

无针搅拌摩擦点焊技术 研究现状分析*

Research Status of Friction Stir Spot Welding Without Needle

中航工业北京航空制造工程研究所 代建辉 赵华夏 栾国红



代建辉

现就职于中航工业北京航空制造工程研究所科技发展部,主要从事国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项等科研项目管理工作。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, 简称FSW)技术^[1]与传统熔化焊相比具有诸多优势^[2],目前已经广泛应用于航空航天飞行器、高速舰船、高速轨道列车、汽车等领域^[3]。随着搅拌摩擦焊技术的发展,目前已经在常规工艺基础上演化出了多种新型焊接技术^[4-9]。搅拌摩擦点焊(Friction

无针搅拌摩擦焊可以在一定厚度范围内实现铝合金薄壁结构的可靠连接,从而在铝合金汽车带筋壁板结构的连接和装配中具有应用前景,同时可以扩展到飞机机身带筋蒙皮、隔离框板结构、机翼以及运载火箭的整流罩等壁板结构。现有的研究成果主要以工艺试验为主,即便是国外的研究也没有对焊接过程形成深入的了解,由此造成对无针搅拌摩擦工具端面槽结构的设计以及焊接工艺参数的选择具有较大的随机性,未来有必要对无针搅拌摩擦焊接过程中塑性金属流动行为以及接头形成过程开展深入研究。

Stir Spot Welding, FSSW)是在搅拌摩擦焊接基础上研究开发出来的一种创新性固相焊接技术^[10],具有绿色、高效、清洁、节能等特点,是铆接、电阻点焊等传统连接方法的最佳替代技术。

英国、德国、日本等国先后开展了搅拌摩擦点焊技术研究,其工艺方法各不相同,目前已见报道的点焊工艺方法主要包括3种:(1)常规搅拌摩擦点焊,即采用与搅拌摩擦焊相一致的搅拌工具进行点焊接,焊点处留有与搅拌摩擦摩擦焊相同的“匙孔”;(2)回填式搅拌摩擦点焊,搅拌针与轴肩相分离,焊接过程中搅拌针与轴

肩沿轴向有相对运动,其相对运动形式又分为两种,一种是搅拌针扎入被焊材料,轴肩回抽,另一种是轴肩扎入被焊材料,搅拌针回抽,但不管那种形式,焊接结束时搅拌针与轴肩都将运动至被焊材料表面,从而形成无“匙孔”的焊点;(3)复合搅拌摩擦点焊,同样采用与搅拌摩擦焊相类似的搅拌工具,与常规搅拌摩擦点焊所不同的是,焊接过程中搅拌工具除自转外还要完成圆周轨迹的运动,相当于完成一个半径1mm圆周轨迹的搅拌摩擦焊,最终形成所谓的点连接。

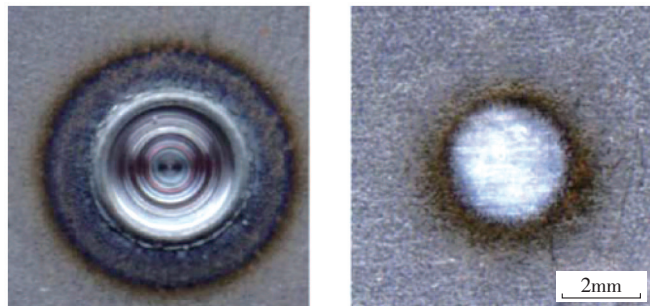
由于常规搅拌摩擦点焊工艺简单,接头性能相对较为稳定,因此形

* “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2012ZX04008-011)资助。

成了良好的工程应用,但常规搅拌摩擦点焊的一些局限性也逐步凸显出来。例如,焊接过程中由于搅拌针的扎入而导致大量被焊材料挤出^[11];焊接終了搅拌针从焊接工件中拔出形成“匙孔”,一方面影响工件表面形貌,另一方面严重影响接头性能。在航空航天飞行器制造中,常规搅拌摩擦点焊要实现“以焊代铆”还存在一定的挑战,尤其是在飞机薄壁铝合金结构制造中(如0.5~2.5mm厚度的飞机机身蒙皮结构)。对于薄壁铝合金结构,如果只利用焊接工具的轴肩和工件表面进行摩擦就能实现焊接,则可以大幅度降低类似结构的焊接难度、提升接头成形质量和生产效率。在此基础上,国内外学者纷纷开展了无针搅拌摩擦点焊,国内称之为塑流摩擦点焊的研究。

国外无针搅拌摩擦点焊技术研究现状

日本 Hitachi 公司的 Kinya Aota 等针对 0.5mm 厚 SPCC 低碳钢开展了无针搅拌摩擦点焊试验研究^[12],从图 1 中接头上表面形貌可以推断其搅拌工具端面为同心圆环槽结构。Kinya Aota 等采用镀镍层对接示踪法研究了无针搅拌摩擦点焊塑性金属流动行为,研究结果认为,无针搅拌摩擦点焊接头中塑流区深度不超过 0.5mm。通过焊接过程温度测量及接头微观组织分析后认为,由于没有搅拌针介入,焊接过程完全依赖无



(a) 接头上表面 (b) 接头下表面

图1 低碳钢无针搅拌摩擦点焊接头

(转速18000r/min, 驻留时间1s, 压入量0.2mm)

针搅拌摩擦工具与工件上表面的摩擦以及顶锻压力来实现,因此接头微观组织主要受到焊接过程峰值温度影响,而与无针搅拌摩擦工具端面所形成的搅拌作用完全无关,并由此认为无针搅拌摩擦点焊材料连接过程与扩散焊相类似。可以认为, Kinya Aota 等所采用的无针搅拌摩擦工具端面形貌并未达到焊接最佳效果,因此限制了其塑流区深度。

Kinya Aota 等还报道了 0.5mm 厚 A1100-H24 纯铝与 SPCC 低碳钢之间的异种材料无针搅拌摩擦点焊^[13]。该研究工作获得了不同压入量及驻留时间对接头性能的影响,以及塑性金属流动特征。研究表明,只有当扎入深度超过 0.1mm 时才有可能形成有效连接,但扎入深度和驻留时间过大时,上层铝合金材料的过度流失将导致接头性能下降。

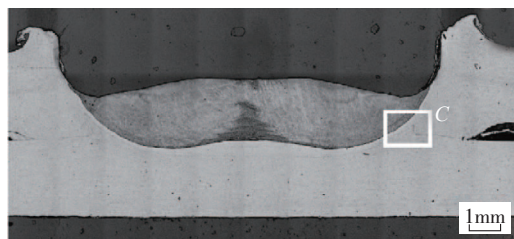
此外, Kinya Aota 等还采用球形端面的无针搅拌摩擦工具开展了 0.5mm 厚 A1100-H24 纯铝搭接焊^[14],该方法消除了搅拌针,但球形端面使得部分端面被插入到被焊材料中,相当于将轴肩及搅拌针融为一体。焊接过程中搅拌头压入量为 0.2mm,但却实现了两层 0.5mm 厚铝板的搭接焊,且焊核区原始搭接界面消失,形成了有效连接。

日本的 Y. Tozaki 等采用端面加工有螺旋槽的无针搅拌摩擦工具开展了无针搅拌摩擦点焊试验研究^[15],被

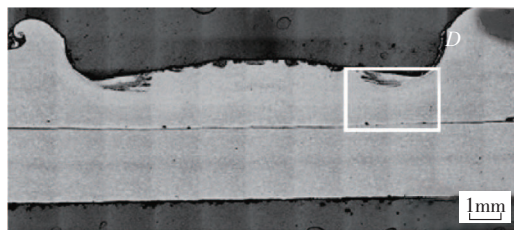
焊材料为 2mm 厚 6061-T4 铝合金。通过铜粉示踪的方法, Y. Tozaki 等初步研究了无针搅拌摩擦点焊塑性金属流动行为,并对比分析了端面螺旋槽对塑性金属流动的影响作用。但由于其示踪手段的局限性,试验结果仅能初步获得沿试板厚度方向上的塑性金属流动行为。结果显示,带螺旋槽端面与光面相比提高了塑性金属在厚度方向上的迁移范围(图 2)。此外由于无针搅拌摩擦点焊接头消除了“匙孔”,因此在优化后的工艺参数下,接头力学性能远远优于常规搅拌摩擦点焊接头。Y. Tozaki 等认为无针搅拌摩擦点焊是一种极具发展前途的焊接方法,但对于无针搅拌摩擦工具端面形貌及工艺参数等还需要开展进一步的研究。

韩国 Kim 等将其开发的无针搅拌摩擦焊技术命名为“surface friction welding”(简称 SFW)^[16],通过该工艺方法实现了厚度 1.5mm 以下多种轻质合金的连接(图 3)。对 5082 铝合金焊接接头的抗拉强度试验显示,其接头强度均达到母材的 80% 以上。

英国曼彻斯特大学的 Dimitrios Bakavos 等系统介绍了其开展的薄板铝合金无针搅拌摩擦点焊研究^[17]。试验对象为 0.93mm 厚 6111-T4 铝



(a) 螺旋槽形



(b) 光面形

图2 铜粉示踪无针搅拌摩擦点焊接头形貌

(转速3000r/min, 驻留时间4s, 轴肩压入量0.7mm)

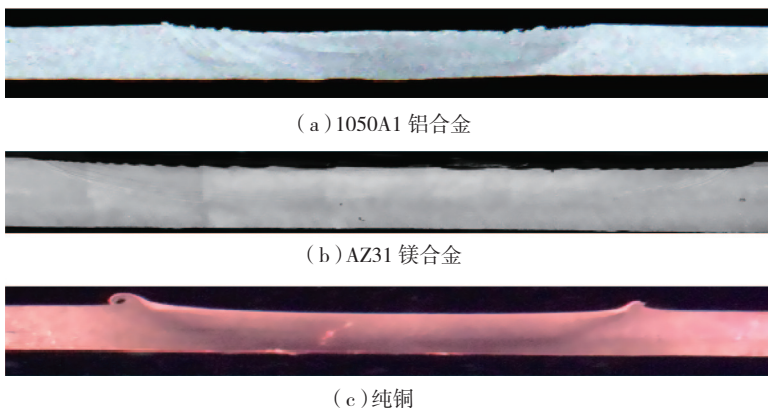


图3 SFW接头宏观形貌(厚度1mm)

合金薄板搭接,焊接压入量统一采用0.2mm,该数值被认为是获得良好接头的最小压入量。该研究设计了5中不同的无针搅拌摩擦工具(图4),其中图4(c)及图4(e)带有0.2mm长的搅拌针。

通过一系列试验研究, Dimitrios Bakavos 等认为采用无针搅拌摩擦

属流动行为又与无针搅拌摩擦工具端面形貌直接相关,因此需要进一步开展相关研究工作。

国内无针搅拌摩擦点焊技术研究现状

2009年北京航空制造工程研究所利用无针搅拌工具对飞机薄壁结

构搅拌摩擦焊“匙孔”进行添补时,获得了良好的焊接接头,随后针对无针搅拌摩擦点焊开展了研究,并于2012年获得了国家发明专利授权^[18]。

针对6mm厚2024、2524(图5),6082和7050 4种飞机铝合金材料开展了无针搅拌摩擦点焊不同工艺参数及点焊深度的对比试验研究,结果显示,无针搅拌摩擦点焊接头成形美观,内部没有裂纹、孔洞等缺陷,接头承受的最大力可以达到6kN,高于相应的铆接接头。

针对2024和6082等铝合金材料,开展了无针搅拌摩擦焊对接试验研究,从接头宏观形貌可以看出(图6),接头成形良好,均匀致密,没有任何目视缺陷,但是工件原始表面的包铝层被卷入焊核区与热机影响区交界处,对接头性能产生不利影响,因

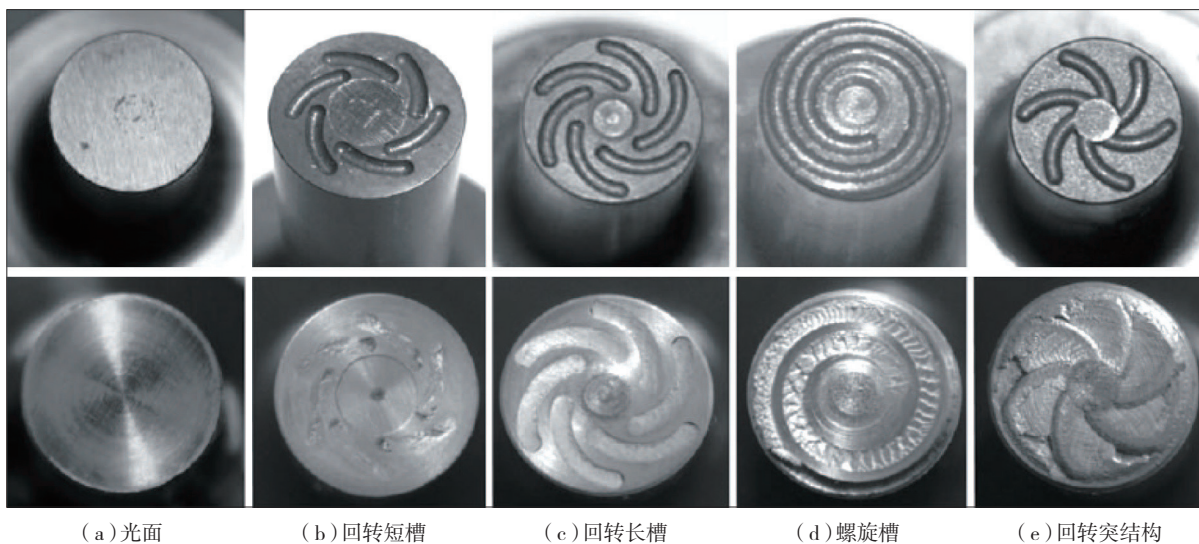


图4 不同形貌的无针搅拌摩擦工具(包括焊前形貌及焊接20次后的形貌照片)

点焊可以在不到1s的较短时间内实现1mm左右厚度的汽车车体铝合金壁板的高强度连接,并且焊点平整无“匙孔”。同时作者也提出,尽管无针搅拌摩擦点焊看似简化了焊接工具及焊接过程,但焊接过程中塑性金属的流动行为却极为复杂,而控制焊接过程中的塑性金属流动行为则是焊接工艺优化的根本所在,并且塑性金

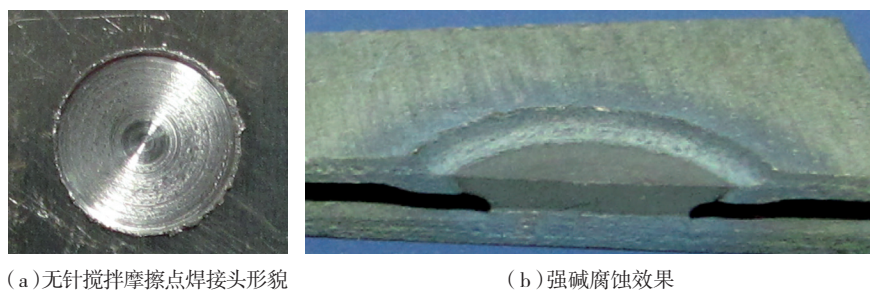


图5 2524铝合金无针搅拌摩擦点焊接头

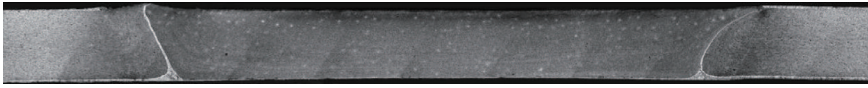


图6 1.6mm厚2024铝合金无针搅拌摩擦焊对接接头

此需要考虑焊前去除包铝层或者通过改善焊接过程塑性金属流动行为避免上下表面包铝层的卷入。焊核区原始界面消除,实现了材料的有效连接,焊核区边缘存在界面畸变,但没有出现常规搅拌摩擦焊搭接接头中常见的冷搭接现象(图7)。

针对常规搅拌摩擦焊经常出现的背部未焊透缺陷,尝试采用无针搅拌摩擦焊进行修补,试验结果如图8所示,可以看到无针搅拌摩擦焊在不

中具有应用前景^[9],同时可以扩展到飞机机身带筋蒙皮、隔离框板结构、机翼以及运载火箭的整流罩等壁板结构。现有的研究成果主要以工艺试验为主,即便是国外的研究也没有对焊接过程形成深入的了解,由此造成对无针搅拌摩擦工具端面槽结构的设计以及焊接工艺参数的选择具有较大的随机性,未来有必要对无针搅拌摩擦焊接过程中塑性金属流动行为以及接头形成过

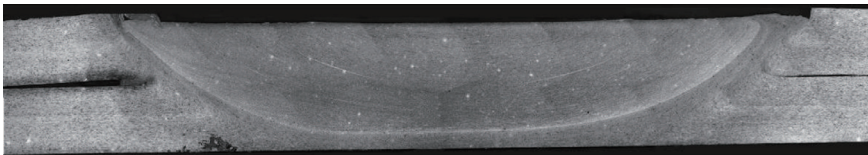


图7 1.6mm厚2024铝合金无针搅拌摩擦焊搭接接头

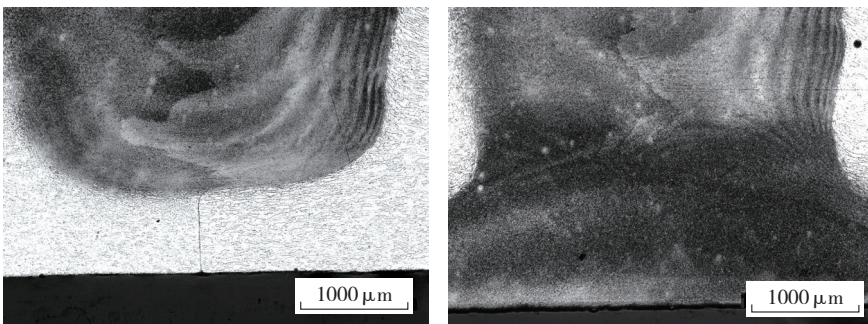


图8 背部未焊透无针搅拌摩擦焊修补结果对比

改变原搅拌摩擦焊焊核区组织形貌的情况下有效消除了背部未焊透缺陷,且修补区域晶粒精细致密,与原焊核区结合良好。

结论

国外针对无针搅拌摩擦焊技术开展了相关研究,应用对象多为点焊,国内则针对铝合金材料对接、搭接及点焊开展了大量试验研究。初步研究结果表明,无针搅拌摩擦焊可以在一定厚度范围内实现铝合金薄壁结构的可靠连接,从而在铝合金汽车带筋壁板结构的连接和装配

程开展深入研究。

参考文献

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction stir butt welding: GB patent application, 99125978. [1991-12-08].
- [2] 栾国红,柴鹏. 搅拌摩擦焊技术应用现状和发展趋势. 金属加工, 2008, 24: 19-22.
- [3] 关桥. 轻金属材料结构制造中的搅拌摩擦焊技术与焊接变形控制(上). 航空科学技术, 2005(4): 13-16.
- [4] 栾国红,轻合金搅拌摩擦焊技术及新发展. 航空制造技术, 2009(9): 26-31.
- [5] 韩文妥,许鸿吉,李光,等. 几种新型搅拌摩擦焊技术. 航空制造技术, 2008(21): 48-51.

[6] 赵衍华,张丽娜,刘景铎,等. 搅拌摩擦点焊技术简介. 航天制造技术, 2009(2): 1-5.

[7] 张健,李光,李从卿,等. 2219-T4 铝合金双轴肩 FSW 与常规 FSW 接头性能对比研究. 焊接, 2008(11): 50-51, 71-72.

[8] Davies P S, Wynne B P, Rainforth W M, et al. Development of microstructure and crystallographic texture during stationary shoulder friction stir welding of Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 42(8): 2278-2289.

[9] Ahmed M M Z, Wynne B P, Rainforth W M, et al. Through-thickness crystallographic texture of stationary shoulder friction stir welded aluminium. Scripta Materialia, 2011, 64(1): 45-48.

[10] Sakano R, Murakami K, Yamashita K, et al. Development of spot FSW robot system for automobile body members//Proc. 3rd international symposium of friction stir welding, 2001.

[11] 王大勇,冯吉才,王攀峰. 搅拌摩擦焊用搅拌头研究现状与发展趋势. 焊接, 2004(6): 6-10.

[12] Kinya A, Kenji I. Development of friction stir spot welding using rotating tool without probe and its application to low-carbon steel plates. Welding International, 2009, 23(8): 572-580.

[13] Kinya A, Makoto T, Kenji I. Friction stir spot welding of aluminium to steel by rotating tool without probe. Welding International, 2010, 24(2): 96-104.

[14] Kinya A, Kenji I. Friction stir welding of aluminum lap joint by tool without probe. Welding International, 2010, 24(3): 197-205.

[15] Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K. A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 844-851.

[16] Kim S J, Lee C G, Han H N, et al. Surface friction welding of thin metal sheets. Key Engineering Materials, 2007, 345-346(2): 1477-1480.

[17] Bakavos D, Chen Y C, Babout L, et al. Material interactions in a novel pinless tool approach to friction stir spot welding thin aluminum sheet. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(5): 1266-1282.

[18] 王卫兵,李光,栾国红,等. 流动摩擦焊接方法及其工具: 中国, 101875154. [2012-02-01].

[19] 栾国红,李光,王卫兵,等. 塑流摩擦焊技术. 焊接学报, 2010, 31(8): 1-4, 8.

(责编 良辰)