

TC4-DT 钛合金线性摩擦焊过程三维数值模拟

3D Numerical Simulation of Linear Friction Welding of TC4-DT Titanium Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所 金俊龙 郭德伦 陶 军 张田仓

[摘要] 针对 TC4-DT 钛合金在热模拟机上测得的流动应力数据,建立了 TC4-DT 线性摩擦焊同质接头三维刚塑性有限元模型,研究了温度场、金属流动。验证试验采用预埋热电偶的方法测得焊接过程中特殊点温度,同时测量了缩短量,误差不超过 4%。在模拟结果中观察到,沿振动方向飞边有波纹状条纹,与实际飞边形貌符合,证明模型可用于预测线性摩擦焊过程中的温度场、轴向缩短量及金属流动情况。

关键词: 线性摩擦焊 TC4-DT 数值模拟 缩短量 金属流动

[ABSTRACT] The flow stress data of TC4-DT is measured on thermal simulation tester, then establishes a three-dimensional model of TC4-DT linear friction welding joint. And, temperature field and metal flow are studied. In validation experiment, temperature of specific points and shortening amount are measured during the welding process by using embedded thermocouple method, and the error is less than 4%. Simulation results show that flash of the vibration direction has striation, which is accordant with the morphology of actual flash. It is proved that the model can be used to predict the temperature field, axial shortening and metal flow in the LFW.

Keywords: LFW TC4-DT Numerical simulation Shortening amount Metal flow

新型飞机对机体结构提出了高可靠性、轻质、长寿命、低成本等要求,对飞机机身结构的选材、设计、制造和检测等方面的关键技术也提出了更高的要求,如材料方面大量采用钛合金、复合材料等轻质、高性能材料。TC4-DT 合金是我国研发的一种具有自主知识产权的损伤容限型钛合金,它是在普通 TC4 合金基础上通过成分设计优化、纯净化熔炼和 β 热加工工艺等途径获得的。该合金不仅具有一定的强度水平(900MPa),还具有较低的裂纹扩展速率 da/dN 和较高的断裂韧性 K_{IC} ($\geq 90\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$),可作为重要的结构材料应用于航空航天领域^[1-2]。先进制造技术方面,线性摩擦焊(LFW)是一种优质、高效的固相焊接方法,目前已经成为航空发

动机整体叶盘制造和修复中的一项关键技术^[3],国外已开始研究它在飞机结构件制造方面的应用。线性摩擦焊具有一系列独特的优点,它可以焊接飞机结构中用通常方法难以焊接的铝合金、钛合金等,尤其是在非轴对称焊件的摩擦焊中拥有巨大的潜力。

国内外对线性摩擦焊的模拟研究还主要集中在二维模型^[4-5],此类研究能说明一些问题,但是与实际情况有一定差距;另外,虽然有一部分三维模型的研究^[6],但在飞边形貌及应力应变场方面仍差距较大。本文针对 TC4-DT 的 LFW 过程建立 TC4-DT 线性摩擦焊同质接头的三维有限元模型,研究焊接过程中的温度场演变及金属的流动情况,得到了较好的结果。

1 三维计算模型的建立

1.1 计算模型

线性摩擦焊属于大变形问题,而弹性变形相对于塑性变形可以忽略,因此可采用刚塑性模型。焊接同质接头时,温度场、变形相对于焊缝具有对称性,因此只选取一个工件进行计算,另一个工件用刚体代替,这样可以大大减少计算量。由于摩擦焊工件的热影响区和变形区较小,为了减少计算量,在综合考虑计算机计算能力和模拟精度后,网格划分采用梯度网格法,在靠近焊缝的 10mm 区域局部细化网格,计算过程中使用网格自动重划分技术避免网格的过度畸变。

所用焊接试块尺寸为 $20\text{mm}\times 75\text{mm}\times 130\text{mm}$,其中 75mm 方向为振动方向。刚体做往复匀速振动,振幅为 3mm,工件底部施加垂直方向的摩擦压力和顶锻压力,建立的三维有限元模型如图 1 所示。

将整个模拟过程分为 3 个部分。第 1 部分(0~1s)由于处在摩擦初始阶段,工件界面金属未进入塑性状态,工件表面易出现接触不均匀,因此在摩擦热输入的基础上在表面施加补偿热源,热输入 $HI = 4\mu fAP(1-t)$,其中 μ 、 f 、 A 、 P 、 t 分别为摩擦系数、频率、振幅、摩擦压力和时间。该热输入随时间增加而降低,在 1s 时降为零。

在第 2 部分(1~3s),摩擦进入稳定阶段,接头附近金属进入粘塑性状态。除去补偿热源,接头摩擦热输入全部由摩擦热及塑性变形热提供。

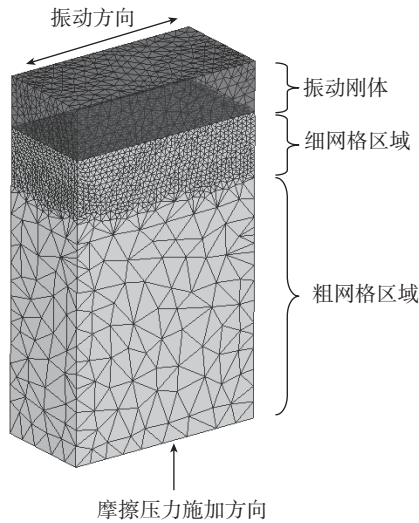


图1 三维有限元模型及网格划分

Fig.1 Three-dimensional finite element model and mesh generation

在第3部分(3~15s),摩擦过程结束,进入冷却阶段,材料模型转换为弹塑性模型。继续施加顶锻压力,工件通过热传导及对流散热。

1.2 材料本构参数及焊接工艺

在Gleeble-1500型热模拟机上进行应变速率0.01~10/s、变形温度750~1200℃条件下TC4-DT材料的热压缩试验,总变形量为50%。以流动应力为目标函数,选用TC4-DT合金试样(尺寸为 $\phi 8\text{mm} \times 12\text{mm}$),得到0.01/s、0.1/s、1/s、10/s 4种应变速率下各温度的应力应变曲线,可以观察到在1050℃以上温度时4种应变速率下流动应力均降到较低水平(图2)。处理后得到TC4-DT合金的材料本构模型。

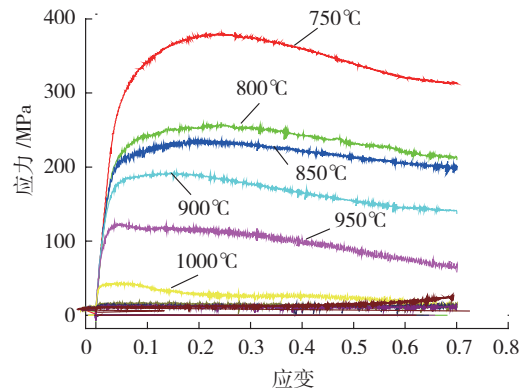
工艺试验在北京航空制造工程研究所自行研制的LFW-20T型线性摩擦焊机上进行,焊接工艺参数如表1所示。测温仪为YOKOGAWA(恒河)DX2000新型网络无纸记录仪,测量周期为125ms,热电偶丝材料为NiAl和NiCr。

2 计算结果与讨论

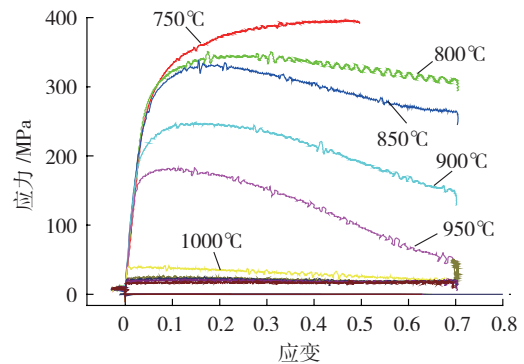
2.1 温度场

采用上述模型,利用有限元软件,计算了TC4-DT材料的线性摩擦焊过程中温度场和塑性流动的情况。图3是焊接过程中接头温度场随时间的演变情况。

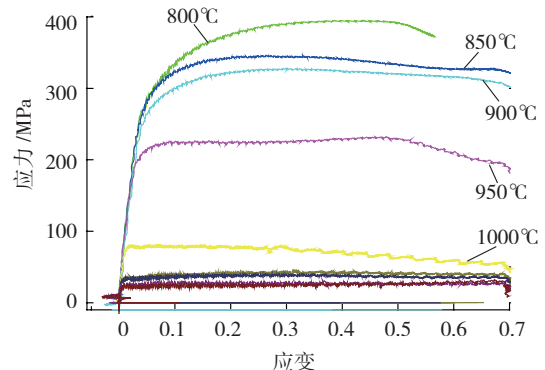
模拟结果显示,接头在摩擦热和补偿热源作用下,中心点在1s内迅速升高到1010℃左右,然后缓慢增加到1193℃,界面温度场逐步均匀化。高温产生大量粘塑性金属,在轴向压力的作用下,界面大量粘塑性金属被挤出,形成飞边。图4所示为模拟焊接过程中焊缝中



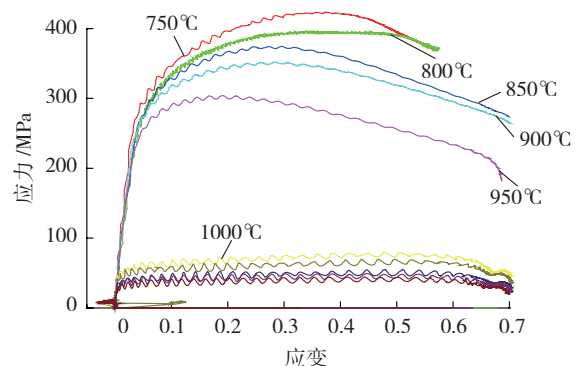
(a)应变速率为0.01/s



(b)应变速率为0.1/s



(c)应变速率为1/s



(d)应变速率为10/s

图2 4种应变速率对应温度下应力应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves in varying temperature under four strain rates

表1 焊接工艺参数

振幅/mm	频率/Hz	摩擦时间/s	摩擦压强/MPa	顶锻压强/MPa
3	30	3	100	120

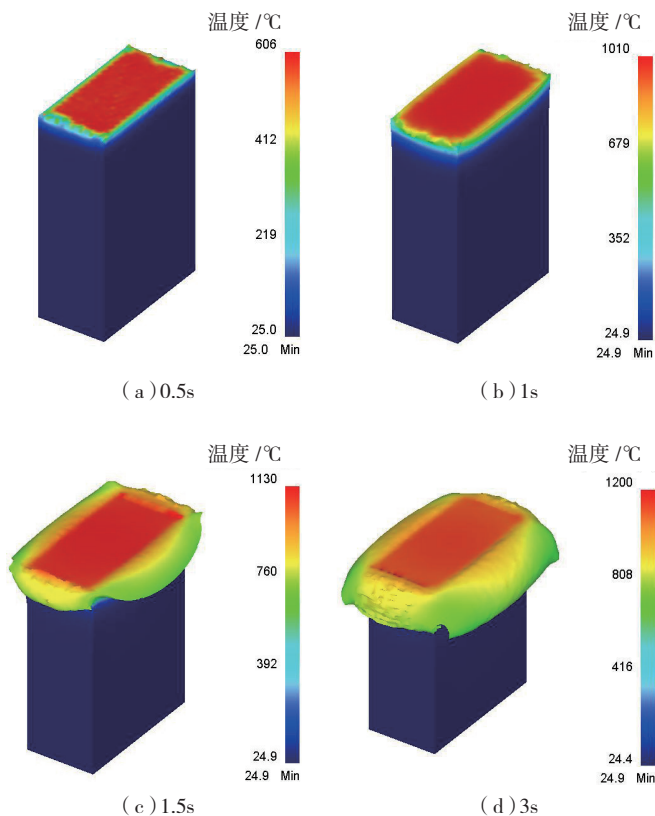


图3 典型时刻接头温度场演变云图

Fig.3 Temperature field evolution nephograms of the joint at typical time

心处温度演变情况。

在非振动端接近焊缝区域不同距离处预埋热电偶测量温度变化,图5所示即为热电偶测温与模拟温度结

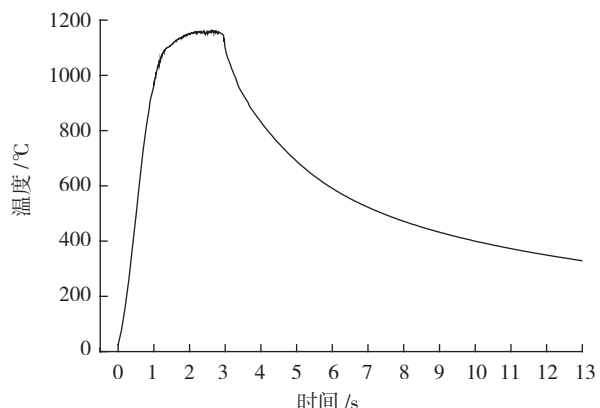


图4 焊缝中心温度变化模拟结果

Fig.4 Simulation results of the temperature variation at weld center

果的比较。图中6mm处热电偶测温点经焊后打磨观察发现,位于焊缝界面处,热电偶测温显示接头特定点温度超过1223℃;另一热电偶测温点距离界面3mm,处在缩短量范围内,在接触到摩擦界面后被摩擦剪应力挤断,被挤断前热电偶测得最高温度达到1212℃。模拟温度场和实际测量特殊点温度变化吻合,低温区相对误差不超过16%,最高温度误差不超过6.1%。

特殊点热电偶测温显示,开始时升温速率较低,这是因为在初始摩擦阶段及过渡阶段,摩擦界面产生的热量基本没有被飞边带走,并主要通过热传导的形式向远离界面处传递能量。当焊接过程进入稳定摩擦阶段以后,材料磨耗的速率较快,摩擦焊接进入动态平衡阶段,此时界面的热量大部分被飞边带走,向基体方向的传导只占很少一部分。只有当摩擦界面靠近测温点时,界面温度才会急剧上升,此时对应升温速率变大。

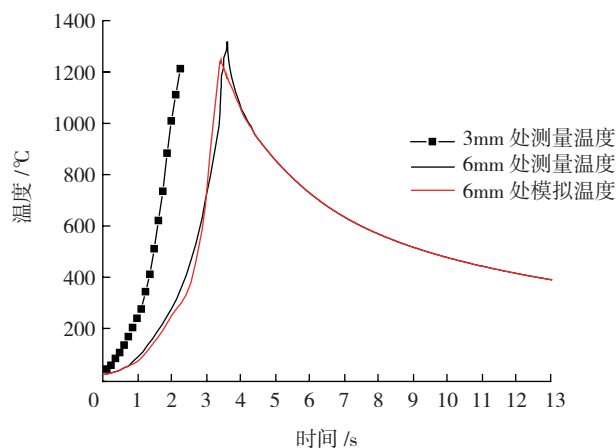


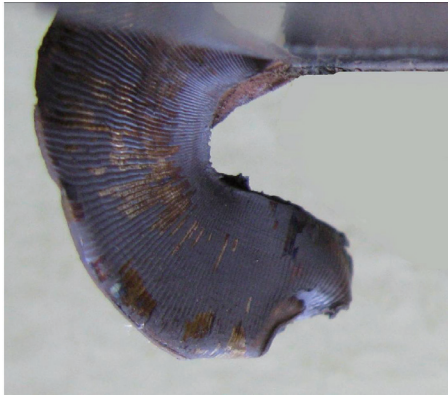
图5 测量温度与模拟温度的比较

Fig.5 Comparisons of measured and simulated temperatures

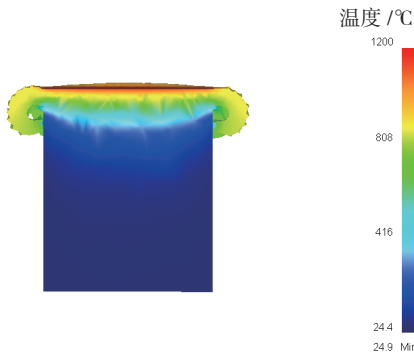
2.2 飞边及缩短量

图6(a)中为实际焊接飞边形貌,表面有波浪状条纹。这是由于试件在焊接过程中受挤压及往复直线运动造成的。在线性摩擦焊过程中,当摩擦界面附近金属达到粘塑性状态后,在轴向摩擦压力作用下,界面金属不断被挤出形成飞边,与此同时,振动工件在向最大振幅方向运动时会在其前端将附近金属挤出,而在回到中间位置时会把这部分金属留在飞边上,周而复始,形成飞边表面的波浪状条纹。在每一个振动周期中,工件在两处飞边上会各形成一条波纹。图6(b)为TC4-DT钛合金LFW模拟得到的3s时飞边形貌,飞边形貌与实际形貌符合,证明模拟方法可行,可以反映实际焊接过程中的金属流动情况。

模拟计算得到单个工件的缩短量为6.03mm,对称后焊接过程缩短量为12.06mm。实际试验焊后测量计



(a) 实际焊接



(b) 3s 时模拟

图6 模拟与实际焊接飞边形貌对比
Fig.6 Comparisons of actual and simulation flash morphology

算出 TC4-DT 在此工艺参数下的缩短量为 12.64mm, 可见模拟结果准确度较高, 相对误差不超过 4%。

3 结论

(1) 焊接界面中心温度在 1s 内升到 1000℃ 以上。随着焊接过程的进行, 界面温度场逐步均匀, 界面温度升到不低于 1223℃, 缩短量不断增加。这说明线性摩擦焊稳定摩擦阶段界面最高温度超过 1200℃。

(2) 通过试验证明文中建立的模拟方法可靠, 对飞边形貌模拟较准确, 能反映实际焊接过程中的金属流动情况, 可以用来预测线性摩擦焊温度场和轴向缩短量。

参考文献

[1] 袁鸿, 余槐, 王金雪, 等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能. 材料工程, 2007, 21(8): 17-19.
[2] 李辉, 赵永庆, 曲恒磊, 等. 损伤容限型 TC4-DT 合金疲劳裂纹扩展行为研究. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(6): 963-967.
[3] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2004(11): 56-58.
[4] Li W Y, Ma T J, Li J L. Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy: Effects of processing parameters. Materials and

Design, 2010, 31: 1497-1507.

[5] Ceretti E, Fratini L, Giardini C, et al. Numerical modelling of the linear friction welding process. Int J Mater Form, 2010, 3(S1): 1015-1018.

[6] Sorina-Müller J, Rettenmayr M, Schneefeld D, et al. FEM simulation of the linear friction welding of titanium alloys. Computational Materials Science, 2010, 48: 749-758.

(责编 谷雨)

(上接第 56 页)

晶断裂, 在断口表面分布着极浅的韧窝。

4 结论

(1) TC17 钛合金的母材、焊缝及热影响区的断裂韧性表现为母材 > 热影响区 > 焊缝 K_{Ic} 。

(2) TC17 钛合金惯性摩擦焊的焊接接头由焊缝区、变形晶区、热影响区及母材组成。其中焊缝区为细小的等轴晶组织, 变形晶区晶粒较大, 晶粒存在着较大的纵横比, 热影响区的晶粒粗大, 母材晶粒较大, 晶内为 $\alpha + \beta$ 相的网篮状组织。

(3) TC17 母材拉伸试样的断裂模式为韧性断裂, 在断口表面分布着大量的韧窝; TC17 焊缝区和热影响区拉伸试样的断裂模式为脆性沿晶断裂, 热影响区晶界处可以观察到小的脆性相及大量的二次裂纹。

参考文献

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第 2 版)(第 4 卷, 钛合金). 北京: 中国标准出版社, 2001.
[2] 束德林. 金属力学性能. 北京: 机械工业出版社, 1987: 113-117.
[3] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 34-40.

(责编 深蓝)

(上接第 60 页)

[3] Fersini D, Perondi A. Analysis and modeling of fatigue life of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75: 790-803.

[4] Ericsson M, Jin L Z, Sandstrom R. Fatigue properties of friction stir overlap welds. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 57-68.

[5] Buffa G, Campanile G, Fratini L, et al. Friction stir welding of lap joints: influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. Materials Science and Engineering A, 2009, 519: 19-26.

[6] Cao X, Jahazi M. Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy. Materials and Design, 2011, 32(1): 1-11.

[7] Kumar K, Kailas S V. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1): 367-374.

(责编 谷雨)