DOI: 10.3901/JME.2014.14.126

TC4 钛合金锥形环辗轧整圆曲线设计及其影响规律*

郭良刚 陈孝庆 杨 合 陈建华 邸伟佳

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室 西安 710072)

摘要: TC4 钛合金锥形环辗轧过程整圆阶段的芯辊进给速度曲线形式, 对成形环件的几何(圆度、壁厚均匀性)、温度与应变分布等具有重要影响作用。针对同一 TC4 钛合金锥形环件热辗轧过程, 提出“上凸形”、“下凹形”、“阶梯形”和“直线形”四种整圆芯辊进给速度曲线(整圆曲线)的设计方法; 进而采用基于 ABAQUS 软件平台的建模仿真方法, 模拟揭示四种整圆曲线对成形环件圆度、壁厚均匀性以及温度与应变场的影响规律。结果表明, “上凸形”、“直线形”、“阶梯形”、“下凹形”整圆曲线下, 成形环件圆度及壁厚均匀性依次变好; 成形环件平均温度依次变低, 温度分布均匀性依次变好; 平均等效塑性应变依次变大, 等效塑性应变分布均匀性依次变差。综合考虑环件圆度、壁厚均匀性以及温度与应变情况, “下凹形”整圆曲线相对更适用于 TC4 钛合金锥形环辗轧过程。

关键词: TC4 钛合金; 锥形环; 环件轧制; 芯辊进给速度曲线; 整圆曲线; 有限元建模仿真

中图分类号: TG33

Design Method of Calibrating Curve and Its Effects on Conical Ring Rolling Process for TC4 Titanium Alloy

GUO Lianggang CHEN Xiaoqing YANG He CHEN Jianhua DI Weijia

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: The feed speed curve of the mandrel at the end stage of the conical ring rolling process for TC4 titanium alloy (calibrating curve) plays an important role in the geometric accuracy, temperature and strain fields of the rolled ring. Design methods for four kinds of calibrating curves which are convex, concave, ladder, and linear forms are proposed. The effect rules of four calibrating curves on roundness, thickness uniformity and temperature and stain fields of the rolled ring are explored through numbers of simulations based on ABAQUS software platform. The results show that, under the convex, linear, ladder and concave calibrating curves, the roundness and thickness uniformity of the rolled ring orderly tend to be better; the temperature distribution of the rolled ring orderly becomes more homogeneous but the temperature average is orderly decreasing; and the equivalent plastic strain distribution orderly becomes more inhomogeneous but the average of equivalent plastic strain is orderly increasing. So the concave calibrating curve is the relatively adequate selection among the above four calibrating curves for the conical ring rolling process for TC4 titanium alloy billets.

Key words: TC4 titanium alloy; conical ring parts; ring rolling; feed speed curve of the mandrel; calibrating curve; finite element(FE) modeling and simulation

0 前言

TC4 钛合金锥形环件广泛应用于航空航天领域, 尤其是作为航空发动机的机匣、结合环等构

件^[1-4]。环件辗轧是一种先进的连续局部回转塑性成形技术, 它通过轧环机使坯产生壁厚减薄、直径扩大、截面轮廓成形, 因具有省力、节能、节材、优质、高效等技术优势, 因而在航空、航天、风电、高铁等高端制造领域日益得到广泛的应用^[5], 并已成为目前生产大型无缝钛环的重要加工工艺^[6]。

环件轧制过程一般分为三个阶段: ① 起轧阶段, 坯从静止状态过渡到连续咬入孔型的转动状态, 并使得每转进给量达到设计值; ② 稳定轧制阶段, 坯直径快速长大, 为主要变形阶段; ③ 整圆

* 国家自然科学基金(51175427)、国家自然科学基金重点(51135007)、金属挤压与锻造装备技术国家重点实验室开放基金(2011MEFETKF_03)、国家科技重大专项(2010ZX04004-131-07)、材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题基金(P2014-05)和 111 引智(B08040)资助项目。20131026 收到初稿, 20140408 收到修改稿

阶段，芯辊进给速度逐渐减小直至轧制变形结束，该阶段通过减小进给速度亦即减小每转进给量，对环件进行整形轧制，使环件壁厚均匀、形状圆整^[7]。TC4 钛合金锥形环热辗轧成形是一个受多因素交互影响的宏观变形和微观组织演变耦合的复杂过程。由于环坯几何形状轴向的不对称性，辗轧过程中环件容易出现攀爬、扭转等现象，轧制环件常产生椭圆度大、壁厚不均匀、组织不均等缺陷。因此，整圆阶段即辗轧过程结束阶段的芯辊进给速度曲线设计对获得圆度好、壁厚均匀、组织优良的环件具有十分重要的意义。实践证明，合理制定整圆阶段芯辊进给速度曲线，可以有效解决椭圆度、壁厚不均等问题，大大提高成形环件的几何精度，改善产品性能。对于难变形昂贵的 TC4 钛合金环件，则可大大减少或消除后续机械加工切削余量，提高材料利用率。因此，研究难变形材料复杂截面异形环件辗轧整圆阶段芯辊进给速度曲线(整圆曲线)的设计方法，进而揭示整圆曲线对成形质量的影响规律，是发展难变形材料异形环件辗轧精密低成本成形制造迫切需要研究的课题。

然而，相关研究鲜见报道。针对矩形截面环件辗轧过程，华林等^[8]研究了矩形截面环件轧制中形状变化规律，获得了环件内外轮廓曲线方程和内外轮廓椭圆度计算式；AMIR 等^[9]研究了芯辊进给速度对成形件椭圆度的影响规律，提出一种环件圆度测量的简易方法；杨合等^[10]基于理论解析法，研究了一种典型的异形截面环件冷辗扩成形过程中环件半径扩大变形与压下量之间的关系，为进给运动的设计提供了依据；李兰云等^[11]研究揭示了矩形截面环件开式冷轧工艺中总压下量不变时，芯辊进给速度对轧制力、轧制力矩和环件轴向宽展的影响规律；李斌^[12]通过对不同芯辊进给速度下 Ti40 合金环件径轴向轧制进行数值模拟，分析研究了环件温度、应变及几何尺寸对芯辊进给速度的响应规律。需要指出的是，以上研究都是针对芯辊匀速进给的情况，即芯辊进给速度曲线为水平直线，没有考虑整圆阶段。然而，实际生产中，通常需要设计合理的递减的进给速度曲线以达到整圆和壁厚均匀化的目的。何书林等^[13]针对钛及钛合金环材轧制过程给出了轧制各个阶段芯辊进给速度的合适范围，但有关整圆阶段芯辊进给速度曲线(整圆曲线)的设计方法及其对环件几何精度、应变与温度分布的影响规律还有待进一步深入研究。

鉴于上述研究背景与意义，本文以 TC4 钛合金锥形环热辗轧过程为研究对象，首先提出了四种整圆曲线的设计方法，然后基于 TC4 钛合金锥形环热辗轧有限元建模与仿真，揭示了不同整圆曲线对成形环件几何精度(圆度和壁厚均匀性)和温度与应变分布的影响规律，从而为实际生产中 TC4 钛合金锥

形环辗轧的形/性一体化调控与制造提供重要依据。

1 整圆曲线设计方法

本文研究的 TC4 钛合金锥形环件及环坯的几何形状及尺寸如图 1 所示。由图 1 可知轧制过程总的壁厚减薄量也即芯辊总进给量为 14 mm。同时，根据文献[13]芯辊进给速度范围选取初始进给速度 $v_0=1.2$ mm/s，最终进给速度 $v_f=0.2$ mm/s。采用的轧辊如图 2 所示，其尺寸及环坯与环境温度、驱动辊转速如表 1 所示。

图 1 环坯及成形环件示意图

图 2 锥形轧辊示意图

表 1 辗轧工艺参数

参数	数值
驱动辊上、下端半径 $R_{1u}, R_{1b}/\text{mm}$	180, 150
芯辊上、下端半径 $R_{2u}, R_{2b}/\text{mm}$	50, 80
环坯初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	930
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	30
驱动辊转速/(r/min)	30

针对上述 TC4 钛合金锥形环辗轧过程，本文提出“上凸形”(加速递减)、“直线形”(匀速递减)、“阶梯形”(阶梯形递减)、“下凹形”(减速递减)四种整圆曲线形式(图 3)。为了方便研究，本文不考虑起轧阶段，芯辊首先以 $v_0=1.2$ mm/s 的速度匀速进给 7 s，则该阶段进给量为 8.4 mm。然后进入整圆阶段，

从第 7 s 开始, 芯辊以上述四种减速方式进给, 总进给量为 5.6 mm。下面详细给出上述四种整圆曲线的设计方法。

图 3 四种不同类型的整圆曲线

1.1 “上凸形”整圆曲线设计

采用芯辊进给速度 v 随轧制时间 t 变化的一元二次函数来描述图 3a 所示的“上凸形”整圆曲线

$$v = a(t-h)^2 + k \quad a < 0 \quad 7 \leq t \leq T_1 \quad (1)$$

式中 T_1 ——总轧制时间;

a, h, k ——函数待定系数。

由图 3a 可知, $h=7, k=1.2$ 。再根据速度-时间曲线下的面积即为芯辊进给量, 并结合轧制结束时进给速度为 0.2 mm/s 的边界条件, 可得到如下未知数为 a 和 T_1 的方程组

$$\begin{cases} \int_7^{T_1} [a(t-7)^2 + 1.2] dt = 5.6 \\ v|_{t=T_1} = a(T_1-7)^2 + 1.2 = 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)求解可得

$$\begin{cases} a = -0.024 \\ T_1 = 13.46 \end{cases}$$

则图 3a 所示“上凸形”整圆曲线由式(3)确定

$$v = -0.024 \times (t-7)^2 + 1.2 \quad (3)$$

整圆阶段, 芯辊以式(3)的速度由 1.2 mm/s 变减速进给 6.46 s 至 0.2 mm/s, 总轧制时间 T_1 为 13.46 s。

1.2 “直线形”整圆曲线设计

采用芯辊进给速度 v 随轧制时间 t 变化的线性函数来描述图 3b 所示的“直线形”整圆曲线

$$v = at + b \quad 7 \leq t \leq T_2 \quad (4)$$

式中 T_2 ——总轧制时间;

b ——函数待定系数。

根据速度-时间曲线下的面积即为芯辊进给量, 并结合整圆阶段开始及结束时芯辊进给速度分别为 1.2 mm/s、0.2 mm/s 的边界条件, 可得到如下未知数为 a, b 和 T_2 的方程组

$$\begin{cases} \int_7^{T_2} (at + b) dt = 5.6 \\ v|_{t=7} = 7a + b = 1.2 \\ v|_{t=T_2} = aT_2 + b = 0.2 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)求解可得

$$\begin{cases} a = -0.125 \\ b = 2.075 \\ T_2 = 15 \end{cases}$$

则图 3b 所示“直线形”整圆曲线由式(6)确定

$$v = -0.125t + 2.075 \quad (6)$$

整圆阶段, 芯辊以式(6)的速度由 1.2 mm/s 匀减速进给 8 s 至 0.2 mm/s, 总轧制时间 $T_2=15$ s。

1.3 “阶梯形”整圆曲线设计

如图 3c 所示, 将整圆阶段分为两段, 采用阶梯形函数来描述图 3 所示的“阶梯形”整圆曲线

$$v = \begin{cases} v_1 & 7 \leq t \leq t_1 \\ v_2 & t_1 \leq t \leq T_3 \end{cases} \quad v_1, v_2 \text{ 为常数} \quad (7)$$

式中 v_1 ——第一段芯辊进给速度;

v_2 ——第二段芯辊进给速度;

t_1 ——第一阶段结束时的轧制时间;

T_3 ——总轧制时间。

在本文研究中取 $v_1=0.8 \text{ mm/s}$, $t_1=13 \text{ s}$, 由于轧制结束时芯辊进给速度为 0.2 mm/s , 则 $v_2=0.2 \text{ mm/s}$, 结合整圆阶段芯辊总进给量为 5.6 mm , 可得到如下未知数为 T_3 的方程

$$\int_7^{13} 0.8 dt + \int_{13}^{T_3} 0.2 dt = 5.6 \quad (8)$$

由式(8)求解可得

$$T_3 = 17$$

则图 3c 所示“阶梯形”整圆曲线由式(9)确定

$$v = \begin{cases} 0.8 & 7 \leq t \leq 13 \\ 0.2 & 13 \leq t \leq 17 \end{cases} \quad (9)$$

整圆阶段, 芯辊以式(9)的速度由 0.8 mm/s 匀速进给 6 s , 再以 0.2 mm/s 匀速进给 4 s , 总轧制时间 T_3 为 17 s 。

1.4 “下凹形”整圆曲线设计

采用芯辊进给速度 v 随轧制时间 t 变化的一元二次函数来描述图 3d 所示的“下凹形”整圆曲线

$$v = a(t-h)^2 + k \quad a > 0 \quad 7 \leq t \leq T_4 \quad (10)$$

式中 T_4 ——总轧制时间。

由图 3d 可知, $h=T_4$, $k=0.2$ 。再根据速度-时间曲线下的面积即为芯辊进给量, 并结合整圆阶段开始时进给速度为 1.2 mm/s 的边界条件, 可得到如下未知数为 a 和 T_4 的方程组

$$\begin{cases} \int_7^{T_4} [a(t-T_4)^2 + 0.2] dt = 5.6 \\ v|_{t=7} = a(7-T_4)^2 + 0.2 = 1.2 \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)求解可得

$$\begin{cases} a = 0.009 \\ T_4 = 17.5 \end{cases}$$

则图 3d 所示“下凹形”整圆曲线由式(12)确定

$$v = 0.009 \times (t-17.5)^2 + 0.2 \quad (12)$$

整圆阶段, 芯辊以式(12)的速度由 1.2 mm/s 变减速进给 10.5 s 至 0.2 mm/s , 总轧制时间 $T_4=17.5 \text{ s}$ 。

2 TC4 钛合金锥形环热轧三维热力耦合有限元模型

本文采用文献[14]中所建立的 TC4 钛合金锥形环热轧三维热力耦合有限元模型(图 4)进行模拟研究。环坯尺寸如图 1 所示, 轧辊尺寸、环坯初始温度、环境温度、驱动辊转速等如表 1 所示, TC4 钛合金的相关物理参数如表 2 所示^[15-16]。

(a) 锥形环热轧原理图

(b) 锥形环热轧装配模型

图 4 TC4 钛合金锥形环热轧三维热力耦合有限元模型

表 2 TC4 钛合金物理参数

物理参数	数值
密度/(kg/m ³)	4 440
泊松比	0.32
热辐射系数/[W/(m ² ·K ⁴)]	0.6
表面传热系数/[W/(m ² ·K)]	20
接触热导率/[W/(m·K)]	4 000

3 结果与讨论

3.1 整圆曲线对成形环件圆度及壁厚均匀性的影响规律

3.1.1 圆度及壁厚均匀性衡量指标

圆度衡量指标。如图 5 所示, 在成形环件端面(小端)外圆面上每隔 15° 取一个特征点, 共取 24 个, 并输出这 24 个点的 x 、 z 坐标值(所参考坐标系如图 4 所示)。将此 24 点分成 8 组, 每组的三点确定一个外圆的内接正三角形(图 6), 根据三角形 3 个顶点

的坐标值,则可以确定相应的环件外径值,8组即得到8个环件外径值 $D_i(i=1,2,\dots,8)$,求其平均值即得到环件的平均外径 D_a ,进而采用式(13)的环件外径标准偏差(Standard deviation of diameter, SDD)来描述成形环件小端外径的圆度

$$SDD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (D_i - D_a)^2}{8}} \quad (13)$$

那么, SDD 越小,表示成形环件圆度越好。对于成形环件小端内径及大端内、外径的圆度,采用相同方法计算。

壁厚均匀性衡量指标。如图5所示,在成形环件端面(小端)内圆上相应地也取24个特征点,其对应位置特征点之间的距离,即是成形环件的壁厚 $H_i(i=1, 2, \dots, 24)$,求其平均值则得到环件的平均壁厚 H_a ,进而采用式(14)的环件壁厚的标准偏差(Standard deviation of wall-thickness, SDW)来描述成形环件的壁厚均匀性

$$SDW = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} (H_i - H_a)^2}{24}} \quad (14)$$

SDW 越小,表示成形环件壁厚越均匀。对于成形环件大端的壁厚均匀性,采用相同方法计算。

图5 内外径特征点的选取

图6 圆内接正三角形的选取

3.1.2 整圆曲线对成形环件圆度的影响规律

用整圆曲线 1、2、3、4 的编号分别表示上凸形、直线形、阶梯形、下凹形整圆曲线。图7所示为不同整圆曲线下成形环件大端内、外径及小端内、外径的圆度(即 SDD)变化情况。可以看出,整圆曲线 1、2、3、4 下环件的圆度依次变好;成形环件的大端圆度均比小端圆度好;环件的外径圆度比内径好。这主要是因为以下几点。

(1) 根据文献[6],轧制过程每转进给量

$$\Delta h_i = \frac{v_i}{n_1 D_1} \left(\frac{D_0 + d_0}{2} \frac{H_0}{H_i} + H_i \right) \quad (15)$$

对于给定的驱动辊转速 n_1 、驱动辊直径 D_1 、坯初始内外径和壁厚 d_0 、 D_0 、 H_0 ,每转进给量 Δh_i 主要取决于芯辊进给速度 v_i 。因此,在整圆阶段,芯辊低速进给持续的时间越长,速度减小的趋势就越平缓,在相同时间内每转进给量的变化也就越小,这有利于提高成形环件的圆度,而整圆曲线 1、2、3、4 下,整圆时间依次变长,因此环件圆度依次变好。

(2) 由式(15)可知,驱动辊直径越小,每转进给量越大,因此,驱动辊小端的每转进给量大于大端,这使得驱动辊小端与环件大端贴合越紧密,从而使得环件大端的圆度好于小端。

(3) 由文献[6]可知,环件轧制过程中,环件外表面的进给量小于内表面的进给量,因此成形环件外径圆度比内径圆度好。

图7 不同整圆曲线下成形环件大、小端内外径 SDD

3.1.3 整圆曲线对成形环件壁厚均匀性的影响规律

图8所示为不同整圆曲线下成形环件的壁厚均匀性(即 SDW)变化情况。从图8中可以看出,整圆曲线 1、2、3、4 下,成形环件的壁厚均匀性依次变好,且大端较小端更均匀。其原因也主要在于整圆曲线 1、2、3、4 下,芯辊减速进给持续的时间依次变长,在相同时间内每转进给量的变化也就越小,从而有利于提高环件壁厚的均匀性。同时,由于环

件大端与驱动辊小端的贴合性更好, 因而使得环件大端壁厚均匀性比小端好。

图 8 不同整圆曲线下成形环件大、小端 SDW

3.2 整圆曲线对成形环件温度及应变场的影响规律

3.2.1 温度及应变分布均匀性衡量指标

采用温度的标准偏差(Standard deviation of temperature, SDT)(式(16))和应变的标准偏差(Standard deviation of plastic strain, SDP)(式(18))来描述 TC4 钛合金锥形环热辗轧过程温度、应变分布的均匀性。SDT、SDP 越小, 表示环件温度、应变分布越均匀。

$$SDT = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T_a)^2}{N}} \quad (16)$$

$$T_a = \sum_{i=1}^N T_i / N \quad (17)$$

$$SDP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (PEEQ_i - PEEQ_a)^2}{N}} \quad (18)$$

$$PEEQ_a = \sum_{i=1}^N PEEQ_i / N \quad (19)$$

式中 N ——单元总数,

T_i ——第 i 个单元的温度,

T_a ——环件上所有单元温度的平均值;

$PEEQ_i$ ——第 i 个单元处的等效塑性应变(Equivalent plastic strain, PEEQ);

$PEEQ_a$ ——环件上所有单元处等效塑性应变的平均值。

3.2.2 整圆曲线对成形环件温度场的影响规律

图 9 所示为不同整圆曲线下成形环件温度场的分布云图。可以看出, 不同整圆曲线下环件温度场的分布规律基本一致, 高温区位于环件中间层, 低温区位于内外表层。从图 10 也可以看出, 不同整圆曲线下成形环件温度的径向分布规律一致, 径向中

心处的温度高于环件内外侧, 且越靠近径向中心处, 环件温度越高。这是由于环件中间层变形热效应产生的热量不易损失, 因而温度较高, 而环件内外表层与环境及轧辊之间的对流换热及接触传热效应损失大量的热量, 因而温度较低。

(a) 整圆曲线 1

(b) 整圆曲线 2

(c) 整圆曲线 3

(d) 整圆曲线 4

图 9 不同整圆曲线下成形环件温度场分布云图(°C)

图 10 不同整圆曲线下成形环件温度径向分布

图 11 所示为不同整圆曲线下成形环件温度的平均值及温度分布均匀性(SDT)变化情况。从图 11 中可以看出,整圆曲线 1、2、3、4 下环件平均温度依次降低,温度分布依次较为均匀。这是因为整圆曲线 1、2、3、4 下,轧制时间依次越长,热损失越大,因此环件平均温度越低;同时,轧制的时间越长,环件内部热传导进行得越充分,因而温度分布得越均匀。

图 11 不同整圆曲线下成形环件平均温度及 SDT

3.2.3 整圆曲线对成形环件应变场的影响规律

图 12、13 所示分别为不同整圆曲线下成形环件等效塑性应变场分布云图及等效塑性应变沿环件径向分布情况。从图 12、13 中可以看出,不同整圆曲线下,环件等效塑性应变场的分布规律基本一致,环件表面的等效塑性应变较内部大。同时,在整圆曲线 1、2、3、4 下,成形环件内外侧的等效塑性应变依次变大,而中间层相差不大。这主要是因为,在整圆阶段,随着芯辊进给速度的减小,每转进给量也随之减小,对环件的辗透能力下降,使得环件变形区主要集中在内外表层,而中间层变形很小,所以不同曲线下中间层应变相差不大;同时,由于整圆曲线 1、2、3、4 下芯辊低速进给的时间依次变长,使得环件内外侧的变形量依次变大,因而环件内外侧的等效塑性应变依次变大。

图 14 所示为不同整圆曲线下平均等效塑性应变(PEEQ_a)及等效塑性应变分布均匀性(SDP)的变化情况。从图 14 中可以看出,整圆曲线 1、2、3、4 下,成形环件平均等效塑性应变依次变大,其应变分布依次越不均匀。这主要是因为整圆曲线 1、2、3、4 下,成形环件内外侧应变依次变大,而中间层应变相差无几,因此,内外侧与中间层的变形量差别依次变大,应变分布越不均匀。

4 结论

(1) 提出了“上凸形”、“直线形”、“阶梯形”、

图 12 不同整圆曲线下成形环件等效塑性应变场分布云图

图 13 不同整圆曲线下成形环件等效塑性应变径向分布

“下凹形”四种不同类型的整圆曲线形式及其设计方法。

(2) “上凸形”、“直线形”、“阶梯形”、“下凹形”整圆曲线下成形环件圆度及壁厚、温度分布均匀性依次变好,而等效塑性应变分布均匀性依次

图 14 不同整圆曲线下成形环件 PEEQ_a 及 SDP

变差。

(3) 综合考虑成形环件圆度和壁厚、温度及应变分布的均匀性,“下凹形”整圆曲线相对更适合于本文 TC4 钛合金锥形环辗轧过程。

参 考 文 献

- [1] 张德昭, 朱峰, 杨昭. Ti-4Al-0.005B 钛合金大型环件的研制[J]. 钛工业进展, 2003, 20(6): 26-27.
ZHANG Dezhaoh, ZHU Feng, YANG Zhao. Manufacturing process of large-scale rings made of titanium alloy Ti-4Al-0.005B[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(6): 26-27.
- [2] 陈志刚, 菅海燕, 宋涛. 大型钛环的轧制[J]. 锻压技术, 1994(5): 43-45.
CHEN Zhigang, JIAN Haiyan, SONG Tao. Rolling of large titanium ring[J]. Forging & Stamping Technology, 1994(5): 43-45.
- [3] 窦忠林. TC4 合金大型机匣环形锻件的轧制工艺研究[C]//中国航空学会青年科技论坛, 2004 年 7 月, 北京. 北京, 中国航空学会, 2004: 632-636.
DOU Zhonglin. Study on the rolling process of big TC4 alloy engine-cage ring forging[C]//CSAA Science and Technology Youth Forum, July, 2004, Beijing. Beijing: CSAA, 2004: 632-636.
- [4] YEOM J T, KIM J H, PARK N K, et al. Ring-rolling design for a large-scale ring product of TI-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 747-751.
- [5] 郭良刚, 杨合, 金坚诚. 环件径轴向轧制毛坯尺寸设计方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 1-9.
GUO Lianggang, YANG He, JIN Jiancheng. Design method of blank sizes for radial-axial ring rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 1-9.
- [6] MARCZINSKI H J. Hot ring rolling process and its integration into automatic production lines[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes, Kyoto, 1984: 251-265.
- [7] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
HUA Lin, HUANG Xinggao, ZHU Chundong. Theory and technology of ring rolling process[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [8] 华林, 梅雪松, 吴序堂. 环件轧制中的形状和精度[J]. 汽车技术, 1998(2): 30-39.
HUA Lin, MEI Xuesong, WU Xutang. The shape and precision of ring in rolling process[J]. Automobile Technology, 1998(2): 30-39.
- [9] AMIR H G, MOHAMMAD R F, ABDOL A M. Investigation of process parameters on hot ring rolling by coupled thermo-mechanical 3D-FEA[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 4(4): 33-38.
- [10] 杨合, 李兰云, 王敏, 等. 异形环件冷辗扩中环件半径扩大变形行为研究[J]. 中国科学, 2010, 40(7): 802-810.
YANG He, LI Lanyun, WANG Min, et al. Research on the expanding deformation of ring radius in cold profiled ring rolling process[J]. Sci. China Tech. Sci., 2010, 40(7): 802-810.
- [11] 李兰云, 杨合, 郭良刚, 等. 芯辊进给速度对环件冷轧工艺的影响规律[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 808-811.
LI Lanyun, YANG He, GUO Lianggang, et al. Effect of feed velocity of mandrel on cold ring roll process[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(7): 808-811.
- [12] 李斌. Ti40 合金环件径轴向轧制过程数值模拟及工艺优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011.
LI Bin. Numerical simulation and optimization of radial-axial ring rolling process for titanium alloy Ti40[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2011.
- [13] 何书林, 马宝军, 丁珊琦, 等. 钛及钛合金环材轧制技术[J]. 钛工业进展, 2006, 23(4): 27-30.
HE Shulin, MA Baojun, DING Shanqi, et al. The rolling technology of titanium and its alloy ring[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(4): 27-30.
- [14] 郭良刚, 陈建华, 杨合, 等. TC4 钛合金锥形环热辗轧应变及温度场对轧辊尺寸的响应规律[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1463-1473.
GUO Lianggang, CHEN Jianhua, YANG He, et al. Response rules of strain and temperature fields to roll

- sizes during hot conical rolling process of TC4 titanium alloy conical ring[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(6): 1463-1473.
- [15] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. *China aeronautical materials handbook*[M]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [16] YANG H, WANG M, GUO L G, et al. 3D coupled thermo-mechanical FE modeling of blank size effects on the uniformity of strain and temperature distributions during hot rolling of titanium alloy large rings[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 44: 611-621.
-
- 作者简介: 郭良刚, 男, 1974 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为精确塑性成形与计算机建模仿真。
E-mail: glgglg66@nwpu.edu.cn
- 陈孝庆, 男, 1988 年出生。主要研究方向为钛合金环件精确轧制过程的数值模拟。
E-mail: chenxiaqing122@163.com

国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目简介

压电驱动型跨尺度原位纳米压痕/刻划测试新技术的研究*

项目负责人: 赵宏伟(E-mail: hwzhao@jlu.edu.cn)

依托单位: 吉林大学

项目批准号: 50905073

1. 项目简介

提出对特征尺寸毫米级以上三维试件实现跨尺度原位纳米压痕/划痕测试的新技术, 获取了有关基础理论与关键技术, 设计了结构紧凑的以压电驱动组件作为压痕/划痕测试的核心驱动元件, 通过步进电动机和压电叠堆混合驱动技术实现了压头在压入方向上的宏动调整与精密压入、压出动作, 利用精密力传感器和位移传感器作为检测元件, 结合算法程序实现了仪器的闭环控制。成功研制我国首台, 也是目前国际上为数不多的几台可在扫描电子显微镜内实现原位压痕/划痕测试和微纳加工的仪器样机, 被测样品尺寸达 10 mm×10 mm×5 mm。利用研制的仪器在扫描电镜内对大块非晶合金和半导体材料开展了原位微纳米压痕/划痕测试试验, 动态研究了材料在载荷作用下的变形损伤机制, 获取了一批有意义的研究成果, 仪器实现了推广应用和示范应用, 推动了我国在相关领域占据国际重要地位。

2. 主要创新点及其主要研究进展

研究获取了涉及纳米压痕/划痕测试原理、算法修正、仪器设计分析、闭环控制、调试校准、性能评价、原位测试试验等方面较为系统深入的基础理论与关键技术。提出一种寄生运动压电驱动新原理, 藉此开发了原位微纳米压痕/划痕测试仪器。设计研制了我国首台, 也是当前国际上为数不多的可在扫描电镜内实现原位压痕/划痕测试和微纳加工的仪器。利用研制的仪器, 针对非晶合金和半导体材料深入开展了原位压痕/划痕试验, 获取了一批有意义的研究成果, 如发现了受阻条件下非晶合金材料去除机制与流动规律等。

* 此项目在“第十五届国际制造技术会议(IMCC2013)”上被评为优秀结题项目。