

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.006

基于 ABAQUS 的 Ti5553 合金等径 转角挤压过程有限元分析*

马彩云, 李振华*

(浙江海洋学院 船舶与海洋工程学院, 浙江 舟山 316022)

摘要:针对非等温条件下 Ti5553 合金等径转角挤压过程这一多因素影响的复杂问题,对不同的摩擦系数、挤压速度、挤压温度下,被挤压试样的应力大小和分布以及等效应变情况分别进行了研究,对 Ti5553 合金高温变形行为、有限元分析的关键技术、等径转角挤压的原理和方法进行了归纳,给出了 Ti5553 合金等径转角挤压过程有限元分析的模型参数,建立了等径转角挤压的三维模型,利用 ABAQUS 软件自带的点迹跟踪方法对不同摩擦系数、挤压速度和挤压温度下 3 个特征点的等效应变曲线的变化进行了跟踪。研究表明,试样在接近转角处时等效应变开始发生,并在转角处迅速增加到最大;随着摩擦系数、挤压速度的增加,等效应变发生时间均提前;P2 点的等效应变受挤压温度和挤压速度的影响较大。

关键词: Ti5553 合金;等径转角挤压;有限元分析

中图分类号: TH142.2;TG379

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)10-1300-05

Finite element analysis of Ti5553 alloy during equal channel angular extrusion based on ABAQUS

MA Cai-yun, LI Zhen-hua

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Aiming at equal channel angular extrusion process of Ti5553 alloy under non-isothermal condition affected by lots of complicated factors, the value and distribution of stress and equivalent strain of the specimen in different friction coefficient, extrusion speed and extrusion temperature were researched, and high temperature deformation of Ti5553 alloy, the key technical of finite element analysis and the principle and method of equal channel angular extrusion were summarized. The model parameters of finite element analysis of Ti5553 alloy during equal channel angular extrusion were provided, and the 3D model of ECAE was established. The variation of the equivalent strain curve of three feature points at various friction coefficients, extrusion speeds and extrusion temperatures was analyzed based on the particle tracking method of ABAQUS. The results indicate that the equivalent strain begins to occur when the specimen is near the corner, and rapidly increases to maximum at the corner. With the increase of friction coefficient and extrusion speed, the equivalent strains occur in advance. The equivalent strain of P2 is greatly impacted by extrusion temperature and extrusion speed.

Key words: Ti5553 alloy; equal channel angular extrusion (ECAE); finite element analysis (FEM)

0 引 言

近 β 型钛合金 Ti5553^[1],具有良好的淬透性和

较宽的加工工艺范围、对偏析不太敏感、强度优异和断裂韧性较高等优点。但现有 Ti5553 钛合金的强韧性匹配不能很好地满足航空要求,而且该钛合金的一些性能对工艺参数非常敏感、磨损性能差、难加工

收稿日期:2015-04-29

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51205359);清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLTkf13A06)

作者简介:马彩云(1990-),女,安徽淮北人,主要从事机电工程方面的研究. E-mail:macy1990@126.com

通信联系人:李振华,女,教授,硕士生导师. E-mail:lzh760905@126.com

等^[2-4],这些问题都在一定程度上限制了高强度 Ti5553 合金的应用。王华等^[5]研究发现,Ti5553 合金可通过合理的机械热加工方法,使该合金的强度、塑性和断裂韧性等综合性能指标都有所提高,且达到良好的匹配。

等径转角挤压 (equal channel angular extrusion, ECAE) 是一种获得超细晶粒的强塑性变形法^[6],最早由 Segal^[7] 提出经 Valiev^[8] 发展并得到许多研究者的重视。该方法已成功地应用于 TiAl 金属间化合物、Ti-Ni 基合金、Ti-6Al-4V 合金、Ti1023 合金^[9-12],获得具有优异的力学性能、物理性能、化学性能和低温高应变速率下的超塑性等极细小微米晶合金材料。

目前,国内外对于 Ti5553 合金的 ECAE 研究还不够深入,而且 ECAE 变形复杂,对其内部材料流动规律和流动过程中的等效应变、应力场的大小和分布还很难通过试验和计算的方法获得。ABAQUS 是一款非线性分析功能强大,能够自动找出模型中各部件之间的接触对,高效地模拟部件之间的复杂接触的有限元分析软件^[13]。

因此,本研究采用 ABAQUS 软件通过热塑耦合的有限元分析方法,模拟 Ti5553 合金在非等温条件下的 ECAE 过程中的高温变形行为,分析不同摩擦系数 (μ)、挤压速度 (v) 和挤压温度 (T) 对其挤压过程中应力和等效应变的影响。

1 ECAE 数值模型及有限元分析

1.1 ECAE 数值模型及参数设置

挤压通道的横截面设计尺寸为 10 mm × 10 mm;入口通道长度为 125 mm;出口通道长度为 115 mm;试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 90 mm;顶杆端面尺寸为 10 mm × 10 mm;模具内转角、外弧角均为 90°,ECAE 装置原理图如图 1 所示。为了简化分析过程,ECAE 模具和导杆默认为刚体^[14]。初始模具温度为 773 K,初始试样温度分别设为 923 K、1 023 K、1 123 K、1 223 K,环境温度为 293 K;试样原材料为 Ti5553 合金,名义成分如表 1 所示。考虑到在高温条件下进行 ECAE 挤压需要对试样和模具进行润滑^[15],因此笔者选用摩擦系数为 0、0.02、0.05、0.1 分别进行研究。本研究采用 ABAQUS 软件自带的点迹跟踪功能,分析在不同摩擦系数、挤压速度和挤压温度下 3 个特征点 P1、P2 和 P3 (3 个特征节点位于试样长度 1/2 处的平面上,位置如图 2 所示)的等效应变曲线的变化。

表 1 Ti5553 合金的组成成分 (质量分数,%)

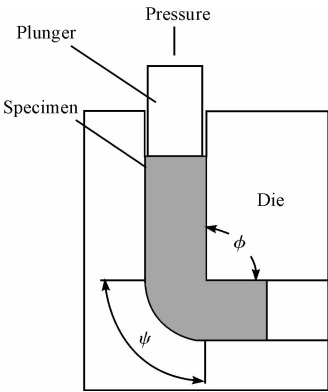


图 1 ECAE 装置原理图

Al	Mo	V	Cr	Zr	Ti
5.00	5.00	5.00	3.00	0.65	Bal.

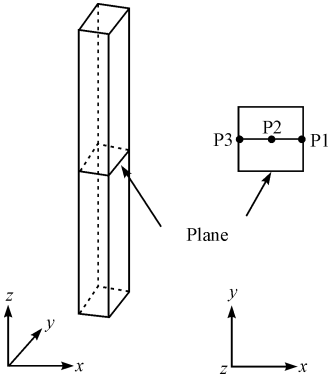


图 2 试样横截面所选跟踪点示意图

1.2 网格划分和边界条件

本研究采用分割技术对模型进行网格划分,网格划分图如图 3 所示。试样和模具的结构简单,采用结构化网格划分技术把试样和模具划分成六面体单元。六面体单元能够以小的计算代价得到较高的计算精度^[16];模具扇形区域通道底部和试样的受力复杂且试样发生大的塑性变形,因而笔者对试样和模具扇形区域通道底部增加网格种子数量,采用更加细化的网格单元,如图 3(a)、3(b)中的椭圆部分所示。在整个挤压过程中,模具是不动的,试样在导杆压力的作用下,通过模具的入口经过 90°转角到达出口,所以模拟中要给模具施加固定约束,给导杆沿轴向方向设定速度,导杆速度分别为 6 mm · s⁻¹、25 mm · s⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 摩擦对 ECAE 的影响

2.1.1 不同摩擦系数下的等效应变分布

P1、P2 和 P3 3 个特征点在不同摩擦系数下等效

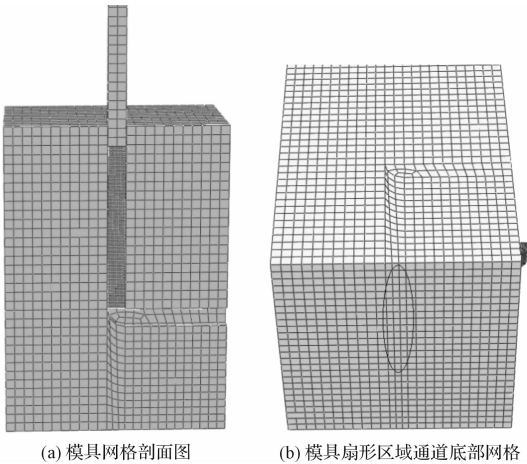


图3 ECAE模型的网格划分

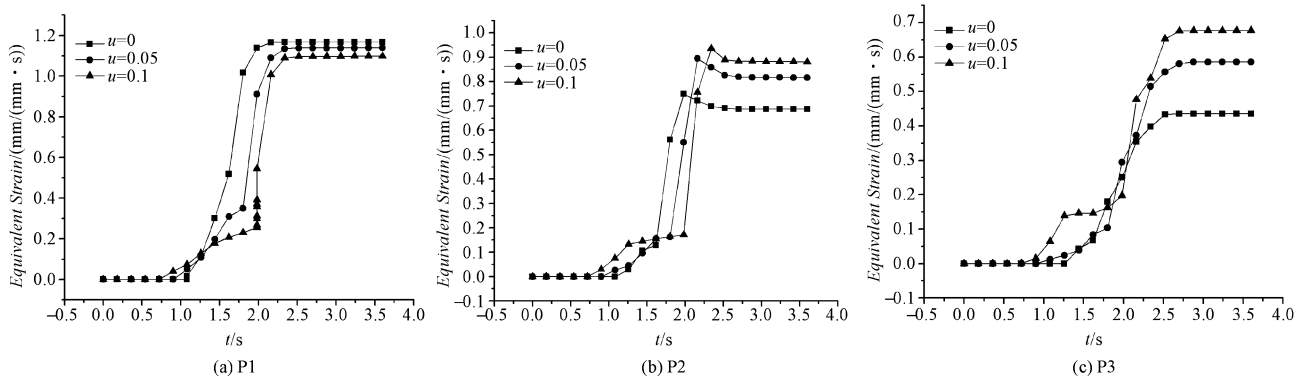


图4 3个特征点不同摩擦系数下的等效应变曲线($T=1\,123\,\text{K}$, $v=25\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.1.2 不同摩擦系数下的应力场分布

不同摩擦系数下试样的应力场分布图如图5所示。由图5可知:应力存在于ECAE的整个过程中。随着摩擦系数的增加,入口处和出口处试样的应力值均增加,在模具转角扇形区域处应力分布均匀性降低。这是因为随着摩擦系数的增加,试样受到的摩擦阻力

变大,导致模具内试样的流动行为因阻碍作用而沿径向的分布不均匀,即试样心部的金属流速较快,靠近模具内侧壁处试样的流速较慢,且这种试样内金属变形流动不均匀的趋势,随着摩擦系数的增加将显著加剧。这与李峰^[18]报道的关于摩擦条件对合金的挤压变形流动行为的影响一致。

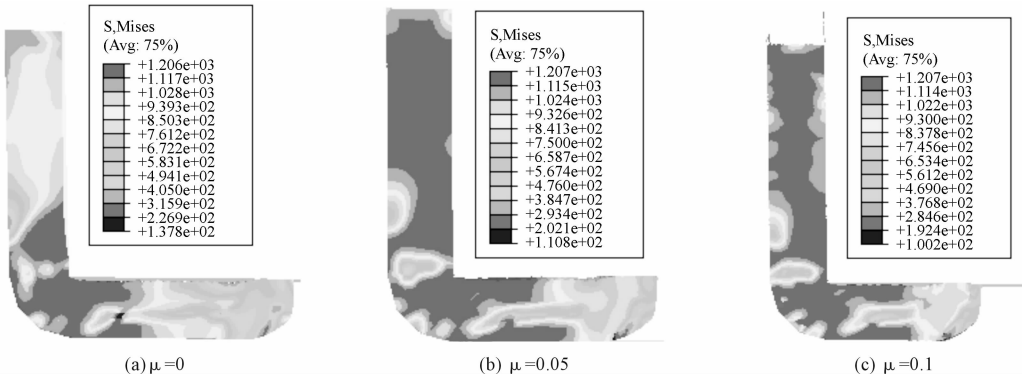


图5 不同摩擦系数下的应力场分布($T=1\,123\,\text{K}$, $v=25\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.2 挤压速度对ECAE的影响

2.2.1 不同挤压速度下的等效应变分布

P1、P2和P3 3个特征点在不同挤压速度下的等效应变曲线图如图6所示。由图6中可以看出:在挤

压速度为 $6\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,3个特征点的等效应变曲线趋势变化不大;但在挤压速度为 $25\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,与P1和P3点相比,P2点的等效应变曲线趋势发生了明显的变化,等效应变值在达到峰值后迅速降低。这种趋势

和 Warchomicka^[19] 研究的一致。这种现象的主要原因是当挤压速度为 $25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,试样内储存了较多的变形能,导致试样在转角处应变速率增加了 0.83,过

高的应变速率会导致位错急剧堆积,应力集中得不到释放,从而抑制了动态再结晶的形核,最终导致试样的等效应变值在转角处增加到最大又减小。

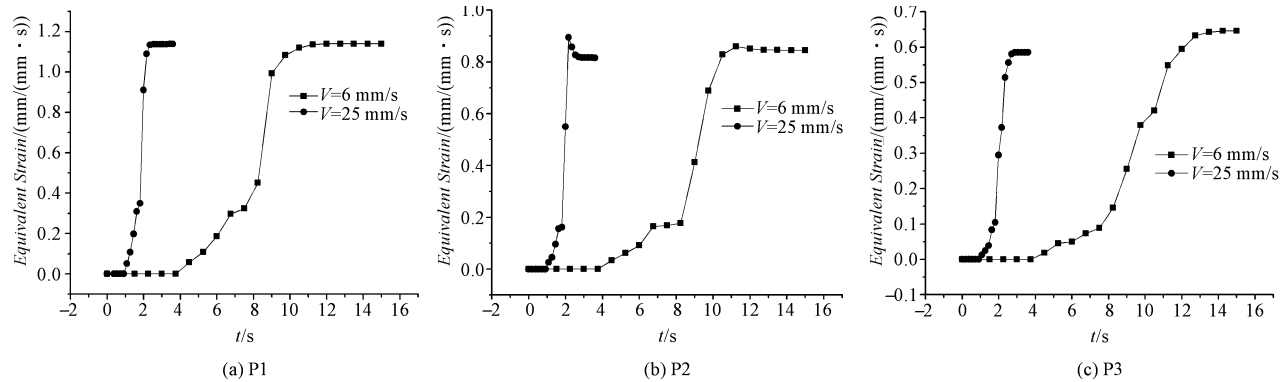


图 6 3 个特征点不同挤压速度下的等效应变曲线 ($T=1\,123\text{ K}, \mu=0.05$)

2.2.2 不同挤压速度下的应力场分布

不同挤压速度下试样的应力场分布如图 7 所示。由图 7 可以看出:在挤压速度为 $25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时出口处试样的应力值相比挤压速度为 $6\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时小,这因为当挤压速度过高时,变形热消耗的不充分,试样内变形金属处于热力学不稳定的状态,试样内变形金属自发地向变形前的稳定状态变化的趋势更大^[20]。在挤压速度为 $25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $6\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,试样的应力分布均匀性相差不大,这表明挤压速度对应力分布的均匀性影响不大。

2.3 挤压温度对挤压过程的影响

2.3.1 不同挤压温度下的应变场分布

P1、P2 和 P3 3 个特征点在不同挤压温度下的等效应变曲线图如图 8 所示。由图 8 可见:3 个特征点在进入转角之前,其等效应变值缓慢增加;当 3 个特征点通过转角时,其等效应变值迅速增加,并且在转角处最大;在经过转角区域时,不同预热温度条件下,P1 和 P3 点的等效应变曲线趋势变化不大,而 P2 点的等效应变曲线趋势在 $1\,023\text{ K}$ 和 $1\,123\text{ K}$ 的初始预热条件下出现了明显的不同,其等效应变值在转角处上升到最大后又明显降低,这是因为纯钛的再结晶温度范围在 $875\text{ K}\sim 961\text{ K}$ 内,而 Ti5553 合金中的高熔点合金元素 Mo、V、Cr、Zr 分布与晶界处并阻碍晶界的迁移,使再结晶温度提高;当挤压温度为 923 K 时,再结晶过程受阻较大;当挤压温度为 $1\,023\text{ K}$ 和 $1\,123\text{ K}$ 时,超过高熔点合金元素 V、Cr、Zr 的再结晶温度,再结晶过程受阻较小,加上挤压速度较高,因此在经过转角后等效应变曲线出现下降的现象;当挤压温度为 $1\,223\text{ K}$ 时,达到 Ti5553 合金中所有高熔点合金元素的再结晶温度,阻

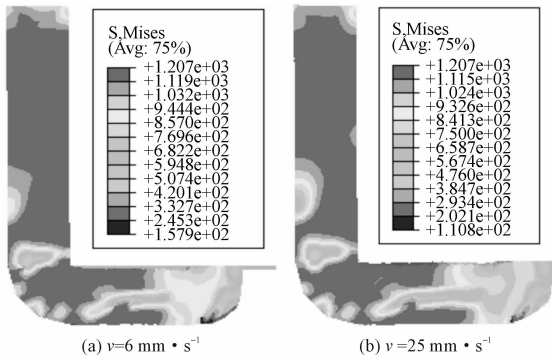


图 7 不同挤压速度下的应力场分布 ($T=1\,123\text{ K}, \mu=0.05$)

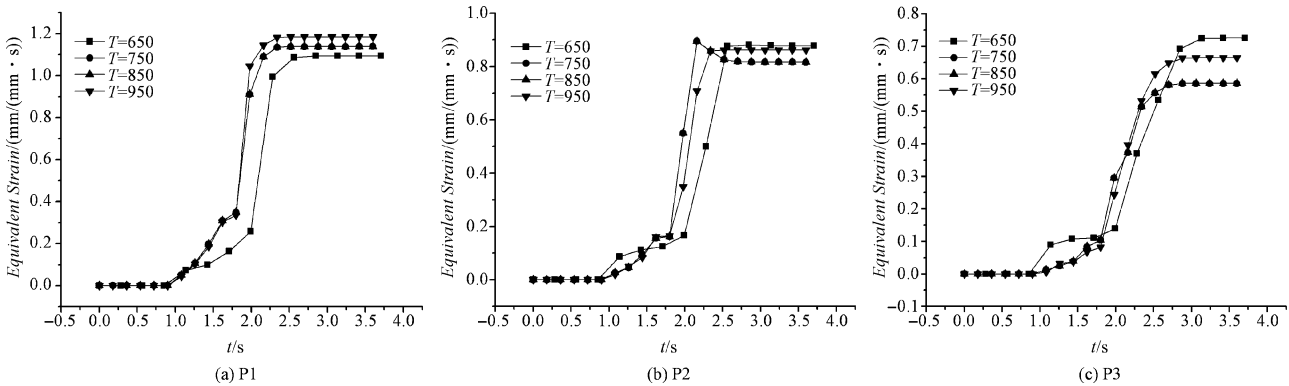


图 8 3 个特征点不同挤压温度下的等效应变曲线 ($v=25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}, \mu=0.05$)

碍晶界迁移的阻力消失,试样在经过转角后产生大的变形,少数特殊晶界将迅速迁移,导致少数晶粒变大。

2.3.2 不同挤压温度下的应力场

不同挤压温度下试样的应力场分布如图 9 所示。由图 9 可知:当初始预热条件为 1 023 K 和 1 123 K 时,试样的应力值分布相比 923 K 的初始预热条件下更均

匀,这是因为随着挤压温度的升高,材料的变形抗力和挤压力减小,试样更容易挤出;但当初始预热条件为 1 223 K 时,应力分布相比 1 023 K 和 1 123 K 预热条件下的不均匀,这是因为在 1 223 K 的预热条件下,阻碍晶界迁移的阻力消失,试样中的晶界能增加,少数晶粒变大,变形试样处于热力学不稳定状态。

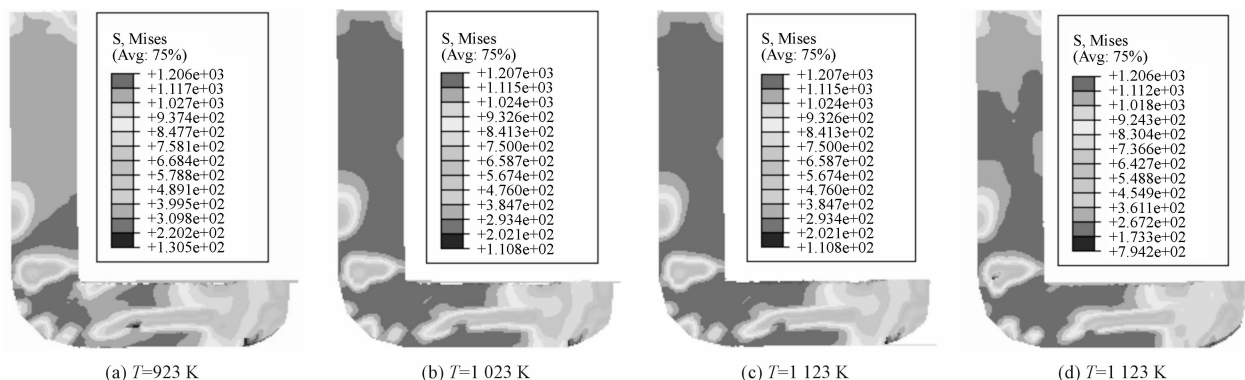


图 9 不同挤压温度下的应力分布 ($v = 25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\mu = 0.05$)

3 结束语

本研究对非等温条件下, Ti5553 合金等径转角挤压过程进行了分析,得到以下实验结果:

(1) P1、P2 和 P3 3 个特征点在进入转角前,没有应变发生,但当 3 个特征点通过转角时,3 个特征点的等效应变值均迅速增加到最大;最大等效应变值达到 1.2,发生在扇形区域的内转角处。

(2) 随着摩擦系数的增加,等效应变发生提前,入口处和出口处试样的应力均增加,在模具转角扇形区域处应力分布的均匀性降低;随着挤压速度的增加,试样产生等效应变的时间提前,出口处试样的应力值减小。

(3) P2 点的等效应变受初始预热温度和挤压速度的影响较大。当挤压速度为 $25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 初始预热温度高于 Ti5553 合金中组成元素 V、Cr 和 Zr 的再结晶温度时, P2 点的等效应变值在转角处达到峰值,然后下降。

参考文献 (References):

- [1] HUANG J, WANG Z R, XUE K M. Cyclic deformation response and micromechanisms of Ti alloy Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-0.5Fe [J]. **Materials Science and Engineering A**, 2011, 528 (29-30): 8723-8732.
- [2] NAG S, BANERJEE R, HWANG J Y. Elemental partitioning between α and β phases in the Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.5Fe (Ti-5553) alloy [J]. **Philosophical Magazine**, 2009, 89 (6): 535-552.
- [3] ARRAZOLA P J, GARAY A, IRIARTE L M. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti5553) [J]. **Journal of**

Materials Processing Technology, 2009, 209 (5): 2223-2230.

- [4] JONES N G, JACKSON M. On mechanism of flow softening in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr [J]. **Materials & Technology**, 2011, 27 (6): 1025-1032.
- [5] 王 华, 代光华. 一种提高 Ti5553 合金综合性能的热加工方法 [J]. **钛工业进展**, 2014, 31 (1): 32-34.
- [6] 李振华, 程先华. 摩擦系数对钛合金等通道转角挤压影响的有限元分析 [J]. **摩擦学学报**, 2011, 31 (3): 235-239.
- [7] SEGAL V M. Material processing by simple shear [J]. **Materials Science and Engineering A**, 1995, 197 (2): 157-164.
- [8] VALIEV R Z. Structure and mechanical properties of ultra-fine-grained metals [J]. **Materials Science and Engineering A**, 1997, 234-236 (1): 59-66.
- [9] HOCKAUF M, MEYER L W, ZILLMANN B, et al. Simultaneous improvement of strength and ductility of Al-Mg-Si alloys by combining equal-channel angular extrusion with subsequent high-temperature short-time aging [J]. **Materials Science and Engineering A**, 2009, 503 (1/2): 167-171.
- [10] LI Z H, CHENG X H. Effects of equal channel angular extrusion and subsequent heat treatment on tribological properties of TiNi alloy [J]. **Surface Engineering**, 2007, 23 (6): 434-438.
- [11] KO Y G, JUNG W S, SHIN D H, et al. Effects of temperature and initial microstructure on the equal channel angular pressing of Ti-6Al-4V alloy [J]. **Scripta Materialia**, 2003, 48 (2): 197-202.
- [12] 袁士翀, 郭鸿镇, 赵张龙, 等. 等通道转角挤压 (ECAP) 工艺对 Ti-1023 合金显微硬度的影响 [J]. **航空材料学报**,

2009,29(2):25-28.

[13] 计时鸣,王嘉琦,谭大鹏. 基于 ABAQUS 的单个颗粒与加工面碰撞对固液两相流加工的影响研究[J]. 机电工程,2013,30(1):1-4.

[14] SI J Y, WU X L, XIA K N, et al. Equal channel angular extrusion of TB2 alloy under different die designs by finite element method [J]. **Rare Metal Materials and Engineering**,2014,43(7):1577-1581.

[15] JIANG H, FAN Z G, XIE C Y. Finite element analysis of temperature rise in CP-Ti during equal channel angular extrusion[J]. **Materials Science and Engineering A**,2009,513-514(15):109-114.

[16] 沈伟平,胡旭东,张 华. 基于 ABAQUS 的横机动态成圈过程有限元分析[J]. 机电工程,2013,30(3):307-310.

[17] KIM J K, KIM W J. Analysis of deformation behavior in 3D during equal channel angular extrusion[J]. **Journal of materials processing technology**, 2006, 176(1-3):260-267.

[18] 李 峰,刘晓晶,苑世剑. 摩擦条件对铝合金挤压变形流动行为的影响[J]. 中国有色金属学报,2008,18(11):2014-2019.

[19] WARCHOMICKA F, POLETTI C, STOCKINGER M. Study of the hot deformation behaviour in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr [J]. **Materials Science and Engineering A**, 2011,528(28):8277-8285.

[20] 汤忠义,梁合意,徐友良. 金属材料与热处理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2011.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

马彩云,李振华. 基于 ABAQUS 的 Ti5553 合金等径转角挤压过程有限元分析[J]. 机电工程,2015,32(10):1300-1305.

MA Cai-yun, LI Zhen-hua. Finite element analysis of Ti5553 alloy during equal channel angular extrusion based on ABAQUS[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(10):1300-1305.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1299 页)

表 2 结构优化前、后单片叠片精度对比		
	优化前	优化后
平均距离/mm	2.32	0.86

从表 2 的结果中可以看出,经过结构优化后的自动叠片机能够满足 1 mm 的单片叠片精度要求。

4 结束语

本研究以改善变压器铁心手工叠装这一现状出发,设计了一套硅钢片自动叠片装置。该装置通过吸取一位移—放置等功能,实现了将不同规格、不同大小的硅钢片准确快速地放置在所指定的位置上。

本研究针对所设计的装置 z 方向运动机构基座松动这一问题进行了结构优化,经过振动测试,找出了基座松动而产生的振动作用频段。实验结果表明,结构优化后能够有效减少由于基座松动而产生的振动,达到实际生产的精度要求。

参考文献 (References):

[1] 郭振岩. 中国变压器行业现状及应对措施[J]. 变压器,

2012(3):43-47.

[2] 宋悠全. 动车组变压器铁心自动叠片工艺研究[J]. 科技传播,2013(22):155-156.

[3] 朱 峰,林吉靓. 硅钢片自动叠片机的研究与设计[J]. 机械设计与制造,2014(7):43-48.

[4] 刘宝志. 步进电机的精确控制方法研究[D]. 济南:山东大学计算机学院,2010.

[5] 刘 剑. 高速滚珠丝杠副综合性能的试验研究[D]. 济南:山东大学控制科学工程学院,2005.

[6] 陈烨妍. 精密滚珠丝杠副可靠性试验方法研究及试验装置设计[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2014.

[7] 郭维强,蒲如平,韩秀杰,等. 真空发生器抽吸机理与性能的分析研究[J]. 真空,2003(6):54-56.

[8] 吴晓娜. 接近开关的正确选用[J]. 中国科技信息,2008(14):162-163.

[9] 钱金川,朱守敏. 接近开关在自动化控制中的应用[J]. 江苏电器,2006(5):30-35.

[10] JB/T 8689—1998,通风机振动检测及其限值[S]. 北京:机械工业部机械标准化研究所,1998.

[编辑:李 辉]