

搅拌摩擦焊的缺陷类型及其检测技术

Defect Type of Friction Stir Welding and Inspection Technology

中航工业第一飞机设计研究院 许云峰

[摘要] 简要介绍了搅拌摩擦焊的工艺特点及其在航空结构中的应用;分析了搅拌摩擦焊的缺陷类型;根据新型制造工艺所提出的新的检测需求,介绍了可用于搅拌摩擦焊的检测方法。

关键词: 搅拌摩擦焊 缺陷类型 检测技术

[ABSTRACT] The characteristics of friction stir welding and their defect types are analyzed. The applications of this new welding technology in aviation structures are briefly introduced. Some test methods are suggested for the detection of friction stir welding according to the process features.

Keywords: Friction stir welding Defect type Inspection technology

现代飞机正朝着高性能、轻重量、长寿命、高可靠、高舒适性以及低制造成本的方向发展。搅拌摩擦焊作为一种新的焊接技术,已经在航空结构中得到广泛应用。搅拌摩擦焊不仅改善了航空结构,也促进了航空结构完整性检测技术的改进和发展。

1 搅拌摩擦焊的工艺特点及其应用

1.1 搅拌摩擦焊的工艺特点

搅拌摩擦焊技术是近年来国际上发展较快的技术之一,具有对被焊材料损伤小、焊接变形低、焊缝强度高和绿色制造等特点,被誉为“当代最具革命性的焊接技术”。

搅拌摩擦加工主要通过搅拌头的高速旋转和移动实现,搅拌头由轴肩和搅拌针组成。加工过程中,搅拌头高速旋转并缓慢挤入工件的待加工部位,直到轴肩与工件表面紧密接触。搅拌针伸进材料内部进行摩擦和搅拌,其旋转产生的剪切摩擦热将搅拌针周围的金属变软进而热塑化,使加工部位的材料产生塑性流变。搅拌头高速旋转的同时,沿加工方向与工件相对移动。热塑化的材料由搅拌头的前部向后部转移,并且在搅拌头轴肩的锻造作用下,产生强塑性变形。

与氧炔焊工艺相比,搅拌摩擦焊有许多优点,包括能够消除气体、焊条和电极等许多焊接材料。由于在机械作业产生的摩擦热作用下进行实施连接工艺,因此,

搅拌摩擦焊仅有3种主要的焊接变量需要控制,包括冲击力、旋转速度和焊接速度。

1.2 搅拌摩擦焊的应用

搅拌摩擦焊具有广泛的应用前景,已在航空铝合金焊接中得到广泛的应用。

2XXX系列铝合金强度高、重量轻,长期以来一直是航空结构的主要材料。如Al2195铝-锂合金等新材料,与上一代材料Al2219相比,在基础材料方面有了大幅度改进。在室温和低温条件下,新合金的强度有了极大改进,然而,有时候其焊接性容易出现問題,这也促使人们努力改善工艺,并最终发展并实施了搅拌摩擦焊。Al2195合金能够较好地用于搅拌摩擦焊工艺,克服了利用传统氧炔焊工艺对Al2195进行焊接的过程中所生产的难题。搅拌摩擦焊还可焊接各种铝合金材料,如Al-Cu、Al-Mg、Al-Mg-Si、Al-Zn、Al-Li等高强铝合金,同时也能得到优良的焊接接头。

搅拌摩擦焊在航空结构中的应用主要包括机翼、机身、尾翼、油箱和副油箱等方面。波音公司将搅拌摩擦焊接技术应用于C-17“空中霸王III”军用运输机地板的制造中,生产效率是原来铆接的10倍。空中客车公司已经开始将搅拌摩擦焊接技术引入到A340飞机制造中,并大规模应用于A350的制造,以及用于A340-500及A340-600的机身纵缝连接,取代传统的铆接技术。空客公司声称,使用搅拌摩擦焊接技术代替铆接技术制造飞机机身,每米焊缝能够减轻重量0.9kg^[1]。

2 搅拌摩擦焊的缺陷类型

搅拌摩擦焊工艺存在着形成有害缺陷的倾向性,缺陷的类型取决于搅拌摩擦焊的参数设置和控制。

2.1 孔洞

孔洞缺陷的形成主要是由于焊接过程中热输入不够,达到塑化状态的材料不足,造成材料流动不充分,从而导致在焊缝内部形成未完全闭合的现象。当采用不带螺纹的柱状或者锥状搅拌针的搅拌头进行焊接时,接头容易出现空洞。该类缺陷通常位于接头前进侧的中

下部以及焊缝表面附近。位于焊缝表面附近的空洞方向与焊接方向一致,在焊缝长度方向上延伸较长时也被称作隧道型缺陷^[2]。

2.2 飞边

飞边缺陷出现在焊缝表面,通常是由于焊接压力过大而导致较多的塑性材料从轴肩两侧挤出,冷却后形成的一种缺陷。搅拌摩擦焊接过程是一个焊缝材料体积不变的过程,在实际焊接过程中,搅拌头轴肩、针部、未熔化的母材金属会形成一个“挤压模”,发生塑性变形的材料在“挤压模”中流动。如果焊接压力过大,也就是搅拌头扎入过深,会使“挤压模”体积小于正常焊接时的体积,导致部分材料从轴肩两侧挤出,冷却后形成飞边缺陷。

2.3 未焊合

未焊合是指在焊缝底部未形成连接或者不完全连接而出现的“裂纹状”缺陷,焊缝压力过小时容易形成根部未焊合。未焊合的产生实质上是由于搅拌针长度不足而造成的,在搅拌摩擦焊接过程中,如果搅拌针长度合适,2块对接板材之间对接面上的氧化物会在搅拌针旋转和平动过程中被打碎,并在搅拌头后部形成致密的接头,氧化物弥散分布在接头中。但如果搅拌针长度比正常尺寸短,搅拌针在焊接过程中不能完全搅拌焊缝厚度上的材料,尤其是焊缝下部的材料,加上板材对接面上氧化物的存在,在焊接后接头根部会出现裂纹状的未焊合缺陷。

2.4 沟槽

沟槽缺陷是搅拌头在对接板表面机械搅动后未形成连接的一种重要缺陷,通常位于前进侧焊缝表面。沟槽缺陷的产生主要是由于焊接过程中压力过小,导致热输入严重不足,发生塑性变形的材料大量减小;而且材料流动性降低,造成焊缝前进侧的塑化材料从后退侧绕流后不能回填到前进侧,从而在前进侧焊缝表面附近形成空洞。当材料流动能力进一步下降时,形成空洞的范围发生扩展,最终贯通焊缝上表面形成沟槽缺陷。

2.5 其他缺陷

由于焊接表面氧化膜的存在,焊后在焊缝表面可能形成一层与焊缝内部不同的氧化物;由于对接表面氧化膜在焊接过程中可能未被完全搅拌打碎,从而在焊缝中残留并呈连续分布状,被称为“S线”或“Z线”;在搭接或T形接头中,容易形成一种被称为残余界面线的缺陷,这也属于未焊合缺陷。

3 搅拌摩擦焊的检测方式

焊接结构的检测主要采用目视检测和无损探伤,新的搅拌摩擦焊工艺的出现,对目视检测和无损探伤技术

提出了新的要求。

3.1 目视检测

目视检测是最直接、最简单的检测技术,也是进行表面状况检测的最佳方法,可以直观检测零件表面存在的飞边、擦伤、边缘孔洞以及焊缝不齐等情况。这些缺陷是由不正确的焊接参数所引起的,如过快的移动速度、过快的旋转速度、较小的冲击力以及不合适的焊缝形状。

焊缝根部最不能接受的缺陷是未焊合,它是最重要的缺陷类型,大部分无损探伤都是针对这类缺陷而进行的。

在对焊接结构进行渗透处理后,可以目视发现未焊合缺陷。侵蚀是焊接后进行的一种化学处理,通常需要在进行渗透检测之前对表面进行机械加工处理。在此情况下,侵蚀工艺清楚地显示了焊接部位的动态再结晶区域(DXZ)及其周围热影响区域(HAZ),从而使专业人员能够通过肉眼检测发现焊接缺陷。目视检测是确认可疑未焊合缺陷的一项可靠技术。

3.2 渗透检测

通过P135E和P6F4进行的渗透检测,可在焊接原状、单一侵蚀或者双重侵蚀状态下,在搅拌摩擦焊测试板上进行,此外,可分别在使用和不使用显影剂并在不同渗透时间条件下进行渗透检测。在焊接原状进行渗透检测,由于检测能力差、背景噪声过大,被认为是一种不可接受的方法。

在侵蚀条件下,通过P135E和P6F4对搅拌摩擦焊结构进行检测,能够成功检测出根部的未焊合缺陷。由于每种渗透剂的检测敏感度不同,检测结果也有所不同。使用P135E,能够成功检测出深度大于或者等于1.626mm的未焊合缺陷,使用P6F4,能够成功检测出深度大于或等于1.270mm的未焊合缺陷。与单一侵蚀相比,在应用渗透剂之前通过腐蚀性侵蚀剂进行双重侵蚀,能够提高对未焊合缺陷的检测率。

单一侵蚀和双重侵蚀之间的差异是指,单一侵蚀能够去除0.005~0.010mm的金属,双重侵蚀能够清除0.010~0.015mm的金属。测试结果表明,在应用渗透剂之前,通过侵蚀方法至少能够去除0.010mm的金属,从而改善对未焊合缺陷的检测率。

研究表明,渗透检测应该包括:在应用渗透溶液之前,利用侵蚀溶液去除0.010~0.015mm的金属层。而延长渗透液渗透时间和使用显影剂,并不会改善未焊合缺陷的检测率。

3.3 超声波检测

包括洛克希德·马丁公司的无损探伤工程师和技术人员对搅拌摩擦焊试件进行了超声波检测,他们使用了传统超声波探头和多探头,以及L形波、剪形波和多角

度传感器。研究表明,采用这些技术能够探测到材料厚度 15%~20% 处的未焊合缺陷。

搅拌摩擦焊工具的改变会直接影响未焊合缺陷的金相特征,使得缺陷闭合更加紧密,更不容易检测。在改善搅拌摩擦焊工艺的同时,需要研究改进相应的检测方法。通过对相控阵超声波检测技术的改进,能够检测材料厚度 25%~30% 处的焊接缺陷。

相控阵超声波检测技术能够提供多个方向的回波,能够提供关于缺陷的位置信息以及整个厚度上的缺陷信息。这种相控阵超声波检测技术采用 32 个超声波探头,当探头沿焊缝自动扫描的时候,通过电子光栅调整超声波波束,生成超声波图像^[3]。

3.4 X 射线照相检测

X 射线照相检测是对搅拌摩擦焊的试件进行胶片照相或者数字照相。研究表明,这种方法能够可靠地(达到 90% 的概率和 95% 的置信度)检测出大于或者等于材料厚度 30% 的未焊合缺陷。然而,采用 X 射线胶片照相检测不同合金的焊接接头存在困难,在这种情况下,很难辨别未焊合缺陷。

其原因有两方面:首先,不同的铝合金焊接以后会在接头处形成 2 种合金的混合物,混合物中铜和锂的成分会存在几个百分点的差异。铜的含量不同,对 X 射线的传输存在较大影响,需要相关人员“训练”眼力,从而能够准确地解读获得的胶片图像;其次,不同的合金采用搅拌摩擦焊以后,在合金混合区域(如 Al2219 与 Al2195 的混合),未焊合缺陷会变得更加紧密,不容易进行检测。

3.5 涡流与传导性检测

洛克希德·马丁公司利用 1MHz 笔形探头和 300kHz 差动旋转探头,在搅拌摩擦焊试件上进行了传统的涡流检测。初始涡流检测结果表明,利用马绍尔空间飞行中心和洛克希德·马丁公司的技术,能够对相同合金(Al2195/Al2195)的搅拌摩擦焊焊缝(未焊合缺陷至少 1.651mm 或者更深)进行可靠的检测。而涡流通过不同合金焊缝时的响应完全不同,所有的试件都产生涡流响应,从而无法区别存在未焊合缺陷的试件与不存在未焊合缺陷的试件。

利用自动的无损探伤技术进行可靠的检测,是确保航空部件结构完整性的关键。为了评估最新的涡流检测技术,洛克希德·马丁公司联系了 Jentek 传感器公司,开发搅拌摩擦焊的检测技术。这种新的涡流检测方法基于传导性。1998~2001 年, Jentek 传感器公司利用自己的检测系统,在焊接工艺检测和焊缝检测方面做了大量的工作。后来对这种基于传导性的检测技术进行了完善,并研制了专用于搅拌摩擦焊的传感器。这一研究

对目前广泛用于搅拌摩擦焊的检测方法,如渗透检测、超声波检测、X 射线照相检测进行了补充,可以进一步降低搅拌摩擦焊的检测风险^[3]。

4 结束语

在我国新型航空设备的制造过程中,新的制造工艺和制造技术获得了更大范围的应用。新工艺、新技术的应用可以提高航空部件的结构效率和制造效率,也对航空结构的完整性检测提出了新的挑战。随着我国航空市场的活跃和发展,我们不但要完善制造技术、提高制造水平,还要通过不断创新,发展适应新技术的完整性检测技术,保证航空结构的可靠性。

参考文献

- [1] 王亚军,卢志军. 焊接技术在航空航天工业中的应用和发展建议. 航空制造技术,2008(16): 27-31.
- [2] 刘会杰,潘庆,孔庆伟,等. 搅拌摩擦焊焊接缺陷的研究. 焊接,2007(2): 17-20.
- [3] Kinchen D G, Aldahir E. NDE of friction stir welds in aerospace applications. New Orleans: Lockheed Martin Michoud Space System,2002: 1-7.

(责编 深蓝)

(上接第 76 页)

就是对受损的热端部件是否能通过修复而恢复其使用性能的一种可行性的分析,其受技术性和经济性两方面的制约。

(2) 热端部件的可修复性评估,应在现有技术基础上,综合分析部件缺陷位置载荷要求、焊接修复后组织性能和结构可达性、工艺匹配性等特殊制约因素对热端部件可修复性的影响,在此基础上评估受损热端部件的可修复性。

(3) 在对热端部件可修复性进行分析探讨的基础上建立了相应的评估工艺流程。

参考文献

- [1] 关桥. 发动机叶片与部件修复工程中的焊接技术(上). 航空工艺技术,1993(2): 2-12.
- [2] 关桥. 发动机叶片与部件修复工程中的焊接技术(下). 航空工艺技术,1993(3): 2-9.
- [3] 史耀武. 中国材料工程大典第 23 卷. 材料焊接工程(下). 北京: 化学工业出版社,2006.
- [4] 张栋,钟培道,陶春虎,等. 失效分析. 北京: 国防工业出版社,2004.
- [5] Swaminathan V P, Lowden P. Gas turbine blade life and assessment repair guide. EPRI GS-6544, Project 2775-2 (Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, November 1989, 172.
- [6] 周婉婷,徐庆鸿,徐宾士. 激光修复叶片的可行性探讨. 中国表面工程,1995(3):10-13.

(责编 小城)