

## Ti-43Al-9V-Y 合金包套热轧热力耦合有限元模拟

孔凡涛, 崔宁, 陈玉勇, 訾凌君

(哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 采用 ABAQUS 有限元模拟软件对 Ti-43Al-9V-Y 合金的轧制过程进行模拟, 建立三维热力耦合有限元模型, 分析轧制状态下包套和合金的温度场、应力场以及等效应变场。结果表明: 包套的存在保证合金在变形过程中获得均匀的温度场。轧制过程中包套和 TiAl 坯料棱边处的温降较芯部大。包套轧制后 TiAl 坯料棱边处等效应力值较高。包套的存在承担一部分切应力, 使 TiAl 合金所受切应力较低, 能有效降低横向裂纹产生的几率。包套和 TiAl 坯料的变形抗力匹配性较好, 并且均具有两端以及棱边处等效应变变量较大的特点。

**关键词:** TiAl 合金; 包套; 轧制; 有限元; 模拟

**中图分类号:** TG337

**文献标志码:** A

## Thermo-mechanical coupling finite element simulation for hot rolling process of canned Ti-43Al-9V-Y alloy

KONG Fan-tao, CUI Ning, CHEN Yu-yong, ZI Ling-jun

(National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The hot rolling of Ti-43Al-9V-Y alloy was simulated by ABAQUS finite element software. The three-dimensional thermo-mechanical coupling finite element model was constructed. The results show that the temperature field, stress field and equivalent strain field of rolled piece were analyzed under the condition of rolling. The uniformity of temperature field can be improved by cans in the process of deformation. The temperature drop on the edge of rolled piece is higher than that in the centre. Equivalent stress is higher on the edge of rolled piece. The shear stress on the surface of TiAl would be relieved by cans, which would reduce the probability of transverse crack initiation. The deformation resistance of TiAl alloy matches well with that of the cans, and the equivalent strains on both ends and the edge of rolled piece are higher.

**Key words:** TiAl alloy; canned; rolling; finite element; simulation

$\gamma$ -TiAl 合金作为新一代轻质耐高温结构材料, 具有密度低、高温强度高、抗蠕变性能好等优点, 被认为是替代航空上较重的镍基合金的理想材料<sup>[1-2]</sup>。目前许多零件的制备都需要用到 TiAl 合金板材, 例如排气阀的喷嘴、直升机的防护罩等<sup>[3-4]</sup>。因此, 实现 TiAl 合金的轧制对其进一步应用非常重要。经过十几年的发展,  $\gamma$ -TiAl 合金的研究在合金化、机械加工等方面都取得了较大进展<sup>[5-7]</sup>。但其室温下的本征脆性和较差的高温变形能力始终限制其工业应用<sup>[8]</sup>。当前, beta-gamma TiAl 合金成为研究热点<sup>[9-10]</sup>, 其主要利用  $\beta$  相稳定化元素(如 Nb、Mo、Mn 和 V 等), 在高温下引入

具有较多滑移系的面心立方  $\beta$  相来协调变形<sup>[11]</sup>。同时, 通过添加晶粒细化元素(如 B 和 Y 等)来细化晶粒, 从而提高合金的变形能力。前期研究<sup>[12]</sup>表明: Ti-43Al-9V-Y 合金具有较好的热加工性能, 但 TiAl 合金的热加工窗口较窄, 实际的热加工较为困难。

对 TiAl 合金进行轧制等塑性变形前, 需要预先了解其变形特性以改善工艺。ABAQUS 有限元分析是工程塑性领域常用的分析方法之一, 能有效分析合金变形的温度场和应力场。有限元模拟方法在热加工的应用非常广泛。ZHU 等<sup>[13]</sup>利用 ABAQUS 有限元模拟软件对 TA15 合金热环轧过程中轧制条件和显微组织的

关系进行分析。JIANG 和 TIEU 等<sup>[14]</sup>利用 ABAQUS 有限元模拟软件对拉应力作用下板带冷轧过程进行了弹塑性有限元模拟。但目前对 TiAl 板材轧制过程进行模拟的研究较少。本文作者利用 ABAQUS 有限元模拟软件, 对 Ti-43Al-9V-Y 合金的包套轧制过程进行热力耦合有限元模拟。分析 TiAl 合金包套轧制温度场分布以及变形均匀性分布的规律。

## 1 实验和有限元模型的建立

轧制模拟采用 ABAQUS 有限元分析软件。在本模拟中, 轧制设备选用二辊热轧试验机。轧辊选用刚体, 轧辊尺寸选定为  $d$  250 mm×300 mm。坯料采用矩形锻坯, 几何尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm。包套材料选用 304 不锈钢, 包套厚度为 5 mm。初始轧制温度为 1 200 °C, 轧制速度为 0.3 m/s, 共进行 12 道次轧制。第 1 道次的变形量选为 6%; 第 2-6 道次选择的道次变形量为 8%; 第 7~12 道次道次变形量为 10%。考虑到包套和 TiAl 坯料之间的结合力不同, 摩擦机理不同, 需选择不同的摩擦因数。摩擦因数设定为 0.2~0.8。Ti-43Al-9V-Y 合金和 304 不锈钢的高温塑性参数均通过高温热物理模拟实验获得。热压缩实验在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上进行。热压缩温度为 1 100~1 250 °C, 应变速率为 0.01~0.5 s<sup>-1</sup>, 变形量为 60%。在模型中设定三种材料的比热容、热导率和热膨胀系数等参数以及轧辊与轧件接触换热系数、对流换热系数、辐射换热系数、包套与 TiAl 合金接触换热系数。(其中, Ti-43Al-9V-Y 合金的比热容、热导率和热膨胀系数等参数为实测。)通过建立模型、划分网格、装配等过程完成有限元模型的建立。几何装配图和相应坐标如图 1 所示。

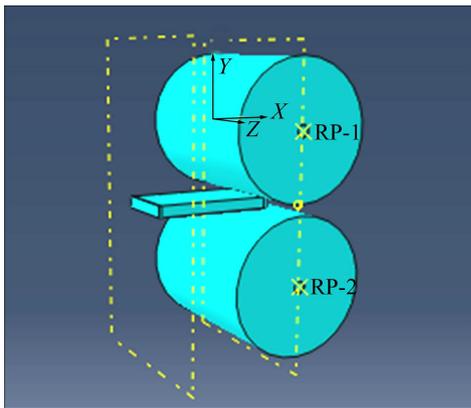


图 1 包套轧制几何模型装配图

Fig.1 Assembly drawing showing canned rolling process

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度场分析

利用 5 mm 厚的不锈钢对 Ti-43Al-9V-Y 合金进行包套后, 轧件经 12 道次轧制后的温度场分布图如图 2 所示。从图 2 可以发现 TiAl 坯料整体的温度分布均匀性较好, 这主要是由于轧制过程中包套的引入对 TiAl 坯料具有保温作用。包套和轧辊以及周围环境直接接触, 使包套温度降低较快。由于包套棱边处的温降最为剧烈, TiAl 坯料棱边处的温降较其他部位也更大。短边棱处最低温度为 1 160 °C 左右, 最高温度为 1 200 °C 左右, 长边棱处最低温度为 1 130 °C 左右, 最高温度为 1 170 °C 左右。TiAl 坯料心部温降最小, 热量损失最少, 温度分布最为均匀, 温度较初始轧制温度降低仅 10 °C 左右。TiAl 坯料上下表面温度差较小, 头部温度较尾部温度降低仅 30 °C 左右。在轧制过程中产生温度降低的主要原因是, 金属塑性变形热以及摩擦热较少不足以弥补由于热传导作用引起的温降。而在无包套轧制条件下, TiAl 合金的温度降低剧烈。因此, 包套对于改善合金整体的温度均匀性十分有效。

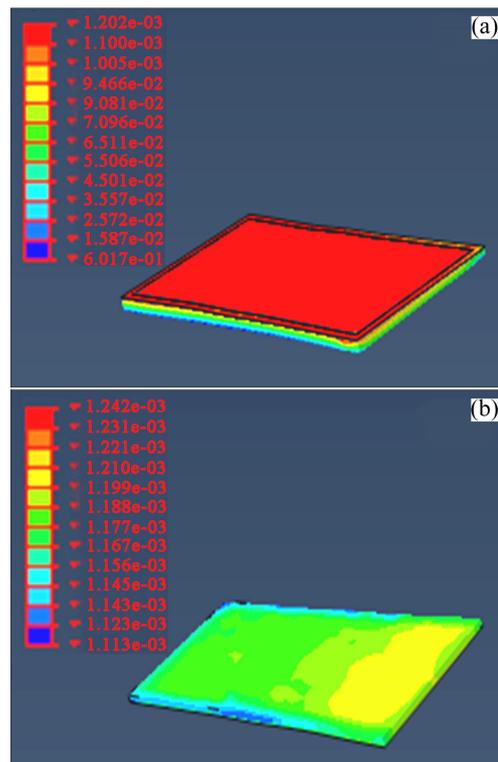


图 2 温度场分布图

Fig.2 Distributions of temperature: (a) Rolled piece; (b) TiAl alloy

## 2.2 应力场分析

TiAl 合金轧制时的应力场分布强烈依赖轧制工艺条件选择, 不同轧制工艺条件下, 应力场分布有很大差别。无包套轧制时, 应力场分布极不均匀, 不同部位应力场差别较大。图 3 所示为包套轧制后轧件应力场分布图, 包套的引入使 TiAl 坯料受到的应力载荷明显降低, 应力场分布均匀性程度增加, 不同方向切应力减小<sup>[15]</sup>。由于包套材料与 TiAl 坯料之间具有较好的强度匹配性, 同一温度下两者流变应力相近。因此, 轧制后两者应力分布和变形程度差异不大。包套轧制后 TiAl 坯料棱边处等效应力值较高, 短边棱应力峰值为 52 MPa 左右, 最小值为 45 MPa 左右, 长边棱应力峰值为 55 MPa 左右, 最小值为 35 MPa 左右。Ti-43Al-9V-Y 合金在坯料宽度方向上表面与心部应力分布较为均匀。

包套轧制 Ti-43Al-9V-Y 合金坯料切应力较低。如果进行无包套轧制, TiAl 坯料与轧辊直接接触, 摩擦

引起的切应力直接作用在 TiAl 坯料上。而包套轧制后, 包套承担一部分切应力, 切应力降低可以有效降低横向裂纹产生的几率。包套的存在有利于 TiAl 合金在约束条件下的变形。包套和 TiAl 坯料具有较好的变形协调性, 包套可以使得 TiAl 坯料受到的拉应力明显降低。包套轧制时, TiAl 坯料的平均等效应力为 40 MPa 左右。

## 2.3 等效应变场分析

TiAl 合金轧制变形过程中获得均匀的温度场及应变场是获得组织与性能优异板材的前提条件。轧制过程应力状态非常复杂, 应变速率较高, TiAl 坯料均匀变形的难度较大。无包套轧制时, 整个 TiAl 坯料变形极不均匀, 同一方向等效应变波动性很大, 该轧制条件下得到的 TiAl 板材不同部位组织和性能差异较大, 无法实现工业化应用。图 4 所示为包套轧制后轧件等效应变场分布图, 包套的引入使 TiAl 坯料变形均匀程度增加, 同一方向等效应变波动性较低。包套与 TiAl 坯料变形抗力匹配性较好, 因此两者变形程度相近。两者总体等效应变分布规律相似, 都出现头部、尾部以及棱边处等效应变较大, 靠近头部和尾部区域等效应变较小, 中间区域等效应变较相邻区域较大等趋势。棱边处的等效应变峰值为 0.9 左右, 坯料头部和尾部等效应变峰值为 0.7 左右, 而与其相邻区域等效应变的值仅为 0.55 左右, TiAl

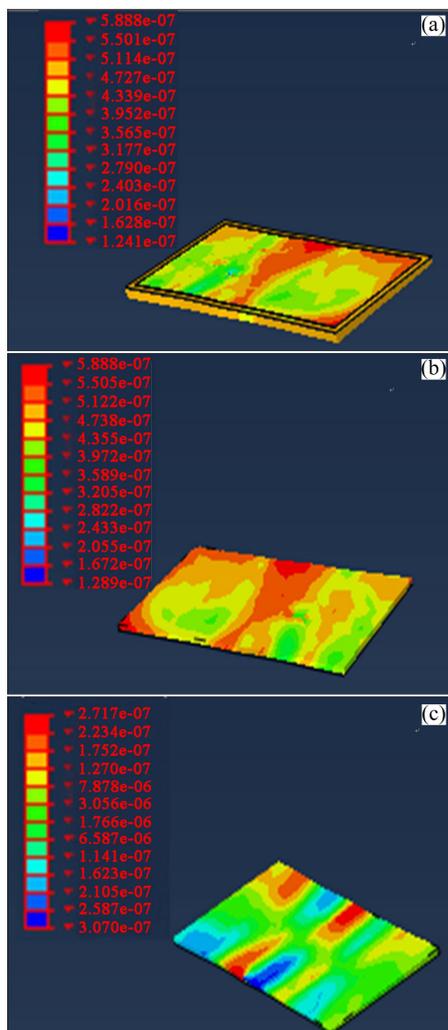


图 3 应力场分布图

Fig.3 Distributions of effective stress: (a) Rolled piece; (b) TiAl alloy; (c) Distribution of shearing strength in X-Z plane

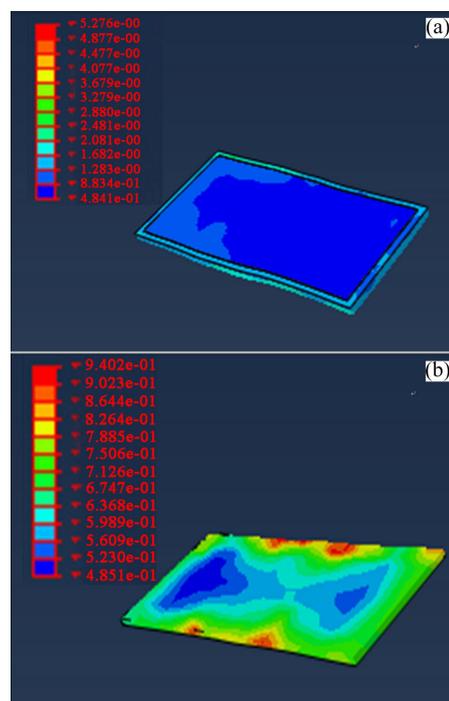


图 4 包套轧制等效应变场分布

Fig.4 Distributions of effective strain during rolling: (a) Rolled piece; (b) TiAl alloy

坯料中部区域等效应变量为 0.65 左右。TiAl 坯料表面等效应变稍小于芯部等效应变。

温度对变形均匀性影响主要在于不同温度下, 坯料流变应力不同, 不同部位金属流动速度不同, 从而导致变形程度的不同。当包套和 TiAl 坯料头部进入轧辊时, 整个轧件温度较高, 导致金属流动变形抗力较小, 应变较大; 随着轧制过程的进行, 轧件表面与轧辊接触, 热量散失变大, 金属流动变形抗力变大, 导致轧件应变变小。当进入稳态轧制阶段时, 由于轧件中间区域与轧辊接触面积增大, 摩擦力增加, 因此由摩擦热以及塑性功热引起的温升以及表面剪切变形综合作用, 包套中部区域等效应变较大, 并且 TiAl 坯料中部区域等效应变较大。随着轧制过程的进行, 轧件尾部温度逐渐降低, 摩擦热以及塑性功热引起的温升不足以弥补由于接触热传导引起的温降, 因此轧件应变降低。

### 3 结论

1) 包套的存在能保证 TiAl 坯料在轧制过程中的具有较好的温度均匀性。轧制过程中包套和 Ti-43Al-9V-Y 合金棱边处的温降比芯部大。

2) 包套的引入增加 TiAl 坯料的应力场分布均匀性, 减小不同方向切应力。切应力降低可以有效降低横向裂纹产生的几率。包套轧制后 TiAl 坯料棱边处等效应力值较高。

3) 包套与 TiAl 坯料变形抗力匹配性较好, 两者变形程度相近。包套的引入保证 TiAl 坯料变形均匀性。包套和 TiAl 坯料均具有两端和棱边处等效应变较大的特征。

### REFERENCES

- [1] APPEL F, BROSSMANN U, CHRISTOPH U, EGGERT S, JANSCHKE P, LORENZ U, et al. Recent progress in the development of gamma titanium aluminide alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2(11): 699–720.
- [2] 郭建亭, 周兰章, 李谷松. 高温结构金属间化合物及其强化机理[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(1): 1–34.  
GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang, LI Gu-song. High temperature structural intermetallics and their strengthening-softening mechanisms[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(1): 1–34.
- [3] ADAMS A, RAHAMAN M, DUTTON R E. Microstructure of dense thin sheets of  $\gamma$ -TiAl fabricated by hot isostatic pressing of tape-cast monotapes[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 477(1): 137–144.
- [4] GERLING R, BARTELS A, CLEMENS H, KESTLER H, SCHIMANSKY F P. Structural characterization and tensile properties of a high niobium containing gamma TiAl sheet obtained by powder metallurgical processing[J]. *Intermetallics*, 2004, 12: 275–280.
- [5] KOTHARI K, RADHAKRISHNAN R, WERELEY N M. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, 55: 1–16.
- [6] KIM Y W, ROSENBERGER A, DIMIDUK D M. Microstructural changes and estimated strengthening contributions in a gamma alloy Ti-45Al-5Nb pack-rolled sheet[J]. *Intermetallics*, 2009, 17: 1017–1027.
- [7] TETSUI T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 329: 582–588.
- [8] CLEMENS H, WALLGRAM W, KREMMER S, GÜTHER V, OTTO A, BARTELS A. Design of novel  $\beta$ -solidifying TiAl alloys with adjustable  $\beta/\beta_2$ -phase fraction and excellent hot-workability[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2008, 10(8): 707–713.
- [9] 杨非, 陈玉勇, 孔凡涛, 肖树龙, 徐丽娟. 包套锻造对 Ti-45Al-5.4V-3.6Nb-0.3Y 组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 315–319.  
YANG Fei, CHEN Yu-yong, KONG Fan-tao, XIAO Shu-long, XU Li-juan. Effect of canned-forging on microstructure and properties of Ti-45Al-5.4V-3.6Nb-0.3Y alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 315–319.
- [10] CLEMENS H, CHLADIL H F, WALLGRAM W, ZICKLER G A, GERLING R, LISS K D, et al. In and ex situ investigations of the  $\beta$ -phase in a Nb and Mo containing  $\gamma$ -TiAl based alloy[J]. *Intermetallics*, 2008, 16(6): 827–833.
- [11] 陈玉勇, 张树志, 孔凡涛, 刘祖岩, 林均品. 新型  $\beta$ - $\gamma$  TiAl 合金的研究进展[J]. *稀有金属*, 2012, 36(1): 154–160.  
CHEN Yu-yong, ZHANG Shu-zhi, KONG Fan-tao, LIU Zhu-yan, LIN Jun-pin. Progress in  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl based alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2012, 36(1): 154–160.
- [12] 孔凡涛, 陈玉勇, 李宝辉. 锻造与轧制对 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金显微组织和力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2012, 36(1): 154–160.  
KONG Fan-tao, CHEN Yu-yong, LI Bao-hui. Effects of forging and rolling on microstructure and mechanical property of Ti-43Al-9V-0.3Y alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 36(1): 154–160.
- [13] ZHU S, YANG H, GUO L G, GU R J. Investigation of deformation degree and initial forming temperature dependences of microstructure in hot ring rolling of TA15 titanium alloy by multi-scale simulations[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 65: 221–229.
- [14] JIANG Z Y, TIEU A K. Elastic-plastic finite element method simulation of thin strip with tension in cold rolling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 130: 511–515.
- [15] 刘咏, 黄伯云, 周科朝, 贺跃辉, 韦伟峰. TiAl 基合金包套锻造工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 10(S1): 6–9.  
LIU Yong, HUANG Bo-yun, ZHOU Chao-ke, HE Yue-hui, WEI Wei-feng. Canned-forging process of TiAl based alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 10(S1): 6–9.

(编辑 王超)