

# 不同火次厚度钛及钛合金 板材轧制力与道次变形

## Rolling Force and Pass Deformation Process of Titanium and Titanium Alloy Plates with Different Fire Frequency and Thicknesses

供稿|翟欣姣, 岳旭, 同晓乐, 王玉佳, 林来儿 / ZHAI Xinjiao, YUE Xu, TONG Xiaole, WANG Yujia, LIN Laier

### 内容导读

钛及钛合金因强度高、耐腐蚀等特性,被广泛用于飞机、船舶、化工设备等领域。但在生产过程中,如何控制轧制力(即机器对板材施加的压力)和变形量(板材厚度的变化),一直是工程师们研究的热点。本文通过实验研究了不同厚度的 TA2、TA8 和 TC4 板材在多次轧制过程中的表现,发现如下现象:厚板材的“自我加热”效应:轧制较厚板材时,材料变形产生的热量会抵消表面散热,导致轧制力不随变形量增加而明显上升,甚至可能下降;薄板材的“同步响应”规律:轧制较薄板材时,轧制力会与变形量变化趋势一致。

钛及钛合金因其优异的性能而被广泛应用于各行各业,其中航空航天、海洋工程、化工等领域的需求量与日俱增<sup>[1]</sup>。钛及钛合金需求的增长不仅仅是产品数量的增长,更是产品种类及产品产业化的增长。从纯钛到目前应用最广泛的 TC4,继而是应用于航空航天领域的高温钛合金 Ti60、Ti65 等,每种钛合金都发挥着其独特的优异性能<sup>[2-13]</sup>。根据应用条件的不同,钛及钛合金的成型方式也不同。钛合金板坯成型工艺引起了众多学者的广泛关注,多数学者在织构及热处理工艺对板坯性能的影响方面展开了深入的讨论,使基础理论研究更为丰富<sup>[14-16]</sup>。在工程应用领域,鲜有对不同厚度板材轧制成型过程进行探究,轧制成型过程真实地表明了板坯每一道

次的轧制情况,对该过程进行深入的了解与掌握,能更好地指导实际生产,产生直接经济效益。

### 实验材料及方法

#### 实验材料

以新疆湘润板材厂 2450 四辊可逆轧机为基础,分析其在轧制不同牌号、不同厚度的钛及钛合金时,每一道次的实际轧制情况。实验时选取的轧制速率一致,同一实验编号试样的热处理工艺一致,以减少轧制速率和热处理工艺对数据分析带来的影响,实验用钛及钛合金成分见表 1。

#### 实验方法

选取不同厚度 TA2、TA8 及 TC4 进行轧制。

作者单位:新疆湘润新材料科技有限公司,新疆 哈密 839099

表1 实验用钛及钛合金成分(质量分数)

%

| 钛及钛合金 | Ti | Pd   | Al   | V    | Fe    | C     | N     | H     | O     |
|-------|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TA2   | 余量 |      |      |      | 0.039 | 0.029 | 0.009 | 0.001 | 0.154 |
| TA8   | 余量 | 0.05 |      |      | 0.045 | 0.032 | 0.007 | 0.002 | 0.143 |
| TC4   | 余量 |      | 6.20 | 4.08 | 0.169 | 0.005 | 0.004 | 0.001 | 0.123 |

TA2 选取了 3 种厚度, 每种厚度分别选取了不同火次的轧制工艺, 探究不同火次不同厚度的轧制过程。TA8 选取了 1 种厚度进行一火轧制。TC4 钛合金选取了 2 种厚度进行轧制实验, 其中 3.4 mm 的 TC4 选用包覆叠轧工艺。包覆叠轧是将较薄的钛板经过组包, 放置在焊好的焊盒里, 通过对焊盒的加热轧制, 获得所需厚度或更薄的钛板, 具体实验方案见表 2。TA2、TA8 及 TC4 在进行热处理前, 均去除表面氧化皮。在轧制现场直接进行数据采集, 随后进行数据处理, 为了保证数据分析的可靠性, 相同材料的同种轧制工艺, 均选用 3 块相同厚度的板坯进行轧制实验。

表2 实验方案

| 钛及钛合金 | 编号             | 轧制工艺 | 热处理工艺  |          | 目标轧制厚度/mm  |
|-------|----------------|------|--------|----------|------------|
|       |                |      | 保温温度/℃ | 保温时间/min |            |
| TA2   | 1 <sup>#</sup> | 一火   | 900    | 215      | 268.0→65.9 |
|       | 2 <sup>#</sup> | 二火   | 800    | 50       | 62.7→19.1  |
|       | 3 <sup>#</sup> | 三火   | 800    | 25       | 34.3→4.0   |
| TA8   | 4 <sup>#</sup> | 一火   | 900    | 210      | 265.0→31.2 |
| TC4   | 5 <sup>#</sup> | 二火   | 940    | 200      | 169.0→93.8 |
|       | 6 <sup>#</sup> | 包覆叠轧 | 880    | 60       | 3.4→1.2    |

## 实验结果和分析

### TA2 板坯轧制过程

#### ➤ TA2 一火开坯轧制

将圆铸锭锻造成板坯后再由轧机轧至所需厚度。在 TA2 板坯进行一火轧制过程中, 开轧温度为 900 ℃。板坯轧制厚度目标为从 268.0 轧至 65.9 mm, 实际测量轧制厚度为 65.8 mm, 3 张锻坯具体轧制过程参数变化曲线如图 1 所示, 为了避免其它因素的干扰, 这 3 张锻坯的来料厚度和一火终轧厚度均保持一致, 从图 1(a) 可知, 在轧制过程中, 随着道次的增加, 单道次变形量逐渐呈上升趋势, 且最大的单道次变形量为 16.7%, 在第 9 道次之后的 3 个道

次, 其单道次变形量逐渐降低。由图 1(b)~1(d) 可知, 计算厚度(计算机系统在轧机运行过程中实时计算板坯厚度)和实际辊缝宽度均随着道次的增加逐渐降低, 而计算长度(计算机系统在轧机运行过程中实时计算板坯长度)随道次的增加逐渐增加。轧制过程参数变化趋势并非线性, 这是因为在轧制过程中, 需满足体积不变原理和最小阻力定律, 所以每一道次的轧制过程参数变化趋势是非线性的<sup>[17]</sup>。

图 1(e) 所示为轧制过程中每一道次对应的轧制力, 以 1<sup>#</sup>-1 为例, 当第 1 道次的道次变形量(2.985%)较小时, 其轧制力(11727 kN)也较小, 第 2 道次的变形量(7.692%)增大时, 其轧制力(14698 kN)也随之增大。随后, 其轧制力随单道次变形量的增大, 均未表现出明显的增大趋势。1<sup>#</sup>-1、1<sup>#</sup>-2 板在第 8 道次之前和 1<sup>#</sup>-3 板在第 7 道次之前, 各道次的轧制力与其对应的第 2 道次轧制力相差不大, 但单道次变形量均较第 2 道次有较大的增长。表明在一火开坯轧制时, 轧制过程中板坯由于塑性变形产生的形变回热大于板坯的表面散热, 此时板坯温度高, 轧制过程容易变形; 当轧制力较小如 1<sup>#</sup>-3 板第 7 道次, 1<sup>#</sup>-1、1<sup>#</sup>-2 板第 8 道次, 虽然轧制力最小, 但单道次变形量仍然增大, 说明此时形变回热最大, 对应该道次未轧制之前的板坯厚度为 140~160 mm。3 张板坯在轧制力的变化趋势上虽然呈现一致性, 但出现最小轧制力的道次不同。

1<sup>#</sup>-3 板第 8、9 和 1<sup>#</sup>-1、1<sup>#</sup>-2 板第 9 道次变形量增大, 其所对应的轧制力增大。进一步对其轧制力进行分析, 1<sup>#</sup>-3 板第 8、9 道次, 1<sup>#</sup>-1、1<sup>#</sup>-2 板第 9 道次的轧制力仍与板坯对应的第 2 道次的轧制力相差不大。说明产生的形变回热仍大于板坯表面散热, 此时该道次未轧制前的板坯厚度为 120 mm。1<sup>#</sup>-1、1<sup>#</sup>-2 板第 10 道次, 单道次变形量小, 其轧制力未有明显变化, 说明形变回热开始小于板坯表面

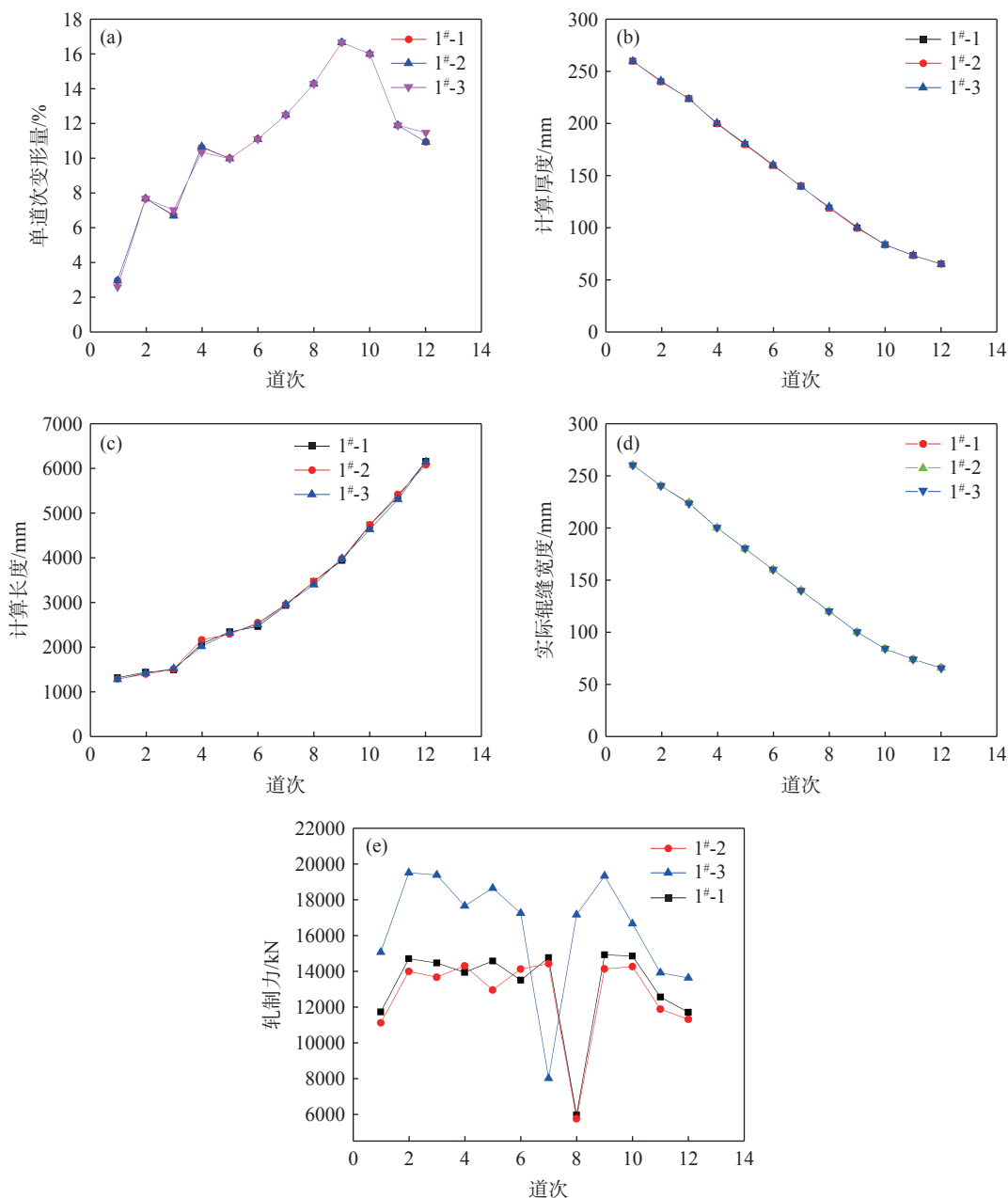


图1 TA2板坯一火开坯轧制过程参数变化曲线: (a) 单道次变形量; (b) 计算厚度; (c) 计算长度; (d) 实际辊缝宽度; (e) 轧制力

散热。随后道次, 单道次变形量逐渐减少, 其轧制力逐渐降低。

## ➤ TA2 二火轧制

在TA2板材二火轧制过程中, 板坯轧制厚度目标为由62.7轧至19.1 mm, 其实际测量数据为19.1 mm, 具体的轧制过程参数变化曲线如图2所示, 其计算厚度与计算长度呈现非线性。由图2(a)和2(e)可知, 单道次变形量随着道次数的增加而逐

渐减小, 轧制力亦随着道次数的增加逐渐减少。其中第3、4道次的变形量相差较小, 分别是14.3%和13.9%, 其轧制力的变化与单道次变形量改变表现得并不一致。以2#-1板为例, 其第3、4道次轧制力分别为26010和27650 kN, 第4道变形量降低, 轧制力却增大, 说明该道次的形变回热小于表面散热, 所以所需轧制力变大。在最后一道次轧制时, 同样出现了此现象。

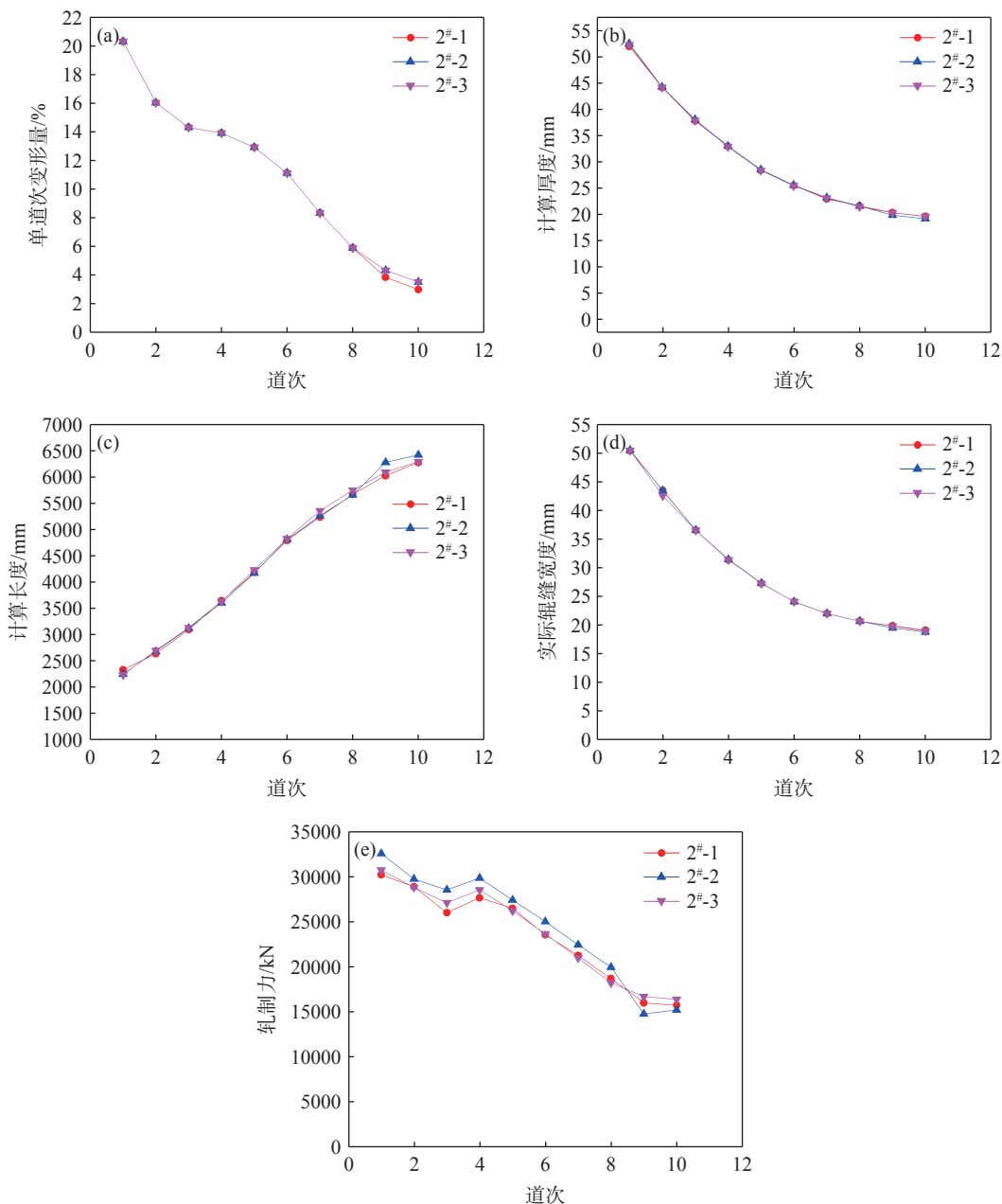


图2 TA2板坯二火开坯轧制过程参数变化曲线: (a) 单道次变形量; (b) 计算厚度; (c) 计算长度; (d) 实际辊缝宽度; (e) 轧制力

### ➤ TA2 三火轧制

在TA2板材三火轧制过程中,板坯轧制厚度目标为由34.3轧至4.0 mm,其实际测量数据为4.7 mm,具体的轧制过程参数变化曲线如图3所示,计算厚度、计算长度变化趋势与TA2二火轧制一致。三火轧制主要对单道次变形量和轧制力进行讨论分析,通过图3(a)和3(e)可知,单道次变形量随道次的变化趋势与轧制力随道次的变化趋势一

致,第9道次之后,当道次变形量逐渐变小时,轧制力变化较小。

在该轧制过程中,板材设计的轧制厚度是4 mm,实际测量厚度是4.7mm,两者相差较大。当温度较低时,轧制过程中的形变抗力较大,需要更大的轧制力才能克服变形抗力使金属变薄。因此,在实际工程应用中,为使实际测量厚度接近设计厚度,通常采用的方式为在原先设计厚度的基础上,继续降低

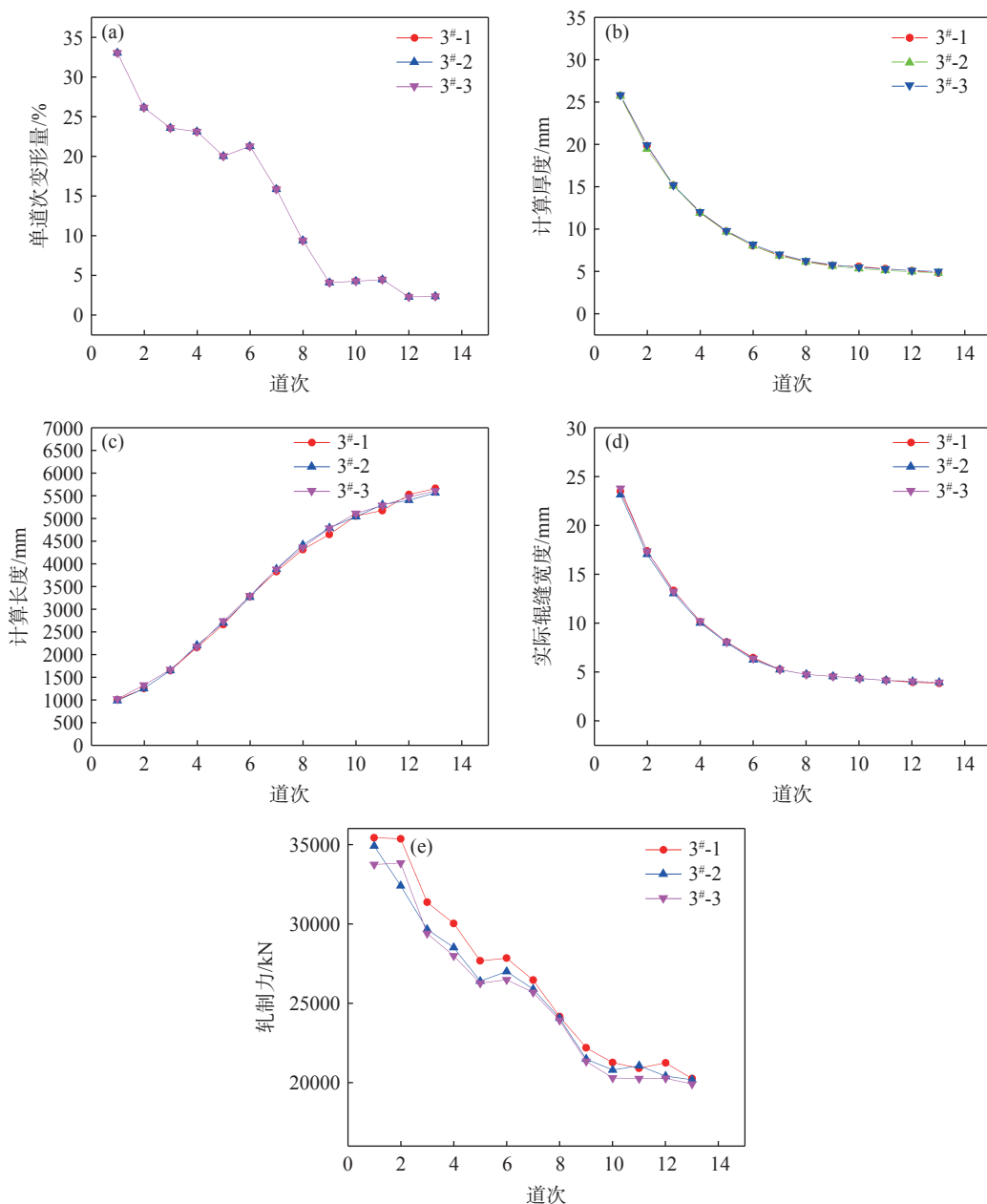


图3 TA2板坯三火开坯轧制过程参数变化曲线:(a)单道次变形量;(b)计算厚度;(c)计算长度;(d)实际辊缝宽度;(e)轧制力

设计值,从而使实际测量厚度接近初始设计厚度。

从TA2一火开坯、二火和三火轧制的具体过程分析了纯钛在实际应用过程中的轧制情况。在轧制过程中,单道次变形量与轧制力之间的关系并非一成不变。在一火开坯过程中,由于形变回热大于轧制过程中散热,所以中间某些道次(第7~8道次,道次轧制完成后板坯厚度在120 mm左右)随着单道次变形量的增大,其轧制力大致不变或降低;在二、三火轧制时,其轧制力随其单道次变形量的降

低而降低,但在最后1~2个道次时,出现轧制力随单道次变形量降低而增大的现象,这是由于板材温度低,变形抗力增大所致。

基于上述规律,在接下来的实验中,选取合金的单道次变形过程与轧制力进行分析,用于探究钛合金轧制过程。

### 合金轧制过程

图4所示为2种钛合金轧制过程中轧制力和单

道次变形量情况,从图 4(a)和 4(b)中可以看出,TA8 钛合金板坯一火轧制过程中,开轧温度为 900 °C,板坯轧制厚度目标为由 265.0 轧至 31.2 mm,随着单道次变形量逐渐增大,其轧制力在一定范围内产生波动,特别是第 10 道次,未轧制该道次之前的板坯厚度为 100 mm,其单道次变形量较第 9 道次降低,较第 5~8 道次增大,但其轧制力不仅小于第

9 道次,也小于第 5~8 道次,说明此时存在形变回热回温板坯的现象。从图 4(c)和 4(d)中可以看出,TC4 钛合金板坯二火轧制过程中,开轧温度为 940 °C,轧制厚度目标为从 169.0 轧至 93.8 mm,轧制力和单道次变形量变化趋势与 TA8 钛合金一火轧制的变化情况相似,存在单次变形量增大,对应道次轧制力不变或降低的情况。图 4(e)和 4(f)所示为

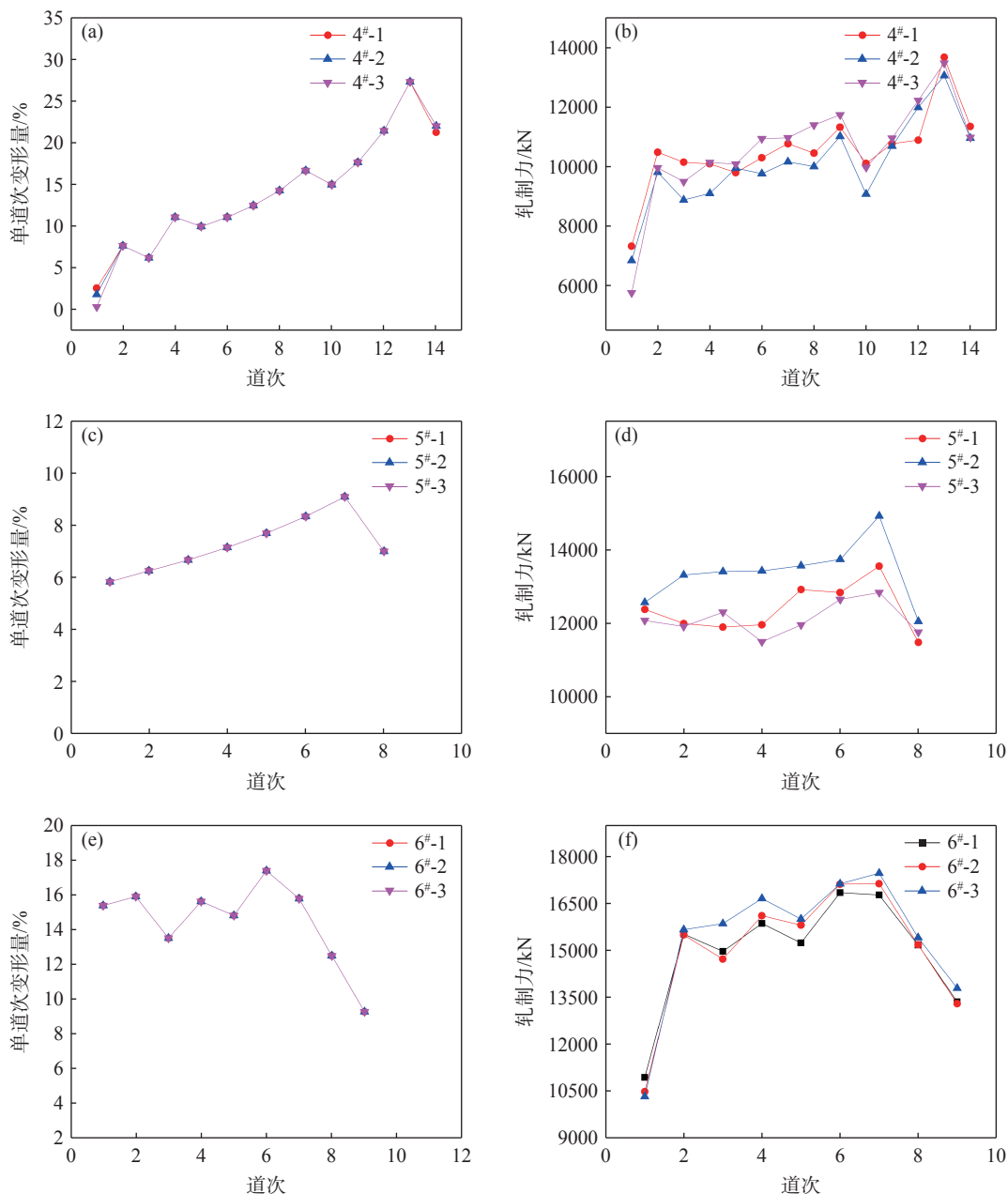


图 4 合金板坯轧制过程: (a) TA8 单道次变形量; (b) TA8 轧制力; (c) TC4 单道次变形量; (d) TC4 轧制力; (e) TC4 包覆叠轧单道次变形量; (f) TC4 包覆叠轧轧制力

TC4 钛合金包覆叠轧过程中轧制力和单道次变形量的变化趋势, 开轧温度为 880 °C, 可以看出轧制力变化趋势与单道次变形量的变化趋势一致, 即单道次变形量增大时, 轧制力也增大, 单道次变形量减少时, 轧制力也随之减小。

通过对不同钛合金的轧制过程进行分析, 发现其与纯钛 TA2 的轧制过程基本一致。在板坯较厚时, 例如 TA2 一火轧制、TA8 一火轧制和 TC4 二火轧制过程, 存在形变回热回温板坯的现象, 使轧制力变小; 在轧制较薄的板坯时, 存在轧制力变化趋势与单道次变形量变化趋势一致的现象。

### 结束语

(1) 不同厚度 TA2 的轧制过程中轧制力与道次变形量的变化趋势不同, 在 TA2 一火开坯轧制过程中, 出现形变回热使其单道次轧制力随单道次变形量增大而降低的现象, 产生该现象的板坯厚度一般  $\geq 120$  mm。

(2) TA8 钛合金在一火轧制过程中, 同样存在形变回热使单道次轧制力随单道次变形量增大而降低的现象, 对应板坯厚度一般  $\geq 100$  mm。

(3) TC4 钛合金二火轧制过程也存在形变回热回温板坯现象。在 TC4 钛合金包覆叠轧过程中, 轧制力变化趋势与其单道次变形量变化趋势一致。

(4) 在板坯较厚时, 存在形变回热回温板坯的现象, 使轧制力变小; 在轧制较薄的板坯时, 存在轧制力变化趋势与单道次变形量变化趋势一致的现象。

### 参考文献

- [1] 马忠贤. 舰船用 TA23 钛合金板材工艺研究 [学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019
- [2] 徐勇. 轧制态 TC4 钛合金  $\alpha+\beta$  两相区热变形行为及其低温超塑性研究 [学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2018
- [3] 许成. TC4 钛合金板材热轧工艺研究 [学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018
- [4] 王牛俊, 罗乾伟. TC4 钛合金板热轧过程显微组织研究. 机械设计与制造工程, 2017, 46(6): 81
- [5] 黄剑锋. 高强高塑 TC4 钛合金板材热轧与热处理的组织和性能研究 [学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2013
- [6] 刘石双. Ti60 钛合金保载疲劳行为研究 [学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018
- [7] 孙峰. Ti60 钛合金相变动力学及组织演变研究 [学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2015
- [8] 冯叶. Ti65 钛合金板材的高温循环氧化和变形行为研究 [学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022
- [9] 岳颖. Ti65 合金显微组织及关键高温力学性能 [学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019
- [10] 王东辉. Ti70 钛合金及其与 TA5 异种钛合金的电子束焊接技术研究 [学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021
- [11] 苏宇. DSTi700 短时用高温钛合金热变形行为及其板材组织性能 [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021
- [12] 叶园. Zr 含量对 650 °C 短时高温钛合金显微组织和力学性能的影响 [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
- [13] 王天祥. Ti60 合金的热变形行为及工艺参数优化 [学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2020
- [14] 冀宣名, 胡爽. 时效处理对不同热轧 Ti-3.5Al-5Mo-4V 钛合金组织与性能的影响. 材料热处理学报, 2022, 43(10): 27
- [15] 辛利平. 轧制退火对 TC21 钛合金微观组织和力学性能的影响 [学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019
- [16] 彭湃. TC2 钛合金热轧板材的组织演变及各向异性研究 [学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016
- [17] 安震, 孙泽辉, 刘兵, 等. TA15 钛合金厚板热轧变形有限元模拟研究. 西安航空学院学报, 2022, 40(1): 65

**作者简介:** 翟欣姣 (1994—), 女, 硕士, 陕西省渭南市人。2020 年毕业于中北大学材料科学与工程专业, 主要研究方向: 钛合金塑性成型。通信地址: 新疆维吾尔自治区哈密市伊州区南湖工业园区星光大道; E-mail: 251910167@qq.com。