

# 分段成形磨削工艺在超大模数 齿轮加工上的应用

刘成<sup>1,2</sup>, 杨超<sup>1,2</sup>, 信稳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>洛阳矿山机械工程设计研究院有限责任公司 河南洛阳 471039

<sup>2</sup>矿山重型装备国家重点实验室 河南洛阳 471039

**摘要:** 利用 ZP50 数控成型磨齿机单面分段成型磨削, 来实现超大模数齿轮齿形的加工, 并通过具体实例对此磨削方法加以验证。此磨削工艺优势在于, 不需要增添专用机床和特殊工装刀具, 是一种适用性强、经济性好的齿形精加工方法。

**关键词:** 超大模数; 硬齿面; 齿形精加工; 分段成形磨削

**中图分类号:** TH132.412 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-3954(2020)09-0070-05

**DOI:** 10.16816/j.cnki.ksjx.2020.09.014

## Application of sectional profile grinding on machining of gear with ultra-large module

LIU Cheng<sup>1,2</sup>, YANG Chao<sup>1,2</sup>, XIN Wen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Luoyang Mining Machinery Engineering Design Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Mining Heavy Equipment, Luoyang 471039, Henan, China

**作者简介:** 刘成, 男, 1966年生, 高级工程师, 主要从事机械加工工艺研究工作。

况、截割负载突变和牵引速度变化情况下的动力学特性, 发现不同牵引速度下截割滚动所受转矩为负载; 受负载转矩的影响, 低速级行星齿轮部分受外部载荷直接作用, 振动最大, 随着传动链中阻尼的消振作用, 高速部分齿轮副的振动逐渐减弱; 截割负载突变和牵引速度的增加使传动系统中高速级齿轮的振动和受力明显加剧。

### 参 考 文 献

- [1] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
- [2] 杨阳, 邹佳航, 秦大同, 等. 采煤机高可靠性机电液短程截割传动系统[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4): 111-119.
- [3] LIU C, QIN D, LIAO Y. Electromechanical dynamic analysis for the drum driving system of the long-wall shearer[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(10): 1-14.
- [4] 王洪英, 刘春生, 王金波. 采煤机镐形齿与刀形齿截割力试验分析[J]. 煤矿机械, 2002(6): 29-31.
- [5] TIRYAKI B, BOLAND J N, LI X S. Empirical models to predict mean cutting forces on point-attack pick cutters[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(5): 858-864.
- [6] 葛帅帅, 秦大同, 胡明辉, 等. 不同截割工况下变速截割采煤

机截割性能多目标优化[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2338-2347.

- [7] LI Z, GE S, ZHU H. Key problems of monitoring and diagnosis of wear faults of key components for shearer in deep coal seam[J]. Tribology, 2017, 34(6): 729-731.
- [8] 刘长钊, 秦大同, 廖映华. 采煤机截割部机电传动系统动力学特性分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 14-22.
- [9] 杨阳, 袁媛辉, 李国伟. 基于周期性激励的采煤机电液截割传动系统特性分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 217-222.
- [10] 张东升, 于海洋, 徐健博, 等. 采煤机截割部传动系统非线性特性研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(1): 249-256.
- [11] 易园园, 秦大同, 刘长钊, 等. 瞬态过程中采煤机电传动系统动态特性分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 142-149.
- [12] CHEN H, WANG X, GAO H, et al. Dynamic characteristics of wind turbine gear transmission system with random wind and the effect of random backlash on system stability[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 (vols 203-210), 2016: 0954406216640572.
- [13] ZAKY M S. High performance DTC of induction motor drives over a wide speed range[J]. Electrical Engineering, 2015, 97(2): 139-154. □

(收稿日期: 2020-06-10)

(修订日期: 2020-06-23)

Abstract: ZP50 CNC profile grinding machine was applied to conduct single-side sectional profile grinding, so as to realize the high-precision machining of the case-hardened gear with ultra-large module, and specific example was offered to verify the grinding method. The advantage of the grinding method was there was no need to add special machine tool and fixture tools. It was an economical and strong applicability method for tooth profile finishing.

Key Words: ultra-large module; case-hardened; tooth profile finishing; sectional profile grinding

随着工业技术发展和产业结构的调整, 矿山设备朝着超大型化方向发展, 为了满足齿轮高承载能力的要求, 齿轮亦需向超大模数、高齿面硬度、高精度方向发展<sup>[1]</sup>。

模数  $50 \leq m_n \leq 135$  的齿轮称为超大模数齿轮。常规齿形加工时, 其齿面硬度为 220~300 HB, 齿轮加工精度为 9~10 级, 齿面粗糙度不小于  $Ra 6.3$ <sup>[1]</sup>。

## 1 常规齿形加工

通常模数  $m_n < 50$  的渗碳淬火齿轮齿形加工, 常用数控成型磨齿机磨削加工, 其齿形加工的工艺流程如下:

- (1) 锻造 齿轮毛坯锻造成形。
- (2) 粗车 齿坯粗加工, 使其具有零件的外形。
- (3) 探伤 检验及保证齿坯内在质量。
- (4) 正火 改善齿坯内部组织结构为后续工序打基础。
- (5) 半精车 找正齿顶圆及端面。
- (6) 齿形的预加工 模数  $m_n \leq 36$  时, 选用磨前滚刀滚齿, 如图 1 所示; 模数  $m_n > 36$  时, 选用指形铣刀铣齿, 如图 2 所示。
- (7) 渗碳淬火 保证齿面的高硬度和渗碳层深度要求。
- (8) 喷丸处理 表面清理以及改善齿根部表面状

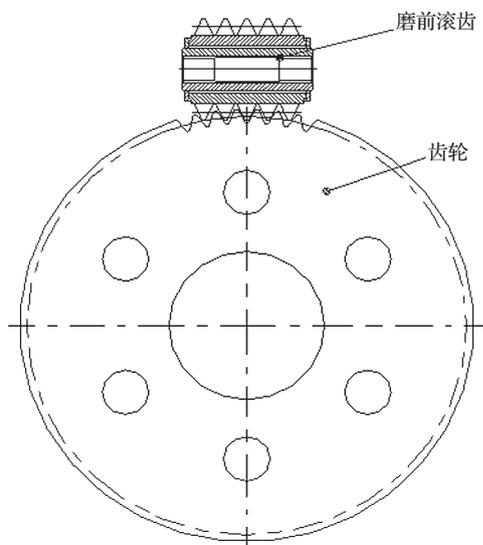


图 1 滚刀铣齿示意  
Fig. 1 Hobbing sketch

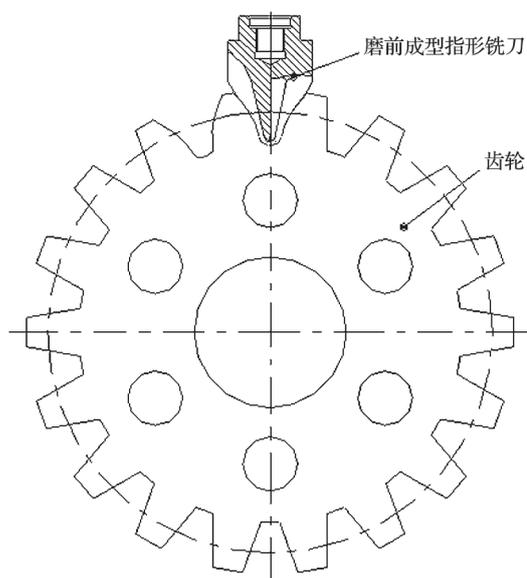


图 2 成型指形铣刀半精铣齿  
Fig. 2 Semi-finishing tooth milling with shaped finger-type milling cutter

况。

- (9) 精车 加工出齿顶圆和齿轮两端面等基准面。
- (10) 齿形滚切半精加工 修正渗碳淬火变形, 同时切除部分加工余量, 对于  $36 < m_n < 50$  的齿轮不执行此步骤, 直接磨齿。
- (11) 磨齿 采用双斜边砂轮对齿形成型磨削精加工, 双面或单面成型磨削, 如图 3 所示。
- (12) 检查 磁粉探伤和检查轮齿精度。

## 2 超大模数齿轮加工

自升式海洋平台升降系统用齿轮轴, 其模数  $m_n = 62.667$ , 齿面渗碳淬火, 精度要求 5~6 级, 及齿面粗糙度要求  $Ra 0.4 \sim 0.8$ 。该齿轮具有大模数、高精度、高硬度等特点, 齿轮加工属于极限加工, 技术含量高, 是平台升降系统制造中的挑战性难题<sup>[2]</sup>。为了解决该制造难题, 笔者摒弃常规工艺流程, 利用 ZP50 数控成型磨齿机单面分段成型磨削法进行超大模数硬齿面加工, 为该类非常规齿形加工提供了新的解决方法。其齿形精加工, 若采用铸造-修磨、线切割/火焰切割-修磨、刨或插削-修磨、铣削-修磨等常规方法<sup>[3-4]</sup>, 齿轮精度和齿面粗糙度均满足不了图纸要求; 另外, 采用 SH1200 梳齿机精梳齿形, 精度

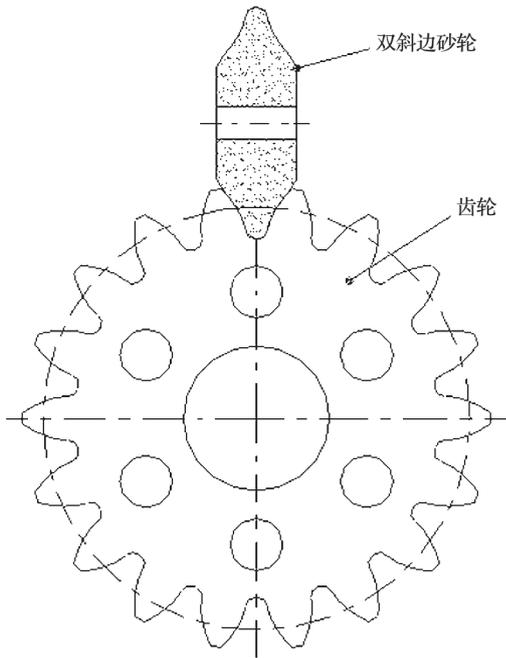


图 3 成型磨齿示意

Fig. 3 Sketch of tooth profile grinding

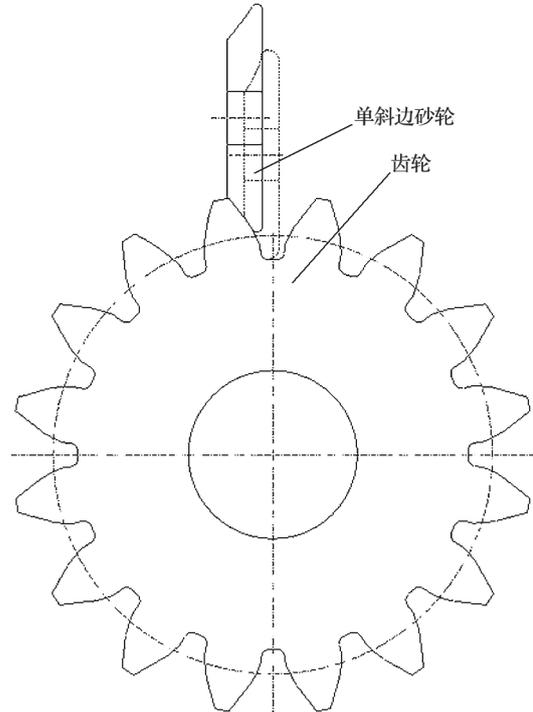


图 4 单斜边砂轮单面分段磨削示意

Fig. 4 Sketch of sectional profile grinding with SBGW

能满足要求,但由于齿面硬度高,齿面粗糙度达不到要求;由于齿轮齿槽深,齿槽宽,渐开线展开长度超长,受数控成型磨齿机 ZP50 加工能力限制,也不能采用常规渗碳淬火齿轮齿形磨削精加工工艺。

常规磨齿选用双斜边砂轮一次磨削齿槽的双齿面或单齿面<sup>[6]</sup>,超大模数 ( $m_n = 62.667$ ) 齿轮磨削受磨削机床能力的限制,一次磨削完不成齿槽的双面磨削或单面磨削。为此,将齿轮的渐开线齿面分  $N$  段编制程序,程序调试合格后与 ZP50 数控成型磨齿机链接调试,合格后输入图纸参数先模拟加工,而后对超大模数渗碳淬火齿轮齿形单面分段磨削精加工,如图 4 所示。即对齿的一侧面齿形分  $N$  段成形磨削后,再对另一侧面分  $N$  段成形磨削,每一侧面磨削分粗磨、半精磨、精磨削,并达到图纸要求的精度和齿面粗糙度,整个磨削过程由数控程序控制。另外,由于齿轮模数较大,磨削过程中产生的成型磨削力较大,为增强磨削砂轮的刚性,磨削时不选用双斜边砂轮,而采用单斜边砂轮实施磨削<sup>[6]</sup>。

模数  $m_n = 62.667$  硬齿面齿轮的热加工工序与模数  $m_n < 50$  齿轮的工艺相同,区别在于齿形磨削前的加工及齿形磨削需要采用非常规手段,其齿形加工的工艺流程如下:

- (1) 锻造 齿轮毛坯锻造成形。
- (2) 粗车 齿坯粗加工,使其具有零件的外形。
- (3) 探伤 检验及保证齿坯内在质量。
- (4) 正火 改善齿坯内部组织结构为后续工序打基础。
- (5) 半精车 找正齿顶圆及端面。

- (6) 齿形的预加工 可采用 4 种加工方法:① 选用相同超大模数的指形铣刀,在卧式或立式滚齿机单分度铣齿;② 在镗铣床选用棒铣刀沿齿面阶梯铣,而后选用数控镗铣床程序插补铣;③ 在镗铣床选用棒铣刀沿齿面阶梯铣,而后选用数控加工中心铣齿;④ 梳齿机梳齿加工齿形。

(7) 渗碳淬火 保证齿面的高硬度和渗碳层深度的要求。

(8) 喷丸处理 表面清理以及改善齿根部表面状况。

(9) 精车 加工出齿顶圆和齿轮两端面等基准面。

(10) 齿形滚切半精加工 可采用 3 种方法:① 选用数控镗铣床程序插补铣齿形;② 选用数控加工中心铣齿形;③ 梳齿机梳齿加工齿形。

(11) 磨齿 选用高效精密数控成型磨齿机床,同时配备高精光整磨削砂轮分段成形磨削以完成齿形的磨削精加工,并达到图纸要求的高精度和低粗糙度。具体实施:根据超大模数  $m_n \geq 50$  参数将渐开线齿面分成  $N$  段 ( $N \geq 2$ ),编制并调试程序,调试合格后与数控成型磨齿机程序链接,实施模拟加工;磨削时,根据齿面渐开线分段程序修正砂轮,使砂轮轮廓满足磨削段的齿形轮廓,先磨削各齿槽同一侧被磨削段齿廓,待第一段齿形磨削完成,重新根据下一段被磨齿形修正砂轮,磨削下一段齿形,直至一侧齿形磨削完成;调装砂轮同理磨削各齿槽另一侧同位被磨削段齿廓,直至整个齿廓磨削完成;磨削顺序从齿根部到齿顶部,先粗磨、再半精磨、精磨。每一磨削工步完成

均要修正砂轮廓形。

(12) 检查 磁粉探伤和检查轮齿精度。

### 3 齿轮加工

#### 3.1 主要参数及要求

齿轮轴的轮齿为标准渐开线直齿，其主要的几何参数如表 1 所列；齿轮轴材料采用低碳合金渗碳钢，其材料牌号、热处理方式及其相关要求如表 2 所列；轮齿齿面公差及粗糙度要求如表 3 所列。

表 1 齿轮主要几何参数

Tab. 1 Main geometric parameters of gear

模数 $m_n$	齿数 $z_1$	压力角 $\alpha_n / (^\circ)$	齿顶高系数 $h_a^*$	顶隙系数 $c_p^*$	齿宽 $b_1 / \text{mm}$
62.667	16	20	1	0.4	600

表 2 齿轮材料及热处理技术要求

Tab. 2 Material and heat treatment technical requirements of gear

齿轮材料	热处理方式	齿面硬度	渗碳层深度/mm
17Cr2Ni2Mo	渗碳淬火	60 ~ 64 HRC	6.0 ~ 6.5

表 3 轮齿齿面公差及粗糙度要求

Tab. 3 Tolerance and roughness requirements of tooth surface

齿距累积偏差 $F_p / \text{mm}$	齿向偏差 $F_b / \text{mm}$	齿廓偏差 $F_f / \text{mm}$	齿面粗糙度 Ra 0.4
0.32	0.089	0.231	

#### 3.2 齿形加工

齿坯加工按常规加工技术执行及热处理按热处理工艺执行(此处热加工工序省略)。模数  $m_n = 62.667$  的渗碳淬火齿轮轴齿形加工具体步骤如下：

##### 3.2.1 齿形预加工

由表 1 数据可计算出：全齿深为 150.401 mm，齿槽最大宽度为 200.650 mm。由于渐开线展开长度已远远超出现有滚齿机加工能力，因此需要采用非常规切齿工艺：

(1) 选用模数  $m_n = 50$  的指形铣刀单分度粗开齿槽。

(2) 选用模数  $m_n = 62.667$  分段指形铣刀分 2 段预加工齿形，如图 5 所示。分别采用指形铣刀加工出齿轮的上半部和下半部齿形，两段加工之间需要重新调整机床，需要注意的是，齿轮下半部齿槽的深度和齿底部过渡圆弧按图铣成，且所有齿面按工艺规范留量 4 mm。

(3) 将齿坯调装于梳齿机 (SH1200) 上，如图 6 所示。选用高速钢材料梳齿刀对轮齿齿形展成加工，并修正齿形齿距，以消除 Y36125 卧式滚齿机单分度铣齿造成的齿形齿距误差，按工艺规范齿单面留量 1 mm。

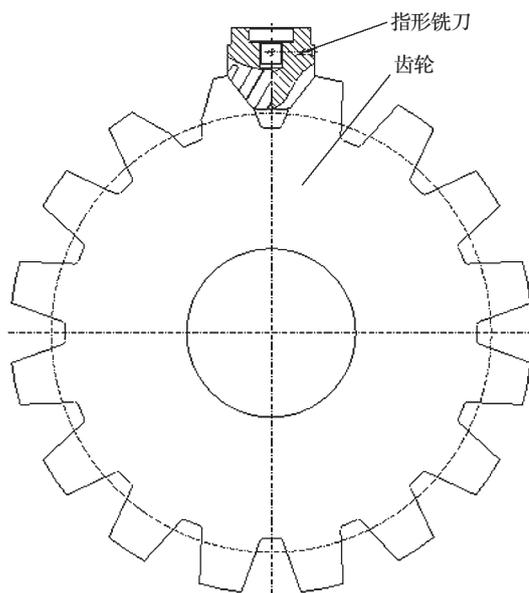


图 5 轮齿铣齿模型

Fig. 5 Tooth milling model

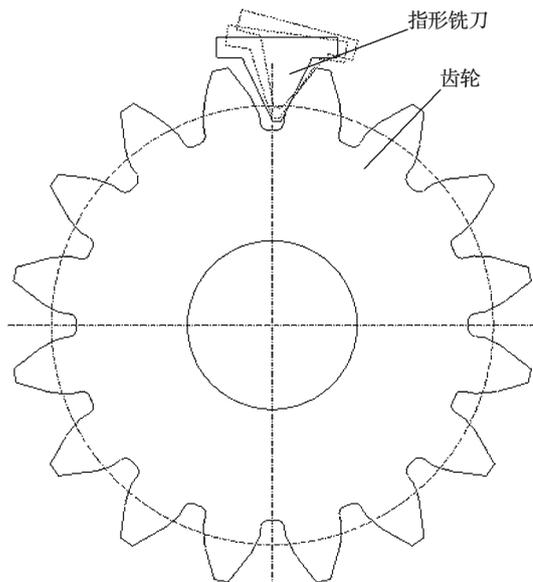


图 6 梳齿工序

Fig. 6 Tooth slotting process

##### 3.2.2 齿形半精加工

齿轮渗碳淬火之后，齿轮轴重新调装于梳齿机上，选用粉末冶金涂层梳齿刀展成梳齿半精加工，以修正渗碳淬火热处理造成的轮齿变形，同时去除部分齿面余量，以提高磨齿效率。按工艺规范齿单面留磨削余量 0.4 ~ 0.5 mm。

##### 3.2.3 齿形磨削精加工

ZP50 精密数控成型磨齿机如图 7 所示。将齿轮轴调装于 ZP50 上，根据齿轮轴参数，按单齿面分为 2 段编程、调试及试运行，合格后实施分段模拟磨削精加工。加工工艺如下：

- (1) 工件找正、夹紧；
- (2) 选取单斜边砂轮，并对砂轮平衡修正，修正

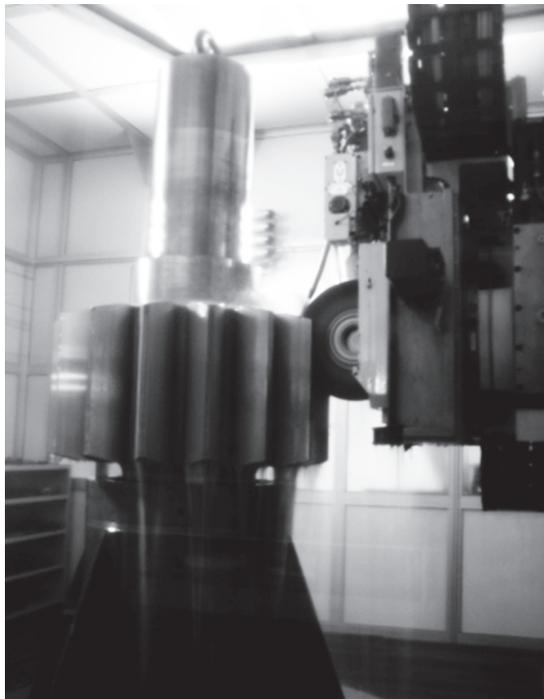


图7 ZP50 数控成型磨齿机

Fig. 7 ZP50 CNC profile grinding machine

后安装于 ZP50 数控磨齿机上；

(3) 输入图纸参数；

(4) 按程序根据齿根部渐开线修整砂轮轮廓，成型磨削各单齿面的齿根部；

(5) 按程序根据齿顶部渐开线修整砂轮轮廓，成型磨削同齿面各齿顶部；

(6) 重新调装砂轮，重复步骤 4、5，成型磨削另一齿面；

(7) 经粗磨、半精磨、检查合格后精磨成齿形。

### 3.3 精度检测

对模数  $m_n = 62.667$  的渗碳淬火齿轮轴分别采用铣齿粗加工及梳齿加工半精加工，并在 ZP50 数控成型磨齿机上采用单面分段成型磨削法进行精加工，完成整个齿形加工，加工后轮齿精度检测结果如表 4 所列。

表 4 轮齿精度检测结果

Tab. 4 Inspection record of tooth precision

检测项目	检测工具	标准值	实测记录
齿面粗糙度 Ra	粗糙度仪	Ra 0.4	Ra 0.3
齿廓偏差 $F_r$ /mm	机床自测	$\leq 0.220$	0.100
齿向偏差 $F_\theta$ /mm	机床自测	$\leq 0.089$	0.05
齿距累计误差 $F_p$ /mm	机床自测	$\leq 0.320$	0.191
检测结论	合格	合格	合格

## 4 结语

笔者充分利用现有设备实现了超大模数硬齿面齿轮的高精度齿形加工。首先，在齿轮加工方面，利用 Y36125 普通卧式滚齿机、SH1200 梳齿机和 ZP50 数

控磨齿机相结合，充分发挥机床的加工优势；其次，采用了分段指形铣刀分段粗铣齿和专用磨削砂轮分段精磨齿的新工艺，并采用数控模拟技术，既保证了超大模数硬齿面齿轮齿形加工精度，又提高了加工效率，也扩展了现有机床的加工能力。通过实例加工论证，分段成型磨削工艺不仅适用于超大模数硬齿面齿轮的高精度齿形加工，同样还适用于调质或调质+齿面淬火高精度超大模数齿轮齿形精加工，也可用于大模数齿轮超出现有数控成型磨齿机磨削深度限制的齿形精加工。

### 参考文献

- [1] 唐文献, 马宝, 吴琼. 超大模数齿轮齿条承载能力影响因素研究 [J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 294-299.
- [2] 乔雪涛, 李钜, 路明. 超大模数齿轮齿条加工现状及分析 [J]. 成组技术与生产现代化, 2006, 23(3): 41-43.
- [3] 张萍, 刘成, 刘景兰, 等. 超大模数齿轮齿形加工技术应用 [J]. 矿山机械, 2018, 46(5): 73-75.
- [4] 阎建慧, 田瑾, 毕俊青, 等. 超大模数齿轮轴齿形的半精加工及指状铣刀设计 [J]. 工具技术, 2015, 49(10): 78-80.

(收稿日期: 2020-06-11)

(修订日期: 2020-07-15)

M&PE 涵盖整个矿山机械全部专业的杂志!

欢迎刊登广告!



α 矿山机械杂志社  
MINING & PROCESSING EQUIPMENT

电话: 0379-64087880 (李颖)