

DOI: 10.3901/JME.2021.01.210

TA15 钛合金齿轮结构电流辅助微成形工艺研究*

包建兴^{1,2} 徐 杰^{1,2} 曲家正^{1,2} 白嘉楠^{1,2} 单德彬^{1,2} 郭 斌^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 针对钛合金室温塑性差、高温成形模具易损坏、成形精度差等问题,提出了 TA15 钛合金微齿轮结构电流辅助微成形工艺。利用有限元模拟和实验相结合的方法,分析了浮动成形和分流孔直径对微齿轮电流辅助成形载荷和流动行为的影响规律。结果表明浮动成形降低了微齿轮的成形载荷并有利于齿形下端角的填充,中空分流时分流孔直径为 2.3~2.5 mm 成形载荷和坯料填充流动最佳。对微齿轮结构进行显微组织和成形性能分析,结果显示,齿形填充完整度较好,金属流线沿轮廓分布,齿面力学性能分布均匀,等轴组织基本被保持。

关键词: 齿轮结构; 电流辅助成形; 中空分流; 微成形; 钛合金

中图分类号: TG316

Electrically-assisted Micro-forming Process of Gear Structure in TA15 Titanium Alloy

BAO Jianxing^{1,2} XU Jie^{1,2} QU Jiazheng^{1,2} BAI Jianan^{1,2} SHAN Debin^{1,2} GUO Bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Micro-Systems and Micro-microstructures Manufacturing of Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The processing technology of titanium alloy is a significant challenge in micro-manufacturing field owing to the worse plasticity under the room temperature, easily damaged die at high temperature and low controllability of the shape. For this purpose, the electrically-assisted micro-forming (EAMF) of micro-gears structure is conducted for TA15 titanium alloy. The effects of floating forming and diverging hole diameter on the forming load and flow behavior of micro-gears structure are simulated by finite element method. The results show that the floating forming reduces the forming load of the micro-gear and is beneficial to the filling of the bottom corners for tooth profile. The forming load and filling flow capacity are best when the diameter of diverging hole is 2.3-2.5 mm. The microstructure and formability analysis show that there are complete tooth profile, obvious metal flown line along contour, uniformly distributed mechanical properties of gear surface and almost unchanged equiaxed structure.

Key words: gear structure; electrically-assisted forming; inside divided flow; micro-forming; titanium alloy

0 前言

钛合金微齿轮结构是各种微小型传动机构的关键与核心构件,具有质量小、强度高、抗腐蚀性好、高低温性能优异等特点,在航空航天、武器装备以及海洋等领域具有广泛的应用前景。然而,由于微

型微齿轮模具型腔特征尺寸非常小,材料对微小型腔填充性能成为影响微成形质量的重要因素。

采用常规固定凹模的成形方法仅能成形出微型齿轮轮廓,填充质量很差。为了改善微型齿轮成形质量,利用基于浮动凹模的微成形方法,通过改变成形中模具对坯料的摩擦力方向,将阻碍坯料充填的摩擦阻力变为利于成形的积极摩擦力,显著降低了成形载荷有效提高了微型齿轮填充质量^[1-4]。目前,浮动式凹模微成形方法已经成功应用到微型双齿轮和微型叶轮高质量成形中^[5]。

* 国家自然科学基金重点项目(51635005)和装备预研基金重点(6140923020301)资助项目。20200206 收到初稿,20200611 收到修改稿

然而, 浮动式凹模摩擦力方向的改变使得齿轮上端角的填充难度增大。为改善这种状况, 提出了中空分流成形工艺, 中空分流由于分流面的存在, 分流面以外的金属向外流动充填齿顶型腔的同时, 分流面以内的金属向内流动使孔径缩小, 这样可以避免端角齿形充填压力陡增的现象, 改善了坯料充填性^[6-8]。OHGA 等^[9-11]系统研究了中空分流工艺在齿轮精锻成形上的应用, 当在毛坯中间加工出 $\phi 9\text{ mm}$ 减压孔后, 单位成形力降低了 33.8%, 并得到了填充效果良好的齿轮件。王广春等^[12]对空心管坯和实心圆柱坯进行了传统闭式锻挤和分流成形工艺的对比试验, 结果表明新的分流成形工艺工序简单, 齿形充填饱满, 端面平整, 成形力降低了 37% 以上。

同时, 微成形中由于尺度效应的存在, 材料微成形性能和尺度极限降低, 微成形件尺寸精度及一致性变差, 特别是对于钛合金等高性能材料, 单纯依靠模具施加载荷的微成形技术难以进行。在成形过程中对坯料施加脉冲电流, 能够有效地改善材料的塑性, 降低成形载荷, 提高微成形构件质量^[13-14]。目前电流辅助已经成功应用到了大量塑性成形工艺中, 例如电流辅助轧制^[15]、电流辅助拉拔^[16]、电流辅助冲压^[17]、电流辅助弯曲^[18]以及电流辅助压印^[19]等, 结果表明电塑性效应的存在具有降低成形力、提高塑性、消除回弹、促进再结晶和焊合孔洞等能力。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为宝钛集团有限公司提供的 TA15 钛合金热锻棒, 其化学成分如表 1 所示, 是一种高 Al 当量的近 α 型钛合金。图 1 所示为 TA15 钛合金原始微观组织照片, 是一种典型的等轴组织, 由大量平均晶粒尺寸约 $20\text{ }\mu\text{m}$ 等轴初生 α 相、部分片层厚度约 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的次生 α 相以及少量 β 相组成。采用线切割沿着热锻棒轴向制备微齿轮坯料, 为了消除表面氧化层对试验结果的影响, 采用 P800 砂纸机械抛光每个试样的轴面和端面, 抛光后的坯料直径 $4\text{ mm}\pm 0.05\text{ mm}$ 、高度 $7\text{ mm}\pm 0.05\text{ mm}$ 。另外, 试验采用中空分流工艺, 为了研究分流孔尺寸对微齿轮电流辅助成形的影响, 在抛光后的微齿轮坯料中心加工了直径 $\phi 2\text{ mm}\pm 0.05\text{ mm}$ 和 $\phi 2.5\text{ mm}\pm 0.05\text{ mm}$ 两类尺寸的内孔。

表 1 TA15 钛合金化学成分

| 元素 | Al | Mo | V | Zr | Fe | C | N | Ti |
|----------|-----|------|------|-----|------|------|------|----|
| 质量分数 (%) | 6.3 | 1.32 | 1.68 | 1.9 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 其余 |

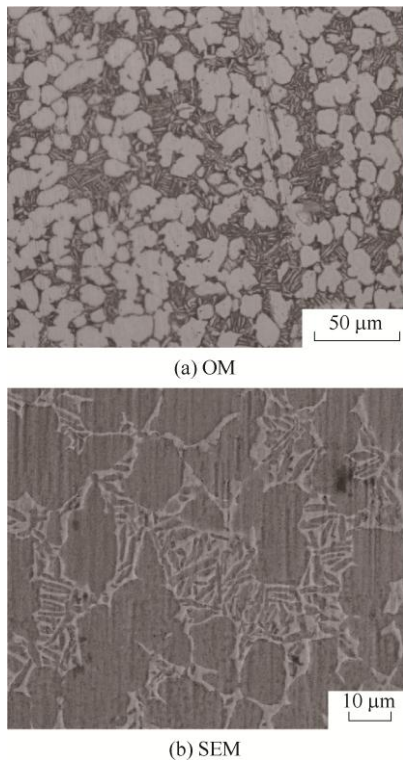


图 1 TA15 钛合金原始微观组织

1.2 试验方法

本文齿轮为渐开线圆柱齿轮, 具有渐开线和过渡线组成的齿形, 渐开线齿轮在工业上应用比较广泛。该渐开线微型齿轮的模数为 0.2 mm , 齿数 24, 齿顶圆直径 5.2 mm , 齿根圆直径 4.3 mm , 基圆齿厚 0.362 mm 。电流辅助微齿轮模具模芯部分如图 2 所示, 其中上凸模长度 5 mm , 下凸模长度 7 mm , 浮动凹模高度 13 mm 。弹顶与凹模下表面间距为 4 mm , 则上凸模伸出凹模型腔的高度为 2 mm 。试验采用预锻粗加终锻浮动成形的工艺路线, 使用万能材料试验机(AG-X 50 kN, 岛津公司)进行试验。在成形过程中, 凸模冲头向下运动与坯料接触后接通电源 (MicroStar CRS-LFP20-500, Dynatronix Inc.), 采用直流恒流模式, 电流 325 A , 预锻粗阶段成形速度 0.008 mm/s , 行程为 2 mm 时, 坯料预锻粗结束, 上凸模上表面与浮动凹模上表面平行。终锻过程, 冲头继续下压, 带动浮动凹模同时向下运动, 终锻成形速度 0.005 mm/s , 至成形结束。

使用金相显微镜(OM, OLYMPUS GX71)观察了成形件的微观组织, OM 样品是在机械抛光后使用体积比为 2:1:17 的 HF、 HNO_3 和 H_2O 溶液蚀刻所得。采用轮廓仪(VMS-2515)观察了成形件的齿形和圆角填充质量; 使用扫描电子显微镜(FE-SEM, FEI Quanta 200F)观察了齿轮的侧壁和齿形的表面形貌; 通过激光共聚焦显微镜(LSCM, OLYMPUS OLS-3000,)测量并分析了齿形尺寸精度。使用维氏

硬度计(Vickers, HUAYIN HVS-1000A)测量了硬度值,分析了成形件的齿面硬度分布情况。

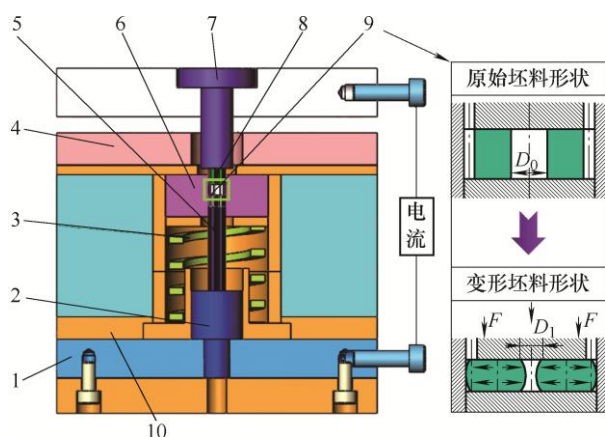


图2 微齿轮模具模芯

1. 下极板 2. 弹顶 3. 弹簧 4. 凹模盖板 5. 下凸模 6. 浮动凹模
7. 冲头 8. 上凸模 9. 坯料 10. 云母片

2 微齿轮成形过程有限元分析

2.1 模拟参数设置

本文利用 TA15 钛合金微压缩试验获得的流动应力曲线在 Deform 3D (DEFORM v11.0)有限元软件上模拟了钛合金齿轮结构电流辅助微成形过程。微压缩试验在电流密度 35 A/mm^2 条件下使用了直径 2 mm 和高度 3.5 mm 的微型试样。采用 Pro/E 软件对微型齿轮进行实体造型,将上下凸模、凸模凹模和坯料的 STL 文件导入 DEFORM-3D 软件,由于齿轮为轴对称几何体,因此只取 1 个齿进行研究。划分坯料网格数为 100 000,模具设置为刚性体,电流由上下凸模外侧端面引入。环境温度 20°C ,模具与环境的热传导系数设置为 0.2,模具、坯料之间的热传导系数设置为 11,坯料与模具之间的摩擦选择剪切模型,摩擦因数为 0.3,上凸模的预锻粗和终锻的压下速度 0.008 mm/s 和 0.005 mm/s ,设置电流密度为 35 A/mm^2 。

2.2 浮动成形

考虑到微型齿轮上下对称特点,分别采用浮动成形与非浮动成形方案进行模拟。图 3 为参数相同条件下浮动成形与非浮动成形载荷-位移曲线对比,两者载荷曲线变化趋势类似,均是分为三个阶段,材料预锻粗阶段、平稳填充阶段和困难填充阶段。不同之处是加载中期 $2.0 \sim 3.2 \text{ mm}$ 间,浮动成形加载所需的力要小于非浮动成形加载,主要是成形方法引起的材料流动行为变化而形成的差异。在图 3 中浮动成形与非浮动成形压下量 97% 时坯料填充轮

廓与速度场分布对比,由于摩擦力方向不同,二者的成形规律相反。非浮动成形首先填充上齿顶,而浮动成形则首先填充下齿顶;非浮动成形的下端填充时间晚于上齿顶,因此导致上齿顶的大部分材料流动速度较大;而浮动成形由于下端已经填充,仅有上齿顶小部分的材料流速较大。

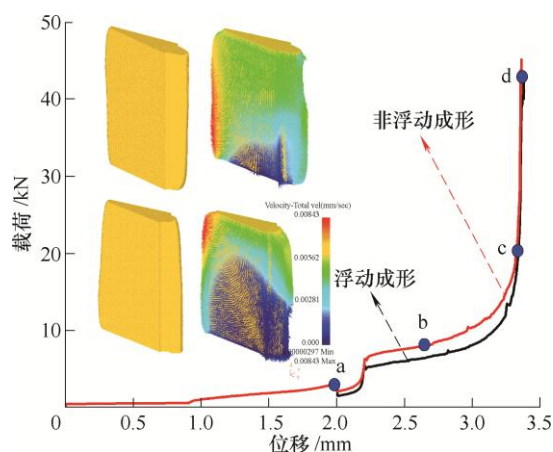


图3 浮动成形与非浮动成形载荷-位移曲线和坯料填充轮廓与速度场分布

2.3 分流孔尺寸

在坯料中预加工分流孔,可以增大成形时坯料的自由流动表面积,分流孔尺寸的大小会直接影响载荷大小和坯料填充的流动行为。图 4 对比了不同分流孔直径时成形力的模拟结果,由于不同分流孔尺寸导致成形的总行程不同,因此横坐标设为总压下量的百分比。在平稳填充阶段载荷随着分流孔直径的增大而减小,且随分流孔直径增大平稳填充的压下量百分比逐渐增加。通过对比不同分流孔直径坯料的最大成形力,可以看出,随着分流孔直径的增大,最大成形力逐渐上升,直径到达 2.3 mm 后基本保持稳定。图 5 为同一标尺下不同分流孔直径坯料等效应变分布。等效应变的分布特点与材料流动的

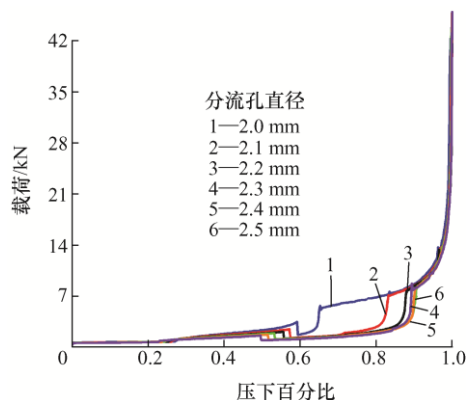


图4 不同分流孔直径的压下百分比-载荷曲线

有直接关系,其大小反映了材料流动趋势。在分流孔直径 2.0~2.3 mm 齿形处的等效应变逐渐降低,而分流孔直径 2.3~2.5 mm 齿形处等效应变则基本不变。中心分流孔处的等效应变随分流孔直径的增大而减小,并在直径达到 2.3 mm 后基本稳定,说明分流孔直径在 2.3~2.5 mm 时成形载荷和坯料填充流动最佳。

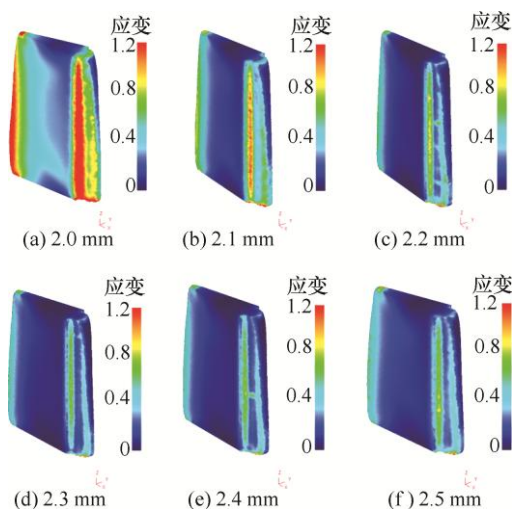


图 5 不同分流孔直径的等效应变分布

3 成形质量分析

3.1 表面形貌

试验得到的微齿轮件如图 6a 所示,成形件 No.1 中心分流孔直径 2 mm,成形件 No.2 中心分流孔直径为 2.5 mm。图 6b 为成形件成形载荷-位移曲线对比,可以看出,相同位移下 No.2 的成形载荷较 No.1 有少量降低,这与模拟的结果一致。使用 SEM 观察成形件的表面形貌,图 7a 和 7c 为齿轮端面的微观形貌,可以看到端面存在大量氧化皮,这是成形过程中温度较高所导致。此外,图 7a 的 No.1 成形件齿形填充饱满度较差,圆角表面粗糙,与之对比 No.2 成形件均好于 No.1 成形件。图 7b 为成形件 No.1 齿形形貌,可以看到齿根面表面粗糙,高度不一,而齿顶面填充则略好于齿根面;但是由于凹模侧壁粗糙度较大,导致取出零件时会在齿廓面产生脱模痕迹,形成了明显的表层毛刺;总的来说,成形件 No.1 整体填充完整度较差。图 7d 为成形件 No.2 齿形形貌,齿顶面和齿根面整体填充完整度较好,齿廓面的表面质量略好于齿根面,齿顶面和齿根面表层毛刺相较成形件 No.1 明显减少。

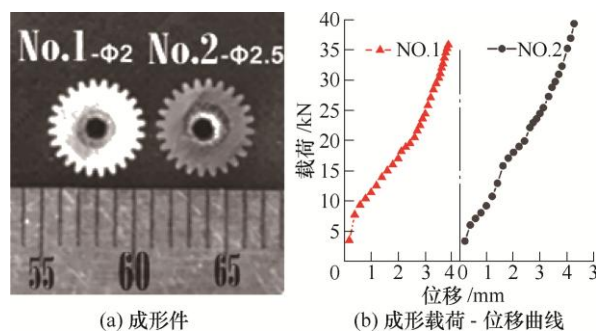


图 6 微齿轮成形件

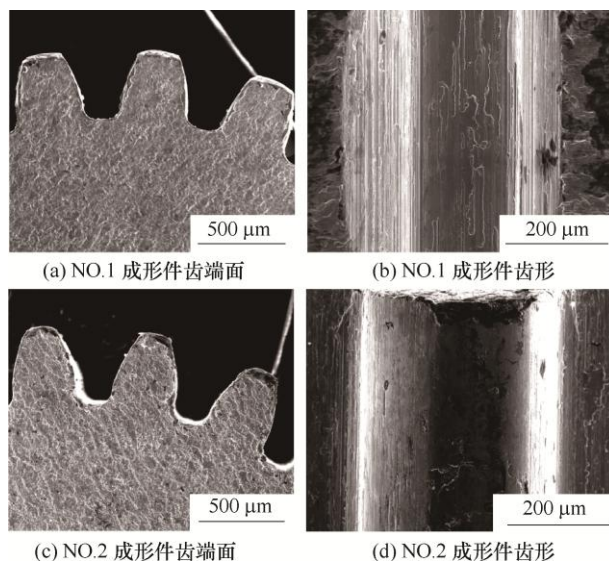
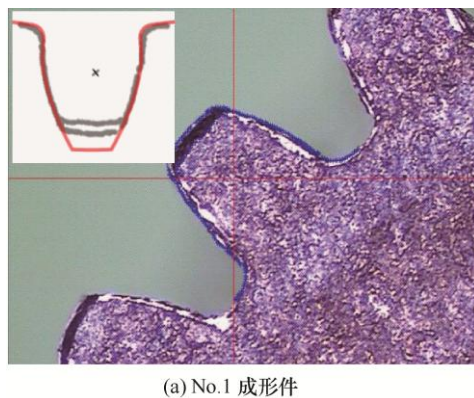


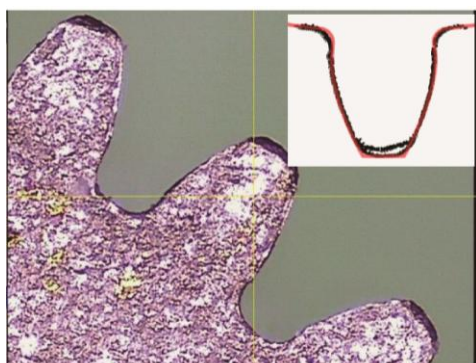
图 7 微齿轮成形件表面形貌

3.2 轮廓精度

图 8 为微齿轮成形件轮廓仪测量齿形轮廓照片。No.1 成形件齿形未填充完整,齿顶部分未充满,并且填充分布不均匀(图 8a),与标准齿形轮廓对比,齿高的填充高度约为标准齿形的 85%,而由于圆角,端面的填充高度进一步降低,约为 80%。图 8b 显示 No.2 成形件齿形填充效果好于 No.1 成形件,齿廓面填充完整,仅有齿顶面圆角未填充,填充高度约为标准齿形的 95%。



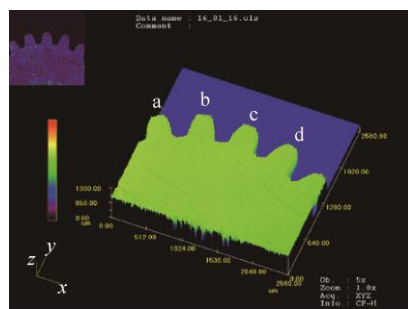
(a) No.1 成形件



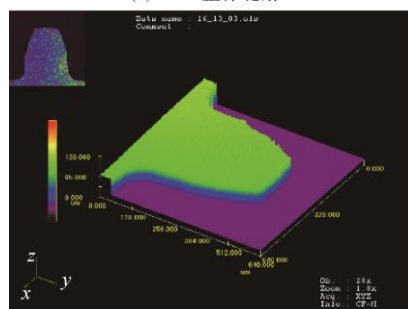
(b) No.2 成形件

图 8 微齿轮成形件轮廓仪测量齿形轮廓对比

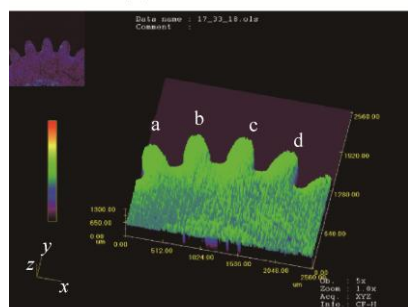
通过激光共聚焦显微镜进一步分析了齿形轮廓尺寸精度, 由于放大倍数较大, 无法扫描全貌, 因此取一侧的 4 个齿为研究对象。图 9a, 9b 和图 9c, 9d 分别为 No.1 成形件和 No.2 成形件的激光共聚焦照片, 分别测量所研究齿形的齿高及基圆齿厚, 如表 2 所示。两个微齿轮件的基圆齿厚分别为 $373.75\ \mu\text{m}$ 和 $368.97\ \mu\text{m}$, 与标准齿形的基圆厚度 $362\ \mu\text{m}$ 对比, 说明微齿轮件的齿形侧面成形精度较好。从齿高数据可以看出, 齿形成形不均匀, 填充效果 No.2 成形件较 No.1 成形件有所提高。



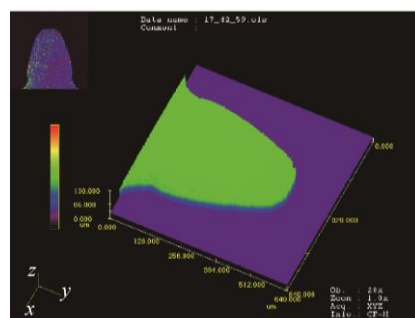
(a) No.1 整体轮廓



(b) No.1 局部放大图



(c) No.2 整体轮廓



(d) No.2 局部放大图

图 9 微齿轮成形件激光共聚焦测量齿形轮廓对比

表 2 微齿轮成形件基圆齿厚及齿高测量值

| 齿序号 | No.1 | | | | 平均值/ μm |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| | a | b | c | d | |
| 基圆齿厚/ μm | 372.61 | 373.67 | 373.45 | 374.53 | 373.75 |
| 齿高/ μm | 389.92 | 394.43 | 412.03 | 421.27 | — |

| 齿序号 | No.2 | | | | 平均值/ μm |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| | a | b | c | d | |
| 基圆齿厚/ μm | 368.63 | 369.30 | 367.20 | 369.71 | 368.97 |
| 齿高/ μm | 453.94 | 449.97 | 452.20 | 449.97 | — |

3.3 齿轮强度

通过维氏硬度计对成形件截面的硬度分布规律进行了测量, 只选取单个齿进行测试, 由距齿顶 $0.1\ \text{mm}$ 开始, 沿直径以间距为 $0.2\ \text{mm}$ 向齿中心取点测量。加载条件为载荷 $9.8\ \text{N}$, 保荷时间 $15\ \text{s}$, 测量结果如图 10 所示。结果显示, 从齿顶到齿轮中心区域的硬度分布较为均匀。对比于原始坯料硬度值 318.4HV_1 , 说明经过挤压成形后, 材料的硬度上升明显, 这主要是因为存在着明显的加工硬化。

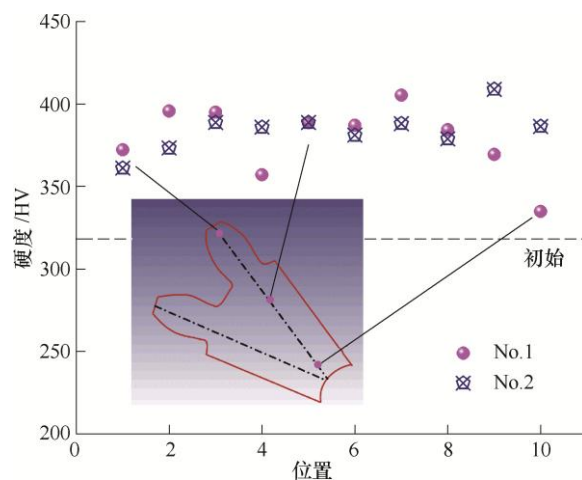


图 10 微齿轮件齿形硬度值分布

3.4 显微组织

图 11 为微齿轮件齿形和齿根部位显微组织。可以看出, 两个微齿轮件的显微组织相似, 未发生明

显相变, 等轴 α 相沿流线拉长。齿根处的变形最为剧烈, 等轴晶粒被拉长成长条状, 金属流线十分明显。齿身部位的微观组织形貌如图 12 所示, 结果显示靠近分流面及分流孔部位的组织形貌有很大差异。靠近分流孔位置的材料向分流孔内流动, 受到切向的压力, 使组织沿直径方向拉长, 并且距离中心越近变形越剧烈。而靠近分流面的部位, 变形量较小, 晶粒形貌与坯料的原始组织类似, 存在大量变形量较小的等轴 α 晶粒。

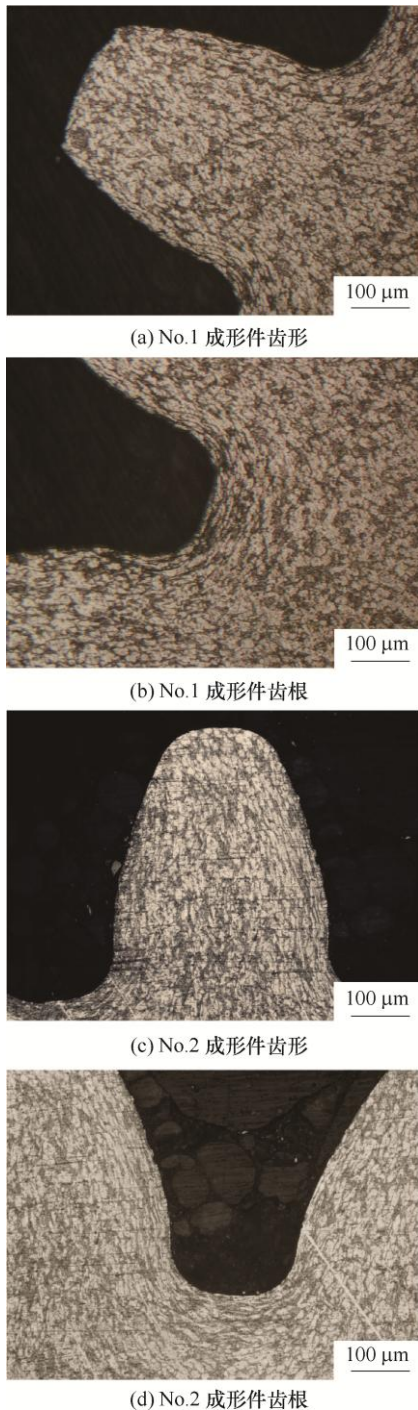


图 11 微齿轮件齿形和齿根部位显微组织

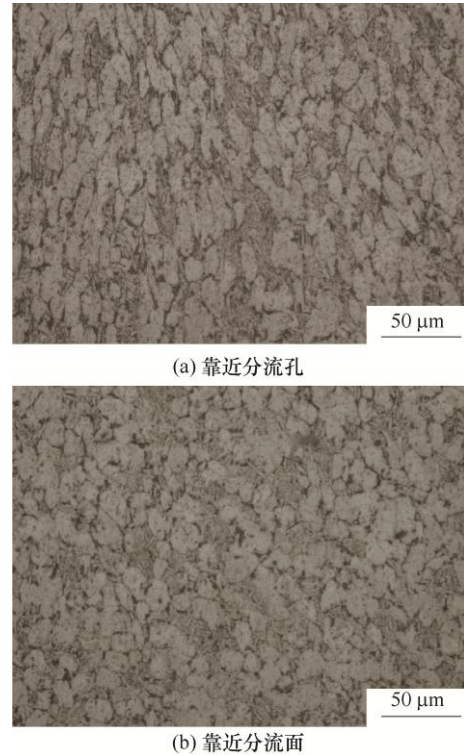


图 12 No.2 成形件齿身部位显微组织

4 结论

(1) 提出了钛合金微齿轮结构电流辅助微成形工艺, 利用有限元模拟分析了浮动成形和分流孔直径对微齿轮电流辅助成形载荷和流动行为的影响规律, 结果表明浮动成形降低了微齿轮的成形载荷并有利于齿形下端角的填充, 中空分流分流孔直径为 2.3~2.5 mm 成形载荷和坯料填充流动最佳。

(2) 进行了齿轮结构微成形试验, 结果显示浮动成形条件下分流孔直径 2.5 mm 较 2.0 mm 得到了齿形和齿根填充完整度较好, 表层毛刺相对更少的微齿轮, 其填充高度约为标准齿形的 95 %, 齿轮基圆齿厚为 368.97 μm 。

(3) 显微组织分析发现齿形及齿根处的变形剧烈, 金属流线沿轮廓分布, 齿身靠近分流孔处等轴组织沿中心方向伸长, 靠近分流面部位等轴组织与原始类似。

参 考 文 献

- [1] 单德彬, 徐杰, 王春举, 等. 塑性微成形技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(4): 251-261.
SHAN Debin, XU Jie, WANG Chunju, et al. The state of the art in plastic micro-forming[J]. Materials China, 2016, 35(4): 251-261.
- [2] XU J, WANG X, WANG G, et al. A review on

- micro/nanoforming to fabricate 3D metallic structures[J]. *Advanced Materials*, 2020, 2000893.
- [3] 王春举, 单德彬, 郭斌, 等. 基于浮动式模具成形微型齿轮工艺研究[J]. *材料科学与工艺*, 2011, 19(4): 11-14. WANG Chunju, SHAN Debin, GUO Bin, et al. Research on forming processes of microgears with floating micro-die[J]. *Materials Science & Technology*, 2011, 19(4): 11-14.
- [4] WANG C, SHAN D, GUO B, et al. Key problems in microforming processes of microparts[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2007, (2): 283-288.
- [5] WANG C, WANG C, SHAN D, et al. Manufacturing high aspect ratio microturbine by isothermal microforging process[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29(1): 42-45.
- [6] 夏巨谌. 金属材料精密塑性加工方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. XIA Juchen. Precision plastic machining of metal materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
- [7] 夏巨谌, 金俊松, 邓磊. 中空分流锻造成形机理及成形力的计算[J]. *塑性工程学报*, 2016, 23(1): 1-6. XIA Juzhan, JIN Junsong, DENG Lei, et al. Mechanism of forging utilizing flow relief hole and forming load calculation[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2016, 23(1): 1-6.
- [8] 谭险峰, 刘霞, 胡德锋, 等. 约束分流精锻成形直齿圆柱齿轮[J]. *锻压技术*, 2010, 35(2): 26-30. TAN Xianfeng, LIU Xia, HU Defeng, et al. Spur gear restrained distributary precision forging[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2010, 35(2): 26-30.
- [9] KYOICHI O, KAZUYOSHI K, TOSHIMASA J S. Research on precision die forging utilizing divided flow (Second report, Experimental study of processes utilizing flow relief-axis and relief-hole) [J]. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1982, 25(209): 1836-1842.
- [10] OHGA K, KONDO K, JITSUNARI T. Research on precision die forging utilizing divided flow (First report, Theoretical analysis of processes utilizing flow relief-axis and relief-hole) [J]. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1982, 25(209): 1828-1835.
- [11] OHGA K, KONDO K, JITSUNARI T. Research on precision die forging utilizing divided flow (Fourth report, Influence of restricting a centripetal flow) [J]. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1983, 26(218): 1434-1441.
- [12] 王广春, 赵国群, 夏世升. 直齿轮精锻成形新工艺及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41 (2): 123-126. WANG Guangchun, ZHAO Guoqun, XIA Shisheng. New precisions forging process and experimental study on spur gears[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41 (2): 123-126.
- [13] WANG X, XU J, SHAN D, et al. Modeling of thermal and mechanical behavior of a magnesium alloy AZ31 during electrically-assisted micro-tension[J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 85: 230-257.
- [14] WANG X, XU J, SHAN D, et al. Effects of specimen and grain size on electrically-induced softening behavior in uniaxial micro-tension of AZ31 magnesium alloy: Experiment and modeling[J]. *Materials & Design*, 2017, 127: 134-143.
- [15] LI X, WANG F, LI X, et al. Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 618: 500-504.
- [16] EGEA A J S, ROJAS H A G, CELENTAND D J, et al. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses[J]. *Materials & Design*, 2015, 90: 1159-1169.
- [17] KIM W, YEOM K H, THIEN N T, et al. Electrically assisted blanking using the electroplasticity of ultra-high strength metal alloys[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, 63(1): 273-276.
- [18] ZHAO Y, PENG L, LAI X. Influence of the electric pulse on springback during stretch U-bending of Ti-6Al-4V titanium alloy sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 261: 12-23.
- [19] MAI J, PENG L, LAI X, et al. Electrical-assisted embossing process for fabrication of micro-channels on 316L stainless steel plate[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(2): 314-321.

作者简介: 包建兴, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为难变形材料电场辅助微成形。

E-mail: jxbao@126.com

徐杰(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳成形理论、技术与装备。

E-mail: xjhit@hit.edu.cn