

航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形方法研究

孟洋^{1,2} 庄武豪^{1,2} 韩星会^{1,2}

(1 武汉理工大学 高温轻合金及应用技术全国重点实验室, 武汉 430070)

(2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070)

摘要:【目的】面向航空装备直齿圆柱齿轮优质高效制造需求, 针对模锻、挤压等传统单自由度成形方法制造航空直齿圆柱齿轮时齿形填充困难且成形载荷过大等问题, 本研究创新提出航空直齿圆柱齿轮多自由度成形新思路, 即通过辗压模连续局部多自由度加载提升金属流动能力, 降低成形载荷, 同时细化齿轮晶粒组织, 形成沿齿形连续分布的金属流线, 进而提升齿轮强度和疲劳寿命, 为高强度、长寿命航空直齿圆柱齿轮制造提供新技术路径。【方法】首先, 采用有限元仿真技术探究了坯料形状对齿形填充效果及成形载荷的影响规律, 据此提出坯料优化设计方法, 并进一步揭示了成形过程中齿形填充规律、等效应变分布与演变规律以及金属流线演变规律; 其次, 依据有限元仿真结果开展航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形工艺试验, 并对试验样件进行晶粒尺寸和金属流线检测, 验证上述有限元仿真模型和仿真结果的有效性。【结果】研究表明, 采用圆台型坯料可有效提升齿形填充效果并降低成形载荷, 最终获得了齿形填充饱满的航空直齿圆柱齿轮样件; 同时, 多自由度成形方法能够向齿形区域引入剧烈塑性变形, 不仅可有效细化齿轮晶粒, 还能形成沿齿形连续分布的金属流线。因此, 多自由度近净成形技术可以实现航空直齿圆柱齿轮高性能制造。

关键词: 航空直齿圆柱齿轮; 多自由度近净成形; 塑性成形规律; 高性能制造; 成形工艺设计

中图分类号: TG316 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

航空直齿圆柱齿轮是航空发动机及传动系统中的核心基础件, 其性能直接决定了航空装备的运载能力和服役寿命。新一代航空装备为了提升运载能力并延长服役寿命, 对直齿圆柱齿轮的性能提出了更为苛刻的要求^[1-2]。然而, 采用传统切削加工的减材制造方法制造直齿圆柱齿轮时, 不仅切断了金属流线, 使晶粒组织不够致密, 同时, 还存在材料利用率和制造效率低的问题, 无法满足新一代航空直齿圆柱齿轮优质高效的制造需求。

与切削加工相比, 塑性成形技术能细化齿轮晶粒组织并获得连续的金属流线, 从而大幅提升齿轮的强韧性和疲劳寿命; 同时, 塑性成形是通过金属流动成形复杂齿形结构, 是近等材制造方法, 具有制造效率高、材料利用率高等优点, 是实现直齿圆柱齿轮优质高效制造的重要途径^[3], 已经受到国内外学者的广泛关注。宋应德等^[4-7]提出用冷挤压技术成

形直齿圆柱齿轮的工艺方案, 研究了模具结构、挤压道次、坯料形状等工艺参数对直齿圆柱齿轮冷挤压成形的影响, 提出了浮动模具结构、中空分流等直齿圆柱齿轮冷挤压成形模具与工艺设计方法。左斌等^[8-11]研究了直齿圆柱齿轮热模锻成形规律, 分析了齿形填充不饱满、折叠等成形缺陷的产生机理, 提出了直齿圆柱齿轮热模锻成形工艺设计方法, 实现了重卡汽车、工程机械用大模数直齿圆柱齿轮热锻成形制造。然而, 上述研究对象主要为汽车、工程机械等装备用直齿圆柱齿轮, 与之相比, 航空齿轮不仅结构更极端, 其材料还具有强度更高、塑性更差的特点, 采用模锻、挤压等传统单自由度成形工艺制造时, 由于模具仅作单自由度整体加载, 金属流动方向单一且模具与齿轮接触面积大, 导致金属流动能力弱、成形载荷大, 不仅难以使齿形填充饱满, 还易造成模具失效。因此, 单自由度成形技术也难以满足航空直齿圆柱齿轮的制造需求。

多自由度成形技术是近年来快速发展的塑性成

收稿日期: 2025-08-03 修回日期: 2025-10-04

基金项目: 两机重大专项(2019-VII-0017-0158); 国家自然科学基金项目(U21A20131, 52005375)

作者简介: 孟洋, 男, 2000年生, 河北邯郸人, 硕士研究生; 主要研究方向为高性能齿轮成形制造技术; 767522730@qq.com。

引用格式: 孟洋, 庄武豪, 韩星会. 航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形方法研究[J]. 机械传动, XXXX, XX(XX): 1-9.

MENG Yang, ZHUANG Wuhao, HAN Xinghui. Study on multi-degree-of-freedom near-net shape forming method for aviation spur gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX (XX): 1-9.



免费获取

形新技术,该技术采用做多自由度运动模具连续局部辗压坯料,使坯料金属发生多向流动和塑性变形,从而实现复杂构件近净成形^[12-13]。相比模锻、挤压等单自由度成形技术,多自由度成形技术不仅继承了单自由度成形技术细化晶粒组织和形成连续金属流线的优势,更通过模具的连续局部加载显著提升金属流动能力、降低成形载荷,是实现航空齿轮高性能制造的重要途径。HAN等^[14]提出了具有倒锥齿形航空弧齿锥齿轮多自由度成形新方法,不仅通过模具的多自由度加载提升了齿形填充效果,获得了充填饱满的航空弧齿锥齿轮,还创新设计了模具多自由度脱模方案,解决了航空弧齿锥齿轮倒锥齿形的脱模难题,最终实现了有倒锥齿形航空弧齿锥齿轮的近净成形制造。ZHENG等^{[15]104183[16]}首次提出多连杆并联驱动重载多自由度成形装备新构型,提出其高刚度设计准则和高精度控制方法,并成功研制了重载多自由度成形新装备。HAN等^[17]揭示了15Cr14Co12Mo5Ni2WA航空齿轮钢多自由度成形组织性能演变规律,证明了多自由度成形能够显著细化航空齿轮钢晶粒组织,进而有效提升其强度。然而,上述研究主要针对航空弧齿锥齿轮多自由度成形制造,鲜有关于航空直齿圆柱齿轮多自由度成形制造的报道。相比齿形位于轴杆端面的航空弧齿锥齿轮,航空直齿圆柱齿轮的齿形位于周向圆柱面,其多自由度成形齿形填充规律、应变分布规律和金属流线演变规律等与弧齿锥齿轮存在显著差异,航空弧齿锥齿轮多自由度成形规律与工艺设计方法并不适用于航空直齿圆柱齿轮。目前,尚未有研究系统揭示航空直齿圆柱齿轮多自由度成形规律,导致其多自由度成形工艺设计缺乏理论依据,限制了航空直齿圆柱齿轮多自由度成形技术的发展与应用。因此,亟待揭示航空直齿圆柱齿轮多自由度成形规律,建立航空直齿圆柱齿轮多自由度成形工艺设计方法,为高性能航空直齿圆柱齿轮制造提供创新技术路径。

本文以某9310钢航空直齿圆柱齿轮为对象,研究航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形新方法。首先,探究坯料形状对齿形填充效果及成形载荷的影响规律,据此提出坯料优化设计方法;其次,采用有限元仿真技术揭示直齿圆柱齿轮多自由度近净成形齿形填充规律、等效应变分布与演变规律以及金属流线演变规律;最后,开展航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形工艺试验,验证航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形新方法的有效性,为实现航空直齿圆柱齿轮高性能制造提供理论依据与技术支持。

1 航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形工艺原理

图1为航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形原理示意图。用于成形该齿轮的模具包括辗压模和凹模两部分。辗压模为倾斜的锥型模具,其自身轴线与设备轴线之间存在夹角 γ ,即辗压模倾斜角,其型面由直齿圆柱齿轮上表面母线绕辗压模自身轴线旋转所得,用于成形直齿圆柱齿轮的上表面;凹模型腔则与直齿圆柱齿轮的复杂齿面和下表面一致,用于成形直齿圆柱齿轮的复杂齿面和下表面。在直齿圆柱齿轮多自由度成形过程中,辗压模绕设备主轴旋转的同时绕自身轴线旋转,在坯料表面进行多自由度连续加载;与此同时,凹模推动坯料沿设备轴线上作进给运动;在辗压模和凹模的共同加载下,坯料发生连续局部塑性变形,坯料金属逐渐填充模具型腔,最终获得充填饱满的直齿圆柱齿轮。由于辗压模与坯料上表面发生局部接触,并对坯料进行连续局部辗压,能够提高金属流动能力,从而提升齿形充填效果;同时,凹模与直齿圆柱齿轮复杂齿面发生整体接触,能够获得直齿圆柱齿轮高精度齿面。因此,多自由度近净成形技术可以实现航空直齿圆柱齿轮近净成形制造。

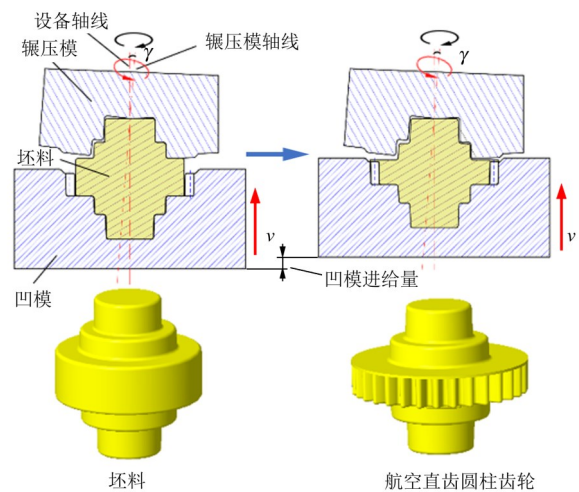


图1 航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-degree-of-freedom near-net shape forming principle for aviation spur gear

2 航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形仿真模型

依据航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形工艺原理构建的齿轮成形有限元模型如图2所示。航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形加工时,坯料塑性变形远大于弹性变形,且弹性变形对成形效果影响微弱,故将其设为塑性体;模具仅产生微小弹性变形

(无塑性变形), 对成形效果影响甚微。因此, 辗压模和凹模均设为刚性体。坯料的材料为航空齿轮专用合金钢 AISI-9310, 该航空齿轮钢强度高、硬度高、韧性好、耐磨性好, 是目前应用最为广泛的航空齿轮钢。其化学成分如表 1 所示, 其应力应变关系参考文献[18]中的测试数据, 用于准确计算航空直齿圆柱齿轮多自由度成形塑性变形过程。多自由度成形模具材料选用热作模具钢 AISI-H13, 其合金成分如表 2 所示。该模具钢具有优异的强度、韧性、耐磨性、热稳定性和抗冷热疲劳性能, 能够保证多自由度运动辗压模具在高温、动载条件下具有高强度和长寿命。为提升金属流动能力和降低成形载荷, 选择在热态下成形, 坯料初始成形温度为 1 000 °C。为减缓成形过程中热量散失、导致坯料温度过低使材料流动能力降低, 将模具初始温度设为 300 °C。此外, 为准确模拟模具与坯料之间的摩擦和热传递关系, 采用适用于大塑性变形的剪切摩擦和传热条件, 其摩擦因数设置为 0.3, 热传导系数设为 $11 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{[19]}$ 。坯料采用四面体网格并划分为 150 000 个网格单元, 最大网格与最小网格尺寸比为 3:1。航空直齿圆柱齿轮的齿形结构复杂, 其填充过程精确仿真难度大, 需对齿形区域进行网格细化, 其网格尺寸为非细化区域的 1/2, 以提高仿真的准确性。辗压模的运动由绕锥模轴线的旋转运动(转速 $8\pi/\text{s}$)和绕成形设备轴线的旋转运动(转速 $-8\pi/\text{s}$)复合而成, 实现辗压模对坯料的连续局部动态辗压; 同时, 凹模以 $v=5\text{mm}/\text{s}$ 的速度向上做进给运动, 以保证辗压的连续性。在兼顾模拟准确性与计算效率的前提下, 设计锥形辗压模每运算步转动 7.2° (即 1/50 圈)。有限元仿真模型的主要工艺参数如表 3 所示。

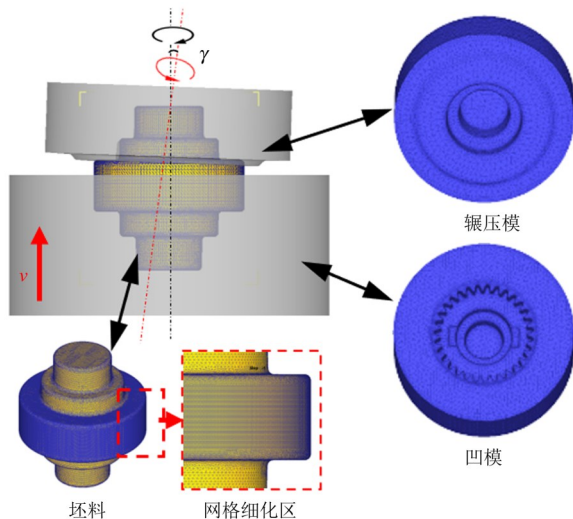


图2 航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形有限元模型

Fig. 2 Finite element model for multi-degree-of-freedom near-net shape forming of aviation spur gear

表1 AISI-9310钢的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of AISI-9310 steel

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
C	0.12	Mo	0.11
Si	0.25	P	0.0052
Mn	0.6	S	0.00016
Ni	3.4	Cu	0.036
Cr	1.11	Fe	余量

表2 AISI-H13钢的化学成分

Tab. 2 Chemical composition of AISI-H13 steel

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
C	0.440	V	1.010
Si	0.910	P	0.015
Mn	0.361	S	0.006
Ni	0.127	Cu	0.054
Cr	4.670	Al	0.015
Mo	1.250	Fe	余量

表3 有限元仿真模型主要工艺参数

Tab. 3 Simulation parameters of the finite element model

模型参数	数值
辗压模锥角/(°)	2
辗压模转速/(rad/s)	8π
凹模进给速度/(mm/s)	5
摩擦类型	剪切摩擦
摩擦因子	0.3
导热系数/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	11
时间步长	0.005
坯料网格总数	150 000
坯料最大与最小网格尺寸比	3
坯料细化与非细化网格尺寸比	0.5
辗压模网格数	80 000
凹模网格数	150 000
坯料属性	塑性
模具属性	刚性
坯料初始温度	1 100 °C
模具温度	300 °C
环境温度	20 °C

3 分析与讨论规律

3.1 坯料优化设计

在航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形过程中, 坯料上半部分金属与做多自由度运动的辗压模局部接触, 因接触面积小, 金属在局部动态载荷作用下易流动并发生塑性变形, 故齿形充填较容易; 坯料下半部分金属与做轴向进给的凹模整体接触, 由于

接触面积大,坯料局部应力小,金属流动及塑性变形能力弱于上半部分,齿形填充能力相对较差。此外,坯料上半部分在辗压模与凹模间隙处缺乏径向约束,金属径向流动阻力小,易从模具间隙流出形成飞边;而坯料下半部分金属完全闭塞于凹模内,流动困难。通过上述分析可知,在多自由度近净成形过程中,靠近辗压模的齿形比靠近凹模的齿形更易填充;若采用圆柱形坯料成形齿形,会出现上端齿形已经填充饱满且形成飞边,而下端齿形还未充满的现象,难以实现航空直齿圆柱齿轮近净成形。故本文提出采用圆台型坯料提升齿形填充效果的新思路:将坯料用以成形齿形的部分设计成为上小下大的圆台形(图3),将圆台母线与垂直方向的夹角定义为坯料圆台锥角并用 α 表示, α 分别取 0° 、 2.5° 、 5° 、 7.5° 、 10° ;通过研究 α 对齿形填充的影响,提升成形过程中齿形填充质量和均匀性,最终确定适合航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形的坯料形状。

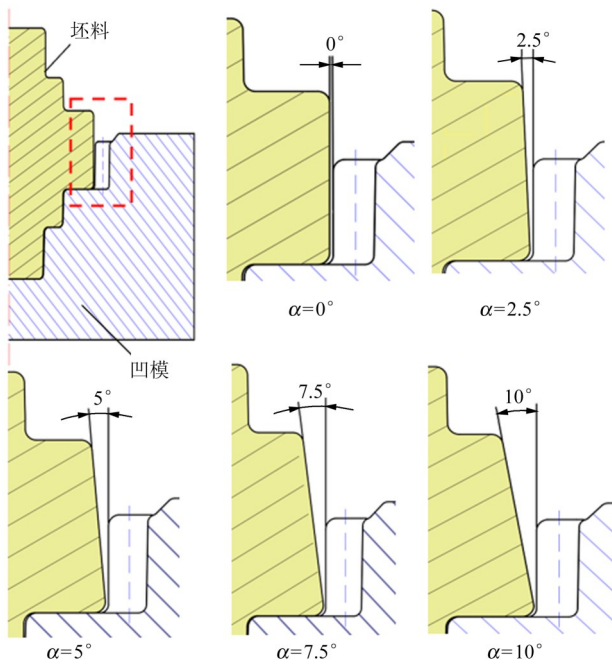


图3 不同形状坯料示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of billet geometries

图4为采用不同坯料方案仿真得到的航空直齿圆柱齿轮齿形填充效果示意图。由图4可知,仿真齿轮齿顶曲线越接近模具型腔齿顶曲线,齿形填充越饱满;当 α 为 0° 时,仿真齿轮齿顶曲线与模具型腔齿顶曲线之间存在较大的空隙,表明齿形并未填充饱满;当 α 为 2.5° 时,仿真齿轮齿顶曲线与模具型腔齿顶曲线之间的空隙有所减小,齿形填充效果得到提升,但仍未完全填充;当 $\alpha \geq 5^\circ$ 时,整个仿真齿轮齿顶曲线与模具型腔齿顶曲线基本重合,说明齿形填充饱满。上述仿真结果说明,随着坯料圆台锥角 α

的逐渐增大,仿真齿轮齿顶曲线与模具型腔齿顶曲线之间的空隙逐渐减小,齿形填充效果随着坯料圆台锥角 α 的逐渐增大而明显提升。因此,本文所提出的圆台型坯料能够有效提升直齿圆柱齿轮齿形填充效果,实现航空直齿圆柱齿轮近净成形。

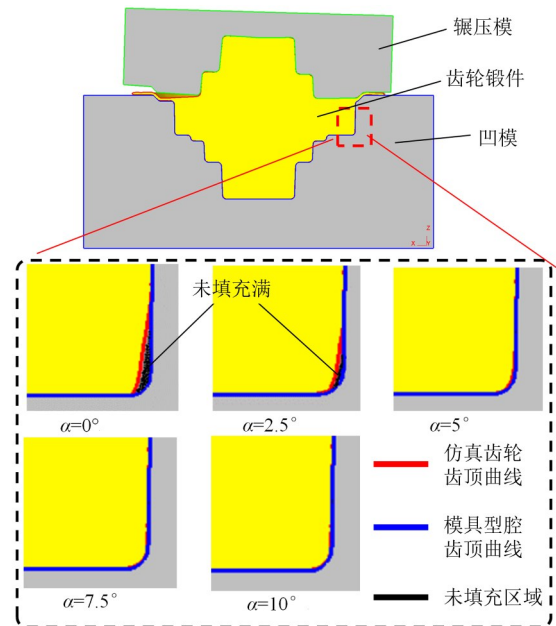


图4 不同坯料方案对齿形填充效果影响示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the influence of different billet schemes on tooth profile filling

图5所示为不同坯料圆台锥角 α 对航空直齿圆柱齿轮多自由度成形最大成形载荷的影响规律。由图5可知,在坯料圆台锥角 α 从 0° 增大到 5° 过程中,最大成形载荷逐渐减小。这是因为齿形充填越饱满,所形成的飞边尺寸越小,坯料承载面积越小,因此,成形载荷越小。但当齿形充填饱满后,继续增大坯料圆台锥角 α 将导致成形载荷有所增大。这是因为随着坯料圆台锥角 α 的增大,圆台上表面直径减小,圆台高度增高,多自由度成形时需要更大的镦粗变形才能充填齿轮模具型腔,所累积的塑性变形更多,加工硬化更大,因此,多自由度成形的最大成形载荷有所增大。

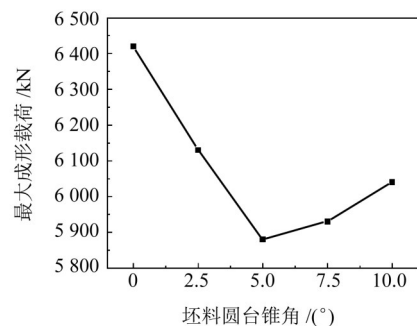


图5 坯料圆台锥角对最大成形载荷影响规律

Fig. 5 Effect of billet taper angle on maximum forming force

3.2 多自由度近净成形规律

3.2.1 齿形填充过程

当坯料圆台锥角 α 为 5° 时, 航空直齿圆柱齿轮的齿形已经填充饱满, 且最大成形载荷相对其他方案最小, 本文后续将重点研究圆台锥角 α 为 5° 的坯料成形过程。图6为航空直齿圆柱齿轮多自由度成形齿形填充过程图。图中, s 表示凹模轴向进给量。

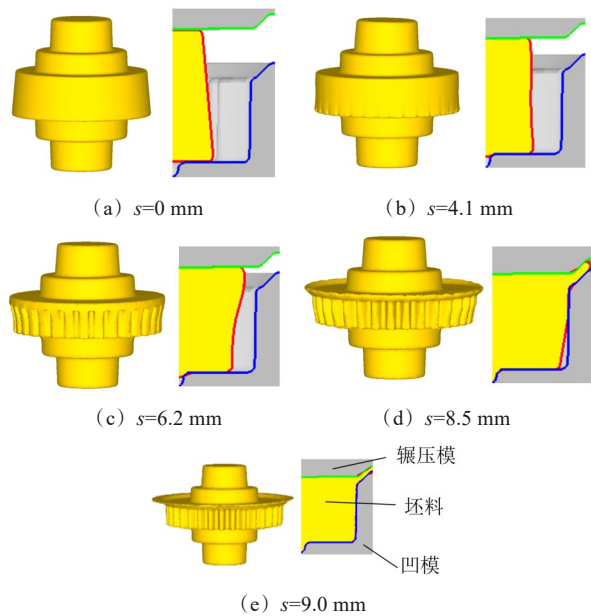


图6 航空直齿圆柱齿轮多自由度成形齿形填充过程图

Fig. 6 Tooth profile filling process in multi-degree-of-freedom forming of aviation spur gear

对比图6(a)和图6(b)可以看出, 坯料圆台上端部分的直径在辗压模的连续局部辗压下明显增大, 逐渐向凹模的齿形型腔靠近; 与此同时, 坯料圆台下端金属先于上端金属开始填充齿形型腔。从图6(c)可以看出, 齿形上端的填充速度明显比齿形下端的填充速度快。这是由于齿形上端是由做多自由度运动的辗压模局部加载所成形, 其金属流动能力更强。因此, 齿形上端最先充填饱满[图6(d)]。随着辗压模和凹模继续加载, 坯料上表面部分金属将被向下挤压进入齿形型腔, 逐渐由齿形上端向下填充齿形, 齿形由上端到下端逐渐完成充填, 最终获得整个齿形填充饱满的直齿圆柱齿轮, 如图6(e)所示。由于齿形下端型腔距离坯料上表面最远, 金属流入该区域的距离最远, 因此, 该区域最后完成填充。

3.2.2 等效应变分布与演变规律

图7为航空直齿圆柱齿轮多自由度成形等效应变分布与演变云图。由图7可知, 随着模具不断加载, 齿形区域等效应变逐渐增大, 说明齿形区域不断发生塑性变形并不断累积。塑性变形有利于细化晶粒组织, 提高齿轮力学性能。

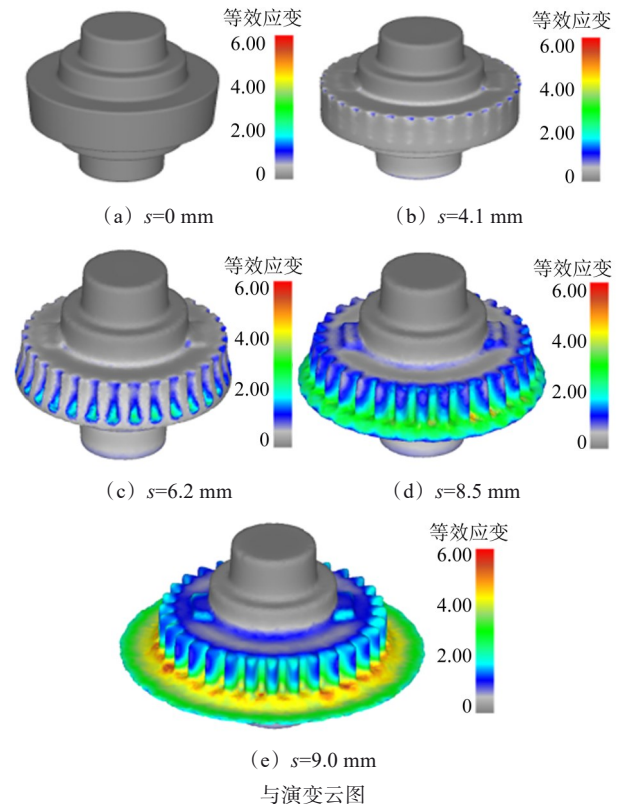


图7 航空直齿圆柱齿轮多自由度成形等效应变分布与演变云图
Fig. 7 Effective strain distribution and evolution in multi-degree-of-freedom forming

为了详细分析齿形区域的等效应变分布规律, 从齿形下端到齿形上端依次选取了5个截面, 测量并绘制了齿廓上的等效应变分布曲线和由齿廓到齿轮芯部的等效应变分布曲线, 如图8所示。由图8(a)可知, 齿根处等效应变明显大于齿顶处等效应变。这是因为齿根处金属在凹模挤压下发生剧烈剪切变形, 而齿顶处金属主要沿径向流动, 与凹模型腔接触时间较短, 累积塑性变形较少。其次, 从齿形上端到齿形下端的等效应变基本呈逐渐增大趋势。这是因为越接近齿轮上端的金属, 经过辗压模的反复辗压变形越剧烈, 累积的塑性变形越多。由图8(b)可知, 从齿廓到齿轮芯部的等效应变均呈逐渐减小的趋势。这说明越靠近齿廓的金属受到凹模的挤压变形越大, 该现象表明采用多自由度成形的齿轮齿面相比齿轮芯部具有更高的强度。塑性变形梯度分布有助于提高轮齿表面的硬度和耐磨性, 同时可保持芯部的韧性与抗冲击性能, 从而全面提升航空直齿圆柱齿轮的综合服役性能。

3.2.3 金属流线演变规律

图9所示为航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形过程中齿形区域金属流线演变规律。由图9可知, 随着坯料金属不断填充齿形型腔, 坯料内金属流线始终保持连续并逐渐向齿形型腔内延伸, 逐渐形成沿

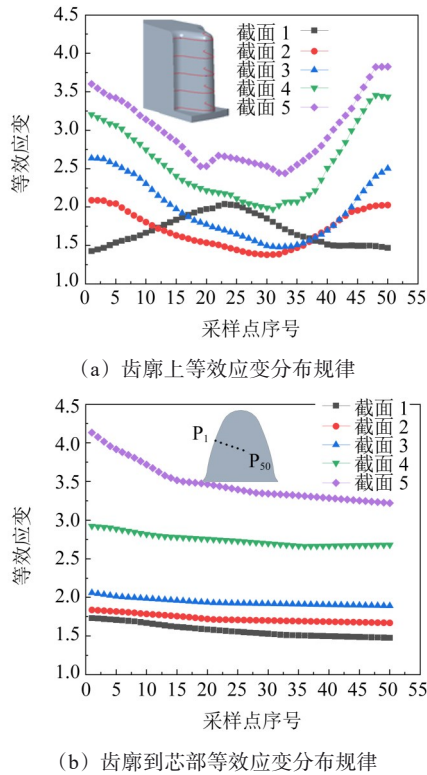


图8 多自由度成形航空直齿圆柱齿轮齿形区域等效应变分布

Fig. 8 Effective strain distribution curves in tooth profile zone of aviation spur gear

齿廓连续分布的金属流线。对比齿形不同区域的金属流线可以看出，齿根区域的金属流线相对致密，而齿顶处则相对宽大稀疏，这进一步说明了齿根部位塑性变形剧烈，而齿顶部位塑性变形较小。同时，从齿形芯部到齿形表面，金属流线密度逐渐增大，这说明轮齿表面塑性变形较大，而芯部塑性变形相对较小。连续的金属流线有利于提高齿形的抗弯曲能力，从而提升航空直齿圆柱齿轮的弯曲疲劳性能。

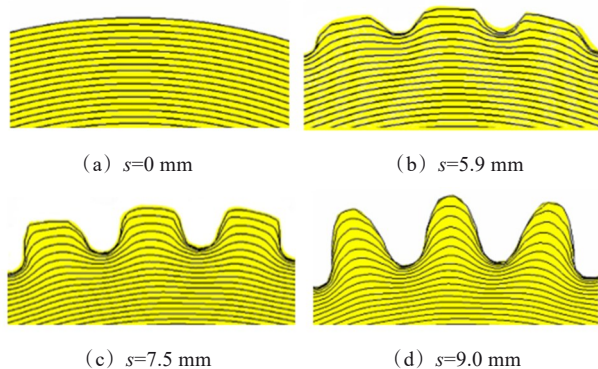


图9 多自由度成形航空直齿圆柱齿轮金属流线演变图

Fig. 9 Evolution of metal flow lines in tooth profile zone

4 验证试验

为了验证航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形工艺方案的可行性，依据前文有限元仿真参数设计并开展了工艺试验。试验在自主研发的重载多自由

度成形设备上实施。图10所示为该多自由度成形设备照片。该设备通过6电机和6连杆的协同作用，驱动辗压模在空间做多自由度运动^{[15][104][83]}。该设备最大成形载荷为800 T，辗压模倾斜角的调节范围为0~2°，辗压模转速的调节范围为0.0~1.5 r/s。

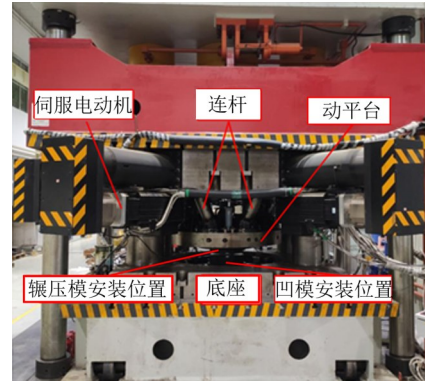


图10 多自由度成形设备

Fig. 10 Multi-degree-of-freedom forming equipment

试验所用模具材料为AISI-H13钢，经真空淬火-回火处理后的硬度为48~52 HRC，其300 °C时的屈服强度 $\geq 1\ 200$ MPa，满足航空直齿圆柱齿轮多自由度成形试验对模具强度韧性、耐磨性、热稳定性和抗冷热疲劳性能的需求。

试验流程如下：将坯料圆台锥角 α 为5°的坯料置于加热炉中，随炉加热至1 000 °C，同时将模具预热至300 °C，以减少坯料热量散失，避免金属流动能力下降导致的齿形充填不足；坯料放入凹模前，向凹模与辗压模内喷涂石墨乳，以降低摩擦阻力，提高金属流动能力，提升齿形填充效果。试验中，辗压模与凹模的运动参数严格遵循表3所示的有限元仿真工艺参数。

图11为航空直齿圆柱齿轮多自由度成形试验样件与仿真样件对比图。从齿顶、齿廓、齿根3个关键部位与仿真结果进行了对比。对比发现，在齿顶部位，试验样件的齿顶轮廓清晰、圆整，齿顶边缘无塌角、无毛刺，表明金属在齿顶端填充完全，顺利充满模具型腔的尖端区域；在齿廓部位，试验样件的渐开线齿廓光滑平整，无折叠、裂纹等缺陷；在齿根部位，试验样件的齿根过渡曲线饱满、圆角充实。航空直齿圆柱齿轮多自由度成形试验样件与仿真样件形状基本一致，齿轮填充均匀饱满，齿轮表面平整，无明显宏观缺陷，成形质量良好。这说明本文建立的航空直齿圆柱齿轮多自由度成形有限元仿真模型是准确可靠的，所设计的航空直齿圆柱齿轮多自由度成形工艺方案是可行的。

此外，沿齿轮轴向在试验样件齿轮齿顶选取10

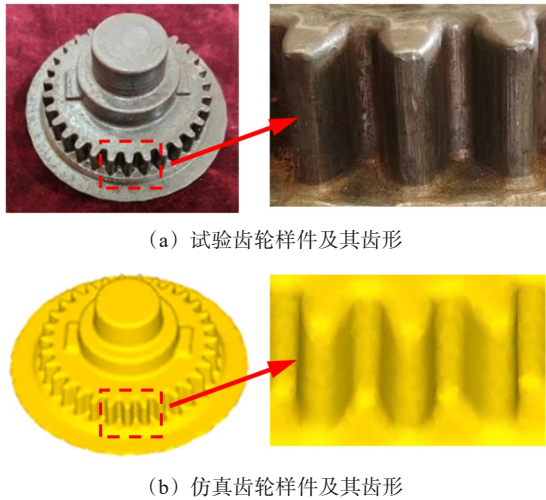


图 11 航空直齿圆柱齿轮多自由度成形试验样品与仿真样品

Fig. 11 Experimental and simulated specimens of aviation spur gear
 个点, 测量该点所在轴向高度处的齿轮齿顶圆直径, 将测得结果与模具型腔齿顶圆直径进行对比, 二者齿顶圆直径对比结果如图 12 所示。由图 12 可知, 试验样品上各测量点处的齿轮齿顶圆直径均大于模具型腔齿顶圆直径, 说明航空直齿圆柱齿轮齿形得到充分填充。试验样品齿轮齿顶圆直径最大为 101.56 mm, 最小为 101.27 mm, 模具型腔齿顶圆直径为 101.15 mm, 偏差范围为 0.12~0.41 mm, 相对偏差小于 0.5%, 二者尺寸高度吻合, 验证了多自由度成形工艺精确成形航空直齿圆柱齿轮的有效性。试验样品齿顶圆直径大于模具型腔齿顶圆直径的原因是实际坯料并非完全的塑性体, 而是弹塑性体, 锻件在多自由度成形结束从模具型腔中脱出后, 模具对锻件的作用力消失, 锻件表面发生微小的弹性变形。同时, 模具也并非完全的刚性体, 模具在多自由度成形过程中也会受到锻件的作用力而胀大。由图 12 可知, 从采样点 1 到采样点 10, 试样齿轮齿顶圆直径逐渐减小。这是因为采样点 1 处靠近凹模开口, 锻件作用在模具上产生的力矩更大, 模具在该处更容易发生变形; 而采样点 10 处靠近凹模基体, 锻件作用力在该处产生的力矩很小, 所以, 采样点 10 处的模具胀大量较小。

图 13 为多自由度成形航空直齿圆柱齿轮试验样品金属流线分布图。由图 13 可知, 金属流线沿着齿廓连续分布, 与仿真所得金属流线分布规律一致。

图 14 所示为坯料和航空直齿圆柱靠近齿廓边缘处的晶粒情况。用线切割分别从坯料和直齿圆柱齿轮上切取合适大小的试样, 采用等效圆直径法对晶粒尺寸进行了定量评价。坯料的平均晶粒尺寸为 12.4 μm , 多自由度成形齿轮齿廓表面的平均晶粒尺

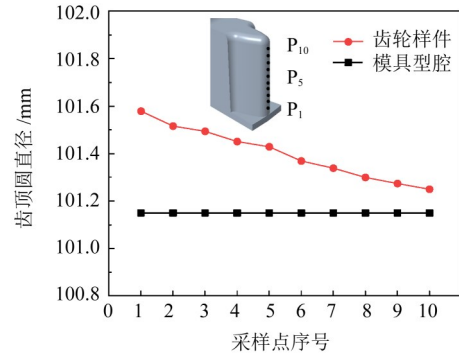


图 12 试验样品齿顶圆直径与模具型腔齿顶圆直径曲线图
 Fig. 12 Comparison curve of addendum circle diameter between experimental specimen and die cavity

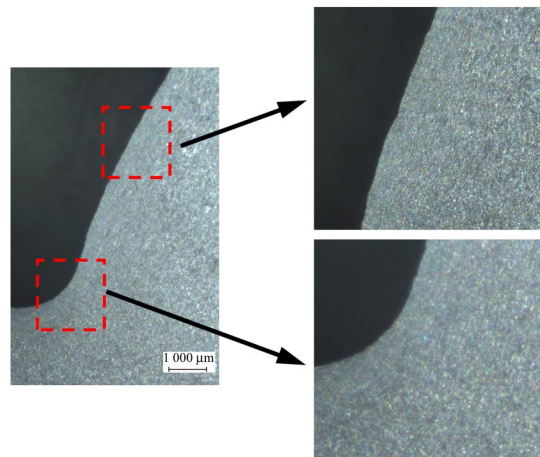
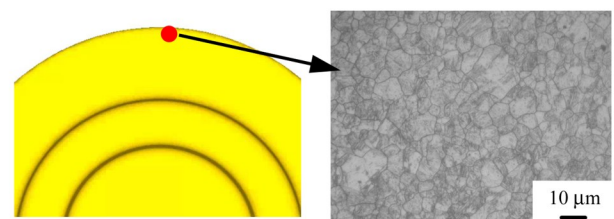
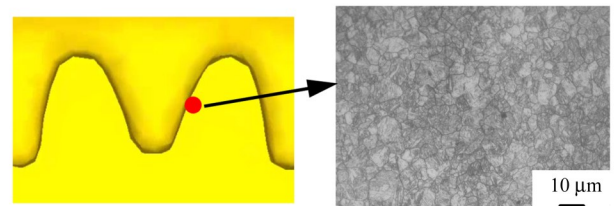


图 13 多自由度成形航空直齿圆柱齿轮试验样品金属流线分布图
 Fig. 13 Metal flow lines distribution in experimental specimens of aviation spur gear

寸为 8.4 μm , 多自由度成形齿轮的晶粒尺寸明显小于初始坯料的晶粒尺寸, 证明多自由度成形技术可有效细化齿轮晶粒, 有利于提升齿轮强韧性。



(a) 坯料取样位置及其晶粒



(b) 齿轮样品齿取样位置及其晶粒

图 14 多自由度成形航空直齿圆柱齿轮晶粒图

Fig. 14 Comparison of grain size before and after multi-degree-of-freedom forming

5 结论

(1) 提出了航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形新原理。通过倾斜锥型辗压模(绕设备主轴与自身轴线旋转)与凹模(轴向进给)协同加载,实现坯料连续局部塑性变形,解决了传统单自由度成形载荷大、齿形填充不足的问题,可获得充填饱满的航空直齿圆柱齿轮。

(2) 探究了坯料形状对齿形填充效果及成形载荷的影响,提出了圆台型坯料优化设计方法。研究发现,采用圆台型坯料可有效提升齿形充填效果并降低成形载荷。当圆台锥角为 5° 时,齿形填充饱满且最大成形载荷相对最小,能较好地满足成形需求。

(3) 建立了航空直齿圆柱齿轮多自由度近净成形有限元仿真模型,并采用该模型揭示了其塑性成形规律。齿形填充过程中,坯料圆台下端金属先开始填充齿形型腔,齿形上端填充速度快于下端,最终由齿形上端到下端逐渐完成充填;齿根处等效应变大于齿顶处,从齿形上端到下端等效应变基本呈增大趋势,从齿廓到齿轮芯部等效应变逐渐减小;金属流线沿齿廓连续分布,齿根流线致密,齿顶流线稀疏,说明齿根处塑性变形更剧烈。

(4) 通过工艺试验验证了多自由度近净成形技术的有效性。试验样件与仿真样件形状基本一致,齿形填充饱满,无明显宏观缺陷;金属流线沿齿廓连续分布,晶粒得到明显细化。

上述结论表明,多自由度成形技术可以实现航空直齿圆柱齿轮近净成形,可有效细化齿轮晶粒,形成沿齿形连续分布的金属流线,对提升齿轮强韧性和疲劳寿命具有重要作用。研究为航空直齿圆柱齿轮的高性能制造提供了可靠的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 潘昱,杨曼,鲍和云,等. 高重合度直齿圆柱齿轮温度场分析及试验验证[J]. 机械传动,2024,48(7):101-113.
PAN Yu, YANG Man, BAO Heyun, et al. Temperature field analysis and experimental test of spur gears with high contact degree [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(7): 101-113.
- [2] 贾晨帆,朱才朝,刘怀举,等. 渐开线圆柱齿轮胶合承载能力计算标准比较研究[J]. 机械传动,2022,46(12):86-92.
JIA Chenfan, ZHU Caichao, LIU Huaiju, et al. Comparative study on calculation standards for scuffing load capacity of cylindrical involute gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(12): 86-92.
- [3] 华林,冯玮,韩星会,等. 齿轮精密塑性成形理论技术装备研究与应用[J]. 塑性工程学报,2024,31(4):56-73.
HUA Lin, FENG Wei, HAN Xinghui, et al. Research and application of theory technology and equipment on gear precision plastic forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(4): 56-73.
- [4] 宋应德,冯文杰,陈莹莹,等. 载重汽车行星齿轮冷挤压成形工艺[J]. 锻压技术,2023,48(7):123-130.
SONG Yingde, FENG Wenjie, CHEN Yingying, et al. Cold extrusion forming process for truck planetary gear [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(7): 123-130.
- [5] 于金伟. 新型减速齿轮塑性成形工艺研究[J]. 机械传动,2012,36(4):94-95.
YU Jinwei. Study on plastic forming technology of speed reduction gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(4): 94-95.
- [6] 郭开元,张如华,吴泽,等. 直齿圆柱齿轮双向墩挤精密成形工艺对比研究[J]. 材料科学与工艺,2019,27(3):60-65.
GUO Kaiyuan, ZHANG Ruhua, WU Ze, et al. Comparative study on the processes of two-way upsetting-extrusion precision forming of spur gears [J]. Materials Science and Technology, 2019, 27(3): 60-65.
- [7] 张晓旭,杜子学. 重卡用直齿圆柱齿轮冷挤压工艺方案设计[J]. 锻压技术,2018,43(4):83-88.
ZHANG Xiaoxu, DU Zixue. Design of cold extrusion process for straight spur gear of camion [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(4): 83-88.
- [8] 左斌,王宝雨,杨乐毅,等. 圆柱齿轮热精锻成形载荷影响因素分析[J]. 北京理工大学学报,2015,35(1):19-22.
ZUO Bin, WANG Baoyu, YANG Leyi, et al. Analysis of the forming load impact factors on hot precision forging of cylindrical gears [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(1): 19-22.
- [9] 黄斯韬,陈康,孙阳,等. 基于数值模拟温锻直圆柱齿轮模具结构与凸模速度影响分析[J]. 煤矿机械,2019,40(12):78-80.
HUANG Sitao, CHEN Kang, SUN Yang, et al. Analysis of effect of warm forging die structure for spur cylindrical gear and running speeds of punch-pin based on numerical simulation [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(12): 78-80.
- [10] WANG W, ZHAO J, ZHAI R X, et al. Variable contour two-step warm extrusion forming of spur gear and the deformation behavior of 20Cr₂Ni4A steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9): 3163-3173.
- [11] WANG W, ZHAO J, ZHAI R X. A forming technology of spur gear by warm extrusion and the defects control [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21: 30-38.
- [12] HU Y X, HAN X H, HUA L, et al. Modeling for plastic instability in multi-directional rotary forging of thin-walled components with three ribs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024,

- 331:118522.
- [13] HU X, HAN X H, HUA L, et al. Microstructure inheriting evolution and strength-plasticity collaborative improvement mechanism of multidirectional rotary forged Al7075 sheets during T6 heat treatment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 203:14-38.
- [14] HAN X H, WANG Y H, HUA L, et al. A new multi-DOF envelope forming process for fabricating spiral bevel gears with back taper tooth[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38(1):103239.
- [15] ZHENG F Y, XIN S, HAN X H, et al. Heavy-load Nonapod: a novel flexible redundant parallel kinematic machine for multi-DOF forming process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2024, 200:104183.
- [16] ZHENG F Y, HAN X H, HUA L, et al. Dynamic error prediction and link strain feedback control for a novel heavy load multi-DOF envelope forming machine[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 216:111494.
- [17] HAN X H, CHEN L F, HU X, et al. Microstructure and mechanical property evolution mechanisms of 15Cr₁₄Co₁₂Mo₅Ni₂WA aviation gear steel during cold rotary forging[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24:3005-3022.
- [18] 施文鹏, 孙岑花, 李佳俊, 等. 基于神经网络智能算法的9310钢本构模型优化[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(3):171-180. SHI Wenpeng, SUN Cenhua, LI Jiajun, et al. 9310 steel constitutive model optimization based on artificial neural network intelligent algorithm[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2024, 16(3):171-180.
- [19] 陈保山, 逯云杰. 基于Deform-3D的齿轮坯精锻工艺分析与试验验证[J]. *锻压技术*, 2023, 48(12):18-24. CHEN Baoshan, LU Yunjie. Analysis and experimental verification of gear billet precision forging process based on Deform-3D[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48(12):18-24.

Study on multi-degree-of-freedom near-net shape forming method for aviation spur gears

MENG Yang^{1,2} ZHUANG Wuhao^{1,2} HAN Xinghui^{1,2}

(1. National Key Laboratory of High-temperature Light Alloys and Application Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2. Hubei Provincial Key Laboratory of Modern Automotive Parts Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] Addressing the requirements for high-quality and efficient manufacturing of aviation spur gears, and targeting issues such as incomplete tooth profile filling and excessive forming loads encountered in traditional single-degree-of-freedom forming methods like die forging and extrusion, this study innovatively proposes a multi-degree-of-freedom forming approach for aviation spur gears. This method enhances material flow capacity and reduces forming loads through continuous local loading via a multi-degree-of-freedom rolling die. Simultaneously, it refines the grain structure of the gear and generates continuously distributed metallic flow lines along the tooth profile, thereby improving the gear's strength and fatigue life. This provides a new technological pathway for manufacturing high-strength, high-toughness, and long-life aviation spur gears. [Methods] Finite element simulation technology was first employed to investigate the influence of preform geometry on tooth profile filling effectiveness and forming load. Based on this, an optimized preform design method was proposed. The mechanisms of tooth profile filling, Effective strain distribution and evolution, and metallic flow lines evolution during the forming process were further revealed. Subsequently, a Multi-Degree-of-Freedom Near-Net Shape Forming experiment was conducted based on simulation results. Grain size and metallic flow lines of the test specimens were characterized to validate the finite element model and simulation results. [Results] The results demonstrate that: Frustum-shaped preforms significantly improve tooth profile filling completeness and reduce forming load, enabling the production of fully-filled aviation spur gears. The Multi-Degree-of-Freedom forming method introduces severe plastic deformation into the tooth profile zone, effectively refining grain size and generating continuously distributed metallic flow lines along the tooth contour. Multi-Degree-of-Freedom Near-Net Shape Forming technology achieves high-performance manufacturing of aviation spur gears.

Key words: Aviation spur gear; Multi-degree-of-freedom near-net shape forming; Law of plastic forming; High-performance manufacturing; Forming process design

(编辑: 刘星泽)