

热源与热沉的距离对焊接接头应变影响研究^{*}

Research on Influence of Distance Between Arc and Heat Sink on Welding Strain

中航工业北京航空制造工程研究所 李菊 杜欲晓 关桥 郭德伦

[摘要] 热源与热沉的距离 D 是动态控制低应力无变形焊接技术的关键参数之一。采用有限元技术开展了热源与热沉中心的距离对焊接接头应变影响的研究。研究发现:冷却介质的急冷作用使得热源与热沉之间的温度陡降,温度梯度变大,热沉作用处成为焊缝中心线上温度最低的位置;不同的 D 值引起的焊缝中心点的温度历史不同,塑性应变的历史不同,残余态结果也不同。热源与热沉之间距离越近,拉伸作用越强。热源与热沉中心的距离较近时,可以产生大于加热阶段形成的压缩塑性应变的拉伸塑性应变,从而不仅补偿加热时产生的缩短应变,而且还使焊缝中存在拉伸塑性应变。

关键词: 动态控制低应力无变形焊接技术 热源与热沉中心的距离 温度场 应变

[ABSTRACT] The distance between arc and heat sink is one of the most important parameters in DC-LSND welding technique. The influence of distance between heat sink and arc on strain in welded joint is studied. The results show that the temperature between arc and heat sink sharply reduced and the temperature of the point under the heat sink center in the weld is the lowest among those of all the points in the weldment because of the cooling effect of coolant. The temperature histories are different for the points in the weld with different distances between arc and heat sink, so as to plastic strain histories and residual plastic strain histories. The nearest of the distance between arc and heat sink, the strongest of the stretching effect. When the distance between arc and heat sink is near enough, the tensile plastic strain can be bigger than the compressive plastic strain caused in the heating process, which not only compensates the compressive plastic strain, but also causes the tensile plastic strain in the weld.

Keywords: DC-LSND welding technique Distance between arc and heat sink Temperature field Strain

薄壁构件的焊接应力和变形是很复杂的,焊接残余

应力主要有纵向应力和横向应力,残余变形根据形貌可分为横向收缩、纵向收缩、角变形、失稳翘曲变形等。由于薄壁构件本身的刚度小、稳定性差,甚至在很小的残余应力作用下,构件就会产生局部翘曲和扭转等比较明显的失稳变形。因此,影响薄壁构件使用的焊接变形主要是失稳变形。钛合金弹性模量小,在相同的残余应力作用下,比钢的焊接变形大得多。尤其当选用的材料厚度在 0.5~4mm 范围内时,问题就更为严重,在焊接残余压应力作用下板壳很容易发生失稳变形^[1]。

与常规焊相比,动态控制低应力无变形焊接技术(DC-LSND 焊)能够改变焊接接头的应力应变分布,获得低应力无变形的焊接结果。但是当焊接工艺参数选择不当时,采用 DC-LSND 焊将不会得到理想的低应力无变形的效果。在所有的工艺参数中,热源与热沉之间的距离和热沉的冷却强度是影响焊接效果的两个重要决定性因素。为了给生产应用提供科学的指导,必须对这两个因素的影响规律进行研究。本文将对热源与热沉之间的距离对焊接接头应变影响进行数值模拟研究,以揭示它们的影响规律。

1 动态控制低应力无变形(DC-LSND)焊接法

动态控制低应力无变形焊接法是在焊接电弧后适当部位,设置一个随电弧移动并对焊缝产生急剧冷却作用的热沉,与焊接电弧形成一个多源系统,用以实现对焊接残余应力和变形的控制^[2]。该系统的示意图如图 1 所示。热沉的冷却介质选用氩气雾化冷却水,冷却强度可通过控制水的流量进行调节。水的雾化大大增强了

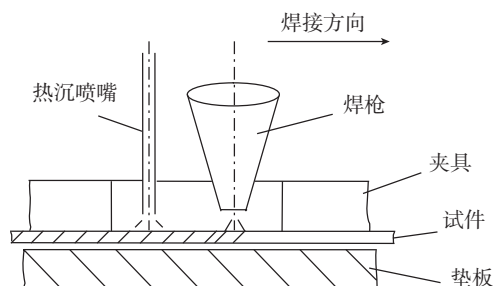


图1 DC-LSND焊接装置示意图

Fig.1 Diagram of DC-LSND

^{*} “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“先进焊接技术与装备创新能力平台”(2011ZX 04016-061)项目资助。

冷却效果。在焊接过程中对焊接电弧采取了特殊设计的保护措施,从而有效地防止了水蒸汽对电弧的干扰,保证了焊接过程的正常进行和良好的焊接质量。热沉中心与热源中心的距离可调,以改善控制效果。

2 计算模型

采用 ANSYS 商用有限元分析软件对钛合金 TC4 薄板的对焊进行分析,试件的焊后尺寸为 $320\text{mm} \times 300\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。考虑到结构的对称性,取其一半进行三维数值模拟。由于试件厚度与长宽相比相对较薄,厚度方向仅划分为一层,有限元网格的 XY 视图如图 2 所示。因焊缝及其相邻部位是研究的重点,所以这一区域有限元网格细分,其中最小单元尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。网格中共有 3460 个单元、7292 个节点。

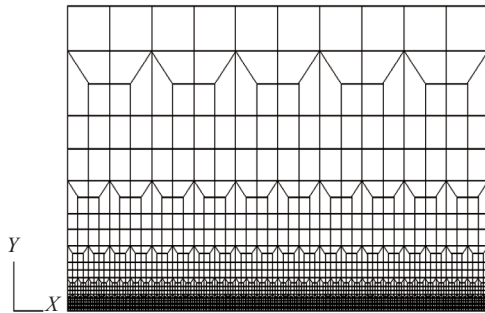


图2 有限元网格
Fig.2 Mesh of FEA

对常规的和带有热沉的钨极氩弧焊分别进行有限元模拟。焊接电流 200A,焊接电压 11.9V,焊接热源的有效利用率 η 为 67%^[3],试件背面有铜垫板。热源及热沉的行走速度为 12m/h。热沉冷却介质流量为 4L/min。在对常规 GTAW 焊及动态低应力无变形 GTAW 焊的数值模拟中,焊接参数均相同。

钛合金 TC4 的材料参数由文献 [4] 获得,屈服强度、弹性模量等力学性能参数均随温度而变化。

3 结果和讨论

3.1 热源与热沉的距离对温度场的影响

为了分析热源与热沉中心的距离 D 对温度梯度的定量影响,将 D 分别为 80mm、50mm、25mm 时试件上温度沿焊缝中心线的纵向分布示于图 3 中,此时焊接开始 60s。

图 3 中各温度曲线最低值是热沉中心,温度曲线最高值对应的是热源中心。无论热源与热沉距离 D 如何,冷却介质的急冷作用都使得热沉作用处成为焊缝中心线上温度最低的位置。从图 3 可以看出, $D=25\text{mm}$ 热源

与热沉之间的温度陡降,温度梯度最大, $D=50\text{mm}$ 次之, $D=80\text{mm}$ 温度梯度最小。在纵向上,热沉仅对其周围金属产生降温冷却作用,而对远处的高温金属冷却作用较弱,这从图 3 中离热沉较远时温度曲线与常规焊温度曲线重合可知。不同 D 值引起的不同的温度梯度势必对试件上的应力应变产生不同的影响。

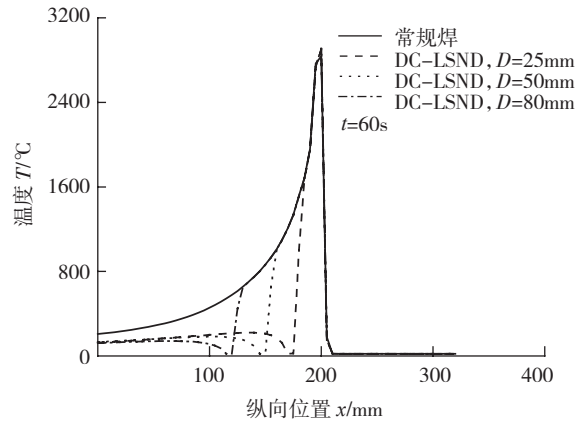


图3 温度沿焊缝中心线的纵向分布

Fig.3 Longitudinal distributions of temperature in weld centerline

3.2 热源与热沉的距离对焊接应变的影响

由于 DC-LSND 焊中热沉的采用改变了焊接瞬态温度场,那么,不同距离的 D 值对应变场的影响也将不同。通过对试件上焊缝纵向塑性应变历史的分析,可以得到热源与热沉的距离 D 对应变的影响规律。取试件中部 $x=160\text{mm}$ 截面上焊缝中心 $y=0\text{mm}$ 的点进行分析, D 值仍分别为 25mm、50mm、80mm。图 4 为有限元计算结果,为了与瞬态温度场的变化相对照,将各点的温度历史也画在了同一张图中。

不同的 D 值引起的焊缝中心 $y=0\text{mm}$ 点的温度历史不同,塑性应变的历史不同,残余态结果也不同。 $D=25\text{mm}$ 对应的试件焊缝中心残余态为拉伸塑性应变; $D=50\text{mm}$ 对应的试件焊缝中心塑性应变很小,几乎为零;而 $D=80\text{mm}$ 对应的试件焊缝中心残余态为压缩塑性应变。从图 4 可以看到, $D=25\text{mm}$ 相比 $D=50\text{mm}$ 和 $D=80\text{mm}$ 而言,热源与热沉之间距离较近,拉伸作用较强; $y=0\text{mm}$ 点在加热阶段所产生的压缩塑性应变小于常规焊的相应值,也小于采用另外 2 个 D 值进行 DC-LSND 焊的相应值;在冷却阶段由于热沉与热源之间温度梯度较大,拉伸作用使得温度处于力学熔点以上的高温金属产生较大的拉伸塑性应变,该拉伸塑性应变大于加热阶段产生的压缩塑性应变,即大于熔池熔化时该部位的缩短应变,因此,不仅补偿了这一缩短应变,而且还使焊缝中存在着拉伸塑性应变。与 $D=25\text{mm}$ 相比, $D=50\text{mm}$ 对应的热源与热沉距离较远,热沉对加热

阶段产生的压缩塑性应变没有影响;在冷却阶段,由于热沉的拉伸作用,热沉前方温度高于“力学熔点”的金属产生了拉伸塑性应变,从图4可以看到,这一拉伸塑性应变刚好补偿了加热阶段产生的缩短的不协调应变,使得残余不协调应变趋于0。对于 $D=80\text{mm}$ 情况,由于热沉与热源相距甚远,虽然在温度历史曲线上也可以看到温度的下降,但这一温差值相比前两种情况要小得多,而且,该点温度在热沉作用前很长一段时间内与常规焊曲线重合,虽然热沉在冷却阶段有所拉伸,但可以看到, $D=80\text{mm}$ 对应的 $y=0\text{mm}$ 点的塑性应变历史几乎与常规焊重合。综合以上分析可知,选取不同的热源与热沉的距离,对焊缝中塑性应变的发展影响不同,在讨论的3种情况下, $D=50\text{mm}$ 对应的焊缝在残余态塑性应变趋于0,进行DC-LSND焊控制变形的效果最好。

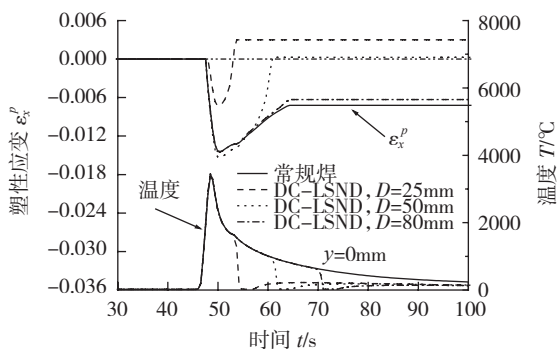


图4 热源与热沉距离对纵向塑性应变历史的影响
Fig.4 Influence of distance between arc and heat sink on longitudinal plastic strain histories

4 结论

(1) 热源与热沉中心的距离 D 是DC-LSND焊接技术的重要参数之一,无论热源与热沉距离 D 如何,冷却介质的急冷作用都使得热沉作用处成为焊缝中心线上温度最低的位置。在纵向上,热沉仅对其周围金属产生降温冷却作用,而对远处的高温金属冷却作用较弱。

(2) 热源与热沉中心的距离 D 不同,对应变场的影响不同。热源与热沉之间距离越近,拉伸作用越强。拉伸作用使得温度处于力学熔点以上的高温金属产生较大的拉伸塑性应变,热源与热沉中心的距离较近时,可以产生大于加热阶段形成的压缩塑性应变的拉伸塑性应变,由此不仅补偿加热时产生的缩短应变,而且还使焊缝中存在拉伸塑性应变。

参考文献

- [1] Q Guan. A survey of development in welding stress and distortion

controlling in aerospace manufacturing engineering in China. *Welding in the World*, 1999, 43(1):14-24.

[2] 关桥,张崇显,郭德伦. 动态控制的低应力无变形焊接新技术. *焊接学报*, 1994, 15(1): 8-15.

[3] 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. *焊接学报*, 1982, 3(1): 10-23.

[4] 中国航空材料手册编辑委员会. *航空材料手册*. 北京: 中国标准出版社, 1988. (责编 可岚)

(上接第104页)

起裂扩展区前缘的断口照片也显示断面以小刻面解理平台为主,为典型的准解理形貌,如图8所示。由此可以认为焊缝和熔合区试样的裂纹为脆性起裂特性,焊缝和熔合区的断裂韧性较差。

3 结论

针对薄壁结构完整性评估的需要,设计了测试平面应力断裂韧性的三点弯曲试样,并进行了GH4169焊接接头的CTOD测试试验,结论如下:(1)采用所设计的平面应力三点弯曲试样进行的GH4169焊接接头CTOD测试过程满足BS7448标准中关于测试过程有效性检测指标要求,而且测试数据分散性很小,可以认为是有效的;(2)GH4169母材的断裂韧性较好,裂纹为延性起裂特性,而焊缝和熔合区的断裂韧性较差,裂纹为脆性起裂特性。

参考文献

[1] 武淮生,钟群鹏. 飞机发动机零部件结构完整性的概率R6评定. *航空学报*, 2000, 21(4): 96-99.

[2] 吴德锋,隋福成,毛春见. 先进飞机典型结构关键部位损伤容限分析研究. *飞机设计*, 2010(10): 16-19.

[3] R6. Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 3. British Energy Generation, 2000.

[4] BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. London, BSI, 2005.

[5] FITNET. Fitness for service analysis of structures using the FITNET procedure; An Overview, 24th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng., Greece 12-17 June, 2005.

[6] API RP 579. Standardized fitness-for-service assessment techniques for pressurized equipment used in the petroleum industry. API, 2004.

[7] 钟群鹏,李培宁. 国家标准《在用含缺陷压力容器安全评定》的特色和创新点综述. *管道技术与设备*, 2006(1): 1-5.

[8] ASTM E399-09. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness KIC of Metallic Materials, ASTM, 2002.

[9] BS7448-1. Fracture mechanics toughness tests—Method for determination of KIC, critical CTOD and critical J values of metallic materials. BSI, 1991.

[10] GB/T 2358-94. 金属材料裂纹尖端张开位移试验方法.

(责编 小城)