



表面致密化粉末冶金齿轮的性能

Lorenz S. Sigl, Günter Rau, Michael Krehl

(Sinterstahl GmbH, D-87629 Füssen, Germany)

摘要: 用压制、烧结及选择性横向辗压表面致密化制造了轿车变速器的粉末冶金螺旋齿轮。在生产的每一道工序中都根据显微组织、齿轮几何形状、表面粗糙度及 DIN 品质对齿轮的性能演变进行了监控。将粉末冶金齿轮的几何形状和现在变速器中使用的常规生产的锻钢齿轮(DIN 品质 7)进行了比较。表明, 制造的粉末冶金齿轮的品质位于 DIN 品质 8 范围以内; 而且, 证明通过生产工序的改变可减小对中与齿廓的误差。虽然锻钢齿轮的对中与齿廓误差较小, 但是粉末冶金齿轮的偏心率与节矩的误差和表面粗糙度较好。

关键词: 粉末冶金; 齿轮; 表面致密化; 螺旋齿轮

Properties of surface densified P/M gears

Lorenz S. Sigl, Günter Rau, Michael Krehl

(Sinterstahl GmbH, D-87629 Füssen, Germany)

Abstract: A helical PM gear for a passenger car gear box was manufactured by pressing, sintering and selective surface densification by transverse rolling. The evolution of the gear properties in terms of microstructure, gear geometry, surface roughness and DIN-quality is monitored at each step of the processing sequence. The geometry of the PM gear is compared to a conventional wrought steel gear (DIN-quality 7) being currently used in the gear box. It is shown that PM gears can be manufactured well within the DIN quality 8 tolerance fields. Furthermore it is demonstrated that alignment and profile errors are reduced in the sequence of processing. While wrought gears have less alignment and profile errors, PM gears are superior in terms of run-out and pitch errors as well as surface roughness.

Key words: powder metallurgy; gear; selective surface densification; helical gear

齿轮在现代传动技术中是关键结构零件。齿轮的主要功能目标是可靠且无噪声地传输转矩。通常, 齿轮是在齿顶或齿顶稍下方表面啮合时承受脉动应力, 因此, 主要是需要在其表面或表面层具有高强度与耐磨损性。除了需要强度外, 对于许多齿轮的应用, 噪声低也是必须的。噪声的产生基本上决定于齿轮的尺寸公差、形貌及表面粗糙度。齿轮的几何形状或组件的不精确都会显著减低齿轮的使用寿命、承载能力及增强噪声的产生。因此, 一般需要齿轮的几何形状具有高品质, 变速器用的齿轮通常要高于 DIN7。

除了要求强度与噪声之外, 对改善齿轮的经济特性的要求也在提高。近年来, 先进的粉末冶金生产工艺能够制造出成本可行和强度相当高的高负载齿轮。预计这种生产工艺方法制造的粉末冶金齿轮除强度与噪声性能可和常规生产的齿轮相比拟外,

还具有显著的经济与技术优势。

近年来, 已证明选择性表面致密化可减小表面区域的孔隙度, 而保持心部的孔隙度, 从而很有希望在改进噪声性能的同时, 提供足够高的强度。横向辗压是制造表面致密化粉末冶金齿轮最有前景的工艺。采用横向辗压工艺形成的全致密化表面层深度达到约 0.3 ~ 1.0 mm, 而零件心部的孔隙度水平并没有改变^[1-6]。笔者想说明的是, 按照在论文中提出的生产工艺生产时, 图 1 示的螺旋齿轮的显微组织、几何形状及品质是如何演变的。

1 试验

研究的齿轮是图 1 所示的螺旋齿轮, 其特性是螺旋角为 30° 及内径有花键。几何形状的参数汇总于表 1 中。现在这种齿轮是用锻钢制造的, 用作轿车变速器五挡的固定齿轮。

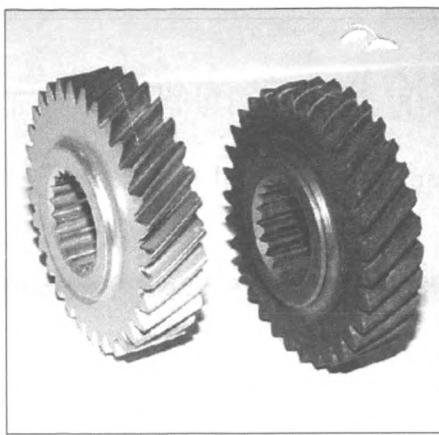


图1 用作标准变速器固定齿轮的粉末冶金齿轮(左)与常规生产的螺旋齿轮(右)

Fig. 1 PM gear (left) and conventional helical gear (right) with inner spline used as a fixed gear in a standard gear box

表1 图1示螺旋齿轮成品的几何形状详细说明

Table 1 Geometric details of finished helical gear from Fig. 1

齿轮参数	精加工的齿轮
齿数(Z)	31
法向模数(m)/mm	1.6
压力角(α)/(°)	20
螺旋角(β)/(°)	30
螺旋方向	左
变位系数	-0.2215
外径(d_a)/mm	60.16~60.55
根径(d_r)/mm	51.31~51.70
二球测量/mm	61.567~61.600
标称节径(d)/mm	57.273

1.1 材料选择

材料是根据以前的生产经验(压制与辗压试验)和滚动接触疲劳试验的评价选择的。根据这些资料,选择了含1.5%(质量分数)Mo(预合金化的)与2.0%(质量分数)Ni(扩散粘结的),预混合0.15%(质量分数)石墨、0.6%(质量分数)Kenolube的水雾化预合金与扩散合金化粉末。

1.2 工艺过程与模具

这项研究采用的生产工艺的工序如下:

- 1)压制有裕量的齿轮。
- 2)烧结体密度达到90%~92%理论密度。
- 3)用横向辗压将表面附近区域选择性致密化到100%密度,同时心部的孔隙度保持不变。

重要的是,要注意在制造表面致密化齿轮时,关键问题是压制的模具和辗压用工具轮要完全一致。这基本上是要求生产的烧结齿轮裕量要精确,这样辗压后,才能使得到的充分致密化的深度>0.4mm;辗压与硬化后,齿轮的几何形状才能位于所需公差范围之内。

齿轮预成形件的几何形状,即齿轮在辗压之前的几何形状,包括齿侧面与齿根的裕量都是计算确定的。而且,为了评估由于压制(回弹)与烧结(收缩)发生的尺寸变化,要进行预成形试验。为了确定压制模具与辗压工具轮的尺寸,要将由于压制、烧结及辗压产生的形状变化进行综合处理。

生产工艺的第一道工序是冷压制。图2图解示冷压制时模具的动作,即采用模架来控制上模冲的螺旋移动。常规压制时,装粉之后是上模冲下行(图2中步骤1);上模冲一面下行一面旋转,使之和螺旋阴模精确配合。为了使零件横向密度分布均匀,阴模向下移动但不转动,即在上、下模冲反向旋转时向下移动(图2中步骤2)。将粉末充分压制后,上、下模冲开始同方向旋转(图2中步骤3)。最后,上模冲回升(图2中步骤4),将压制的齿轮生坯脱出。实际压制是在TPA 350t压机上进行的(见图3)。

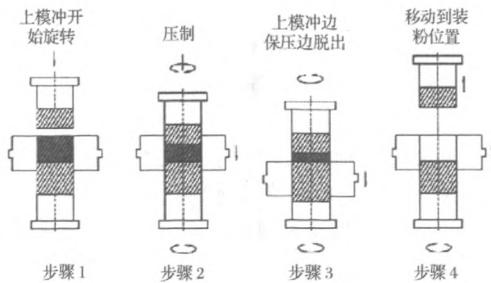


图2 粉末冶金螺旋齿轮的压制程序

Fig. 2 Pressing sequence for a helical PM gear (schematic)

然后,将齿轮生坯置于陶瓷板上,在标准网带式炉内,于吸热性煤气气氛中,在1120℃下烧结30min。为使齿轮的含碳量保持在起始的水平,必须精密控制炉中的碳势。所有零件都是以约0.2K·s⁻¹的冷却速率从烧结温度缓慢冷却的。烧结后齿轮的密度很均匀,即心部为6.96g/cm³、7.0g/cm³。

烧结后,在控制力的圆形辗压机(见图4)上进

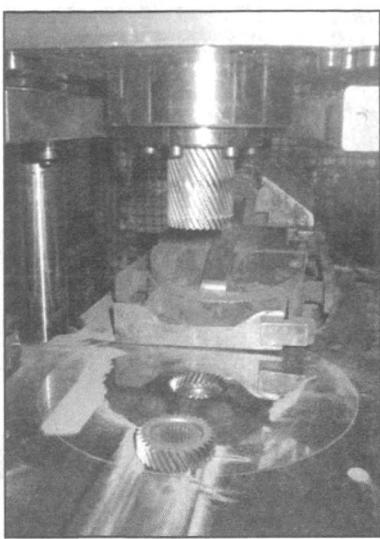


图3 在350t TPA压机上的压制装置

Fig. 3 Pressing set-up on a 350 to TPA-press

行选择性表面致密化。如图4所示,将有裕量的烧结态齿轮置于2个配对的辗压工具轮之间的中心,一直到工具轮与齿轮接触为止;接着施加载荷使齿轮表面致密化,一直到达到预定的中心距离;最后,将工具轮取下并使齿轮卸载。

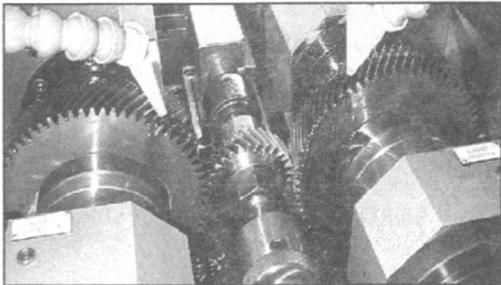


图4 在控制力的圆形辗压机上辗压齿轮的作业

Fig. 4 Rolling operation of a gear in a circular die force controlled rolling machine

2 特性记述

用光学显微镜研究了材料抛光与腐蚀后的显微组织。用3% (体积分数)乙醇硝酸溶液作为腐蚀剂。硬度是按照DIN ISO4498(part 1),用2.5mm布氏球,于载荷62.5kg下测定的。齿轮是按照DIN 3961/3962^[7-8]测定的。所有测量都是在Mahr测量

机(见图5)上进行的。采用卡紧内径和沿内花键对中,将螺旋齿轮固定在测量装置上。评定了下列数据:

- 1) 总齿廓误差, F_a ;
- 2) 齿廓角误差, f_{ha} ;
- 3) 齿廓形状误差, f_{fa} ;
- 4) 总对中误差, F_b ;
- 5) 齿对中误差, f_{hb} ;
- 6) 全长对中误差, f_{fb} ;
- 7) 径向跳动, F_r ;
- 8) 累积节矩误差, F_p 。

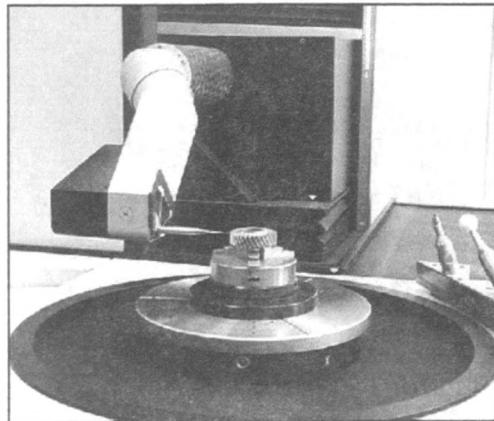


图5 Mahr 测量装置

Fig. 5 Mahr measuring unit

3 结果

3.1 显微组织

烧结后的显微组织示于图6。和缓慢冷却速率与含碳量低(0.15% (质量分数))相一致,主要显微组织构成是铁素体与很细的珠光体,也发现有一些富Ni奥氏体区。

显然,整个齿轮烧结后的显微组织及所有化学与力学性能都是很均一的。这反映在表2所示的密度、硬度及碳的分布无变化上。

表2 烧结后齿轮的硬度与含碳量

Table 2 Hardness and carbon content after sintering

齿轮的部位	硬度 (HB) (2.5/62.5)	含C量 (质量分数) /%
上部	122	0.14
中间	116	0.16
下部	122	0.15

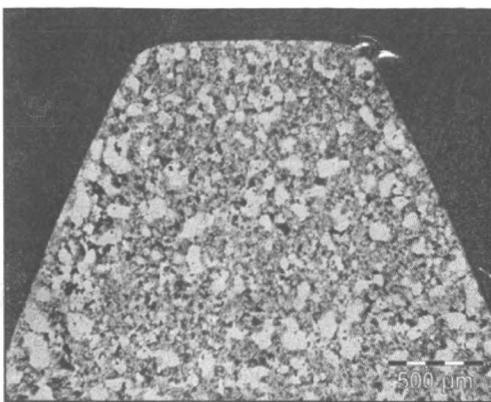


图 6 烧结态齿轮的显微组织: 齿顶区的铁素体(浅色)、贝氏体(黑色)及少量的残余奥氏体

Fig. 6 Microstructure of as-sintered gear: ferrite (light) , bainite (dark) and small fractions of retained austenite in the tooth tip region

图 7 示辗压后的齿轮齿侧面及齿根的孔隙结构。从显微结构图中可以看出,致密化深度约为 0.4mm。

3.2 齿轮品质

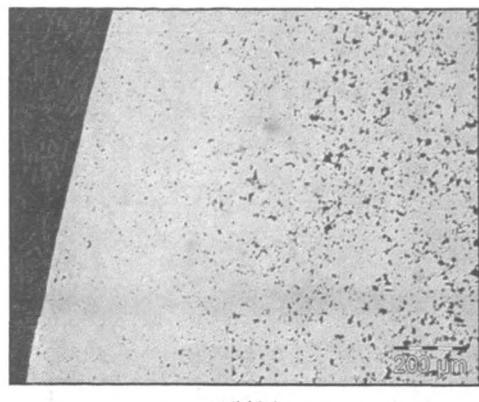
如同在第 2 节所叙述的,每一道工序之后,都测量了标准尺寸与齿轮误差。

对压制、烧结及辗压状态的齿的几何形状与齿的品质都进行了评定,并且和精加工的常规生产的锻钢齿轮的数据进行了比较,详细结果示于表 3、表 4。应该注意,所有数据都是以齿轮成品的几何形状为基准;而且,表 4 中的 DIN 品质数减小与偏差减小都表明齿轮的精度增高。

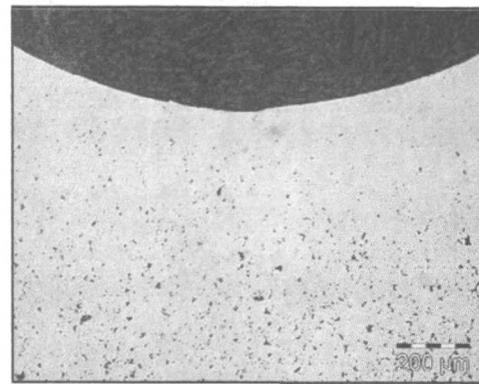
3.3 齿轮轮廓与对中

压制模具的品质为 DIN Q5。压制后,齿轮的特性如下:径向跳动与节矩的误差小,实质上,这反映的是模具的品质;齿轮轮廓与对中的误差,都相应地增大到了 DIN10。虽然,乍看起来这有点令人感到吃惊,但是,和品质数相对应的是齿轮成品的几何形状,而不是压制模具的几何形状。

烧结时,齿的对中稍微恶化,而齿廓有改进,这基本上是由于齿廓角度的误差有所改善所致。考虑到这些偏差,开发了自称是辗压的作业,其目的是补偿对中与齿廓两者的误差,而不会减低节矩与径向跳动的性能。特别是,利用辗压工具轮的几何形状



(a) 齿侧面



(b) 齿根

图 7 铡压后的孔隙结构 (致密化深度约为 0.4mm)

Fig. 7 Pore structure after rolling

(The densification depth is 0.4mm)

与辗压参数可调节齿廓。实际上,如表 3 中的资料所示,适当的组织辗压作业可同时改进对中与齿廓误差。因此,辗压后,齿轮品质可位于 DIN8 范围之内(见表 3)。

3.4 挠曲

如表 4 所示,按照最终尺寸,烧结态齿轮的偏差相当大;这是由于为了平衡表面致密化时产生的体积减小的需要,而有意加大的裕量。辗压后,齿轮的几何形状稍微偏离最终尺寸,但是认为可用修改压制模具的几何形状来解决这些缺欠。

3.5 表面粗糙度

粉末冶金齿轮辗压后的表面粗糙度比精加工的锻钢齿轮要好得多(见表 5)。从压制到烧结的零件,粗糙度略微增大;但辗压后,表面粗糙度非常好。

表3 压制、烧结及用碾压选择性表面致密化之后齿轮的误差数据和与精加工的常规锻钢齿轮品质的比较

Table 3 Gear error data after pressing, sintering and selective surface densification by rolling compared with quality of finished conventional wrought gear

齿轮误差	单位	DIN Q8 最大偏差	压制 生坯	DIN 品质	DIN 烧结态	DIN 品质	碾压后	DIN 品质	锻钢 齿轮*	DIN 品质
总齿廓误差(F_a)	μm	16	25		10		14		21	
齿廓角误差(f_{α})	μm	±10	24	{10}	-4	{6}	-11	{8}	-14	{9}
齿廓形状误差(f_b)	μm	12	6		9		5		17	
总对中误差(F_b)	μm	18	17		28		16		26	
齿对中误差(f_{Hb})	μm	±16	-25	{8}	-41	{10}	-21	{8}	34	{9}
全长对中误差(f_{Bb})	μm	9	6		9		10		11	
径向跳动(F_r)	μm	32	16	6	17	7	12	5	25	8
累积节矩误差(F_p)	μm	50	15	5	19	6	13	4	41	8

* 锻钢齿轮经过磷化处理

表4 压制、烧结及用碾压选择性表面致密化之后齿轮主要尺寸

Table 4 Major gear dimensions after pressing, sintering and selective surface densification by rolling

齿轮尺寸	单位	技术规范	压制生坯	烧结态	碾压后	锻钢齿轮
用二球测量(Mdk)	mm	61.567~61.600	61.679	61.533	61.401	61.457
根径(d_r)	mm	51.310~51.700	51.854	51.712	51.622	51.524
齿顶直径(d_a)	mm	60.160~60.550	60.711	60.534	60.612	60.369

表5 粉末冶金齿轮和常规锻钢齿轮的表面粗糙度

Table 5 Surface roughness of PM gears and conventional wrought steel gears μm

粗糙度	压制生坯	烧结态	碾压后	锻钢齿轮
R_a	0.38	0.41	0.20	1.90
R_s	2.08	3.35	1.35	11.34
R_t	1.30	0.72	0.64	5.71
R_i	3.02	5.94	1.79	12.80

4 结论

在这项研究中,研究了粉末冶金螺旋齿轮的品质演变与生产工艺过程的关系,并且和常规生产的相应锻钢齿轮进行了比较。虽然,整条生产线的研究现在尚待完成,即渗碳淬火后齿轮品质的演变是正在进行研究的课题,但可得出以下结论:

1) 碾压后,选择性表面致密化粉末冶金齿轮的品质可达到 DIN Q7 的品质水平,这可和常规的精加工锻钢齿轮的品质相比拟。

2) 粉末冶金齿轮的表面粗糙度比常规的锻钢齿轮好。

3) 按照齿廓与齿对中,粉末冶金齿轮可与常规的锻钢齿轮相比拟,而径向跳动与累积节矩的误差的品质较好。

参考文献

[1] Bengtsson S, Forden L, Dizdar S, et al. Surface densified PM

transmissions gears//2001 International Conference on Power Transmission Components. Advances in High Performance Powder Metallurgy Applications, Ypsilanti MI, 2001;1~25

[2] Bengtsson S, Forden L, Kuylenstierna C. Performance and properties of surface densified PM transmission gears//Proceedings PM² Tech World Congress, Orlando FL, 2002;2~63

[3] Rau G, Sigl L S, Krehl M. Highly loaded PM gears produced by selective densification//SAE World Congress, Detroit, Michigan March 3~6 2003, SAE Technical Paper Series, 2003~01~0334

[4] Dizdar S, Skoglund P, Bengtsson S. Process, quality and properties of high-density PM gears//PM² TEC 2003, International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas NV, 2003;9~45

[5] Johansson P, Bengtsson S, Dizdar S. RCF-testing of selectively densified rollers of PM materials for gear application//PM² TEC 2002 World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Orlando FL, 2002;5~192

[6] Kotthoff G A. Application of high density PM gears for automotive gearboxes by densification of the surface layer, EU Project No. GRD1~1999~10674, Report D15 (M2-W2L), 2002

[7] DIN 3961. Toleranzen für Stirnradverzahnungen: Grundlagen, Beuth Verlag, Berlin, 1978

[8] DIN 3962. Toleranzen für Stirnradverzahnungen: Teil 1~3, Beuth Verlag, Berlin, 1978

(韩凤麟译)