

2024 厚板铝合金温度场检测分析*

Temperature Measuring and Analysis for Friction Stir Welded Thick Plate 2024 Aluminum Alloy

西北工业大学 周卫涛 刘金合
中国搅拌摩擦焊接中心 董春林 栾国红

[摘要] 通过对 13mm 厚 2024 铝合金进行搅拌摩擦焊工艺实验,检测了焊接过程中沿水平焊缝 X 方向、垂直焊缝 Y 方向和焊缝厚度 Z 方向上特征点的三维温度分布,并分析了焊接参数对温度场分布的影响。

关键词: 铝合金 搅拌摩擦焊 温度场

[ABSTRACT] Based on the friction stir welding experiment about 13mm thick 2024 aluminum alloy, the three-dimensional temperature distribution which are along the welding seam (X), the vertical direction (Y) and the weld seam thickness (Z) is measured, and impact of the welding parameters upon temperature distribution is analyzed.

Keywords: Aluminum alloy Friction stir welding Temperature field

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是由英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)于 1991 年提出的一种新型的焊接技术,主要解决一些熔焊性能差的金属,如铝合金、钛合金、镁合金等^[1]金属结构的焊接难题。

搅拌摩擦焊温度场是进行焊接力学分析、质量预测和焊接应力应变场模拟的基础。搅拌摩擦焊传热过程直接决定了焊缝和热影响区焊后的微观组织、残余应力与变形、焊缝金属的塑性流动和接头力学性能。因此研究搅拌摩擦焊过程中温度场的规律,对优化焊接工艺、提高焊接质量、改进焊接设备以及发展新的焊接技术均有重要的理论和现实意义。国内外对于温度场的研究比较多,但是一般是研究 1 个或 2 个方向上温度场的分布^[2-4]。本文对于焊接过程 X、Y、Z 3 个方向上的温度场分布进行了较全面的检测和分析。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料和设备

试验材料选用 2024-T351 铝合金轧制板,尺寸为 300mm × 100mm × 13mm;焊接试验在中国搅拌摩擦焊中心自主研发的 FSW-1DB-025 型悬臂式焊机上进行;

搅拌头尺寸:搅拌针长度为 12.8mm、轴肩直径为 24mm、倾角 2.5°;特征点温度检测采用热响应快的镍铬-镍硅 K 型筒装热电偶,该种热电偶在 0~900℃范围内的测量误差为 ±2.5℃;温度采集设备为 TYZX01-16 多通道温度采集系统,数据采集频率为 100Hz。

1.2 试验方法

首先在试板上加工 $\phi 1.5\text{mm}$ 的盲孔,用于安装热电偶,盲孔位置如图 1、2 所示。试验分为两组进行,第一组检测沿焊缝 X 方向(图中 1~8,1~4 检测前进侧,5~8 检测后退侧)和垂直焊缝 Y 方向(图中 A~H, A~D 检测前进侧, E~H 检测后退侧)特征点的温度分布;第二组通过与第一组的比较检测厚度 Z 方向上特征点的温度分布。图中 X 方向黑实线为焊缝,从焊缝上表面向下为 Z 方向。试验焊接工艺参数:旋转速度 300~600r/min、焊接速度 80~120mm/min。

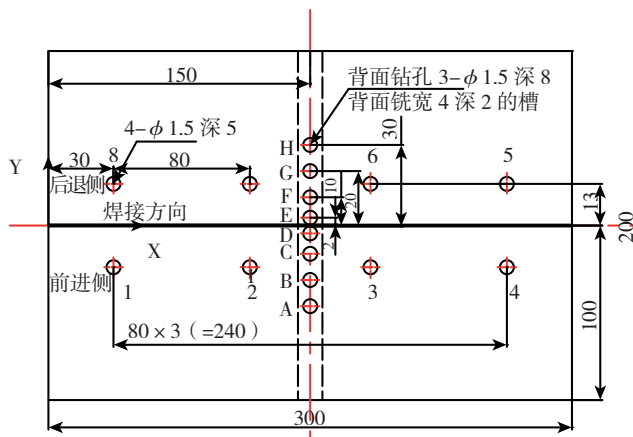


图1 第一组盲孔布置

Fig.1 Blind hole arrangement of first group

2 试验结果及分析

2.1 沿焊缝 X 方向特征点温度分布曲线及分析

沿焊缝 X 方向上试验结果选取具有代表性的特征点温度曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知,焊接过程中各个特征点都经历了相同的温度变化。即先增大,当搅拌针到达该特征点时,温度达到峰值,然后逐渐减小,且呈升温快、降温慢的温度

* 国家自然科学基金(51075334)资助。

变化趋势。这是由于搅拌摩擦焊热输入主要由搅拌头与母材的摩擦产生,当搅拌头到达特征点时产生大量热,使升温较快,而后由于后续的焊接搅拌产热又使降温较缓。

图4为不同焊接参数下特征点峰值温度曲线,从图中可知焊缝同一侧后一个特征点的峰值温度较前面的特征点峰值温度逐渐变大。这是由于焊接刚开始时,试件、垫板和工作台都处于室温,散热较快,随着焊接的进行温度逐渐升高,焊接到最后一个特征点时,试板温度最高,而且散热较慢,因此峰值温度最高。

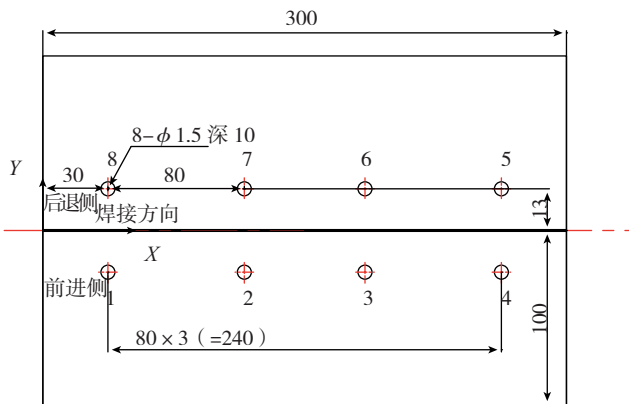


图2 第二组盲孔布置

Fig.2 Blind hole arrangement of second group

比较图4中400/80和400/120、300/80和300/120各个特征点峰值温度可以发现,由于旋转速度不变,摩擦产热相同,当焊接速度增加时,同一位置的热输入降低。因此旋转速度不变时,随着焊接速度的增加,特征点峰值温度有所下降。比较400/80和300/80、400/120和300/120各个特征点峰值温度可知,由于焊接速度一定,当旋转速度增加时,同一位置摩擦产热增大,热输入

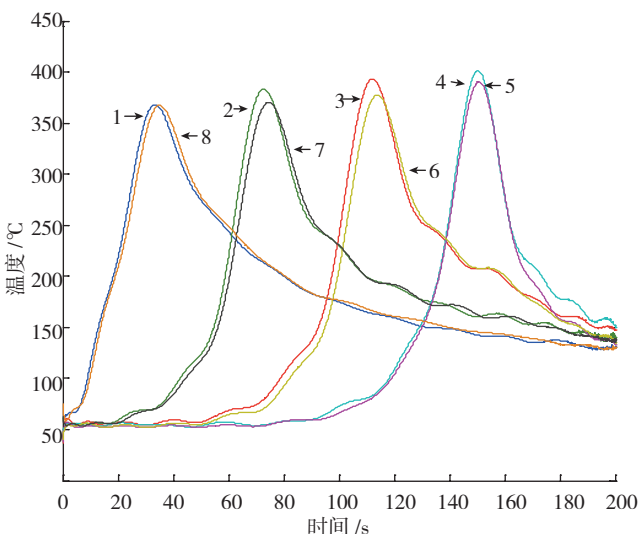


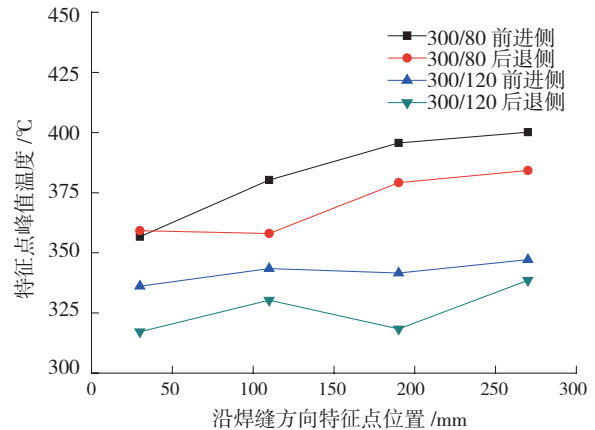
图3 沿焊缝X方向典型特征点温度变化曲线

Fig.3 Characteristic point temperature curve along the weld in X direction

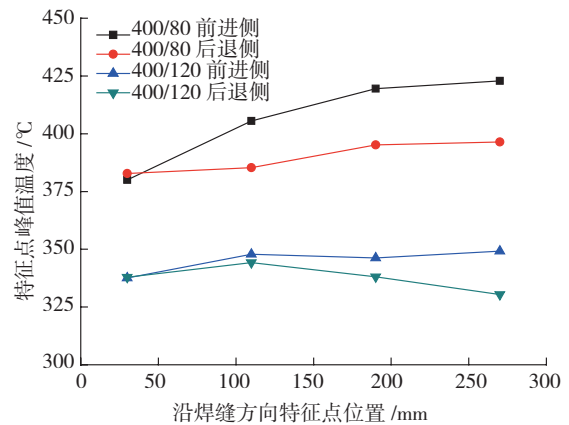
变大,使得特征点峰值温度有所增大。

2.2 垂直焊缝Y方向特征点温度分布曲线及分析

图5给出了垂直焊缝Y方向典型特征点温度分布曲线。



(a) 300/80、300/120下特征点峰值温度比较



(b) 400/80、400/120下特征点峰值温度比较

图4 沿焊缝X方向特征点峰值温度分布曲线

Fig.4 Feature point peak temperature curve the weld in X direction

由图5可知,垂直焊缝Y方向特征点在焊接过程中经历了和X方向相同的温度变化趋势。特征点峰值温度随着距焊缝中心距离的增加而减小。在焊缝同一横截面上,焊接热输入相同,而随着特征点远离焊缝中心,热量由于试板的热传导和散热使得特征点峰值温度逐渐降低。比较图4和图5中前进侧和后退侧峰值温度不难看出,前进侧温度较后退侧温度一般高10~20℃。观察焊后焊缝宏观形貌可知,飞边大部分出现在后退侧,由于飞边的存在使得焊接过程中后退侧热量散失较多;另外前进侧搅拌针旋转方向和焊接方向一致,后退侧旋转方向和焊接方向相反,这就使得前进侧速度相对后退侧较高,从而造成两侧温度差异。另外,从图4中可以看到在焊接阶段由于散热较快,而且飞边较少导致起始阶段前进侧和后退侧峰值温度基本相同。

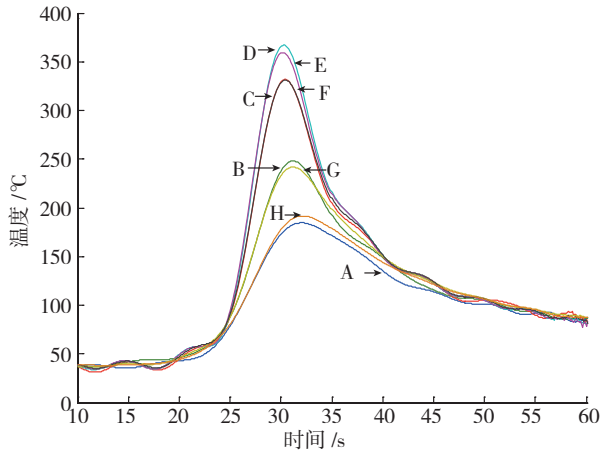


图5 垂直焊缝Y方向典型特征点温度变化曲线

Fig.5 Temperature curves vertical weld

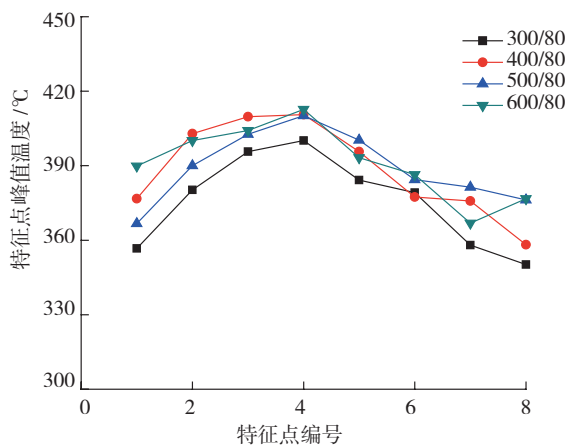


图6 不同旋转速度下特征点峰值温度比较

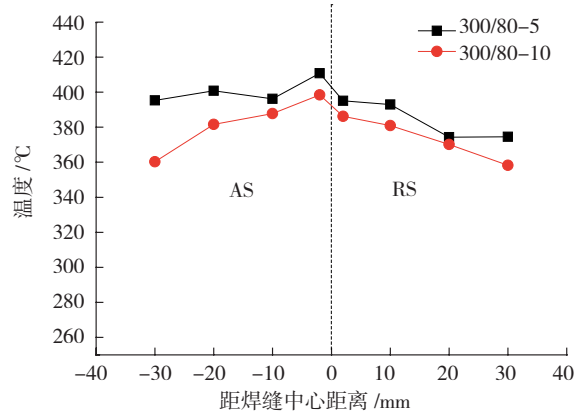
Fig.6 Peak temperature in different rotation speed

比较图6中各曲线可知,峰值温度随着旋转速度有一定的增加,旋转速度从400~600r/min的特征点峰值温度基本都高于300r/min时的峰值温度;但是当旋转速度为400r/min、500r/min和600r/min时,特征点最高峰值温度变化不大。这是由于当旋转速度 ω 和焊接速度 v 比值达到一定的值时,焊缝金属和搅拌针之间的摩擦系数一定,产热基本不变。因此特征点峰值温度在一定范围内随 ω/v 的增加而增大,反之随 ω/v 比值降低而降低。

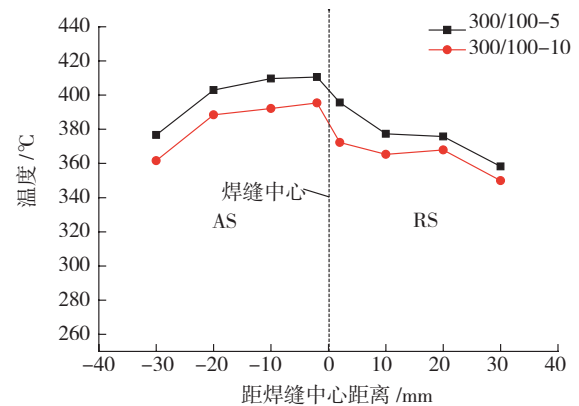
2.3 厚度Z方向特征点峰值温度分布曲线及分析

厚度Z方向不同工艺参数下特征点峰值温度曲线如图7所示,其中300/80-5表示焊接参数为300r/min,80mm/min,距上表面5mm处特征点峰值温度。

观察图7中300/80-5和300/80-10可知,在焊接参数相同时,特征点距上表面5mm时,峰值温度在400℃左右变化;而10mm时,峰值温度均在400℃以下。观察300/100-5和300/100-10,5mm时峰值温度均未超过而10mm时峰值温度。由此可知随着特征点距焊缝上表面距离的增加,峰值温度逐渐下降,这是由于搅拌摩擦焊热输入主要是由轴肩、搅拌针和母材的摩擦产生。其



(a) 300/80-5,300/100-10 特征点峰值温度比较



(b) 300/80-5,300/100-10 特征点峰值温度比较

图7 焊缝Z方向典型特征点峰值温度曲线

Fig.7 Peak temperature curve in Z direction

中轴肩与母材的摩擦生热约占86%^[5],高速旋转的轴肩在焊接下压力的作用下和母材摩擦产生摩擦热;另外,试验中搅拌头为锥形,焊缝上部搅拌针与母材接触处线速度较下部高,摩擦产热多,且焊缝下部试板和垫板的对流散热较上表面的试板和空气的对流散热多,因此产生了在焊缝厚度Z方向上随着特征点距上表面距离的增大而使峰值温度降低,温度分布呈上高下低的趋势。

3 结论

通过在试板X、Y、Z3个方向上布置热电偶,分析实验结果可得以下结论:

(1)在焊缝X方向上,特征点温度经历了升温-峰值-降温的过程;焊接结束时特征点峰值温度较开始时有所升高。

(2)在焊缝Y方向上,随着特征点距焊缝中心距离的增加,峰值温度逐渐降低,呈近高远低的温度梯度。

(3)在厚度Z方向上,随着特征点距焊缝上表面距离的增加,峰值温度逐渐降低,呈上高下低的温度梯度。

(4)前进侧特征点峰值温度较后退侧峰值温度通

(下转第87页)

4 优化结果

粒子数目取 $a=20$,进行随机振动分析时使用速度谱,频率范围为0.1~300Hz,激励方向为 Y 方向,程序首先随机初始化粒子种群可粒子速度,然后通过式(10)和(15)进行迭代计算,自变量 $x(a,1),x(a,2),x(a,3),x(a,4)$ 以及优化目标 f 的优化历程曲线分别如图5和图6所示。

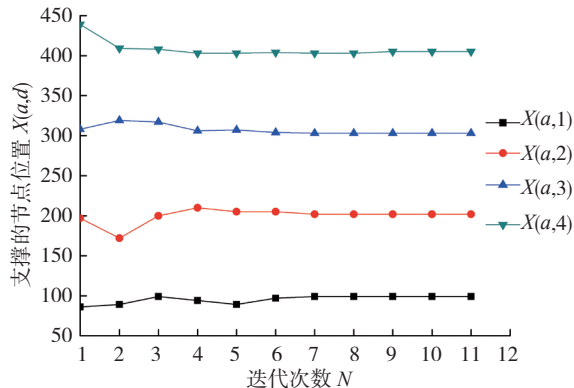


图5 支撑节点位置的优化历程曲线

Fig.5 Optimized curves of supports' node location

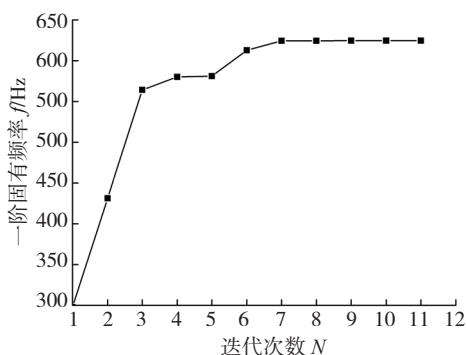


图6 一阶固有频率的优化历程曲线

Fig.6 Optimized curve of first natural frequency

粒子群算法在第8步的时候能够收敛到最优解。如表1所示,此时支撑所在的节点位置分别为, $x(a,1)=99, x(a,2)=202, x(a,3)=303, x(a,4)=405$ 。系统的疲劳损伤累积可靠度为0.9953673,最优解 $f=624.5569\text{Hz}$,这个频率跳出了随机激励的频率范围,因此系统能够有效避免共振的发生。

表1 优化前后各变化量的比较

	自变量 $x(a,1)$	自变量 $x(a,2)$	自变量 $x(a,3)$	自变量 $x(a,4)$	一阶固有 频率 f/Hz
优化前	86	197	308	439	297.7392
优化后	99	202	303	405	624.5569

5 结论

本文结合有限元和改进粒子群优化方法,在疲劳累

积损伤可靠度不低于0.99的约束下,以一阶固有频率最大为目标,对飞机液压管道进行支撑动力学优化。研究表明,粒子群算法对于管道支撑动力学优化是合理、有效的。通过支撑位置的合理优化,可以在保证系统疲劳可靠度的同时提高一阶固有频率,降低管道振动,增强结构抗振能力,为以后的工程实践提供指导作用。

参考文献

- [1] Lee K Y, El-Sharkawi M A. Modern heuristic optimization techniques with applications to power systems. IEEE Power Engineering Society, 2002,2: 45-51.
- [2] Van den Bergh F, Engelbrecht A P. A new locally convergent particle swarm optimizer. IEEE Conference on Systems, 2002, 3: 94-99.
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. In IEEE International Conference on Neural Networks, 1995,4: 1942-1948.
- [4] 邱晔,牟伟强,魏生民,等.基于层次分析法与粒子群算法的飞机装配公差多目标优化.航空制造技术,2010(16): 66-69.
- [5] 孙光永,李光耀,陈涛,等.多目标粒子群优化算法在薄板冲压成形中的应用.机械工程学报,2009,45(5): 153-159.
- [6] Crandall S H, Mark W D. Random vibration in mechanical systems. New York:Academic Press, 1963.
- [7] Clerc M, Eberhart R. Particle swarm explosion stability and convergence in multidimensional complex space. IEEE Transactions On Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-88.
- [8] 李丽,牛奔.粒子群优化算法.北京:冶金工业出版社,2009.
- [9] 高立群,葛延峰,孔芝,等.自适应和声粒子群搜索算法.控制与决策,2010,25(7): 1101-1104.
- [10] He S, Prempain, Wu Q H. An improved particle swarm optimizer for mechanical design optimization problems. Engineering Optimization, 2004, 36(5): 585-605.

(责编 深蓝)

(上接第83页)

常高10~20℃。

(5)在一定范围内特征点峰值温度随 ω/v 比值的增加而变大; ω/v 比值的减小而减小。

参考文献

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction stir butt welding: U.S, NO.5460317[P].1995-24.
- [2] 苏晓莉,王快社,周俊杰,等.铝合金搅拌摩擦焊接参数对温度场的影响.轻合金加工技术,2006,34(2):40-42.
- [3] 徐伟锋,刘金合,栾国红,等.厚板铝合金搅拌摩擦焊接温度场的检测与分析.机械科学与技术,2008,27(9):1159-1162.
- [4] 苏晓莉,王快社,周俊杰.铝合金搅拌摩擦焊接温度场检测.焊接技术,2006,28(1):12-14.
- [5] Schmidt H, Hattel J, Wert J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding. Modeling and Simulation in Materials and Engineering,2004(12):143-151.

(责编 亦非)