

钛合金薄板带热沉的 TIG 焊温度场

李 菊¹, 关 桥², 史耀武¹, 郭德伦², 张崇显², 杜欲晓²

(1. 北京工业大学 材料学院, 北京 100022; 2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘 要: 采用数值模拟和试验相结合的方法比较研究了钛合金薄板常规钨极氩弧焊(TIG)及带热沉的 TIG 焊焊接过程中温度场的形态与演变历史。相对于预置温度场的静态焊接应力和变形控制技术,带热沉的 TIG 焊接技术又称动态控制低应力无变形焊接技术(DC-LSND, Dynamically controlled low stress no-distortion)。该技术中,在热源之后紧随起冷却作用的热沉装置。研究表明,采用 DC-LSND 技术在热沉附近形成了中间低两边高的马鞍形温度场,热沉作用部位存在温度低谷,该温度区冷却收缩造成对附近高温区的拉伸作用,使焊缝不协调应变减小,焊缝中的残余拉应力降低,防止了焊接变形的产生。对 DC-LSND 畸变温度场的研究是了解这种方法控制变形机理的前提。

关键词: 钛合金; 热沉; 动态低应力无变形焊接; 温度场; 数值分析

中图分类号: TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2003)01-69-04



李 菊

0 序 言

随着航空航天工业的快速发展,薄壁焊接结构的应用日趋广泛,但是薄壁构件在焊后产生的残余应力和失稳变形十分严重。与静态(在焊件上预置温度场)控制应力和变形的焊接技术相对应,北京航空制造工程研究所研究开发的带热沉的控制应力和变形的焊接技术,亦称动态控制低应力无变形焊接新技术(DC-LSND, Dynamically controlled low stress no-distortion),采用可跟随焊接热源移动的热沉装置,形成一个热源-热沉多源系统,在焊接区产生局部可控的畸变温度场和相应的热弹塑性应力应变场,获得了低焊接残余应力、无失稳变形的薄壁焊接结构^[1,2]。

众所周知,焊接过程中的不均匀加热和冷却是形成焊件内部热应力与变形的本质原因。为了探究动态控制低应力无变形焊接新技术的控制机理,有必要对该方法所形成的温度场与常规焊所形成的温度场进行对比研究。由于实际测量方法的局限性,采用现有实测方法无法得到焊接过程中焊缝中心的温度,因此作者采用三维有限元数值模拟和试验相结合的方法对在实际生产中得到广泛应用的钛合金 TC4 焊接过程中的温度场进行分析。

1 动态控制低应力无变形焊接法简介

动态控制低应力无变形焊接法即是在电弧后适当部位,设置一个能跟随电弧移动并对焊缝产生急冷作用的热沉,与焊接电弧形成一个多源系统,该系统装置示意简图如图 1 所示。

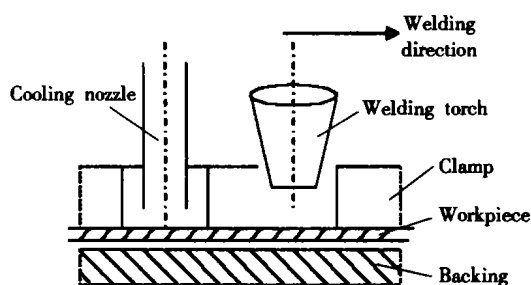


图 1 DC-LSND 焊接装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamically controlled low stress no-distortion welding

2 计算模型

2.1 有限元网格及边界条件

研究采用大型商业软件 ANSYS 对 TC4 钛合金平板对焊情形进行分析。试件的尺寸为 320 mm × 300 mm × 2 mm,考虑到结构的对称性,取其一半进行三维数值模拟。有限元网格如图 2 所示,其中最小单元尺寸为 1 mm × 1 mm × 2 mm,共有 3 460 个单

元,7 292 个节点。

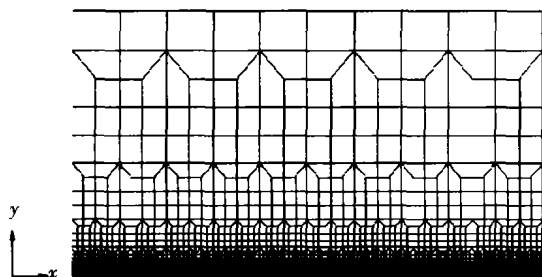


图2 有限元网格
Fig.2 Mesh of FEA

2.2 热源及热沉模型

焊接电弧加热斑点上比热流的分布近似地以高斯数学模型来描述,根据这一关系,距加热中心任一点 A 的比热流可表示成如下形式^[3],即

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right), \quad (1)$$

式中: $q(r)$ 为 A 点的比热流; q_m 为加热斑点中心最大比热流; r_0 为电弧有效加热半径; r 为 A 点离电弧加热斑点中心的距离。

为避免钛合金在高温下的氧化,在 TC4 的 DC-LSND 焊接过程中热沉的冷却介质采用氩气雾化冷却水。在有限元数值研究中,试件与雾化冷却水之间的换热以单个圆形射流冲击传热模型来模拟,表达式^[4]如下

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0.42}} = G\left(\frac{r}{D}, \frac{H}{D}\right) \cdot F(Re), \quad (2)$$

式中: $\overline{Nu}$ 为平均努谢尔特数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数,各参数的具体定义及计算方法参见文献[4],在此不再重述; r 为被冷却范围的半径; D 为冷却介质喷嘴直径; H 为喷嘴到传热面之间的距离; G 是 $\frac{r}{D}$, $\frac{H}{D}$ 的函数; F 是 Re 的阻数。

在数值研究中热沉和热源都以一定的焊接速度移动。

2.3 计算参数

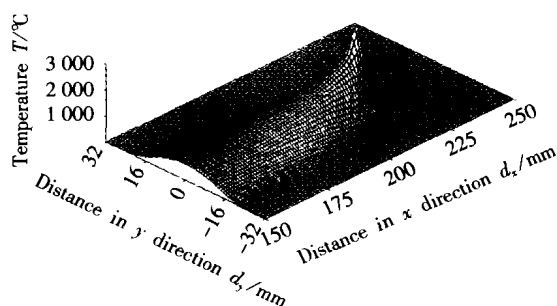
研究对常规的和添加辅助热沉的自动钨极氩弧焊分别进行有限元模拟。焊接电流 $I = 200$ A, 电弧电压 $U = 10$ V, 焊接热源的热效率 $\eta = 47.8\%$ ^[5], 试件背面无铜垫板。热源及热沉的行走速度均为 3.5 mm/s, 两者中心相距 25 mm。热沉冷却介质喷嘴直径 D 为 $\phi 1.3$ mm, 冷却介质流量为 280 mL/min。除热沉外,常规焊及动态低应力无变形焊接的数值模拟的工艺参数均相同。

TC4 钛合金的材料热物性参数由文献[6]获得,它们都是温度的函数。

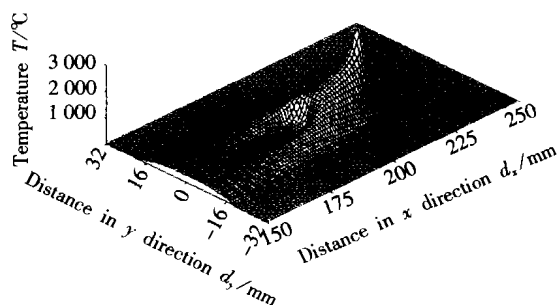
3 计算结果及分析

3.1 温度场整体分布及等温线图

为了获得对试件温度场的总体认识,对常规焊和 DC-LSND 焊焊接过程中达到准稳态后某一时刻的温度场进行分析。文中选取焊接进行至 62.5 s, 电弧中心行走至 $x = 219$ mm 时的温度场进行研究,该时刻试件上表面的温度场示于图 3 中。



(a) Conventional welding



(b) DC-LSND welding

图3 常规焊和 DC-LSND 焊温度场
Fig.3 Temperature fields in conventional and DC-LSND TIG welding

由图 3 可以看出常规焊和 DC-LSND 焊温度场有着显著的不同,与常规焊相比,DC-LSND 焊温度场呈马鞍形,在热沉处温度陡降,形成温度低谷。

常规焊及 DC-LSND 焊进行至 62.5 s 时的等温线示于图 4 中,由于结构的对称性,仅给出试件一半的等温线。

由图 4a 可见,常规焊熔池前沿等温线高度密集。

与常规焊相比,DC-LSND 焊同一温度的等温线的范围小于常规焊的相应值。表明热沉的使用大大降低了试件上的温度。在热源与热沉之间,等温

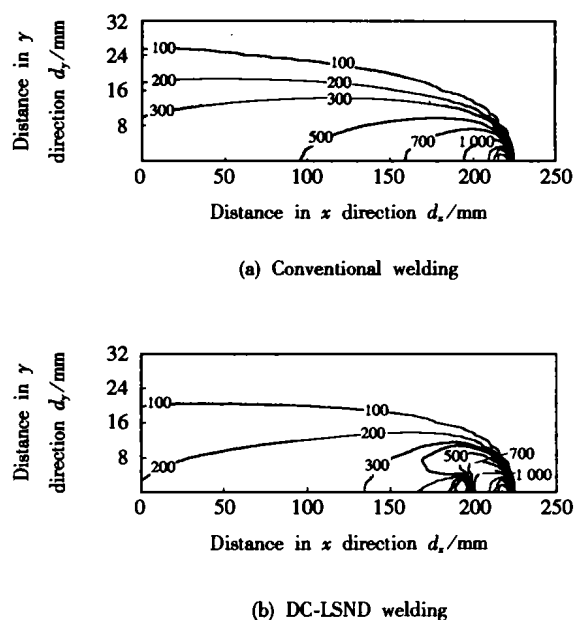


图4 常规焊和DC-LSND焊温度场等温线

Fig.4 Isotherms in conventional and DC-LSND TIG welding

线高度集中,并在热沉前方回缩,产生畸变。在板长方向上,热沉处温度最低,其后,由于周围高温金属的作用,温度又有所升高,但仍远低于常规焊的相应值。沿热沉作用部位的板宽方向上,常规焊焊缝中心温度最高,随着与焊缝中心线距离的增加,温度逐渐降低;DC-LSND焊中,在近缝处温度最大,焊缝中心温度小于近缝区温度。由此可见,DC-LSND焊中热沉的存在,使试件上整体温度场发生畸变。

3.2 距焊缝中心线不同距离处点的温度循环

由于焊接是典型的不均匀加热过程,各点所经历的热及相应的应力应变循环存在很大不同,作者考察了常规焊和DC-LSND焊焊接过程中不同位置处的温度历史。考察点位于 $x = 192$ mm的横向截面上,距焊缝中心线的距离分别为0 mm, 3 mm, 5 mm, 10 mm, 16 mm。

由图5a可见,常规焊中各点温度历史趋势相同,热源未到时温度基本不变。随着热源的临近与到来,温度迅速升高并达到最高;而后随着电弧远去及冷却过程的进行,温度逐渐降低。焊缝中心温度最高,温度上升和冷却速度最大。随着离焊缝的距离的增加,各点所能达到的温度最高值降低,温度上升速度和冷却速度均下降。

从图5b中可以看出,DC-LSND焊中,距焊缝中心较远的三点($y = 5$ mm, 10 mm, 16 mm)温度历史与常规焊相似。但焊缝中心及距焊缝中心线较近的点($y = 0$ mm, 3 mm),温度循环与常规焊相应点有

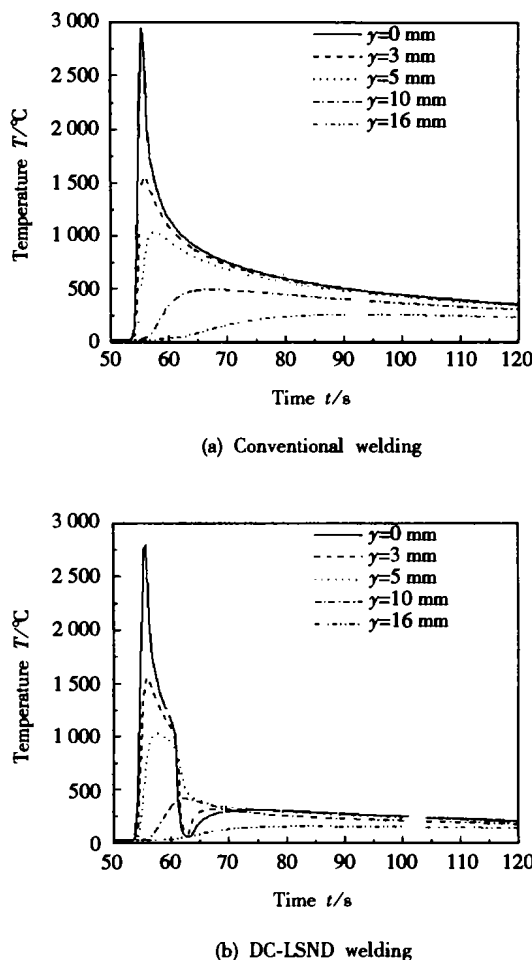


图5 距焊缝中心不同距离点的温度循环

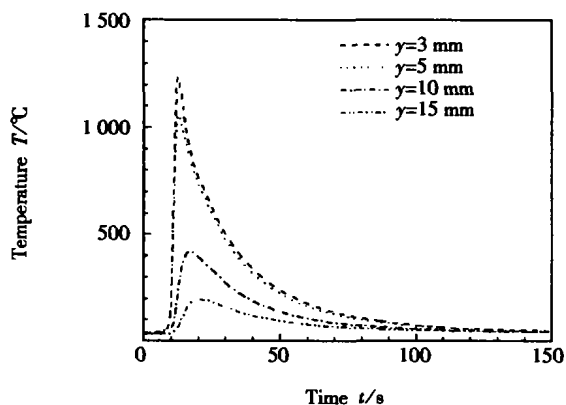
Fig.5 Temperature histories of points with different distances to central line of weld

所不同。DC-LSND焊中由于有热沉作用,热沉作用时刻,热沉作用区温度急剧下降,在热源与热沉相继经过的较短的时间内产生极大的温度梯度。在热沉经过之后,该部位温度重新升高,在温度历史曲线上形成低谷。由此可见,两种焊接方法中焊缝所承受的热循环不同,由此而产生的热应力热应变循环也不同。DC-LSND焊中,正是热沉造成的急冷收缩,使焊缝及附近区域受到较大的拉伸作用,减小了焊缝的不协调应变,从而达到消除变形,降低应力的效果。

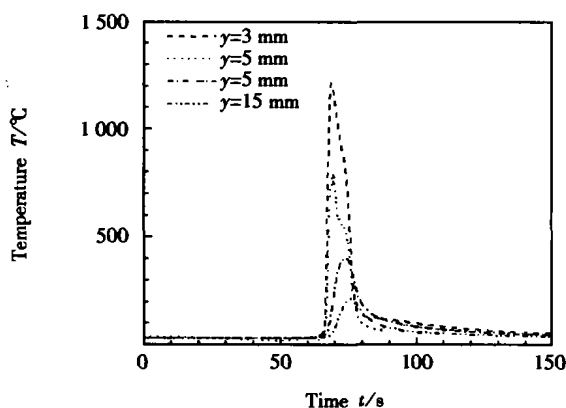
4 试验研究结果

研究同时对采用常规TIG焊和DC-LSND TIG焊进行TC4平板对接时的温度历史进行了试验测量。试件尺寸为400 mm × 170 mm × 2 mm,焊接电流200 A,电弧电压10 V,焊接速度12.7 m/h。DC-LSND TIG焊热沉与热源相距25 mm。由于焊缝中

心的温度很难测出,因而分别对距焊缝中心3 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm 不同位置点的温度历史进行了测量,温度测量采用镍铬-镍铝热电偶。测量结果如图6所示。



(a) Conventional welding



(b) DC-LSND welding

图6 试验测得的距焊缝中心线不同位置点的温度历史
Fig.6 Experimentally measured temperature histories of points with different distances to central line of weld

由图6a可以看出,试验测得的温度循环历史与数值模拟的结果趋势一致,距焊缝中心线距离越近,焊接过程中所能达到的温度越高,随着冷却过程的进行,温度逐渐降低,这一结果证明了数值模拟的正确性。常规焊 $y = 3$ mm处所能达到的最高温度约为1270℃,数值模拟得出该点温度约为1570℃。由于实测温度的热电偶是埋入距试件底面一定距离的深处,而数值计算所处理的是试件上表面温度,由于上下表面的温差及计算模型较试验条件进行了一定程度的简化,因而数值计算所得结果高于实测值。DC-LSND焊的温度(见图6b)在某一时刻急剧降低,该试件停留在高温区的时间短,尤其在靠近焊缝

中心的3 mm处,DC-LSND焊停留在高温区的时间较常规焊短得多,而且 $y = 3$ mm、 $y = 5$ mm的冷却速度比 $y = 10$ mm、 $y = 15$ mm的冷却速度快得多,这些均体现了热沉在焊接中的急冷作用。由此也表明了试验测得的温度分布趋势同数值分析一致,验证了数值模拟的正确性。DC-LSND焊的焊缝中心线上($y = 0$ mm处)的温度曲线未能用实测的方法获得,因为热电偶必须经受电弧高温和金属熔化形成熔池并凝固的过程。

马鞍形的温度场将会对应力应变场产生影响,降温收缩使热源与热沉之间的高温金属受到较大的拉伸作用,可减小焊缝的不协调应变,并达到消除变形,降低应力的效果。

5 结 论

(1) DC-LSND焊中,由于热沉的采用,在焊缝处形成了马鞍形温度场,热沉作用部位处于该温度场的低谷。

(2) 无论是常规焊还是DC-LSND焊,距焊缝中心线距离不同的点经受不同的热循环。距焊缝中心线距离越近,焊接过程中所能达到的温度越高,温度上升速度越大,冷却速度越大。热沉作用使焊缝区在热源与热沉之间产生了陡降的大温差与最大的温度梯度。

参考文献:

- [1] Zhang C X, Guan Q, Guo D L. Study on application of dynamic control of welding stress and distortion in thin aluminium elements [C]. Proc. of the Int. Symp., JWS, Nagoya, 1996. 539 ~ 544.
- [2] 关 桥,张崇显,郭德伦. 动态控制薄板构件低应力无变形焊接法及其装置[P]. 中国专利:93101690.8,1993.
- [3] 陈 楚. 数值分析在焊接中的应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,1985.
- [4] 张崇显. 动态控制低应力无变形焊接技术研究[D]. 北京:航空航天工业部第六二五研究所,1993.
- [5] 关 桥,彭文秀,刘继达,等. 焊接热源有效利用率的测试计算方法[J]. 焊接学报,1982,3(1):10 ~ 23.
- [6] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社,1988.

作者简介:李 菊,女,1970年出生,博士研究生。主要从事焊接结构的数值模拟研究工作。发表论文4篇。

Email: lijuxin@yahoo.com