

# 挤压速度对 $Ti_3Al$ 基合金包套挤压 过程影响的数值模拟

刘诗彪, 王克鲁, 鲁世强, 李鑫, 许求喜

(南昌航空大学, 南昌 330063)

**摘要:** **目的** 研究挤压速度对  $Ti_3Al$  基合金包套挤压过程的影响规律。**方法** 利用数值模拟技术在 Deform-2D 有限元软件中模拟  $Ti_3Al$  基合金的包套挤压过程。**结果** 挤压速度越大, 坯料及包套的温度和等效应变越高, 并且坯料成形的挤压比也越大; 在模拟的挤压速度范围内, 挤压速度对坯料的等效应力场和模具载荷影响较小。**结论** 选择挤压速度时应使坯料温度和应变速率有良好匹配, 这样可以提高坯料成形的均匀性, 降低模具载荷以及坯料所受到的应力, 为  $Ti_3Al$  基合金的包套挤压开坯过程提供参考。

**关键词:**  $Ti_3Al$  基合金; 包套挤压; 挤压速度; 数值模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.006

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0030-04

## Numerical Simulation on Effect of Extrusion Speed on Sheathed Extrusion Process of $Ti_3Al$ -Based Alloy

LIU Shi-biao, WANG Ke-lu, LU Shi-qiang, LI Xin, XU Qiu-xi

(Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study influence rule of extrusion speed on sheathed extrusion process of  $Ti_3Al$ -based alloy. The sheathed extrusion process of  $Ti_3Al$ -based alloy was simulated using numerical simulation technique in Deform-2D finite element software. The higher the extrusion speed was, the higher temperature and effective strain of billets and sheath were, and the larger extrusion ratio of billets forming was; the extrusion speed had minor influence on equivalent stress field of billets and die load within the scope of simulated extrusion speed. The extrusion speed must be controlled to obtain a good match between temperature and strain rate of billets, so as to further improve uniformity of billets forming, reduce die load and stress of billets, and provide reference for sheathed extrusion cogging process of  $Ti_3Al$ -based alloy.

**KEY WORDS:**  $Ti_3Al$ -based alloy; sheathed extrusion process; extrusion speed; numerical simulation

$Ti_3Al$  基合金具有密度低、比强度高、抗氧化性及高温强度好等优点, 是一种理想的轻密度高温结构材料, 在航空航天飞行器发动机中具有重要的应用<sup>[1-2]</sup>。由于  $Ti_3Al$  是金属间化合物, 原子长程有序排列, 该合金的滑移系有限, 位错滑移困难, 大大降低了该合金的塑性, 使塑性加工困难, 甚至连开坯过程都容易

出现裂纹。 $Ti_3Al$  基合金的组织和性能对热加工条件十分敏感, 选择合适的热加工条件对提高其使用性能非常重要<sup>[3-5]</sup>。

包套挤压技术一方面使坯料处于三向压应力状态, 大大提高了材料的变形能力<sup>[6]</sup>; 另一方面可以延缓坯料温度的下降, 使模具不必加热到变形温度就

收稿日期: 2017-03-07

作者简介: 刘诗彪(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为航空高温结构材料。

通讯作者: 王克鲁(1968—), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为塑性成形理论与技术。

可实现等温成形；同时包套还可以改善坯料的润滑条件，减小摩擦力和挤压载荷，可大幅降低工艺成本<sup>[7-8]</sup>。对于金属包套挤压技术的研究在国内还很少，目前只有刘宗煜等<sup>[8]</sup>研究了挤压温度对 Ti40 合金包套挤压的影响以及王忠堂等<sup>[9]</sup>研究了高温合金 GH4169 管材的包套挤压工艺。研究表明，挤压速度对挤压过程中的坯料成形、挤压件微观组织以及模具寿命、模具载荷等方面具有重要的影响，因此很有必要研究挤压速度对包套挤压工艺的影响规律<sup>[10]</sup>。另外，随着数值模拟技术的发展，有限元技术在金属的挤压成形领域中也得到了广泛的应用<sup>[11-15]</sup>。鉴于此，文中采用 Deform-2D 有限元软件，模拟 Ti<sub>3</sub>Al 基合金的包套挤压过程，并分析了不同挤压速度对包套挤压过程的影响规律，研究结果可以为 Ti<sub>3</sub>Al 基合金的包套挤压开坯过程提供参考。

### 1 有限元模型

Ti<sub>3</sub>Al 基合金包套挤压的有限元模型见图 1，由于该结构是轴对称，因此可简化为二维模型在 Deform-2D 有限元软件中进行模拟。在 Ti<sub>3</sub>Al 基合金包套挤压有限元模拟过程中，选择模具材料为 H13，包套材料为 45#钢，室内温度、模具温度、包套温度、坯料温度分别为 20, 300, 1050, 1050 °C，热传递系数和热对流系数分别为 110 和 20 W/(m·K)，包套与模具间、坯料与包套间的摩擦因数分别为 0.2 和 0.7，挤压速度分别为 0.05, 1, 1.5 mm/s，上模挤压行程为 1100 mm。

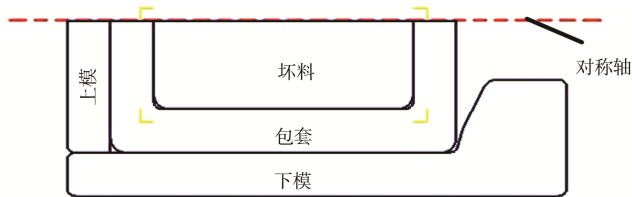


图 1 Ti<sub>3</sub>Al 基合金包套挤压的有限元模型  
Fig.1 Finite element model of Ti<sub>3</sub>Al-based alloy cladding extrusion

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 挤压速度对温度场的影响

上模行程为 950 mm 时不同挤压速度下 Ti<sub>3</sub>Al 基合金包套挤压的温度场见图 2，可以看出，挤压速度越大，坯料和包套的温度越高，温度分布越均匀。同时，通过包套挤压可以有效减小坯料温度的下降和不均匀性，基本上可实现等温成形。当挤压速度为 0.5 mm/s 时，坯料的温度在 925 ~ 1030 °C 之间，其温度差值最大；当挤压速度为 1 mm/s 时，坯料温度在 980 ~ 1070 °C 之间；当挤压速度为 1.5 mm/s 时，坯料

温度在 1020 ~ 1080 °C 之间，其温度差值最小。这是因为挤压速度越大，上模达到相同的行程所需的时间越少，坯料与模具和环境间的热传递就越少，故坯料下降的温度就越少。挤压速度为 1.0 和 1.5 mm/s 时，坯料的最高温度（分别为 1070 °C 和 1080 °C）高于初始挤压温度（为 1050 °C），说明挤压速度越大，产生的变形热就越多，因此，在选择挤压速度时一方面要考虑减小坯料的温降和不均匀性，另一方面要考虑减小变形热的产生，避免出现绝热剪切的现象。

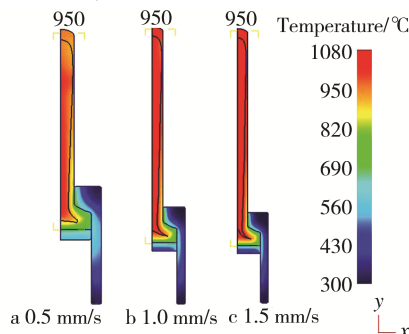


图 2 不同挤压速度时的温度场  
Fig.2 Temperature field at different extrusion speeds

### 2.2 挤压速度对等效应力场的影响

上模行程为 550 mm 时，不同挤压速度下的 Ti<sub>3</sub>Al 基合金包套挤压的应力场见图 3，可以看出，应力主要集中在模口处的包套上，坯料的等效应力很小，说明包套挤压可以有效降低坯料所受到的应力。当挤压速度为 0.5 mm/s 时，坯料所受到的等效应力在 0 ~ 106 MPa 之间；当挤压速度为 1 mm/s 时，坯料所受到的等效应力在 0 ~ 97 MPa 之间；当挤压速度为 1.5 mm/s 时，坯料所受到的等效应力在 0 ~ 99 MPa 之间。各个挤压速度下坯料所受到的应力相差不大，这说明给定的挤压速度对等效应力场的分布影响不大，这主要是因为挤压速度低时，一方面坯料变形的应变速率低，可减小应力；另一方面，在相同上模行程下坯料温度下降得更多，会增加应力。选择合适的挤压速度可以使坯料变形的应变速率和温度有良好的匹配，保证坯料所受到的应力较低。

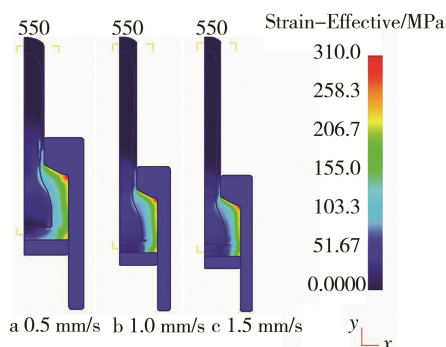


图 3 不同挤压速度时的等效应力场  
Fig.3 Equivalent stress field at different extrusion speeds

## 2.3 挤压速度对等效应变场的影响

上模行程为 950 mm 时,不同挤压速度下的  $Ti_3Al$  基合金包套挤压的等效应变场见图 4,可以看出,挤压速度越大,坯料和包套的等效应变越大,并随着挤压的进行,坯料和包套的等效应变也越来越大。挤压速度为 0.5 mm/s 时,坯料的等效应变在 0.32 ~ 3.54 之间,最大值与最小值间的差值为 3.22;挤压速度为 1 mm/s 时,坯料的等效应变在 0.50 ~ 3.32 之间,最大值与最小值间的差值为 2.82;挤压速度为 1.5 mm/s 时,坯料所受到的等效应变在 0.56 ~ 3.57 之间,最大值与最小值间的差值为 3.01,可以看出挤压速度为 1 mm/s 时,坯料挤压变形最均匀,因此,为了使坯料变形均匀,挤压速度选择既不能太大也不能太小。

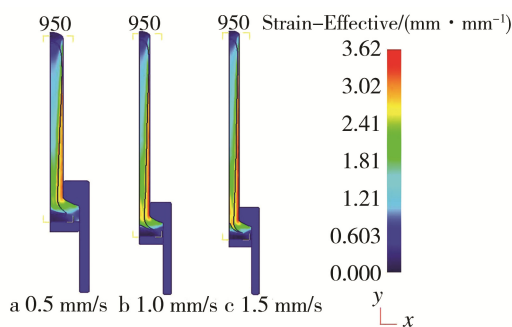


图 4 不同挤压速度时的等效应变场

Fig.4 Equivalent strain field at different extrusion speeds

## 2.4 挤压速度对上模载荷的影响

不同挤压速度时上模载荷-上模行程的关系曲线见图 5,可以看出,不同挤压速度下的上模载荷-上模行程关系曲线差别较小。挤压速度为 1.5 mm/s 时,坯料在上模行程达到 960 mm 时由于网格畸变严重,无法继续模拟,故只模拟到上模行程为 960 mm 阶段。从上模载荷-上模行程的关系曲线的变化规律可将挤压过程分为 3 个阶段。第 1 阶段为填充挤压阶段,即图 5 中的 I 区,在此阶段,上模行程从 0 ~ 150 mm,是包套开始挤入挤压筒到坯料开始挤入挤压筒的过程,主要是包套发生挤压变形,故该阶段的上模载荷曲线平滑并迅速增加;第 2 阶段为稳定挤压阶段,即图 5 中的 II 区,在此阶段,上模行程从 150 ~ 950 mm,是坯料开始挤入挤压筒到坯料完成挤压的过程,由于包套和坯料都发生了挤压变形,故该阶段的上模载荷曲线发生波动,并由于挤压过程温度不断降低,使上模载荷缓慢增加;第 3 阶段为完成挤压阶段,即图 5 中的 III 区,在此阶段,上模行程从 950 ~ 1100 mm,是坯料完成挤压到挤压停止的过程,除了坯料的终端还未挤出,剩下的只是包套的挤压变形,在这个阶段,上模载荷曲线波动幅度更大。这是因为一方面包套材料 45#钢的变形抗力要小于坯料  $Ti_3Al$  基合金,会使上模载荷下降;另一方面由于与模具接触时间较长,

导致包套温度下降很多,各处的温度分布也不均匀,会使上模载荷增加。

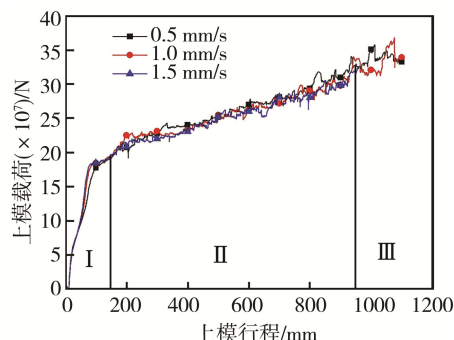


图 5 不同挤压速度时上模载荷-上模行程的关系曲线  
Fig.5 Curve of upper die load-upper mold travel at different extrusion speeds

## 2.5 挤压速度对坯料成形的影响

不同挤压速度下挤压终止时的坯料成形情况见图 6,可以看出,不同挤压速度对坯料成形影响很大,挤压速度越大,所获得的坯料半径越小,坯料尺寸越不均匀,坯料终端畸变越严重。当挤压速度为 0.5 mm/s 时,坯料的平均半径为 152.76 mm,挤压比为 3.86。当挤压速度为 1.0 mm/s 时,坯料的平均半径为 140.33 mm,挤压比为 4.57,因此,可以通过选用不同的挤压速度以获得所需的坯料直径,但挤压速度不宜选择太大,否则会使坯料各部分的尺寸相差太大或出现开裂、断裂等缺陷。

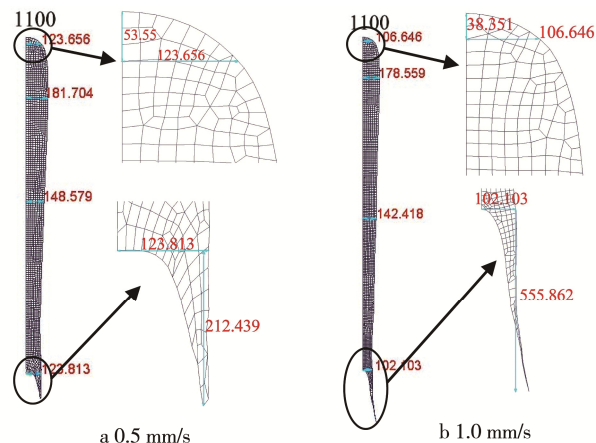


图 6 不同挤压速度时的坯料成形

Fig.6 Blank forming at different extrusion speeds

## 3 结论

1) 挤压速度对  $Ti_3Al$  基合金包套挤压过程有很大的影响。提高挤压速度,一方面会使坯料与模具和环境间的热传递减少;另一方面会使坯料变形的应变速率增加。

2) 挤压速度越大,坯料和包套的温度和等效应变越高,坯料成形的挤压比越大;在模拟的挤压速度

范围内, 挤压速度对坯料的等效应力场和模具载荷影响较小。当挤压速度为 1 mm/s 时, 坯料的挤压比可以达到 4.57。

3) 选择挤压速度时应使坯料温度和应变速率有良好匹配, 这样可以提高坯料成形的均匀性, 降低上模载荷以及坯料所受到的应力。当挤压速度为 1 mm/s 时, 坯料成形的均匀性最好, 所受到的最大等效应力也最小。

#### 参考文献:

- [1] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 等. Ti<sub>3</sub>Al 和 Ti<sub>2</sub>AlNb 基金合金的研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 336—341.  
ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong, LIANG Xiao-bo, et al. Study and Application of Ti<sub>3</sub>Al and Ti<sub>2</sub>AlNb Based Alloys[J]. Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 336—341.
- [2] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉. Ni-Al 系、Fe-Al 系和 Ti<sub>3</sub>Al 金属间化合物研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2001, 21(6): 27—29.  
PENG Chao-qun, HUANG Bo-yun, HE Yue-hui. Progress in Research on Ni-Al, Fe-Al and Ti<sub>3</sub>Al Intermetallics[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2001, 21(6): 27—29.
- [3] WU Y, ZHEN L, YANG D Z, et al. In Situ Tensile Deformation and Fracture Behavior of Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo Alloy with Various Microstructures[J]. Intermetallics, 2004, 12: 43—53.
- [4] CAO J X, BAI F, LI Z X. High Temperature Low Cycle Fatigue Behavior of Titanium Aluminide Ti-24Al-15Nb-1Mo Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 424: 47—53.
- [5] 王克鲁, 鲁世强, 康永林, 等. Ti<sub>3</sub>Al 基金合金的热变形行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9): 1534—1539.  
WANG Ke-lu, LU Shi-qiang, KANG Yong-lin, et al. Thermal Deformation Behavior and Processing of Ti<sub>3</sub>Al-based Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(9): 1534—1539.
- [6] 马婷婷, 龚红英, 仇丹丹, 等. 基于 Deform-3D 的商用车下轴套零件冷挤压模具结构优化设计[J]. 精密成形工程, 2015, 7(4): 26—30.  
MA Ting-ting, GONG Hong-ying, QIU Dan-dan, et al. Optimization Design of Cold Extrusion Die Structure for Lower Axle Parts of Vehicle Based on Deform-3D[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(4): 26—30.
- [7] GOETZ R L, JAIN V K, LOMBARD C M. Effect of Core Insulation on the Quality of the Extrudate in Canned Extrusions of  $\gamma$ -Titanium Aluminide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 35(1): 37—60.
- [8] 刘宗煜, 王克鲁, 鲁世强, 等. 挤压温度对 Ti40 包套挤压过程影响规律的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(9): 80—83.  
LIU Zong-yu, WANG Ke-lu, LU Shi-qiang, et al. Numerical Simulation of the Influence of Extrusion Temperature on the Extrusion Process of Ti40 Cladding[J]. Hot Working Process, 2011, 40(9): 80—83.
- [9] 王忠堂, 张士宏, 程明, 等. 高温合金 GH4169 管材包套挤压工艺及组织性能研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(4): 48—51.  
WANG Zhong-tang, ZHANG Shi-hong, CHENG Ming, et al. Study on Extrusion Process and Microstructure and Properties of High Temperature Alloy GH4169 Tubes[J]. Forging Technology, 2010, 35(4): 48—51.
- [10] 吴向红, 赵国群, 孙胜, 等. 挤压速度和摩擦状态对铝型材挤压过程的影响[J]. 塑性工程学报. 2007, 14(1): 36—41.  
WU Xiang-hong, ZHAO Guo-qun, SUN Sheng, et al. Effects of Extrusion Speed and Friction on Extrusion Process of Aluminum[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2007, 14(1): 36—41.
- [11] 刘先兰, 杨浩, 徐运. Al-5Ti-B 合金等径角挤压变形过程的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(6): 522—525.  
LIU Xian-lan, YANG Hao, XU Yun. Numerical Simulation of Extrusion Deformation Process of Al-5Ti-B Alloy [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2012, 32(6): 522—525.
- [12] ORANGI S, K. ABRINIA K, R. BIHAMTA R. Process Parameter Investigations of Backward Extrusion for Various Aluminum Shaped Section Tubes Using FEM Analysis[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(1): 40—47.
- [13] 王忠堂, 邓永刚, 张士宏, 等. 高温合金 IN690 管材挤压成形数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(10): 895—898.  
WANG Zhong-tang, DENG Yong-gang, ZHANG Shi-hong, et al. High Temperature Alloy IN690 Pipe Extrusion Forming Numerical Simulation[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2011, 31(10): 895—898.
- [14] 陈永哲, 柴跃生, 孙钢, 等. AZ91D 镁合金棒材挤压过程的数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2010, 3(3): 10—14.  
CHEN Yong-zhe, CHAI Yue-sheng, SUN Gang, et al. Numerical Simulation of AZ91D Magnesium Alloy Bar Extrusion Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 3(3): 10—14.
- [15] ZHOU J, LI L, DUSZCZYK J. Computer Simulated and Experimentally Verified Isothermal Extrusion of 7075 Aluminum Through Continuous Ram Speed Variation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(2): 203—212.