DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.03.012

汽车变速器粉末冶金齿轮研究与分析

刘仕堃,孙长义,郭最润,赖继发,曾建东
(格特拉克(江西)传动系统有限公司,江西 南昌 330013)

摘　要:随着汽车变速器行业发展,对作为核心零部件的齿轮的要求也日益增加。轻量化、低成本、低能耗、新材料等要求,成为其发展中新的挑战。关于粉末冶金斜齿轮在汽车变速器内的应用,从粉末冶金齿轮的设计、工艺、验证等方面阐述其优缺点及应用限制。

关键词:粉末冶金齿轮;耐久分析;检测

中图分类号:TF124　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)03-0286-05

Study and Analysis of Powder Metallurgy Gear for Automotive Transmission

LIU Shikun, SUN Changyi, GUO Zuirun, LAI Jifa, ZENG Jiandong
(GETRAG (Jiangxi) Transmission Co., Ltd., Nanchang 330013, China)

Abstract: With the rapid development of automotive transmission industry, the requirement of gear as the core component was also increasing. Lightweight, low cost, low energy consumption, new materials and other requirements have become new challenges in its development. As for the application of PM helical gears in automotive transmission, the advantages and disadvantages and application limitations of PM helical gears are expounded from the aspects of design, process and verification.

Key words: powder metal gear; durability analysis; inspection

随着汽车变速器行业飞速发展,对作为核心零部件的齿轮的要求也日益增加。轻量化、低成本、低能耗、新材料等要求,成为其发展中新的挑战。决定尝试使用粉末冶金技术制造渐开线斜齿轮。

粉末冶金技术,齿轮件重存在降低8%~20%的潜在机会,亦可降低诸如MT、AMT、DCT等变速箱内同步机构惯量。同时,产品工艺链将缩短,齿轮制造所需的厂房面积、设备投资、能量消耗相较传统钢制齿轮加工工艺,均有所节约。此技术可能将会对未来齿轮制造业务,带来巨大变化。

粉末冶金齿轮技术优势:① 材料总体利用率可达95%以上;②不需要或只需极少量切削加工;③零件尺寸稳定,一致性好,精度高;④生产效率高,适合大批量生产,所需成本比切削加工低。

1　粉末冶金齿轮应用分析

由于在同等条件下粉末冶金材料力学性能可能低于钢件,所以选择了某款成熟前驱六速手动变速器内的"输入四档齿轮"(齿数31,模数1.85,压力角15°,螺旋角34°),改制为粉末冶金齿轮,并研究和分析其工艺及性能,同时与渗碳钢齿轮进行简要的对比分析。

1.1　材料的选择

所选铁基粉末由于需经压实、烧结和表面致密化处理,所以需要满足以下几个方面的要求。

(1)拥有良好的流动性及压制性,保证压制出的齿轮各部位都能达到设计所需密度。

(2)粉末粗坯烧结后,其尺寸前后变化应尽量接近于零,且硬度应在100~170 HV10,以防零件过硬而产生裂纹。

(3)材料经致密化滚压后,齿面能够形成理论无孔隙层。

(4)所选的材料应具有一定的淬硬性,保证热处理后齿面能达到设计所需硬度,而零件芯部应具有较高韧性。

(5)所选铁基粉末需适应表面热处理需求。

基于上述因素,选择Astaloy 85 Mo+C预合金铁基粉末,其材料成分如表1。

1.2　材料性能分析

在材料性能方面,为提升粉末冶金零件的杨氏模量E、泊松比ν及疲劳性能,粉末冶金齿轮在齿面及齿根表面轮廓上需要通过特别工艺得到一个表面充分紧密、随后向着芯部方向密度逐渐减小的深约

收稿日期:2018-11-13

作者简介:刘仕堃(1986-),江西南昌人,机械设计工程师.主要从事汽车变速器齿轮设计方面的工作.
电话:15979153129,E-mail:shikun.liu@magna.com

表1 粉末冶金Astaloy 85 Mo+C材料成分 w(%)
Tab.1 Materials composition of Astaloy 85 Mo+C in powder metallurgy

元素	Fe	Mo	C	其他	MnS 可选
最小	剩余部分	0.6	0.1	-	-
最大	剩余部分	1.1	0.5	2.0	0.5
正常	剩余部分	0.85	0.2	-	-

1 mm 的致密层(如图 1 所示)。

经过分析和检测，可将致密层大致分为五层，每层约 0.2 mm，运用公式(1)和(2)得到可用于仿真分析计算的重要参数[1]，如表 2：

$$E=E_0\times\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{3.4} \tag{1}$$

$$\nu=\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.16}\times(1+\nu_0)-1 \tag{2}$$

式中，ρ 为粉末件密度；E_0、ρ_0、ν_0 分别为钢件杨氏模量、密度、泊松比。

表 2 不同密度区域杨氏模量及泊松比
Tab.2 Young´s modulus and poisson´s ratio in different density areas

截面编号及密度	杨氏模量 /GPa	泊松比
1 (7.64 g/cm³)	192	0.282
2 (7.5 g/cm³)	180	0.278
3 (7.35 g/cm³)	168	0.274
4 (7.03 g/cm³)	145	0.265
5 (6.96 g/cm³)	140	0.263
Core(pure PM) (6.95 g/cm³)	139	0.262

1.3 结构设计

粉末冶金制造采用一体成型技术，在特制的刚性封闭模具中将金属粉末铸造成型，所以零件结构的重新设计可以免去钢件上的一些空刀槽，使结构更紧凑[2]。

同时，进行结构设计时需考虑避免以下问题。

(1)避免局部材料薄壁，以便于装粉压实，并防止出现裂纹。

(2)尽量避免在侧壁上设计沟槽和沉孔，因为光滑的侧壁有利于压实或减少余料。

(3)应尽量设计相对简单且对称的形状结构，避免截面积落差变化过大以及窄槽、球面等，以利于模具制造和压实。

(4)在各侧壁上的过渡交接处应采用圆角设计，避免出现锐边，防止模具和压坯时产生应力集中。

1.4 仿真疲劳强度计算

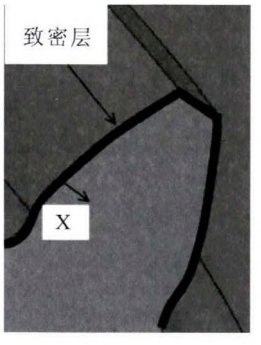
传统粉末冶金零件由于其内部存在孔隙，所以在同等条件下其材料特性参数应低于钢件，即表面弯曲疲劳强度和接触疲劳强度往往比渗碳钢齿轮要差。通过表面致密化处理后在该零件齿部与滚轧模接触的表面几乎达到全致密，再经过合理的热处理及齿轮参数设计优化之后，其弯曲疲劳强度和接触疲劳强度完全可以满足相关使用寿命要求，并接近渗碳钢件的水平。

参照 GB/T 14230 齿轮弯曲疲劳强度试验方法，获得粉末冶金弯曲疲劳 SN 曲线，与 ISO6336 16MnCr5(MQ)进行对比，得到齿轮弯曲强度的对比结果，见图 2。从结果上看，粉末冶金齿轮的弯曲疲劳强度，接近渗碳钢的水平。

2 粉末冶金齿轮工艺过程研究

通常，对于仅采用一次压制、一次烧结的普通粉末冶金工艺生产出来的部件，其密度基本都在 7.2 g/cm³ 以下，如变速器中的换挡鼓齿轮、同步器齿毂等应用，其表面及内部存在大量的孔隙，使其抗疲劳性能大大降低。而变速器传动齿轮，需要在高转速的状态下承受较高的载荷，容易产生断齿、齿面点蚀等失效。基于以上原因，粉末冶金变速器齿轮需要正确选择材料，并在经过压制、烧结工艺后，再进行表面致密化处理，最后进行热处理及后续的机加工处理，以得到优良的力学性能。

新的输入四档齿轮，在将粉末冶金工艺与传统齿轮加工工艺结合后，工艺过程如图 3，从这种工艺路线可以看出，工艺路线大大缩短，减少了加工的复



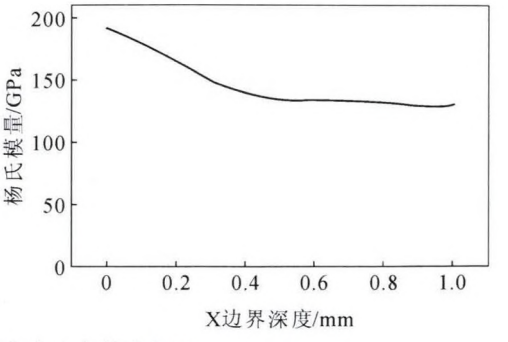


图 1 粉末冶金齿轮致密层
Fig.1 Dense layer of powder metallurgy gear

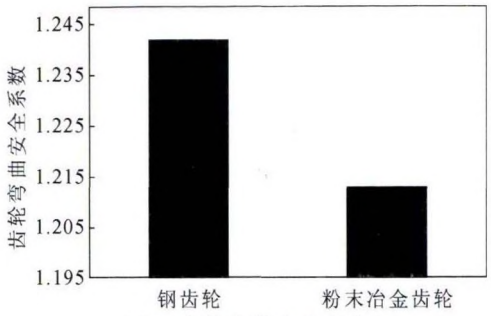


图 2 齿轮弯曲疲劳强度
Fig.2 Bending fatigue strength of gear

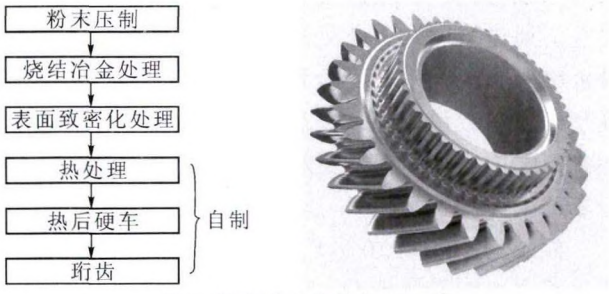


图 3 粉末冶金齿轮加工工艺
Fig.3 Powder metallurgy gear processing technology

杂性,可以大大节约厂房和设备的投入。

2.1 “表面致密化处理”

此工序通过专门的齿轮滚压机来完成，如图 4 所示。两个依据齿轮产品渐开线几何形状而专门设计的主动滚压齿轮将“预加工齿轮”挤压在中间。滚压齿轮在高速旋转的同时又将压力施于“预齿轮”的齿面及齿根表面,产生表面滚压致密的效果[3]。

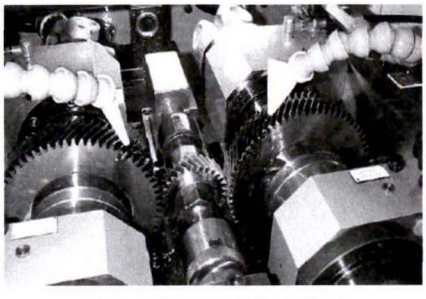


图 4 齿轮表面致密化处理
Fig.4 Treatment of gear surface densification

2.2 “热处理”

对表面致密化后的齿轮需进行渗碳处理,以提高其力学性能,工艺参数如图 5。

经过热处理，零件表面硬度可达到 560~660 HV10,心部硬度将达到 250~320 HV10。综合性能基本满足使用要求。

2.3 “热后硬车”

首先需去除锐边毛刺。由于粉末冶金技术是一种粉末模压技术,模具间存在配合间隙,所以当粉末受压成型时,成型件在模具配合间隙处将产生填充效应,从而产生少量毛刺。可考虑采用滚磨、喷砂

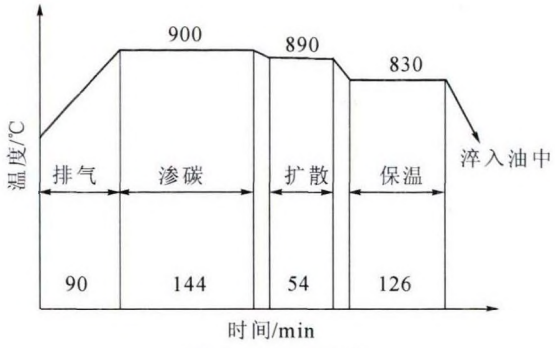


图 5 热处理工艺
Fig.5 Heat treatment process

等恰当的机加工方式去除这些毛刺。

2.4 “珩齿”

粉末冶金齿轮经过表面致密化处理时，由于材料的弹性与应力释放,辗轧后会产生弯曲变形,致使齿面产生齿廓对中误差。热处理时的高温变形,使得相应误差进一步加大。采用珩齿工艺来消除这些误差,这样加工出来的粉末冶金齿轮齿面精度,与类似的钢齿轮在同一水平。

3 品质对比分析

选取输入四档齿轮钢齿轮和粉末冶金齿轮各一件(实物如图 6、图 7 所示),对品质进行比较。

图 6 钢齿轮
Fig.6 Steel gear

图 7 粉末冶金齿轮
Fig.7 Gear of powder metallurgy

3.1 质量

钢件 0.110 kg,粉末冶金件 0.082 kg,粉末冶金齿轮质量减轻 25%;

3.2 齿根粗糙度

由于消除了传统切削加工的刀痕，粉末冶金齿轮碾压后的齿根粗糙度非常好，优于滚齿加工的钢

齿轮，如图 8。

钢件齿轮：Ra=0.445 Rz=2.429 R_{max}=3.216

粉末冶金齿轮：Ra=0.349 Rz=2.433

R_{max}=2.761

3.3 轮齿成品精度

钢齿轮与粉末冶金齿轮均采用热处理后珩齿工艺，经检测，两者成品齿面精度相当[4]，均可达到 DIN 3961 8 级水平。

3.4 花键精度

粉末冶金齿轮的齿形及精度，优于钢齿轮。如图 9。

3.5 密度

相较于钢件紧实的内部结构，粉末冶金零件内部存在孔隙，每批次粉末冶金齿轮的齿部密度都必须抽检，并重点关注。

基于阿基米德方法，可以找到一种分析计算粉末冶金件密度的方式，其步骤及原理概述如下。

(1)首先准备好切割设备、工装夹具、研磨抛光设备、光学显微镜和专业摄像头。

(2)从齿部切制一个质量大于 5 克的标准试块，并在分度圆、与齿根圆角相切 30°的直线的法向方向，这两个区域内进行密度梯度的检测，如图 10 所示。

(3)使用光学显微镜对相关区域放大 200 倍，再使用专业摄像头进行等距拍摄，由表(image 1)至里(image 5)分别拍摄五张照片，所得照片如图 11 所示；(注：照片数量及大小可视零件情况而定)。

(4)图 11 内黑点为气孔，通过特定软件分析出单位尺寸照片内气孔所占面积百分比，从而根据公式(3)计算出真实的密度值。

$$\rho=7.83/100\%\times(100\%-\text{气孔占比}) \quad (3)$$

其中，7.83 g/cm³ 为此粉末材料理论最大密度。

在对每个区域进行逐一分析计算谱，最终可用图表归纳总结出零件不同区域的密度梯度。并与设计要求进行比对。

4 测试结果

将粉末冶金输入四档齿轮装配到相应型号变速器中，并按照所匹配整车路谱生成的耐久载荷谱在专业实验台架上进行了测试。连续 3 台变速器通过

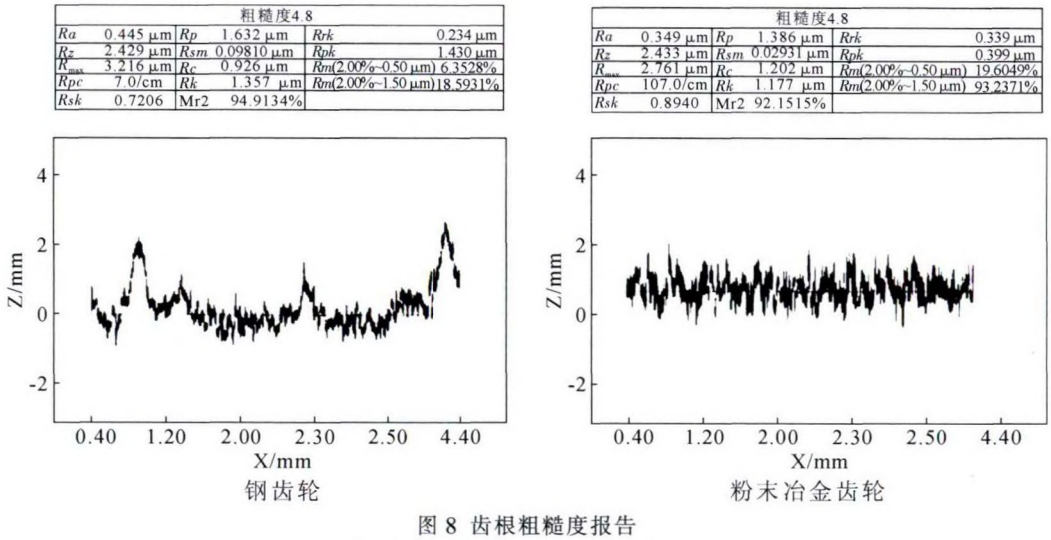


图 8 齿根粗糙度报告

Fig.8 Roughness report of tooth root

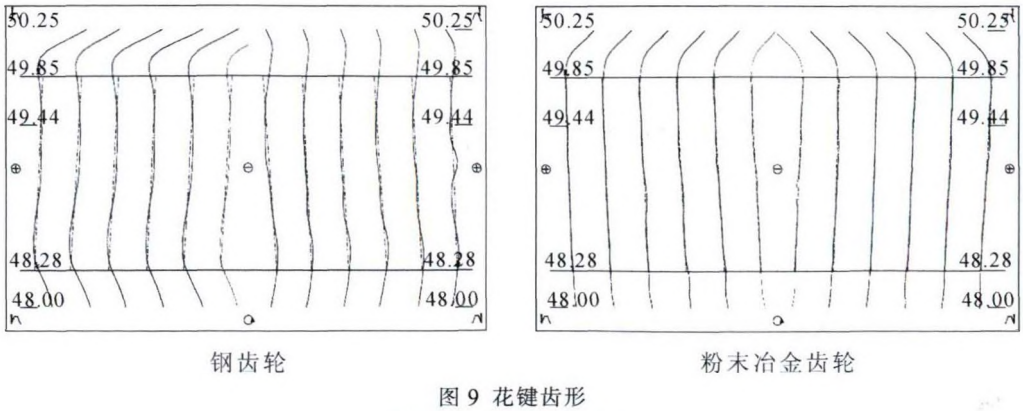


图 9 花键齿形

Fig.9 Spline tooth shape

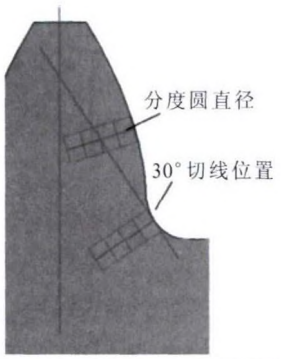


图 10 齿部检测区域示意图
Fig.10 Schematic diagram of tooth detection area

了两倍于耐久载荷谱运转时间的耐久循环试验，满足此款变速器使用寿命要求。

5 结论

(1)粉末冶金齿轮作为绿色环保的可持续性技术，将带来更高的原材料利用率、更低的能量损耗。其更少的加工工序也意味着较少的设备投入和较小的厂区面积规划，且其生产效率较高，成本效益明显。

(2)通过合理的设计，粉末冶金齿轮拥有充足设计余度、减重、降低应力、抑制噪音、吸震等能力。在齿轮设计开发阶段，工程师们又多了一种新的选择。

(3)粉末冶金齿轮需要投入大量模具，在设计未冻结阶段，模具因设计变更而带来的成本风险较大；由于中低产量零件采用粉末冶金工艺生产时经济性不高，推荐大批量需求时使用。

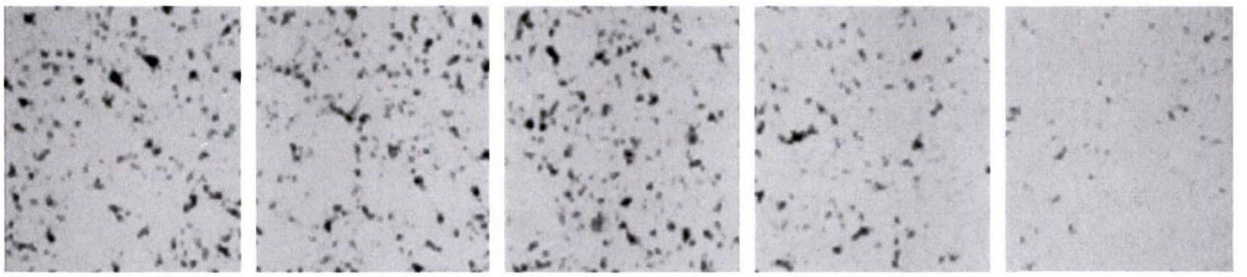


Image 5　Image 4　Image 3　Image 2　Image 1

图 11 局部放大图　×200
Fig.11 Partial enlargement detail

参考文献：

[1] Flodin, A. and L. Forden. "Root and Contact Stress Calculations in Surface-Densified PM Gears," Proceedings from World PM2004 Conference Vol. 2, pp. 395-400.

[2] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京：冶金工业出版社，1997.

[3] 吴成义，张丽英. 粉体成形力学原理[M]. 北京：冶金工业出版社，2003.

[4] 李辉隆，黄俊辉. 粉末冶金齿轮制品精度探讨 [J]. 粉末冶金技术，2005，23(3)：190-194.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　电话/传真：029-83222071　技术咨询：13609155628