有巨大的节约生产成本的潜力。

关键词: 高负载粉末冶金齿轮;粉末冶金钢齿轮;表面致密化;选择性表面致密化

中图分类号: TF125 **文献标识码:** A

文章编号: 1006—6543(2013)04—0006-12

HIGHLY LOADED P/M GEARS PRODUCED BY SELECTIVE SURFACE DENSIFICATION

Han Feng-lin

(PM Association of Machine General Parts Industry Society, Beijing 100825, China)

Abstract: This paper reviews the current development status of highly loaded P/M gears. It is shown that selective surface densified (SSD) P/M steel gears can sustain typical stresses in gears generated by the tooth and rolling contact fatigue at the tooth flank. Specifically, the design of the perform and the corresponding density distribution in the gear after rolling is described. Finally, it is shown that P/M gears manufactured by selective surface densification combine mechanical performance with a significant cost savings potential.

Key words: high loaded P/M gears; selective surface densification; SSD; P/M gears

齿轮是车辆与工业齿轮传动中用于传递运动与动力的基础机械元件。上世纪1937~1938年,美国通用汽车公司的 Maraine Products Division 研制成功粉末冶金油泵齿轮,1940年一家大型汽车公司就将用铸铁制造的油泵齿轮(材料利用率36%)改为了粉末冶金齿轮。这是粉末冶金齿轮或粉末冶金结构零件在世界上第一次用于汽车制造。经过60年粉末冶金零件生产技术与铁基粉末,压制成形压机、烧结炉与保护气氛气体等的不断完善与改进,用粉末冶金工艺已能生产各种几何形状的齿轮,最常用

的有直齿圆柱齿轮、螺旋齿轮及锥齿轮,也生产过螺旋(差速器)半轴齿轮与齿条1。最终用户市场应用的粉末冶金齿轮的事例有,家用器具电动机齿轮,行

1 粉末冶金齿轮的优势[1]

驶割草机变速器齿轮，起重机的齿轮传动装置，以及汽车中用的各种齿轮产品，诸如：油泵齿轮、平衡轴调节齿轮、电动车窗升降齿轮、起动机齿圈与行星齿轮、分电器齿轮、前照灯激励器齿轮。

粉末冶金齿轮之所以能取代用铸铁或钢一切削加工的齿轮，主要是因为用粉末冶金工艺制造齿轮

图1示几种粉末冶金齿轮的设计，其中 B—洗衣机变速器齿条，D—园林拖拉机变速器驱动齿轮，E—前照灯激励器电动机双螺旋齿轮，F—办公室复印机偏心驱动齿轮。

收稿日期：2012-07-09

作者简介：韩凤麟(1928—)，男(汉)，河北新河县人，教授，中国机协粉末冶金分会顾问。

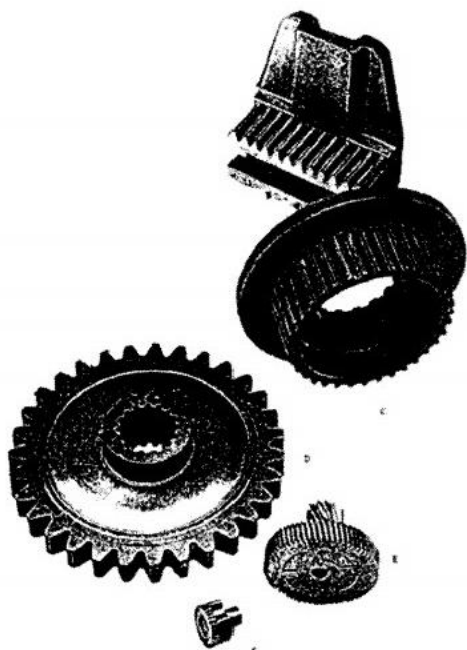


图 1 几种不同的粉末冶金齿轮设计[1]

具有下列优势：

(1) 鉴于粉末冶金是一种最终成形工艺，材料利用率接近100%，可使能源消耗最小化。

例如，用粉末冶金制造图2示的载货车变速器凹口扇形齿轮时，其生产工序和原来采用的锻钢一切削加工生产工序的比较见表1，二种生产工艺的

表 1 载货车变速器凹扇形齿轮制造工艺对比[2]

原制造工序			粉末冶金工序		
零件重量300 g			零件重量312 g		
序号	生产过程 工序	使用能量/ (kW · h)	序号	生产过程 工序	使用能量/ (kW · h)
	切断	0.011			
2	退火	0.04			
3	预锻 精锻 热去飞边	0.087 0.298 0.01	1	压制成形	0.061
	退火	0.097	2	烧结	0.188
	去氧化皮	0.024			
8	静压	0.164 0.2	3	压制(精整)	0.066

9	磨削				
10	镗孔	0.578			
11	埋钻头孔	0.053			
12	扩大	0.077			
13	铣削	0.108			
14	淬火硬化	0.609	4	淬火硬化	0.778
15	清洗	0.003 0.147	5	清洗	0.018
16	磨削				
17	磨削	0.341	6	磨削	0.114
17道工序		2.847	6道工序		1.243

材料利用率对比示于表2。由表2可看出，采用粉末冶金工艺生产图2示之齿轮时，材料利用率高达95%，比锻造一切削加工工艺高41.4%，同时能源消耗也相应减少约43.6%。

表2 原来制造工艺与粉末冶金工艺的对比

	原来制造工艺	粉末冶金工艺
零件成品重量/g	300	312
使用的材料重量/g	560	328
材料损耗/g	260	16
材料利用率/%	54	95

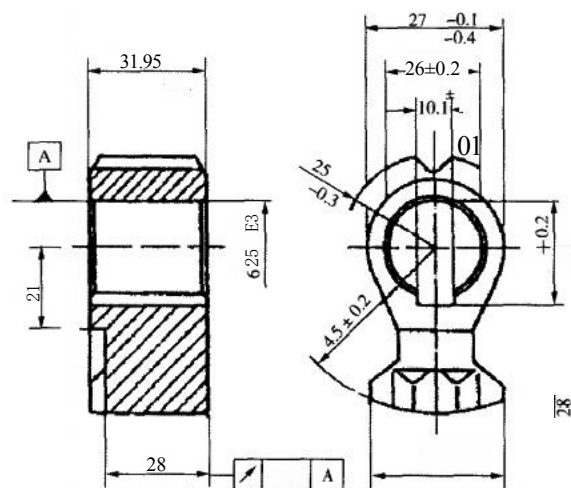


图2 载货车变速器凹口扇形齿轮23

(2)粉末冶金齿轮由于是模压成形的，因此齿的形状与精度始终如一。

(3)粉末冶金齿轮很容易制造出理想的渐形线齿廓与全齿根圆角半径。

(4)粉末冶金齿轮齿廓表面粗糙度好。

(5)粉末冶金齿轮的显微组织中含有某种程度的孔隙度，这在某些场合，有助于齿轮运行平稳，并可进行自润滑(含浸油时)。

(6)粉末冶金齿轮很容易成形减轻孔，这有利于减轻零件重量，节约材料。

(7)可将齿轮形状和其他机械零件形状特征，诸如凸轮、棘轮、驱动突出部或齿轮相结合，形成一个或组合零件。

(8)粉末冶金齿轮可消除切削加工齿轮所需要的退刀槽，制成带盲角的，这可使盲端增大额外的强度。

(9)可使生产的粉末冶金齿轮带整体按装装置，

或者加短枢轴或者加烧结一结合的轴

图3示一在直齿圆柱齿轮底面为盲角和一件式直齿齿轮—螺旋齿轮—枢轴结构。粉末冶金齿轮的不足之处在于,和常规钢齿轮相比,冲击强度、疲劳强度、接触应力能力较低。这种力学性能较低(由于显微组织中存在孔隙)限制了粉末冶金齿轮的应用范围,不能代替同样大小的铸、锻件一切削加工的齿轮,或只能用于负载较轻的齿轮,诸如油泵齿轮之类的产品。通过采用二次压制/二次烧结(DP/DS)或提高烧结温度可增高粉末冶金齿轮的密度,从而增高其力学性能。另外,也可用高温烧结或表面硬化改进粉末冶金齿轮的使用性能。利用粉末冶金齿轮工艺的齿根圆角半径设计,也可提升粉末冶金齿轮承受的弯曲应力。

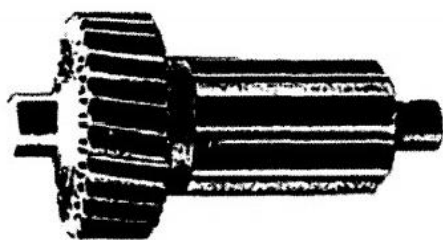


图3 组合直齿齿轮—螺旋齿轮—枢轴
座椅调节器机构[1]

对于某些齿轮的几何形状,诸如锥齿轮与螺旋齿轮,通过模具动作无法得到像直齿齿轮齿那样高的密度。在螺旋齿轮的场合,施加的压力部分消耗于摩擦作用。在锥齿轮的场合,因粉末移动不充分,齿的密度较低。往往采用熔渗铜增高锥齿轮与螺旋齿轮的密度(和相应的力学性能)。

压制成形工艺限制了粉末冶金齿轮端面的宽度。大多数批量生产用成形压机,其可采用的粉末充填量都将端面宽度限制在75 mm 以下。另外,粉末与模具间的摩擦损失会招致密度沿端面宽度减小,和在宽度中间点左右密度最低。端面宽度愈大,密度的减小就愈大。

和密度差异相关的问题是,在烧结与热处理时会产生尺寸变化的差异。粉末冶金齿轮在热加工过程中尺寸会产生小量变化。这种尺寸变化的大小和齿轮的材料、密度及大小直接相关,粉末冶金齿轮密

度的均一性,有利于保证能较好的控制尺寸。密度变化大会导致挠曲,特别是较大的齿轮。

2 粉末冶金齿轮改进

粉末冶金齿轮一直在以下两个方面进行改进：尺寸控制与增高齿的密度。

2.1 尺寸控制

当前较受欢迎的改进尺寸均一性的方法是，采用烧结一硬化工艺，因为其可减小和常规的淬火一回火热处理工艺相关的挠曲变形。烧结一硬化工艺不需要将齿轮重新加热和进行快速油淬火。而通过调节烧结炉内的冷却周期，就能得到要求的力学性能，而且不会减低齿轮的尺寸精度。

2.2 增高齿的密度

鉴于粉末冶金齿轮的力学性能决定于密度，显微组织及组成，首先是密度。因此，许多研究的方向一直是如何增高齿轮齿的密度。对于制造高密度粉末冶金齿轮，现在可采用的制造工艺有：

2.2.1 温一模压制。这种工艺使用的石墨与润滑剂粉末总含量不大于0.4%的预混合粉，在加热到 $\sim 85^{\circ}\text{C}$ 的阴模中，于高达760 MPa的压制压力下，压制的生坯密度 $\geq 7.4 \text{ g/cm}^3$ ，压制的齿轮高度不大于30 mm(见图4)。齿轮的外径28.3 mm，内径9.45 mm，模数1.66，压力角 20° ，节径24.5 mm。于 1120°C 下烧结后，烧结件的密度为 $7.45\sim 7.5 \text{ g/cm}^3$ 。关于这种工艺的较详细情况，请参阅文献[3]。

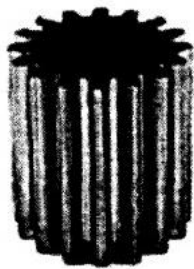


图4 试验的齿轮[3]

2.2.2 表面致密化。表面致密化是一种使齿轮表面及其下一定深度内的密度达到接近材料的无孔隙密度，从而产生压缩应力，以增高齿面的滚动接触疲劳强度，改进齿轮齿表面粗糙度，减小NVH（噪声，振动，不平顺性）的工艺。奥地利的Miba Sinter- metall公司在“2005年世界粉末冶金会议”上，首次发表了使用表面致密化技术生产的烧结凸轮轴齿轮（如图5）。该齿轮经表面硬化后，齿面硬度达到了

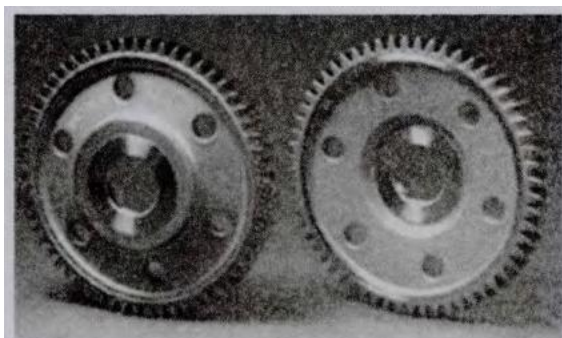


图5 烧结凸轮轴齿轮(Miba)^[5]

750 HV5,主要性能指标达到了16MnCr5 合金钢齿轮热处理后的标准。该公司称用表面致密化工艺每年生产50万件烧结凸轮轴齿轮,供BWM 汽车制造厂商等使用,完全取代了传统的合金钢凸轮轴齿轮,从而减低了该零件的生产成本^[45]。Miba 公司的表面致密化烧结凸轮轴齿轮荣获了2004年欧洲粉末冶金协会新产品奖。关于Miba 公司的表面致密化凸轮轴齿轮的详细资料如下:

- (1)最终零件用户: BMW汽车公司;
- (2)粉末冶金齿轮的组成: 预合金化FeMo 基钢;
- (3)齿轮成品重量: 370 g;
- (4)齿轮密度: 7.0~7.8 g/cm³;
- (5)抗拉强度: 590(心部)MPa;
- (6)硬度: 齿腹750 HV5, 心部200 HV5;
- (7)处理: 表面硬化处理;
- (8)第一次开始生产粉末冶金齿轮的日期: 2003年中;
- (9)年产量: 一年50万件。

这种粉末冶金齿轮的使用性能水平,以前只有钢齿轮才能达到。现在,这种粉末冶金齿轮替代了现有的钢齿轮。将齿腹与齿根的表面致密化用于了预合金化的烧结钢,从而使使用性能水平达到了和表面硬化钢(例如16MnCr5)相同的水平。

另外,日本日立粉末冶金公司开发的汽车发动机无声链条系统的高接触疲劳强度粉末冶金链轮(图6),于2004年荣获了日本粉末冶金工业会生产工艺开发奖。

这种生产工艺是将粉末冶金链轮齿腹用碾压使表面致密化和碳化物弥散渗碳淬火一回火相结合的一种新工艺。利用这种工艺可将粉末冶金链轮齿的接触疲劳强度增高到和常规锻钢(Fe-Cr-Mo-C钢)

同样的水平。

虽然链轮的形状适合于粉末冶金工艺生产，但图6示的齿轮需要具有高接触疲劳强度。为此采用了预合金化 Fe-Ni-Mo 粉作为基粉，同时密度不低于 7.5 g/cm^3 。用碾压工艺，将大量生产的粉末冶金链轮齿腹进行了表面致密化。齿廓的最佳碾压余量是用图象分析仪测定的。

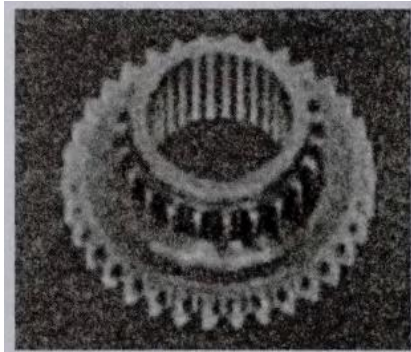


图6高接触疲劳强度粉末冶金链轮(日方) (6)

鉴于采用常规的渗碳淬火一回火时，发现齿腹表面产生点蚀磨损，为改进齿内部的硬度，选择了碳化物弥散渗碳淬火一回火工艺。

这样，开发的高接触疲劳强度粉末冶金链轮就能替代常规的钢链轮了。

据初步统计，全球每年对上述高性能齿轮的市场总需求量有7亿件之多，但当前这些齿轮仍在使用由传统方法生产的钢齿轮。由此不难看出，表面致密化工艺对于开发市场潜力巨大的高性能粉末冶金齿轮是何等重要。

3 高负载粉末冶金齿轮开发[7, 8]

高负载粉末冶金齿轮是一类齿轮齿的弯曲疲劳强度与滚动接触疲劳强度和常规钢齿轮相同的粉末冶金齿轮。这一类齿轮，现在都是用钢一切削加工生产的，大量用于汽车变速器中。为开发这类粉末冶金齿轮，欧盟在1999年度基金计划中，将之列为了“竞争与可持续性增长”项目(项目No.:GRD1-

1999-10674)。参与这个项目的开发单位有 Höganas AB(SE,项目协调), Centro Ricerche Fiat (意大利), Regienov(法国), Sintersthl (德国)及 WZL-RWTH (德国)。

为了进一步扩大粉末冶金零件在汽车动力传动系统中的市场，如上所述，必须对其在以下两方面进

行实质性改进:

(1)力学强度,特别是拉伸/弯曲疲劳,接触疲劳及冲击强度;

(2)尺寸精度。

常用铁基粉末冶金零件的密度范围为 $6.8 \sim 7.4 \text{ g/cm}^3$,或为锻钢理论密度(7.86 g/cm^3)的86%~94%。材料的相对密度小于100%,这表明材料中有孔隙存在。图7示密度为 6.8 g/cm^3 的烧结钢的典型显微组织。显微照片中的黑色区域是孔隙。孔隙的存在影响力学性能,特别是疲劳与冲击性能。

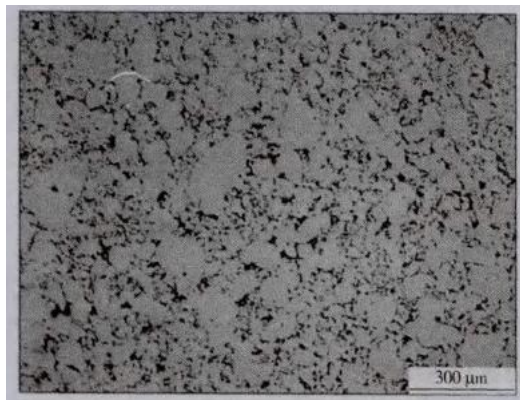


图7 密度为 6.8 g/cm^3 的烧结态钢的典型显微组织

一般说来,低密度粉末冶金零件的静态强度都相当好,即在密度 6.9 g/cm^3 (87%理论密度)下,其约为锻钢强度的70%,和于密度 7.4 g/cm^3 (94%理论密度)下,约为锻钢的95%。可是,孔隙度对锻钢的弯曲或接触疲劳性能有重大影响(一般密度为 7.1 g/cm^3 时,为锻钢的弯曲或接触疲劳强度的60%,和于密度 7.4 g/cm^3 下,低于75%)。图8示锻钢与球墨铸铁的弯曲疲劳强度和传统粉末冶金合金钢的比较。由这些结果可看出,在主要失效模式和与疲劳相关的条件下,制约粉末冶金零件应用的是孔隙度。图9示,热处理的锻钢与高强度铸铁和传统粉末冶金钢间力学性能的空白区。

粉末冶金钢的力学性能主要取决于显微组织中孔隙的百分率。粉末冶金钢的所有力学性能都随着孔隙度增高而减低,已清楚表明,粉末冶金钢的标准牌号(即,密度范围为 $7.0 \sim 7.2 \text{ g/cm}^3$,相应孔隙度为8%~11%(体积分数)的粉末冶金钢)承受不了一般汽车变速器齿轮的负载。例如,粉末冶金Fe-1.5%Mo-0.1%C 钢,其滚动接触疲劳强度极限为

1400 MPa左右,这仅只有一般齿轮钢,诸如

16MnCr5 的滚动接触疲劳强度的2/3。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/986241012140010242>

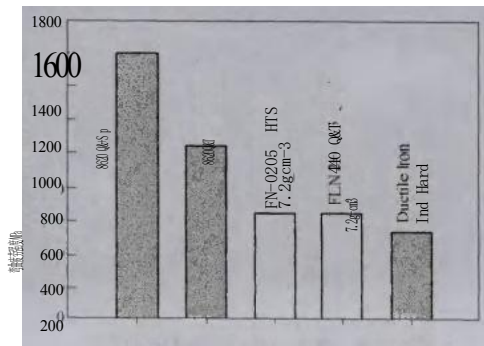
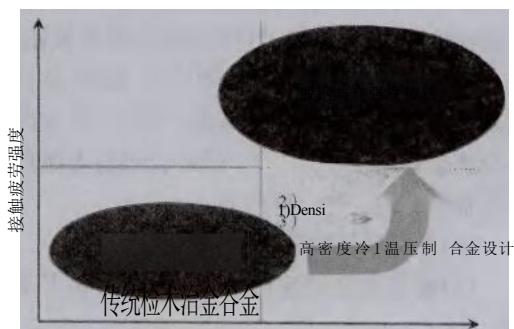


图8 各种Fe基材料的弯曲疲劳强度 (STBF:耐久极限) (来源: CPMT)



拉伸强度, 弯曲疲劳强度

图9 热处理的锻钢与高强度铸件和传统粉末冶金合金力学性能间的间隙区

为开发能用于高负载粉末冶金齿轮生产的材料，也就是研究如何提高粉末冶金齿轮材料的密度，20多年来，开发出了各种生产工艺，例如：

- (1) 温压，温一模压制。用这种工艺可将粉末冶金钢的密度增高到7.5 g/cm³ [即，孔隙度<5% (体积分数)]；
- (2) 粉末锻造。可将密度增高到理论密度，即孔隙度为零；
- (3) 利用高温烧结及其他方式的活化烧结，增大收缩，以提高密度；
- (4) 选择性表面致密化。

利用温压等先进的压制工艺，尽管可将密度增高到7.5 g/cm³ 左右，但其力学性能仍达不到高负载粉末冶金齿轮的要求。粉末锻造虽可将材料的孔隙度减小到接近零，但其尺寸精度差，成本高。高温烧结，虽能增高密度，但会减低尺寸精度，从而限制了可利用的合金组成不适用于制作粉末冶金齿轮。

迄今，开发的制造高负载粉末冶金齿轮的生产