

# Finite Element Modeling of Plastic Metal Flow in Friction Stir Welding of TA15 Titanium

Kuijing Song<sup>1</sup>, Yanhong Wei<sup>1,2</sup>, Zhibo Dong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin

<sup>2</sup>The School of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing

Email: hitskj@163.com, fangkunhit@163.com

Received: Jul. 12<sup>th</sup>, 2013; revised: Aug. 16<sup>th</sup>, 2013; accepted: Sep. 4<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Kuijing Song et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Kuijing Song et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** Metal flow field around the rotation tool in friction stir welding workpiece is simulated numerically by using finite element method analysis software DEFORM-3D. The welding parameters are as follows: the rotation tool rotates at a rate of 800 rpm, and marches at a speed of 36 mm/min. The whole metal flow field shows that the metal around the rotation tool flows into a hopper-like zone similar to the shape of rotation tool, and the flowing field is asymmetrical with the welding central seam. It is found that linear velocities increase with the radial distance from central axis of welding tool increasing, and material's flowing ability gets weakened at bottom of workpiece compared to the surface. By changing the rotating rate and marching speed, heat input is affected. Heat input increases with the rotating rate increasing within a certain range, leading to a better flowing ability of metal and a better welding seam forming. The similar conclusion is indicated with the decrease of marching speed.

**Keywords:** Friction Stir Welding; Metal Flow; TA15; Plastic Deformation

## TA15 钛合金搅拌摩擦焊金属流动的有限元模拟

宋奎晶<sup>1</sup>, 魏艳红<sup>1,2</sup>, 董志波<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨

<sup>2</sup>南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京

Email: hitskj@163.com, fangkunhit@163.com

收稿日期: 2013年7月12日; 修回日期: 2013年8月16日; 录用日期: 2013年9月4日

**摘要:** 本文采用有限元分析软件 DEFORM-3D 对 TA15 钛合金搅拌摩擦焊(FSW)过程中搅拌头周围金属的流动进行了数值模拟。经模拟, 当焊接参数选取旋转速度为 800 rpm, 焊接速度为 36 mm/min 时, 搅拌头周围金属的流动整体呈现漏斗状, 与搅拌头外形轮廓相似, 而且金属的流动关于焊缝中心并不对称。金属的流动速度随着其与搅拌头中心线径向距离的增加而增加, 并且随着焊件厚度的增加, 金属的流动能力逐渐越弱。对焊接工艺参数的作用分析发现, 旋转速度和焊接速度的大小影响焊接过程的热输入, 在一定范围内, 随着旋转速度的增加, 热输入量增加, 金属的流动能力增强, 焊缝成形就较好; 在一定范围内, 随着焊接速度的降低, 也表现出类似的特征。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 金属流动; TA15; 塑性变形

## 1. 引言

FSW 因具有无污染、质量高、变形小等特点,目前已广泛应用于航空、航天、船舶以及车辆制造等诸多领域。然而,FSW 过程的传热、流动、摩擦、相变、再结晶等问题尚不十分清楚。考虑到搅拌头结构以及焊接材料的特点,金属的流动呈现出复杂形态。虽然目前已经有许多种实验的方法,如标记物示踪法,异种材料连接以及急停技术都可以实现对金属流动状态跟踪监测。但是,FSW 是一个动态的过程,所以实验方法都不能完整的描述金属的流动特征。

有限元、有限差分以及有限容积等日益兴起的数值模拟技术,在 FSW 等复杂工艺过程的研究中具有明显优势。姬书得<sup>[1]</sup>和赵俊敏<sup>[2]</sup>利用 ANSYS FLUENT 流体力学软件,建立了钛合金 FSW 的基于动量守恒方程的有限容积模型;李海利<sup>[3]</sup>采用 ABAQUS 有限元软件,基于有限元求解构架,模拟铝合金的搅拌摩擦焊塑性变形情况。

考虑到 FSW 固相连接的特点,金属流动实质上是材料的塑性变形,更适合采用具有大变形计算和网格自适应能力,且材料库充足的 DEFORM 有限元软件进行模拟。张利国<sup>[4]</sup>等采用 DEFORM 软件,研究了没有搅拌针的搅拌头轴肩几何形状对焊件金属流场的影响。本文使用 DEFORM 有限元软件模拟 TA15 合金在 FSW 过程中的金属流动问题,并研究旋转速度和焊接速度对金属流动的影响规律。

## 2. 计算步骤与方法

### 2.1. 几何建模与网格划分

因 DEFORM-3D 本身不具备几何建模功能,故本文采用 CAD 的三维造型功能建立工件和搅拌针的模型。焊件的几何尺寸为 80 mm × 60 mm × 3 mm,材料为 TA15 钛合金。搅拌头包括搅拌轴肩和搅拌针两部分,前者为圆柱体,与焊件表面接触的底面为平面和内凹单个圆槽和内凹同心圆槽等类型,以平面为例,直径为 10 mm,高度为 10 mm。后者形状多样,包括圆柱型,圆锥形,圆台型,螺纹型等,在此将搅拌针简化为圆柱体,直径为 3 mm,高约为焊件厚度的 0.9 倍,取 2.8 mm。实体模型生成以后,将其保存为 STL 格式,然后导入 DEFORM-3D 进行网格划分。如图 1

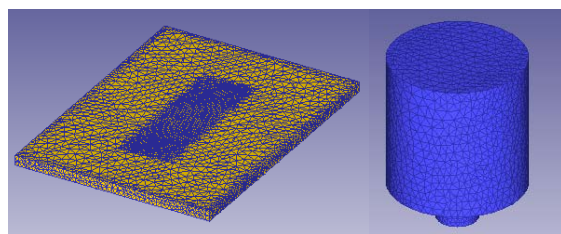


Figure 1. Mesh of workpiece and rotational tool  
图 1. 工件和搅拌头网格划分

为工件和搅拌头的网格情况。工件采用不均匀网格划分,在焊缝处网格加密,单元数目为 40,278,搅拌头单元数目为 40,097,分析时采用网格自适应即 ALE 技术。在数值模拟中,焊接速度为 36 mm/min,旋转速度为 800 rpm。

### 2.2. 材料属性的定义

通过热-机械顺次耦合模拟的方式实现。TA15 在常温下的密度为 4.45 g/cm<sup>3</sup>,泊松比为 0.3,模拟过程中采用随温度变化的比热容、导热系数、热膨胀系数,参考工程材料大典<sup>[5]</sup>。

忽略焊件材料在 FSW 过程中的弹性变形,将工件看作是刚塑性变形体。基于塑性变形计算的增量理论即 Levy-Mises 流动法则,它适用于连续体的大变形问题,应变张量率  $\dot{\epsilon}_{ij}$  的率形式可以表示为:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \left(3\dot{\bar{\epsilon}}/2\bar{\sigma}\right)\sigma_{ij} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\bar{\epsilon}}$  为应变率,  $\bar{\sigma}$  为当前状态材料的等效流变应力,  $\sigma_{ij}$  为应力张量。等效应力是一个瞬态量,是内变量的函数,可以用等效应变,应变率以及温度为自变量表示,即

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (2)$$

式中:  $\bar{\epsilon}$  为等效应变,  $T$  为温度。不同温度和应变率下的流动应力-应变关系经查阅相关文献<sup>[5]</sup>拟合得到,当热压缩时为(3),热拉伸时为(4)。在本文模拟中,暂时以(3)进行模拟。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 6.12 \times 10^{14} \left[ \sinh(0.01165\bar{\sigma}) \right]^{4.0477} \times \exp(-351.2353/RT) \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 1.23 \times 10^{22} \left[ \sinh(0.0173\bar{\sigma}) \right]^{3.59914} \times \exp(-565.5494/RT) \quad (4)$$

式中:  $R$  为气体常数。

### 2.3. 边界条件的定义

模型的边界条件有两类，一类是换热边界条件，一类是运动边界条件。如图2所示，由于工件上表面①与焊接夹具的接触面积非常小，忽略不计，因此认为其满足对流换热边界条件；工件的四周暴露在空气中，也处理成对流换热边界条件，空气温度为20℃，对流换热系数取15 W/(m<sup>2</sup>·K)。工件底面⑥与垫板接触，为度量热传导带来的能量散失，取对流系数为30 W/(m<sup>2</sup>·K)。工件四周②、③、④、⑤面上的节点速度在X、Y、Z方向均为零，工件底面①上固定在底板上，因此在z方向的速度为零，只允许其在水平方向自由运动。

在用 DEFORM-3D 进行建模时，有三种类型的摩擦形式，剪切摩擦、库伦摩擦以及混合型摩擦。剪切摩擦可以用于多数的板材成形，库伦摩擦一般用于两个弹性变形体或一个弹性变形体、一个刚体组成的摩擦体系，且两个相互接触的界面上必须有正压力。在金属与金属组成的摩擦体系中，Borden 提出的黏着摩擦理论被广泛认可<sup>[6]</sup>，该理论认为，当两个金属表面在力的作用下相互接触时，接触面上的一些点在压力的作用下产生屈服和流动，这些点牢固结合，使相互接触的两个面的相对速度为零，成为一体。鉴于此，并参考相关文献<sup>[7]</sup>，本文选取搅拌头和工件之间的摩擦关系为剪切摩擦，摩擦系数取常数 0.4，不考虑搅拌头和工件接触部位的相对速度。

有限元模型建立以后，生成 DB 文件，提交模拟处理器求解计算。FSW 过程分为两个阶段，搅拌针扎入阶段和搅拌头前进阶段，扎入阶段完成后，生成新的 DB 文件，求解对搅拌头前进过程。在整个计算过程中，时间步长选取为 0.1 s，搅拌头的下压量取 0.1 mm。

DEFORM-3D 有两种迭代计算方法，直接迭代法和 Newton-Raphson 迭代法，直接迭代法计算时间较长，本文选取 Newton-Raphson 迭代法求解计算。

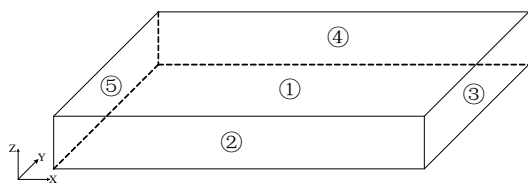


Figure 2. Schematic of boundary conditions  
图 2. 边界条件示意图

### 3. 模拟结果与讨论

对计算结果的分析采取从整体到局部进行分析，以速度矢量表示金属的流动。

#### 3.1. 整体温度场和流场分析

首先建立摩擦生热的热源模型，具体参考参考文献<sup>[8]</sup>。经计算，搅拌针插入工件阶段，停留时间取 15 s 后再前进较为合适。图 3 为焊接时间为 30 s 达到稳态时焊件横截面以及表面的温度场分布。经计算，最高温度约为 TA15 熔点(1600℃~1720℃)的 0.8 倍，满足工件 FSW 的能量条件。

图 4 为搅拌头周围金属流动的整体速度矢量分布图。从图中可以看到，速度场整体呈漏斗状，与搅拌头和工件接触的表面的形状类似。速度值整体呈现上大下小、外大内小的趋势，随着深度的增加和离搅拌头轴线距离的减小，金属的流动速度逐渐减小。这是因为搅拌头的线速度随着直径的增大而增大，其周围金属在搅拌头的摩擦带动下运动，所以节点的速度也表现出相同的特征。

图 5 为金属的流动速度沿 X、Y 和 Z 方向的分布图。在 X 方向的分布图中可以看到，流场关于焊缝并不对称，前进侧金属的流动速度稍大于返回侧，沿 X

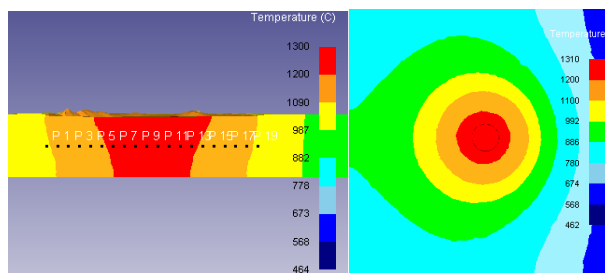


Figure 3. Temperature field  
图 3. 温度场分布

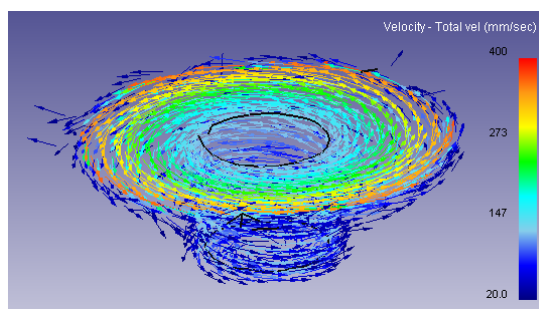


Figure 4. Overall distribution of velocity vector  
图 4. 速度矢量整体分布图

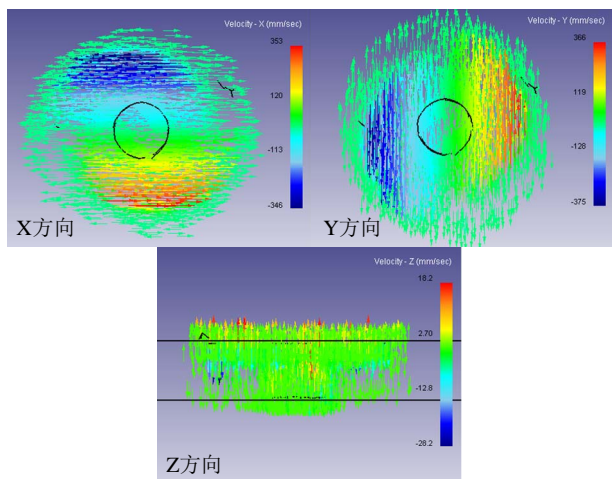


Figure 5. Velocity vector in different directions  
图 5. 不同方向速度矢量图

方向速度矢量分量比较大的节点主要集中于焊缝两侧，越靠近焊缝越稀疏。沿 Y 方向速度矢量的分量在搅拌头前后方也是不对称的，搅拌头后方的值比前方的要稍大。沿 Z 方向的速度矢量分量的值较 X 和 Y 方向要小得多，但这也足以说明金属有向下运动填充搅拌头移动所留下的孔洞的趋势。

### 3.2. 金属水平方向金属流动

为了研究焊接过程中在工件水平方向不同深度金属的流动情况，对工件沿厚度方向每隔 1 mm 进行切片，以达到观察焊缝表面、内部以及底面的目的。图 6 为焊接 5 s 后在不同深度的水平面上的速度矢量分布云图。从切片层 A 的速度矢量云图可以看到，轴肩下方金属受搅拌头的作用，由前进侧向返回侧流动，速度场覆盖的范围基本上与轴肩大小相同，而且从搅拌头轴肩作用区域到搅拌头中心作用区域，速度从大到小逐渐过渡。随着深度的增加金属的流动逐渐减弱，表层金属流动最强，离搅拌头轴线越远，流动速度越大。

### 3.3. 金属纵向金属流动

为了观察沿焊缝纵向金属的流动情况，将工件进行纵向切片，所取切片分别位于焊缝中心以及前进侧和返回侧距焊缝分别为 1 mm 和 3 mm 处，即分别位于轴肩作用区和搅拌针作用区。图 7 为不同切片层的速度矢量分布图。图 7(a)和(e)为轴肩影响区的速度场分布。从其速度场可以看到，该切片层分布在表面上

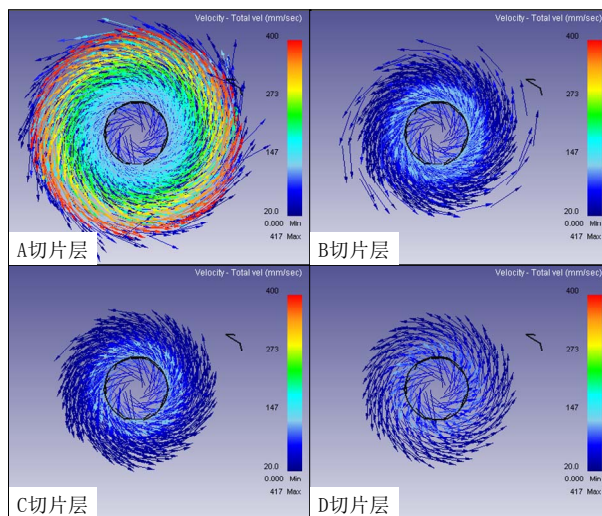


Figure 6. Velocity vector in horizontal direction  
图 6. 水平方向速度矢量图

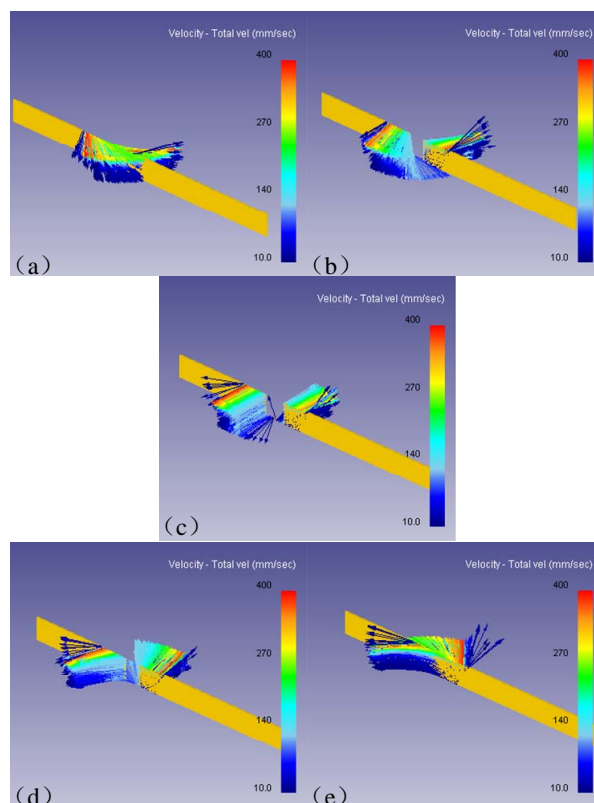


Figure 7. Velocity distribution on different layers  
图 7. 不同切片层速度矢量图

的速度矢量比较多，说明表面金属的塑性流动能力比较强，且均沿着搅拌头旋转的方向。随着厚度的增加，金属的流动能力明显减弱，一方面是由于轴肩对焊件的作用随着深度的增加而逐渐减弱，另一方面是下部金属离搅拌针的中轴线比较远，受到搅拌针的剪应力

较小，其次，工件表面到底面的温度逐渐降低，导致材料自身的流动变形能力逐渐降低。

图 7(b)和(d)为距离焊缝两侧各 1 mm 的切片层速度场分布云图。该切片层受到搅拌针和轴肩的共同作用，速度矢量的较大值分布在焊件表面以及与搅拌针接触的焊件内部，且焊缝内部金属的流动速度明显低于焊缝的表面，这是因为搅拌头旋转的线速度随着半径的增大而增加，相应地，金属在搅拌头的作用力下也表现出相同的特征。另外，前进侧与返回侧金属流动趋势不尽相同，前进侧金属在搅拌头的作用下由前进侧流向返回侧，返回侧金属向搅拌针后方流动，从而填补搅拌头向前移动留下的空隙。

图 7(c)为搅拌头中心切片层的速度场分布图，此处金属受到轴肩和搅拌针沿切向的剪切和挤压作用，速度矢量基本上垂直于切片方向。杜随更等人<sup>[9]</sup>认为摩擦表面速度可由下式计算得到：

$$V_f = (R+r)\omega/2 \quad (5)$$

式中： $R$  和  $r$  分别为管状试件的外半径和内半径， $\omega$  为旋转工件的角速度。由该式计算所得速度  $V_f$  为 272 mm/s，该值为表面的平均速度。在本文所建立的模型中，上表面最大速度为 400 mm/s，最小速度为 120 mm/s，均值为 260 mm/s，与上式计算所得值基本吻合。

图 8 为不同旋转速度时金属内部流动回线。当旋转速度为 800 rpm 时，焊缝两侧的金属基本上实现结合，但也可以观察到还存在一些焊接缺陷。由图可见，随着搅拌头旋转速度的增加，金属流动性和焊缝成形越来越好。同理，焊接速度为 36 mm/min 时，焊缝成形基本良好，金属能填充搅拌头向前移动留下的孔洞。焊接速度越小，焊缝成形越好。但焊速过低或旋转速度过大，可能导致金属过热而影响焊接接头的性能。



Figure 8. Metal flow trace at different rotation velocity  
图 8. 不同旋转速度时的金属流动回线

## 4. 致谢

感谢国家自然科学基金资助项目(51175253)对本研究的支柱。

## 参考文献 (References)

- [1] 姬书得, 刘伟, 张利国, 等 (2012) 基于湍流计算模型的 TC4 钛合金搅拌摩擦焊过程的流场分析. *热加工工艺*, **13**, 172-174.
- [2] 赵俊敏, 王玉, 张辉, 等 (1997) 钛合金搅拌摩擦焊接三维流场数值模拟. *热加工工艺*, **19**, 72-75.
- [3] 李海利 (2011) 搅拌摩擦焊塑性金属三维流动数值模拟. 南昌航空大学, 南昌.
- [4] 张利国, 姬数得, 栾国红, 等 (2011) 无搅拌针的搅拌摩擦焊 Al 合金薄板. *材料科学与技术*, **7**, 647-652.
- [5] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等 (2006) 中国材料工程大典. 化学工业出版社, 北京.
- [6] 高彩桥 (1988) 摩擦金属学. 哈尔滨工业大学出版社, 哈尔滨.
- [7] 孙家枢 (1992) 金属的磨损. 冶金工业出版社, 北京.
- [8] Zhang, Z. and Zhang, H.W. (2008) A fully coupled thermal-mechanical model of friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **37**, 279-293.
- [9] 杜随更, 段立宇, 吴诗惇, 程功善 (1997) 摩擦焊初始阶段的摩擦机制及摩擦系数. *机械科学与技术*, **16**, 703-707.