

## 烧结温度对MIM小模数齿轮精度的影响

刘祚时<sup>1</sup> 明澳阳<sup>1</sup> 任继华<sup>2</sup> 王笑一<sup>3</sup> 钟志丞<sup>1</sup> 朱敏峰<sup>4</sup> 朱卫东<sup>5</sup>

(1. 江西理工大学 机电工程学院, 赣州 341000)

(2. 赣南科技学院 智能制造与材料工程学院, 赣州 341000)

(3. 河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003)

(4. 江西悦安新材料股份有限公司, 赣州 341500)

(5. 江苏精研科技股份有限公司, 常州 213023)

**摘要:**【目的】为提高小模数齿轮的精度, 以420不锈钢粉末为原料, 采用金属粉末注射成形(Metal powder Injection Molding, MIM)工艺, 在1 330~1 360 °C的烧结温度下制备小模数齿轮; 以微观形貌最佳的注射坯为前提条件, 研究烧结温度对小模数齿轮精度的影响。【方法】采用MLA650F场发射扫描电子显微镜观察齿轮注射坯的微观形貌, 分别采用JE 20齿轮测量中心、Image J软件、洛氏硬度计测量了烧结后齿轮的精度、孔隙率、硬度。【结果】结果表明, 在110 MPa注射压力下, 当烧结温度从1 330 °C升高至1 350 °C时, 齿轮表面的孔隙率降低48.28%, 密度提升5%, 硬度提升8.22%, 收缩率持续增大, 精度逐渐提高; 当温度超过1 350 °C后, 孔隙率降低20%, 密度降低0.26%, 硬度降低0.51%, 收缩率缓慢提高, 齿轮精度逐渐下降; 烧结温度为1 350 °C时, 齿轮的综合性能最佳, 孔隙率为1.5%, 密度为7.56 g/cm<sup>3</sup>, 硬度为39.5 HRC, 收缩率为14.1%, 精度等级最高, 达到了标准GB/T 2363—1990的7级精度。

**关键词:** 金属粉末注射成形; 尺寸精度; 烧结温度; 收缩率; 孔隙率; 密度; 硬度

**中图分类号:** TF125 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2025.09.017

## 0 引言

小模数齿轮具有尺寸小、传动精度高、噪声低等特点, 被广泛应用于航空飞行器、数控加工、精密仪器仪表、工业机器人等核心科技领域, 市场需求量巨大<sup>[1]</sup>。滚齿、插齿、线切割、压铸等传统齿轮加工方式效率低、成本高, 无法满足小模数齿轮高效、大规模生产的需求。金属粉末注射成形(Metal powder Injection Molding, MIM)是一种新型的近净成形技术, 其工艺过程通常包括: 制粒、注射、脱脂、烧结。MIM工艺已经逐渐成熟, 形成了一条完整的制造产业链, 能够实现形状复杂产品的高效大规模生产制造, 具有多项优势, 在粉末冶金领域有巨大的发展潜力<sup>[2]</sup>。采用MIM工艺制备小模数齿轮, 可以根据模具模腔的数量, 一次成形多个齿轮, 从而大幅提高生产效率。观察分析发现, MIM工艺加工

的齿轮微观组织均匀、致密性高、性能优越、成本较低<sup>[3-5]</sup>; 相较于压铸成形和滚齿成形, 其具有更高的强度, 更低的成本<sup>[6-7]</sup>。因此, MIM工艺适用于小模数齿轮的生产制造。

在注射成形的过程中, 烧结温度决定了齿轮精度与机械性能的高低, 对小模数齿轮的质量的影响较大<sup>[8]</sup>。国内外许多学者探讨了烧结温度对烧结坯力学性能、微观组织等方面的影响机制, 进行了深入的理论和试验。KAZIOR<sup>[9]</sup>研究了不同烧结温度和氛围对17-4 PH不锈钢致密化程度的影响, 结果显示, 不锈钢经1 340 °C氢气氛围烧结与固溶处理后, 在0.5 mol/L的NaCl溶液中抗点蚀性能最优, 温度和烧结氛围对烧结过程中的致密化程度至关重要。LIAO等<sup>[10]</sup>研究了Fe-4Ni-0.8Mo-0.6C烧结齿轮的结构和机械性能与烧结温度之间的关系, 结果显示, 齿轮相对密度随烧结温度的升高而增大; 烧结温度

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375047)

作者简介: 刘祚时, 男, 1976年生, 江西吉安人, 硕士, 教授; 主要研究方向为智能机器人技术; liuzuoshi@163.com。

任继华(通信作者), 男, 1976年生, 江西于都人, 博士, 高级工程师; 主要研究方向为齿轮; proffrence@163.com。

引用格式: 刘祚时, 明澳阳, 任继华, 等. 烧结温度对MIM小模数齿轮精度的影响[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 136-142.

LIU Zuoshi, MING Aoyang, REN Jihua, et al. Effect of sintering temperature on the accuracy of MIM small-module gears[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(9): 136-142.

为1 320 °C时,相对密度达到最大值,力学性能最佳。陈慧等<sup>[11]</sup>研究了烧结温度(1 300~1 500 °C)对合金显微组织和力学性能的影响,结果显示,随着烧结温度升高,合金致密度升高。ZOU等<sup>[12]</sup>研究了烧结温度、保温时间、渗氮压力等参数对奥氏体不锈钢致密度、收缩率、氮含量的影响,结果显示,烧结温度为1 200 °C,保温时间为6 h,试样致密度较高。ABDULLAH等<sup>[13]</sup>研究了不同烧结温度(1 250、1 300、1 350 °C)对CoCrMo合金微观组织和机械性能的影响,结果表明,烧结温度达到1 350 °C时,烧结后CoCrMo试样表面孔隙体积变小,硬度和密度提高;烧结温度的变化会对合金的微观组织和机械性能产生影响。MIAO等<sup>[14]</sup>分析了烧结温度对多孔NiTi合金微观组织的影响。结果表明,烧结温度从950 °C升高到1 000 °C时,NiTi合金平均孔径从36.00 μm增加到181.65 μm,密度从2.556 g/cm<sup>3</sup>增加到3.030 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率从60.4%降低到51.8%。

目前,关于烧结温度对MIM齿轮精度影响的研究较少。本文采用MIM制备小模数齿轮,观察并分析不同注射压力下的注射坯;以微观形貌最佳的注射坯为前提条件,研究不同烧结温度对各种齿轮偏差(齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差、齿距累积总偏差和径向跳动偏差)的影响,以及各种偏差与孔隙率、密度、收缩率、硬度之间的关系,旨在提升MIM小模数齿轮的尺寸精度,为MIM小模数齿轮的生产制造提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验采用某公司提供的420水雾化不锈钢粉末制备小模数齿轮,粉末平均粒径较小,其平均粒径为8.06 μm,经烧结后的齿轮收缩率均匀性好,强度高。图1为420不锈钢粉末扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)形貌图。可以看出,粉末整体呈球形,粒径细小,无明显团聚现象。420不锈钢粉末粒度分布如表1所示。

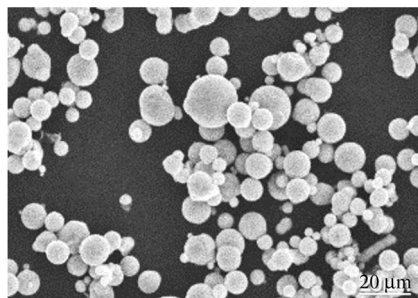


图1 420不锈钢粉末SEM形貌图

Fig. 1 SEM micro-morphology of the 420 stainless steel powder

表1 420不锈钢粉末粒度分布

Tab. 1 Particle size distribution of the 420 stainless steel powder

材料	工艺	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
420	水雾化	2.76	8.06	21.76

注:  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$ 分别表示累计百分含量为10%、50%、90%时对应的粉末粒度。

### 1.2 试验方法

将粉末装载量为58%的420不锈钢粉末与聚甲醛基黏结剂加入密炼机内混合3 h,冷却后加入造粒机中制成喂料。采用TT-160B海天注射机,在100~120 MPa的注射压力、193 °C的注射温度和80 mm/s的注射速度下,制备齿轮注射坯。采用MLA650F场发射扫描电子显微镜,观察不同注射压力下注射坯的微观形貌。采用VGS-466真空烧结炉,以5 °C/min的升温速率,将炉温升到180 °C;然后进行90 min的保温;随后,分别在1 330、1 340、1 350、1 360 °C温度下进行烧结,烧结后的烧结坯分别标记为组1<sup>#</sup>、组2<sup>#</sup>、组3<sup>#</sup>、组4<sup>#</sup>。使用图2所示的JE 20齿轮测量中心测量齿轮烧结坯的齿廓偏差、螺旋线偏差、单个齿距偏差、齿距累积总偏差和径向跳动偏差;采用洛氏硬度计测量不同烧结温度下齿轮硬度;并使用Image J软件计算不同烧结温度下齿轮齿面的孔隙率。



图2 JE 20齿轮测量中心

Fig. 2 JE 20 gear measuring center

## 2 结果与讨论

### 2.1 注射坯微观形貌分析

根据许均力等<sup>[15]</sup>的研究可知,小模数齿轮属于精密传动齿轮,对精度有较高的要求,在实际生产过程中,需考虑注射坯的尺寸变化。可通过控制注射工艺参数来控制注射坯微观形貌,提高产品的尺寸精度。

图3为齿轮注射坯SEM形貌图。可以看出,齿轮注射坯微观形貌存在明显差异。在100 MPa注射压力下,图3(a)中的注射坯齿尖处出现严重的缺料现象,且齿尖外轮廓处出现大量粉末凸起。图3(b)

中的注射坯齿内圈处粉末颗粒被黏结剂均匀包裹，有少量大颗粒粉末聚集。这是因为注射压力较低，充模过程中注射机无法将喂料注射到齿轮模具型腔齿尖处；同时，注射坯内部产生气孔，出现齿尖缺料和粉末颗粒凸起的现象。

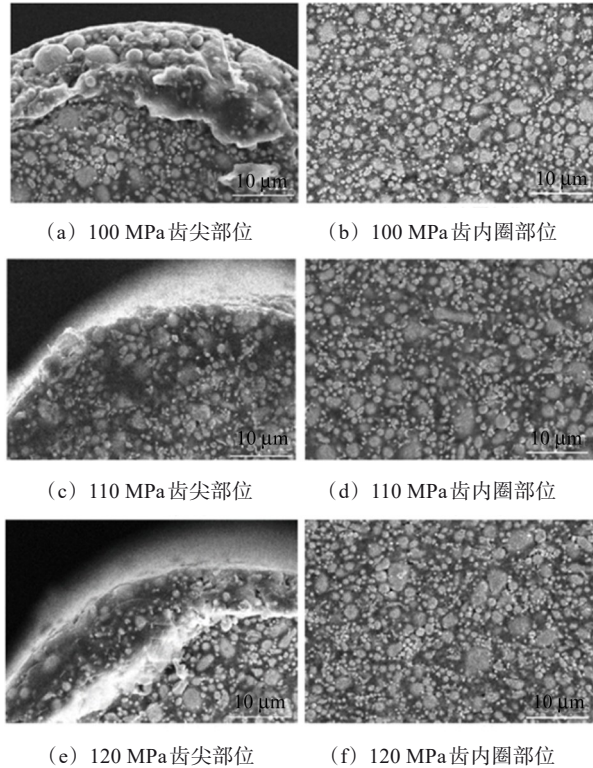


图3 齿轮注射坯SEM形貌图

Fig. 3 SEM micro-morphology of the gear injection blank

在110 MPa注射压力下，图3(c)中的注射坯齿尖处外轮廓较平整，无缺料现象，仅有少量粉末颗粒凸起。图3(d)中的注射坯齿内圈处粉末颗粒被黏结剂均匀包裹，仅有少量粉末和黏结剂的聚集。这是因为注射压力增大，注射机能够将喂料均匀地注射到模具型腔内，充满整个模具。此时注射坯内部气孔基本消除，注射坯微观形貌较优。

在120 MPa注射压力下，图3(e)中的注射坯齿尖处外轮廓较为平整，但沿齿尖处呈现层片状形貌。图3(f)中的注射坯齿内圈处粉末颗粒被黏结剂均匀包裹，未出现粉末和黏结剂的聚集。这是因为在较高的注射压力下，喂料黏度减小；同时，在冷却模具型腔内的注射坯时，其内部温度和压力均高于外表面，形成温度差与压力差，导致注射坯齿尖边角处低黏度喂料溢流到齿尖表面，形成层片状，使齿轮注射坯微观形貌变差<sup>[6]</sup>。

图4所示为不同注射压力下注射坯的偏差。可以看出，随着注射压力的升高，注射坯各个偏差量先减小后增大。齿轮注射坯偏差量从高到低对应的注射压

力排序为：100 MPa下偏差量>120 MPa下偏差量>110 MPa下偏差量。注射压力对注射坯表面质量有较大影响。注射压力过低会引起注射坯充型不足，注射压力过高会引起注射坯产生飞边。注射压力为110 MPa时，注射坯各个偏差的量最小，齿轮注射坯微观形貌最佳。

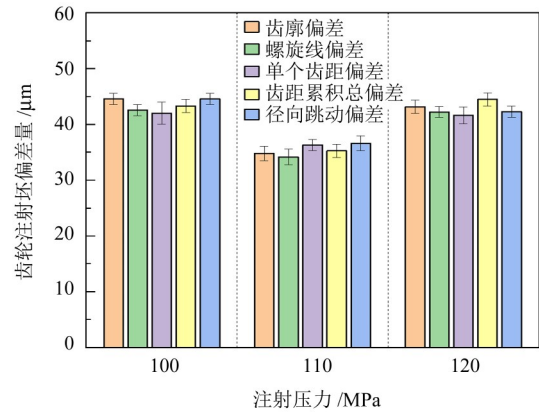


图4 不同注射压力下注射坯的偏差

Fig. 4 Deviation of the injection blank at different injection pressures

### 2.2 烧结温度对齿轮精度的影响

将110 MPa注射压力下的注射坯放入真空烧结炉中，分别以1 330、1 340、1 350、1 360 °C的温度进行烧结。使用JE 20齿轮测量中心对齿轮烧结坯的齿廓偏差、螺旋线偏差、单个齿距偏差、齿距累积总偏差、径向跳动偏差进行测量；根据标准GB/T 2363—1990<sup>[7]</sup>，对上述齿轮偏差精度等级进行评定，得出齿轮烧结坯的精度等级与烧结温度的关系，如图5所示。

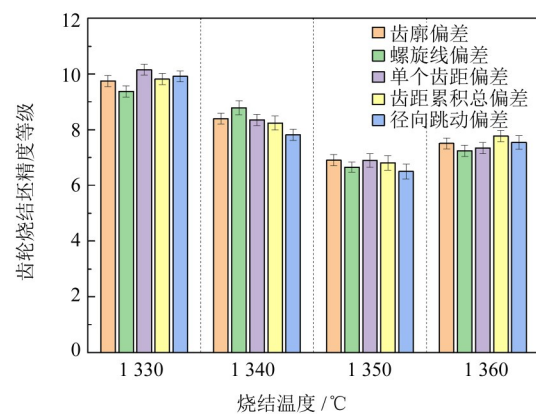


图5 烧结坯精度等级与温度的关系

Fig. 5 Relation between the accuracy grade of the sintered blank and the temperature

烧结坯的齿廓偏差、螺旋线偏差、单个齿距偏差、齿距累积总偏差和径向跳动偏差的精度等级由高到低排序为：3#>4#>2#>1#。烧结温度对齿轮烧结坯精度的影响较大，在1 330~1 360 °C，齿轮精度等级

随着烧结温度的升高, 呈现先升高后降低的趋势。当烧结温度在1 330~1 350 °C时, 齿轮烧结坯的精度等级随着烧结温度的升高而提高, 在1 350 °C时精度等级最高, 达到7级精度; 当烧结温度在1 350~1 360 °C时, 齿轮烧结坯的精度等级有所降低。

在烧结过程中, 金属粉末颗粒之间会出现扩散、流动和重排现象, 从而使齿轮的尺寸发生变化。烧结温度越高, 粉末颗粒之间的扩散速率越快, 流动性越好, 齿轮的尺寸收缩率也就越大, 齿轮精度逐渐提高。当温度过高时, 晶粒过度生长, 易出现过度烧结现象, 使齿轮的微观结构发生变化。此时, 齿轮表面出现晶粒烧熔破损, 齿轮内部产生较多封闭气孔, 导致齿轮各项偏差升高, 齿轮精度降低。因此, 在实际生产中, 合理控制烧结温度, 可以确保齿轮的精度。为了进一步验证烧结温度对齿轮精度的影响, 后续将探究烧结温度与烧结坯表面孔隙率、密度、收缩率、硬度之间的关系。

### 2.3 烧结温度对结构的影响

#### 2.3.1 烧结温度对孔隙率和密度的影响

孔隙率和密度是检验烧结齿轮质量的重要指标。孔隙率反映了齿轮内部气孔的分布情况, 密度反映了齿轮材料的致密程度和均匀性。这两项指标直接影响着齿轮的精度、强度和使用寿命。因此, 在烧结过程中, 孔隙率和密度的准确测量和控制至关重要<sup>[8]</sup>。

图6所示为经过磨抛处理过的齿轮烧结坯, 在电子显微镜下的齿面孔隙图像及孔隙率。烧结温度在1 330~1 360 °C时, 齿轮表面的孔隙数量随着烧结温度的升高逐渐减少, 孔隙率从2.9%降低至1.2%。

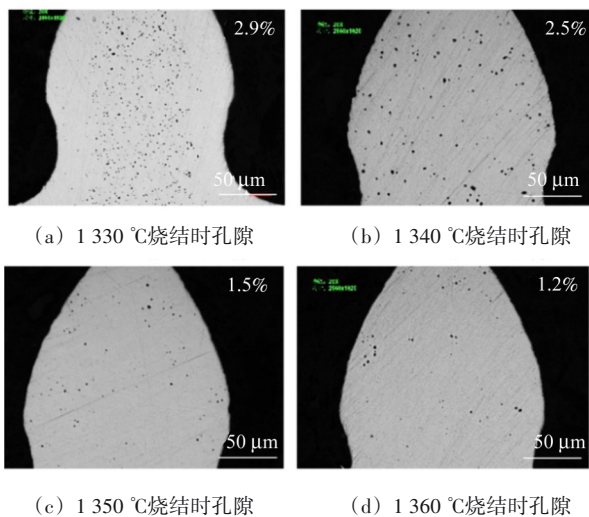


图6 不同烧结温度下的孔隙

Fig. 6 Porosity at different sintering temperatures

根据阿基米德排水法原理, 计算烧结齿轮的密度, 即

$$\rho = \frac{m_1 \rho_0}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为试样密度;  $m_1$  为试样在空气中的质量;  $m_2$  为试样在水中的质量;  $\rho_0$  为测试液体密度。

图7所示为烧结温度对密度的影响。由图7可知, 若烧结温度在1 330~1 350 °C时, 齿轮烧结坯密度会随着烧结温度的升高而增加; 烧结温度为1 350 °C时, 齿轮烧结坯密度显著增加, 达到7.56 g/cm<sup>3</sup>; 烧结温度达到1 360 °C时, 密度反而下降。

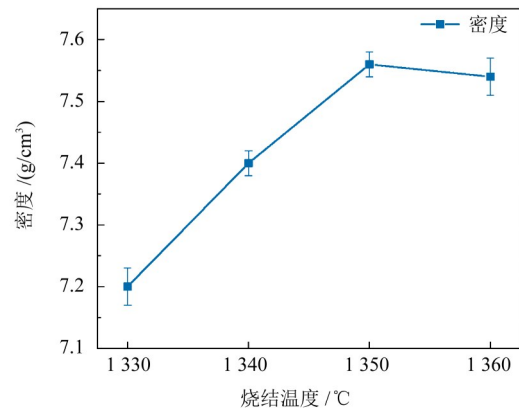


图7 烧结温度对密度影响

Fig. 7 Effect of the sintering temperature on the density

图8所示为孔隙-晶界变化模型。由图6(a)、图8(a)可知, 烧结温度为1 330 °C时, 烧结温度较低, 原子的扩散速率缓慢, 晶粒之间接触面积较小, 孔隙大多分布在晶粒之间的晶界上, 形状不规则且孔径较大, 严重阻碍了晶粒的继续生长。此时孔隙数量较多, 烧结坯密度较低。

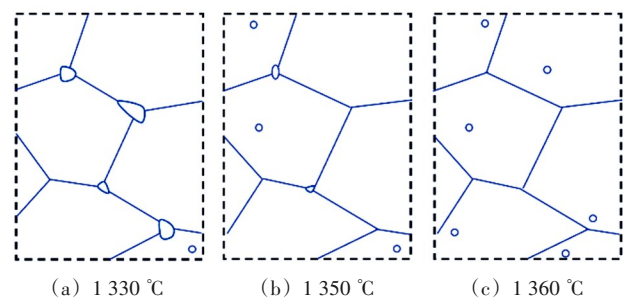


图8 孔隙-晶界变化模型

Fig. 8 Pore-grain boundary evolution model

由图6(c)、图8(b)可知, 当烧结温度升至1 350 °C时, 原子扩散速率加快, 烧结颈能力增强, 晶粒表面能降低, 孔隙逐渐连通, 不规则多面体孔隙逐渐收缩成近球形孔隙, 孔径减小, 密度增加, 晶粒生长使晶界突破孔隙的限制<sup>[9]</sup>, 形成了密闭气孔。此时烧结齿轮的致密化程度最高, 齿轮密度为7.56 g/cm<sup>3</sup>。

由图6(d)、图8(c)可知, 当烧结温度达到

1 360 °C时,晶粒继续长大,多数孔隙基本消除,只有少数孔隙存留于表面无法消除,孔隙形状基本球形。此时烧结温度过高,烧结坯内密闭气孔体积膨胀,影响致密程度,密度反而减小。

结果表明,烧结坯齿轮精度与密度和孔隙率之间存在一定的关系。在齿轮烧结坯完成致密化之前,齿轮烧结坯的孔隙较大,精度较低;当齿轮烧结坯密度增大时,齿轮烧结坯中的孔隙数量明显减少,齿轮的精度也随之提高。在齿轮烧结坯完成致密化后,提高烧结温度,可减少齿轮烧结坯的孔隙,但不能提高齿轮烧结坯的精度。

### 2.3.2 烧结温度对收缩率和硬度的影响

收缩率 $k$ 的计算式为

$$k = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $l_0$ 为注射坯尺寸; $l_1$ 为烧结后尺寸。根据式(2),可计算出不同烧结温度下齿轮齿宽、齿根圆、齿顶圆、内孔圆的收缩率。

图9所示为烧结温度对齿轮烧结坯收缩率的影响。随着烧结温度升高,齿轮齿宽、齿顶圆直径、齿根圆直径、内孔圆直径的收缩率逐渐增大。烧结温度在1 330~1 350 °C时,随着温度增加,齿轮烧结坯的密度迅速增加,收缩率也逐渐提高。在烧结温度超过1 350 °C后,收缩率仍在增加,但相较于1 350 °C时的收缩率变化不大。这是因为烧结温度超过1 350 °C时,产生过度烧结现象,烧结过程已经完成了致密化,升高温度对收缩率影响不大。

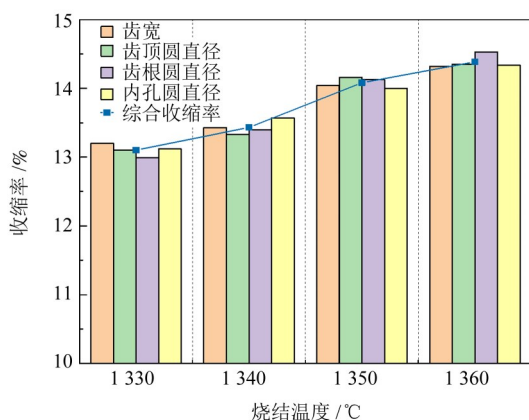


图9 烧结温度对收缩率的影响

Fig. 9 Effect of the sintering temperature on the shrinkage

图10所示为烧结温度对齿轮烧结坯硬度的影响。烧结温度在1 330~1 360 °C时,烧结坯齿轮的硬度呈现先上升后下降的趋势。这是因为烧结温度影响了烧结过程中物质的传输,随着温度升高,齿轮内部

物质传输加快,促进了齿轮坯的致密化,孔隙不断减小,颗粒表面之间的烧结颈能力不断提高,从而提高了齿轮表面硬度。烧结温度为1 350 °C时,齿轮烧结坯硬度最高,洛氏硬度达到39.5 HRC。烧结温度达到1 360 °C时,由于烧结温度过高,出现异常烧结现象,齿轮内部微观结构发生密闭气孔体积膨胀现象,密度降低,进而导致硬度降低。

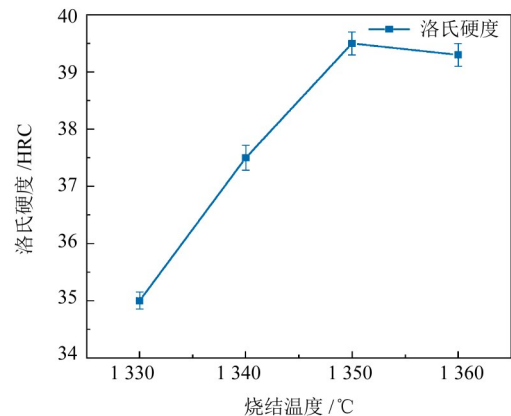


图10 烧结温度对硬度的影响

Fig. 10 Effect of the sintering temperature on the hardness

结果表明,组4#齿轮烧结坯的综合收缩率高于组3#,硬度值低于组3#。相较于组4#,组3#的齿宽、齿顶圆、齿根圆、内孔圆收缩率相差不大,收缩均匀。在烧结温度为1 350 °C时,齿轮烧结坯的力学性能与收缩率最佳。

## 3 结论

1) 注射压力为110 MPa时,注射坯微观形貌最佳,注射坯各个偏差的量最小。

2) 当烧结温度从1 330 °C升高到1 350 °C时,齿轮烧结坯的密度逐渐增加,收缩率和硬度逐渐提高,精度逐渐提高。1 350 °C后,齿轮烧结坯产生过度烧结现象,密度降低,导致齿轮烧结坯精度与硬度降低。

3) 烧结温度为1 350 °C时,齿轮烧结坯孔隙率为1.5%,密度为7.56 g/cm<sup>3</sup>,综合收缩率为14.1%,洛氏硬度为39.5 HRC,齿轮的齿廓偏差、螺旋线偏差、单个齿距偏差、齿距累积总偏差、径向跳动偏差均符合GB/T 2363—1990中7级精度要求,齿轮精度最高。

## 参 考 文 献

- [1] 康玉辉,李美美. 逆向工程技术在小模数齿轮加工检测中的应用[J]. 机电工程,2020,37(11):1372-1375.

- KANG Yuhui, LI Meimei. Application of reverse engineering technology in machining and measuring of small module gear[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(11): 1372-1375.
- [2] 刘超,孔祥吉,吴胜文,等. 钛及钛合金金属粉末注射成形技术的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(2): 150-158.  
LIU Chao, KONG Xiangji, WU Shengwen, et al. Research progress on metal injection molding of titanium and titanium alloys[J]. Powder Metallurgy Technology, 2017, 35(2): 150-158.
- [3] 钟志丞,潘春荣,林玲,等. 粉末粒径对MIM小模数齿轮质量性能的影响研究[J]. 机械传动, 2023, 47(12): 146-152.  
ZHONG Zhicheng, PAN Chunrong, LIN Ling, et al. Research on effect of powder particle size on quality performance of MIM small module gears[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(12): 146-152.
- [4] 相宁,张晓雯,葛勇,等. 注射成型热塑性聚氨酯制件的取向形态演变和力学性能[J]. 材料工程, 2021, 49(12): 156-163.  
XIANG Ning, ZHANG Xiaowen, GE Yong, et al. Orientation morphology evolution and mechanical properties of injection molded thermoplastic polyurethane [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(12): 156-163.
- [5] 孙纯纯,郭志君,张金勇,等. 亚稳 $\beta$ 钛合金在生物医学领域的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 1111-1124.  
SUN Chunchun, GUO Zhijun, ZHANG Jinyong, et al. Research progress on metastable  $\beta$ -titanium alloys for biomedical applications [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(3): 1111-1124.
- [6] 侯江涛,刘召锋,金晶,等. 金属粉末注射成型技术在助插拨锁紧装置中的应用[J]. 电子机械工程, 2022, 38(2): 52-55.  
HOU Jiangtao, LIU Zhaofeng, JIN Jing, et al. Application of metal powder injection molding in plug-in locking device [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2022, 38(2): 52-55.
- [7] 易茜,柳淳,李聪波,等. 基于小样本数据驱动的滚齿工艺参数低碳优化决策方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(13): 1604-1612.  
YI Qian, LIU Chun, LI Congbo, et al. A low carbon optimization decision method for gear hobbing process parameters driven by small sample data [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(13): 1604-1612.
- [8] 张驰,徐春. 金属粉末注射成形技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 214-215.  
ZHANG Chi, XU Chun. Metal powder injection molding technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 214-215.
- [9] KAZIOR J. Influence of sintering atmosphere, temperature and the solution-annealing treatment on the properties of precipitation-hardening sintered 17-4 PH stainless steel [J]. Materials, 2023, 16(2): 760.
- [10] LIAO Y X, LI Z, LI X B, et al. Effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of Fe-4Ni-0.8Mo-0.6C steel small-module gears fabricated by micrometal injection molding [J]. Steel Research International, 2023, 94(8): 2200886.
- [11] 陈慧,姜雪,韩勇. W-CoCrNi合金的烧结致密化及其组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(3): 812-822.  
CHEN Hui, JIANG Xue, HAN Yong. Sintering densification, microstructure and properties of W-CoCrNi alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(3): 812-822.
- [12] ZOU L M, LIU R Y, SU Z J, et al. Sintering optimization of high nitrogen nickel free austenitic stainless steel prepared by metal injection molding [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2459(1): 012121.
- [13] ABDULLAH A R, DANDANG A, KHALIL N Z, et al. Effect of sintering temperature on physical properties & hardness of CoCrMo alloys fabricated by metal injection moulding process [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 257(1): 012010.
- [14] MIAO T H, ZHAN S, CHEN X J, et al. Effect of sintering temperature on microstructure characteristics of porous NiTi alloy fabricated via elemental powder sintering [J]. Materials, 2024, 17(3): 743.
- [15] 许均力,贾成厂,何新波,等. 粉末注射成形中注射工艺参数对注射坯尺寸和密度的影响[J]. 粉末冶金技术, 2010, 28(5): 376-380.  
XU Junli, JIA Chengchang, HE Xinbo, et al. Influence of injection parameters on size and density of green body in powder injection molding [J]. Powder Metallurgy Technology, 2010, 28(5): 376-380.
- [16] 汤志豪,潘超梅,何鹏江,等. 金属注射成形HK30不锈钢的尺寸稳定性与力学性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2021, 26(4): 313-319.  
TANG Zhihao, PAN Chaomei, HE Pengjiang, et al. Dimensional stability and mechanical properties of HK30 stainless steel by metal injection molding [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2021, 26(4): 313-319.
- [17] 全国齿轮标准化技术委员会. 小模数渐开线圆柱齿轮精度: GB/T 2363—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 6.  
National Technical Committee for Gear Standardization. Accuracy of fine-pitch involute cylindrical gears: GB/T 2363—1990[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990: 6.
- [18] TERNERO F, ROSA L G, URBAN P, et al. Influence of the total porosity on the properties of sintered materials: a review [J]. Metals, 2021, 11(5): 730.
- [19] 阮建明,黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 268-269.  
RUAN Jianming, HUANG Peiyun. Principles of powder metallurgy [M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 268-269.

## Effect of sintering temperature on the accuracy of MIM small-module gears

LIU Zuoshi<sup>1</sup> MING Aoyang<sup>1</sup> REN Jihua<sup>2</sup> WANG Xiaoyi<sup>3</sup> ZHONG Zhicheng<sup>1</sup>  
ZHU Minfeng<sup>4</sup> ZHU Weidong<sup>5</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

(2. School of Intelligent Manufacturing and Materials Engineering, Gannan University of Science and Technology,  
Ganzhou 341000, China)

(3. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

(4. Jiangxi Yuean Advanced Materials Co., Ltd., Ganzhou 341500, China)

(5. Jiangsu Gian Technology Co., Ltd., Changzhou 213023, China)

**Abstract:** [Objective] In order to improve the accuracy of small-module gears, small-module gears are prepared by using 420 stainless steel powder as raw material and metal powder injection molding (MIM) process at a sintering temperature of 1 330—1 360 °C. The injection blank with the best micro-morphology was taken as a prerequisite to study the effect of sintering temperature on the accuracy of small-module gears. [Methods] MLA650F field emission scanning electron microscope was used to observe the microscopic morphology of the gear injection blanks; JE 20 gear measuring center, Image J software, and Rockwell hardness tester were used to measure the accuracy, porosity, and hardness of the sintered gears, respectively. [Results] The results show that under 110 MPa injection pressure, when the sintering temperature is increased from 1 330 °C to 1 350 °C, the porosity of the gear surface decreases by 48.28%, the density increases by 5%, the hardness increases by 8.22%, the shrinkage continues to increase, and the accuracy is gradually improved; when the temperature is more than 1 350 °C, the porosity decreases by 20%, the density decreases by 0.26%, the hardness decreases by 0.51%, the shrinkage rate increases slowly, and the accuracy of the gear gradually decreases; when the sintering temperature is 1 350 °C, the gear has the best comprehensive performance, with a porosity of 1.5%, a density of 7.56 g/cm<sup>3</sup>, a hardness of 39.5 HRC, a shrinkage rate of 14.1%, and the highest accuracy level of grade 7 in the GB/T 2363—1990 testing standard.

**Key words:** Metal powder injection molding; Dimensional accuracy; Sintering temperature; Shrinkage rate; Porosity; Density; Hardness