DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20210118

Zn-Al-Si 钎料厚度对磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管接头组织性能的影响

冯 珂[1],黄尚宇[1,2],邓凌波[1],李雨连[1],李清宁[1],杨 正[1],钱东升[1,2]

(1.武汉理工大学 材料科学与工程学院,武汉 430030;2.湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心,武汉 430070)

摘 要:结合磁脉冲成形、半固态成形以及钎焊的复合优势,采用磁脉冲辅助半固态钎焊的方法来实现 Cu/Al 异质金属管件的连接。基于 LS-DYNA 对钎焊过程进行了多物理场耦合仿真,分析了钎料厚度对流变行为的影响,提出了综合考虑氧化膜去除效果及钎料流失缺陷的壁厚设计思路。利用附加能谱仪的电子探针显微分析仪和电子万能材料试验机研究了半固态 Zn-15Al-1.0Si 钎料的厚度对钎焊接头质量的影响。结果表明:在钎焊过程中,半固态钎料所受压、剪应力复合作用随着其厚度的增加而变弱,且在搭接区域中部最弱。钎料过厚,其与母材两侧难以形成良好的冶金结合,而钎料过薄,会导致接头钎料缺失的缺陷。在合适的放电参数条件下,当钎料固相率为 0.6,厚度为 300 μm 时,能获得以球晶组织为主的磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管接头。

关键词:钎焊;电磁成形;半固态;Cu/Al 管;多物理场仿真

中图分类号:TG454 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-0299(2021)05-0039-09

Effect of Zn-Al-Si filler metal thickness on microstructure and properties of Cu/Al tube joints by magnetic pulse assisted semi-solid brazing

FENG Ke[1], HUANG Shangyu[1,2], DENG Lingbo[1], LI Yulian[1], LI Qingning[1], YANG Zheng[1], QIAN Dongsheng[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430030, China;
2. Hubei Engineering Research Center for Green Precision Material Forming, Wuhan 430070, China)

Abstract: Combining the advantages of magnetic pulse forming, semi-solid forming and brazing, the method of magnetic pulse assisted semi-solid brazing was used to realize the connection between Cu/Al tubes. Based on LS-DYNA, a multi-physics coupling simulation of the brazing process was carried out. The influence of filler metal thickness on its rheological behavior was analyzed, and a design idea of filler metal thickness was put forward, comprehensively considering the removal effect of oxide film and the defect of filler metal loss. The influence of the thickness of semi-solid Zn-15Al-1.0Si filler metal on the quality of brazing joints was studied by using an electron probe microanalyzer with an additional energy spectrometer and an electronic universal material testing machine. Results show that during the brazing process, the composite effect of pressure and shear stress on the semi-solid filler metal became weaker with the increase in its thickness, and was the weakest in the middle of the overlap area. When the filler metal was too thick, it was difficult to form a good metallurgical bond with both sides of the base material, while too thin filler metal could lead to the defect of missing filler metal in the joint. Under suitable discharge parameters, when the solid fraction and thickness of filler metal were 0.6 and 300 μm, a magnetic pulse assisted semi-solid brazed Cu/Al tube joint with spherulitic structure as its main structure could be obtained.

Keywords: brazing; electromagnetic forming; semi-solid; Cu/Al tubes; multi-physics simulation

铜铝复合结构广泛应用于各工业领域,其可靠高效的连接一直是学术界和工业界高度关注、致力解决的热点和难点问题之一[1]。在全球环境保护、节能减排和资源节约的背景下,轻量化、“铝代铜”已成为制造业的主流发展趋势[2-3]。铜铝异质金属连接的难点在于[4-5]:铜铝的热物理性能差异较大;铝表面致密的氧化膜会阻碍接头

收稿日期:2021-05-18. **网络出版日期**:2021-08-16.
基金项目:国家重点研发计划“变革性技术关键科学问题”重点专项(2020YFA0714900);国家自然科学基金资助项目(51475345).
作者简介:冯 珂(1997—),男,硕士研究生;
黄尚宇(1963—),男,教授,博士生导师;
钱东升(1982—),男,教授,博士生导师.
通信作者:黄尚宇,E-mail:huangshy@whut.edu.cn
期刊网址:http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx

熔合;铜铝间有着较强的反应活性,易在连接界面处发生扩散反应形成 $CuAl$、$CuAl_2$ 等脆性金属间化合物。因此,传统的熔化焊难以实现铜铝异质管件的可靠连接。

Zn-Al 系钎料是一种较为理想的铜铝钎焊用钎料,其钎焊的铜铝接头通常具有较好的力学性能[6-7]。Zn-Al-Si 钎料组分与 Zn-Al 钎料相近,二者具有相近的机械加工性能,易制成带状[8]。羊浩等人[9]采用 Zn-14.1Al-0.9Si 和 Zn-21.5Al-1.5Si 两种钎料以火焰钎焊方法获得了铜/铝接头,发现 Cu 侧界面结构均为 Cu/扩散层/$Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}$,接头钎缝中心均由 α-Al 固溶体、η-Zn 固溶体、Zn-Al 共晶和 Al-Si 共晶组成。YE 等人[10]采用火焰钎焊获得了 Cu/Zn-34.4Al-2.2Si/Al 接头,结果表明,Al-Si 共晶使 Zn-34.4Al-2.2Si 钎料中晶粒细化,提高了钎料的自由腐蚀电位,降低了扩散层厚度。但是利用传统的钎焊方法时,存在钎料与母材无法充分润湿、具有腐蚀性的钎剂会降低焊点的综合性能等问题[11]。

针对上述问题,黄尚宇等人[12]综合磁脉冲成形、半固态成形和钎焊的特点和优势,采用磁脉冲辅助半固态钎焊的方法来实现铜铝异质金属之间的连接。利用磁脉冲力驱动 Al 管产生缩径变形,挤压半固态钎料发生径向压缩和轴向剪切流变,其固相颗粒在压、剪应力的复合作用下不断撞击冲刷母材表面,使氧化膜发生破碎,并在剪切流变的作用下将破碎后的氧化膜带离钎缝区,实现钎料与母材间无钎剂扩散连接[13-14]。由于钎料厚度会影响半固态钎料的高速剪切流变行为,从而影响去除母材表面氧化膜的效果,并最终影响界面的连接质量。为此,本文将采用数值模拟和试验相结合的方法,探讨钎料厚度对磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管接头的影响,为后续应用中钎料厚度设计提供理论依据。

1 实验

1.1 实验材料

将纯锌、纯铝及铝硅合金按照配比加入坩埚中,利用电阻炉进行熔炼,浇铸、切割、轧制后得到宽度为 7 mm,厚度分别为 400、300 和 200 μm 的 Zn-15Al-1.0Si 钎料带。外管选用外径为19 mm,壁厚为 1 mm 的 1060-Al;内管选用外径为 15 mm,壁厚为 1.5 mm 的 T2-Cu。材料具体成分见表 1。

表 1 Cu、Al 管和钎料的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of Cu, Al tubes, and filler metal (wt.%)

材料	Al	Cu	Zn	Si	Ag	Fe	Mg	Mn	Ni	P	Pb
T2-Cu		Bal	0.0037		0.051	0.0042			0.0038	0.0039	0.0032
1060-Al	Bal	0.15	0.2500	0.4		0.7000	0.8	0.15			
Zn-15Al-1.0Si	15		Bal	1.0							

1.2 试验方法

将钎料、Cu 管和 Al 管打磨后放入无水乙醇中进行超声波清洗 5 min,去除表面的杂质,再将钎料制成圆环状并固定在 Cu 管表面,搭接区域长度为 7 mm。磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管试验过程和工装如图 1 所示,试验分为两个相互独立的步骤:(1)磁脉冲装夹成形;(2)磁脉冲-半固态成形复合钎焊。由于本试验的研究对象为钎料厚度,基于笔者前期研究成果,结合成形过程模拟及预试验,在保证形成 Cu/Al 有效连接且 Cu 内管不发生失稳的前提下,将装夹成形和复合钎焊的放电电压设定为 6.5 和 4.5 kV。装夹成形阶段,先将管件装夹部位轴向移动至集磁器中心,然后对电容器组(550 μF)充电至设定 6.5 kV,闭合高压放电开关,电容器组对成形线圈放电,通过集磁器使装夹部位的 Al 管受到脉冲电磁力作用,迫使其高速变形并与 Cu 管实现紧密的机械连接;装夹完成后,将待钎焊部位轴向移动至集磁器中心,对电容器组再次充电至设定 4.5 kV,接通感应加热线圈对 Cu 管进行加热,加热速率控制为 50 ℃/min,待钎料加热到设定的半固态钎焊温度后,对成形线圈再次放电,脉冲电磁力迫使待钎焊区域的 Al 管高速变形并挤压半固态钎料,冷却后即可得到 Cu/Al 管钎焊接头。

利用 STA449F3 同步热分析仪对 Zn-15Al-1.0Si 钎料进行 DSC 测试,获得其固液相线以及固相率随温度变化的关系曲线。根据王振东等人[14]研究,在磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管的工艺中,半固态钎料固相率为 0.6 时,能够获得钎焊质量良好的 Cu/Al 接头。故将钎料固相率固定为 0.6,仅改变钎料厚度,通过模拟分析并结合钎焊试验,探究钎料厚度对 Cu/Al 管钎焊接头质量的影响。

采用附加能谱仪的 JXA-8230 型电子探针显微分析仪观察分析金相试样的显微组织结构以及

物相组成;采用 HMAS-C1000SZA 硬度测量分析系统测试试样的显微硬度;采用 Instron5967 型电子万能材料试验机和自制的剪切模具(见图 2)对钎焊接头进行抗剪切试验,取 3 组试样的平均值计算抗剪切强度。将 1.5 mm 厚的环形剪切试样套在压头下方,通过套筒和螺母压紧,压头及垫环分别支撑内外管,以 0.5 mm/min 的速度对压头下压至试样失效。

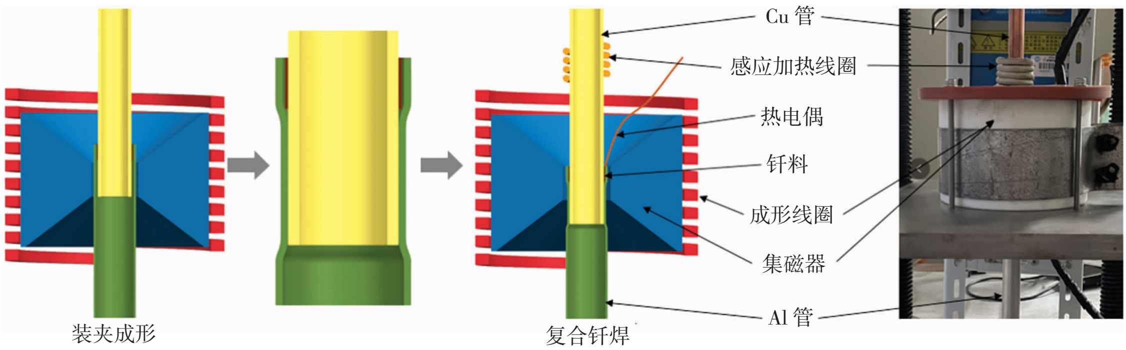

图 1　磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管试验过程和工装

Fig. 1　Testing process and tooling of magnetic pulse assisted semi-solid brazing of Cu/Al tubes

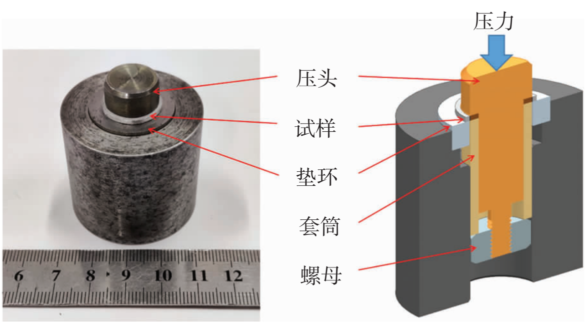

图 2　Cu/Al 接头抗剪切试验模具

Fig. 2　Mold of Cu/Al joint shear test

2　钎料流变过程多物理场耦合分析

磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管有限元模型如图 3 所示。利用三维软件 UG 对线圈、集磁器、Al 管、Cu 管及钎料建立几何模型,再利用 Hypemesh 对各部件的几何模型进行网格划分,最后采用 LS-DYNA 对复合钎焊过程进行磁场-流场-结构场耦合仿真分析。

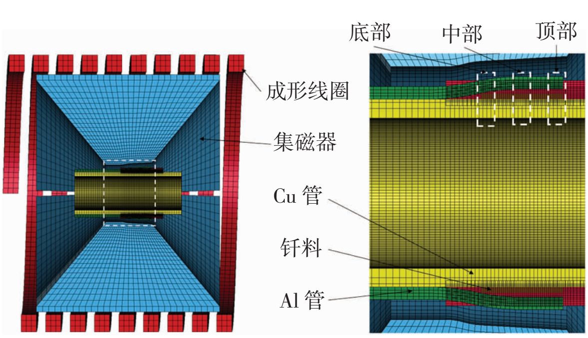

图 3　磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管有限元模型

Fig. 3　Finite element model of magnetic pulse assisted semi-solid brazing of Cu/Al tubes

由于 Cu 内管、成形线圈和集磁器在试验过程中几乎不产生变形,故在数值模拟中将它们视为刚体,采用 MAT_RIGID 模型;采用由牛顿黏性定律计算得出的表观黏度对半固态钎料进行表征,钎料和空气均采用 MAT_NULL 模型并且共节点,通过关键字卡片将空气边界设置为无反射边界,具体参数如表 2 所示;在磁脉冲-半固态复合成形过程中,Al 管会经历剧烈的塑性变形,为了使模拟计算更加贴合实际,因此采用 Johnson-Cook 本构模型[15]来描述成形过程中 Al 管的变形行为。其本构模型表达式为

$$\sigma = [A + B(\varepsilon^{p})^{n}][1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}][1 - \left(\frac{T - T_{r}}{T_{m} - T_{r}}\right)^{m}]$$

式中:σ 为应力;ε^{p} 为塑性应变;$\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率;$\dot{\varepsilon}_0$为参考塑性应变率;T 为温度;T_r 为室温;T_m 为材料熔点;A、B、C、n 和 m 为 Al 管的性能参数,如表 3 所示。

表 2　钎料和空气的参数

Table 2　Parameters of filler metal and air

材料	密度/(g · cm^{-3})	黏度/(Pa · s)
Zn-15Al-1.0Si	5.20000	5.5
空气	0.00125	0

表 3　Johnson-Cook 本构模型参数[15]

Table 3　Johnson-Cook constitutive model parameters[15]

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	m
Al 外管	120	200	0.3	0.01	1

由于磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管过程十分短暂,为毫秒级别,故不考虑复合钎焊过程中

Cu 管、Al 管和钎料的温度变化,将三者的温度均固定为钎焊温度。

3 结果与讨论

3.1 Zn-15Al-1.0Si 钎料固、液相线以及固相率随温度变化的关系

Zn-15Al-1.0Si 钎料 DSC 测试结果如图 4 所示,得到其固、液相线温度,分别为 379.5 ℃ 和 451.1 ℃。

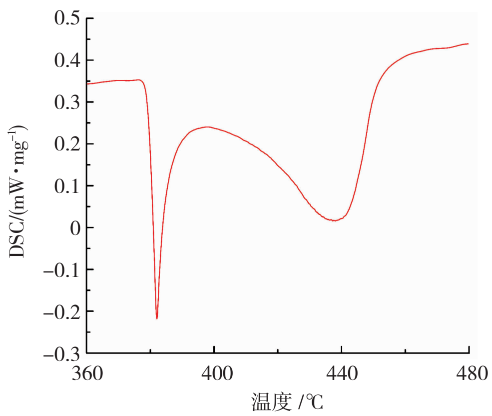

图 4　Zn-15Al-1.0Si 钎料的 DSC 曲线

Fig. 4　DSC analysis of Zn-15Al-1.0Si filler metal

基于余忠土等人[16]介绍的数据处理方法,利用 Origin 软件对 Zn-15Al-1.0Si 钎料的 DSC 测试数据进行分析和计算,得到图 5 所示的钎料固相率随温度变化的关系曲线,可以看出,当钎料固相率为 0.6 时,其半固态温度为 416.1 ℃,故在数值模拟计算以及后续试验中将钎焊温度设定为 416.1 ℃。

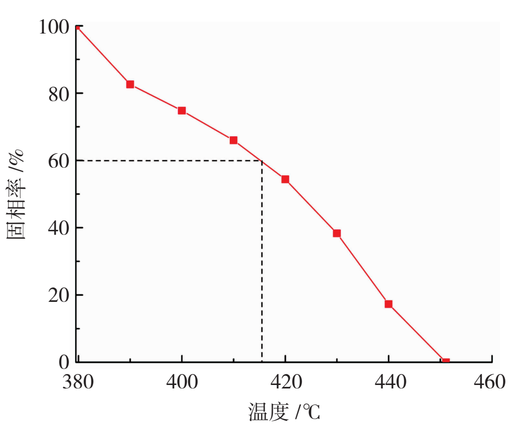

图 5　Zn-15Al-1.0Si 钎料固相率与温度之间的关系

Fig. 5　Relationship between solid fraction and temperature of Zn-15Al-1.0Si filler metal

3.2 钎料流变过程模拟结果分析

图 6 和图 7 分别为半固态钎料在复合钎焊过程中所受径向压应力和轴向剪应力随时间变化的云图。可以看出,当 $t=0.035$ ms 时,Al 管在洛伦兹力的作用下产生缩径,底部最先与半固态钎料接触,迫使半固态钎料在压、剪应力的复合作用下发生径向压缩和轴向剪切流动;当 $t=0.037$ ms 时,钎料顶部开始与 Al 管接触而受到压、剪应力的复合作用;当 $t=0.039$ ms 时,钎料中部才与 Al 管接触而受到压、剪应力的作用,晚于顶部和底部;当 Al 管挤压钎料进行到了中后期时,半固态钎料整体所受的压、剪应力逐渐减小直至消失。根据 SHI 等人[17]的研究结果,半固态钎料中的固相颗粒在压、剪应力的复合作用下反复刮擦母材表面,使氧化膜破碎,从而有效去除氧化膜。本文讨论中,仅以压、剪应力复合作用强弱来衡量去膜效果,没考虑变形模式的综合影响。

由于半固态钎料所受压、剪应力随时间变化的趋势一致,故而采用二者的矢量和即等效应力来描述钎料的受力情况。一方面,等效应力的强弱会影响去除氧化膜的效果;但另一方面,由于钎焊过程中部分钎料会被挤出搭接区域,使接头中半固态钎料剩余体积分数发生变化,进而影响钎缝的填充程度。为此,需综合考察钎焊接头中半固态钎料剩余体积分数、所受等效应力随厚度变化的关系,如图 8 所示。图中实线表明,半固态钎料顶部所受等效应力最大,且远高于中部和底部,随着钎料厚度降低,其所受的等效应力逐渐增大;图中虚线表明,钎料越薄,接头中剩余钎料体积分数越小。由于 Al 管顶部为自由端,变形抗力小,在洛伦兹力的作用下较中部和底部更易产生变形,导致该区域钎料所受的挤压和剪切作用更强,故而其顶部所受的等效应力较大。随着钎料厚度减小,Al 管与钎料接触前的径向加速间距增大,与钎料碰撞时的碰撞速度也相应增大,对钎料的挤压作用更强,使钎料所受的等效应力增大,流速越快,接头中半固态钎料剩余体积分数越小。

钎料越薄,所受的等效应力越大,去除氧化膜效果越好,但是由于轴向流速增大,挤出搭接区域的钎料越多,接头中半固态钎料剩余体积分数越小,易导致接头区域因钎料流失过多而产生缺料的缺陷。因此在保障去膜充分的前提下,钎料不宜过薄,以避免接头出现缺料缺陷。根据图 8 中等效应力变化曲线与半固态钎料剩余体积分数变化曲线的交点,综合考虑去膜和钎料填充效果的前提下,初步判定钎料厚度宜选择在 200 至 380 μm 范围内。因此,分别选取厚度为 400、300 和 200 μm的 Zn-15Al-1.0Si 的钎料进行磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管试验,考察半固态钎料的厚度变化对钎焊接头质量的影响。

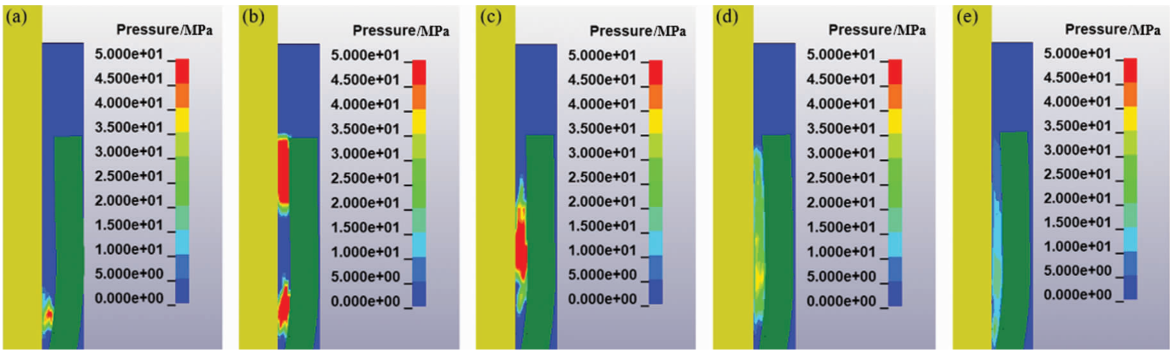

图 6　不同时刻半固态钎料受压应力云图

Fig. 6　Nephogram of semi-solid filler metal under pressure at different time: (a) $t=0.035$ ms; (b) $t=0.037$ ms; (c) $t=0.039$ ms; (d) $t=0.050$ ms; (e) $t=0.070$ ms

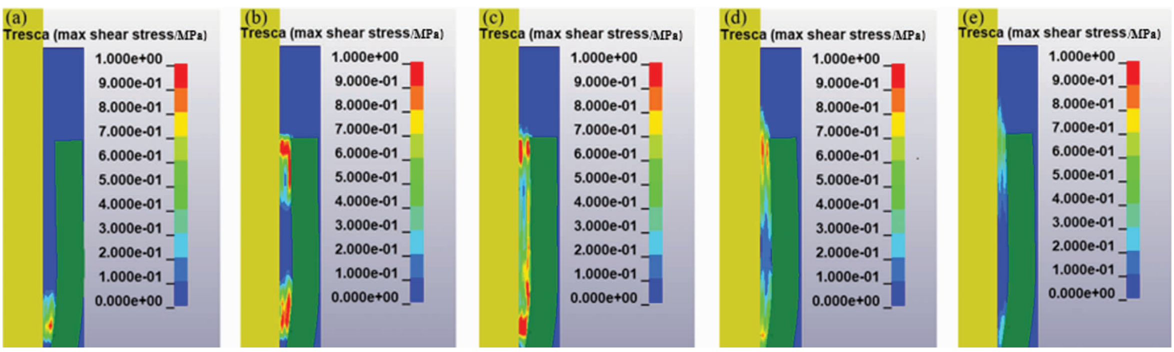

图 7　不同时刻半固态钎料受剪应力云图

Fig. 7　Nephogram of semi-solid filler metal under shear stress at different time: (a) $t=0.035$ ms; (b) $t=0.037$ ms; (c) $t=0.039$ ms; (d) $t=0.050$ ms; (e) $t=0.070$ ms

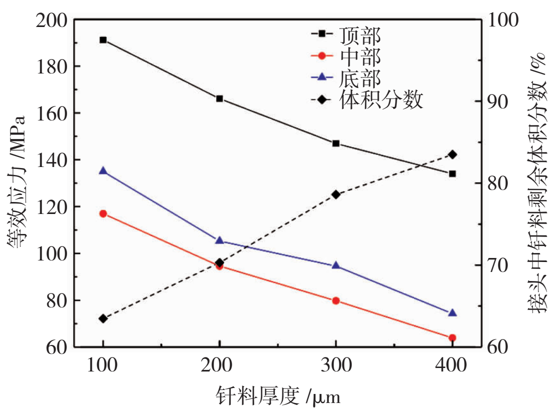

图 8　等效应力、接头中钎料剩余体积分数随其厚度变化关系

Fig. 8　Relationship between equivalent stress and remaining volume fraction of filler metal in the joint with its thickness

3.3　不同厚度钎料接头的微观组织和力学性能

为考察界面区域的连接情况及钎缝组织的形态,对厚度为 400 μm 钎料所得接头的顶部、中部和底部进行了微观分析,如图 9 所示。由图 9(a)和(c)可知,接头钎缝填充饱满,晶粒较细小,无明显缺陷,且在两侧界面都能观察到连续的扩散层,说明在接头顶部和底部,钎料都与母材形成了良好的冶金结合。而在接头中部(图 9(b)),两侧界面仅观察到不连续的扩散层,且晶粒相对粗大,进一步放大后可观察到明显的未连接区域(参见图 10(a)、(g))。这是由于接头中部区域钎料所受的压、剪复合作用相对较弱,其固相颗粒破碎程度相对较低,导致晶粒尺寸较大;另一方面,由于母材表面氧化膜去除不彻底,也部分阻碍了钎料与母材间的扩散反应及冶金结合。

考虑到 Cu/Al 搭接区域中部的连接最为薄弱,因此后续分析中,仅讨论不同厚度钎料所得接头中部的连接情况,如图 10 所示,其中图 10(a)、(d)和(g)分别为图 9(b)对应区域的局部放大。当钎料厚度分别为 300 和 200 μm 时,在其接头中部两侧界面都观察到连续的扩散层,无明显缺陷,实现了钎料和母材间的良好冶金结合。由图 10(d)、(e)和(f)可知,在接头钎缝中部存在大量的球晶组织,它能有效提高钎焊接头的力学性能[18]。不同厚度钎料所得钎缝组织的平均晶粒尺寸分别为 37.5、30.3 和 25.8 μm,可以看出,钎料越薄,钎缝组织晶粒尺寸越小。这是由于钎料越薄,其所受的压、剪应力复合作用越强,固相颗粒破碎更充分,晶粒更细小。

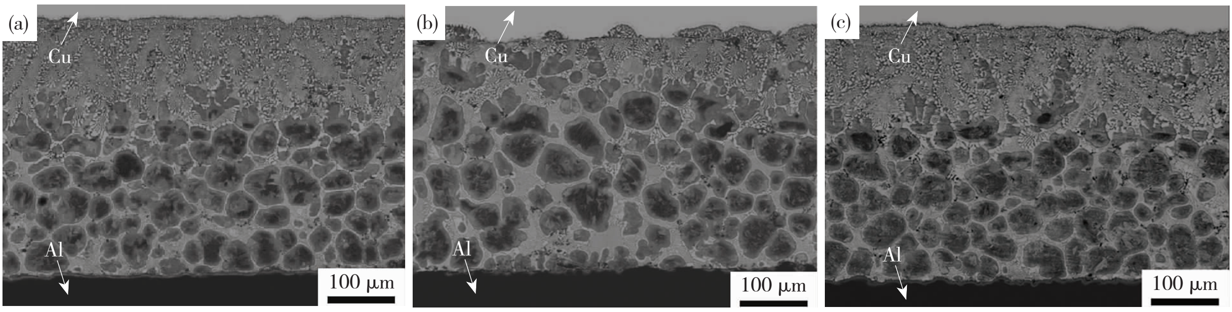

图 9 厚度为 400 μm 钎料所得接头不同部位的显微组织:(a)顶部;(b)中部;(c)底部

Fig. 9 Microstructure of joint obtained with 400 μm filler metal:(a) top; (b) middle; (c) bottom

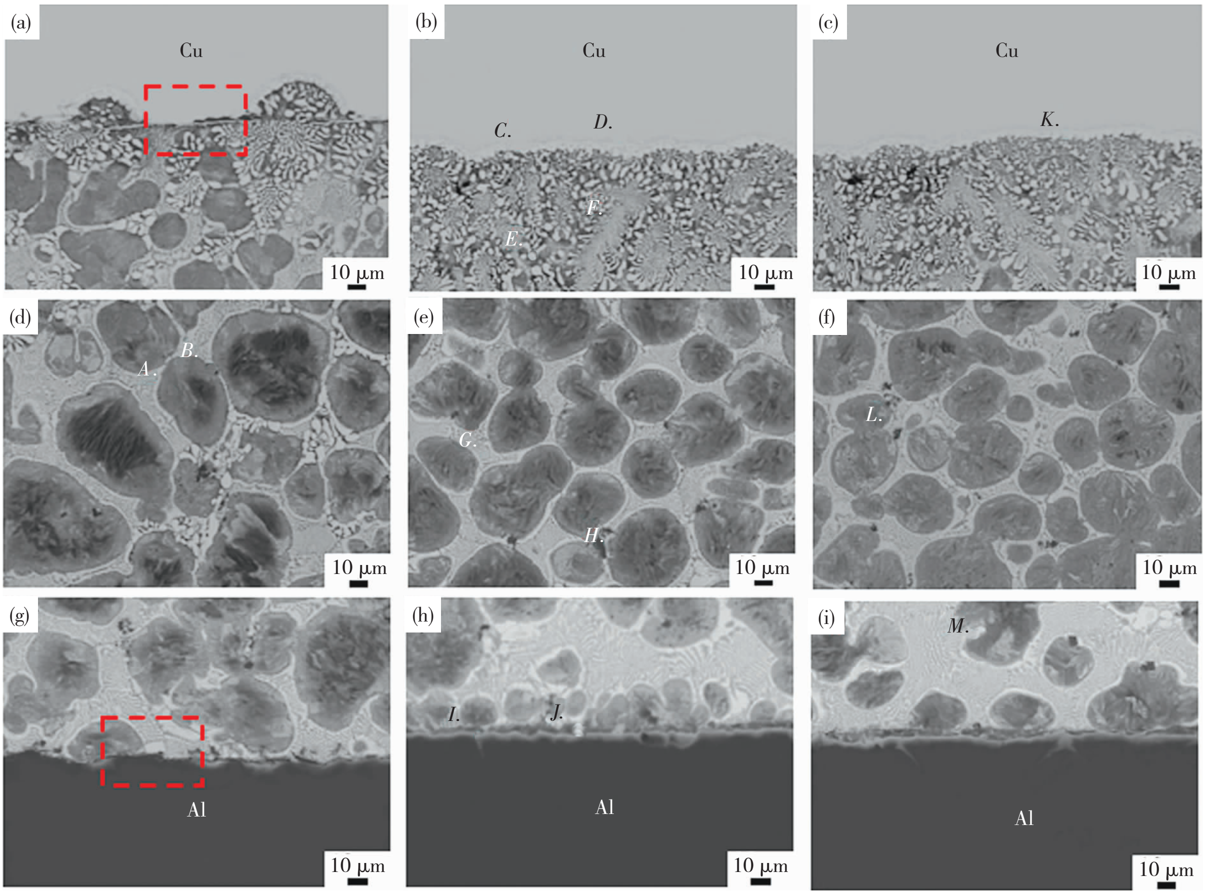

图 10 不同厚度钎料所得接头中部的显微组织:(a),(b)和(c) 400 μm,300 μm 及 200 μm (Cu 侧);(d),(e)和(f) 400 μm,300 μm 及 200 μm (钎缝中部);(g),(h)和(i) 400 μm,300 μm 及 200 μm (Al 侧)

Fig. 10 Microstructure of middle part of joints obtained with filler metals of different thicknesses: (a), (b) and (c) 400 μm, 300 μm and 200 μm (Cu side); (d), (e) and (f) 400 μm,300 μm and 200 μm (middle part of brazing seam); (g), (h) and (i) 400 μm,300 μm and 200 μm(Al side)

对图 10 所示各标记点进行 EDS 分析,结果如表 3 所示。由表可知,推测接头钎缝中部主要由 Zn-Al 共晶基体以及分布其中的球状 α-Al、η-Zn、花状金属间化合物 $CuZn_5$ 和 Al-Si 共晶组成。Al 侧扩散层主要由一深一浅两层组织组成,推测均为 Zn-Al 固溶体,而由于扩散距离的影响,导致浅色相的 Zn 原子含量要低于深色相。经测量,Al 侧和 Cu 侧界面结合层厚度都在 6 μm 左右,Cu 侧结合层看起来较厚,可能是其扩散层上附着生长了锯齿状的 $Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}$ 三元相;FENG 等人[19]的研究表明,锯齿状 $Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}$ 结构能使界面区和钎料牢牢地“钉扎”在一起,阻止裂纹在界面区附近扩展,提高接头界面连接的可靠性。值得关注的是,在 10 μm 标尺下,界面区未发现影响接头性能的层状 $CuAl_2$ 等脆性金属间化合物,表明该新工艺能有效抑制界面区 Cu、Al 脆性金属间化合物的尺寸,从而提高接头性能。

表 3　图 10 中标记点的 EDS 分析结果

Table 3　EDS results of points marked in Fig. 10

点	原子含量/% Al	Zn	Cu	Si	相组成
A	74.81	25.19	0	0	α-Al
B	6.49	0	0	93.51	Al-Si 共晶
C	50.17	15.96	33.87	0	$Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}$
D	34.41	18.76	46.83	0	Cu 侧扩散层
E	8.31	88.35	3.34	0	η-Zn
F	45.41	45.05	9.54	0	Zn-Al 共晶 + $CuZn_5$
G	32.53	60.33	7.14	0	Zn-Al 共晶 + $CuZn_5$
H	9.51	3.41	0	87.08	Al-Si 共晶
I	88.97	11.03	0	0	Al 侧扩散层
J	78.11	21.89	0	0	Al 侧扩散层
K	44.96	24.59	30.45	0	$Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}$
L	7.06	0	0	92.94	Al-Si 共晶
M	4.21	91.54	4.25	0	η-Zn

图 11 为厚度为 300 μm 钎料所得接头各区域显微硬度测试结果,可以看出,钎缝区的显微硬度明显高于两侧母材;Cu 侧界面区的显微硬度略高于钎缝中部和 Al 侧界面区。这是因为 Cu 侧界面区存在连续分布的花状 $CuZn_5$ 金属间化合物,显微硬度较高;而钎缝中心和 Al 侧界面区则主要以 Zn-Al 共晶基体及分布其中的球状 α-Al 组成,显微硬度较低。

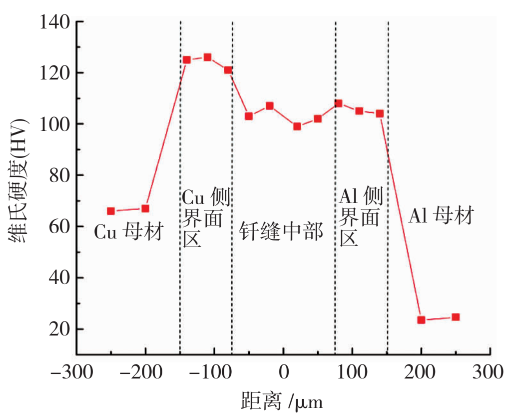

图 11　300 μm 钎料所得接头各区域显微硬度

Fig. 11　Microhardness of each area of joint obtained with 300 μm filler metal

3 种厚度钎料所得接头的抗剪切强度如图 12 所示。结果显示,厚度为 300 μm 钎料所得接头的抗剪切强度(82.89 MPa)最高,400 μm 钎料所得接头的抗剪切强度(68.68 MPa)次之,这是因为钎料越薄,钎焊过程中其所受压、剪复合作用越强,氧化膜去除越彻底,界面冶金结合及固相颗粒破碎更充分,钎缝组织晶粒尺寸更细小,因此接头力学性能越好。但当钎料厚度降至 200 μm 时,其接头抗剪切强度(59.34 MPa)不升反降,这是由于钎料过薄,其在钎焊过程中所受等效应力增大,轴向速率随之增大,使搭接区域的钎料被挤出过多,导致接头区域钎料缺失,如图 13 所示,故接头抗剪切强度因缺料缺陷而不升反降。厚度为 300 μm 钎料所得试样断裂主要发生于 Cu 侧,推测原因可能是近 Cu 侧界面区存在连续分布的花状 $CuZn_5$ 金属间化合物,导致 Cu 侧界面连接强度较 Al 侧弱,在剪切试验中更易发生断裂,图 11 所示的显微硬度分布也表明 Cu 侧界面硬度相对较高,易发生断裂;而厚度为 200 和 400 μm 钎料所得接头试样 Al 侧和 Cu 侧均有断裂,这是由于厚度为 400 μm 钎料所得接头中部两侧界面存在局部的未连接区域,厚度为 200 μm 钎料所得接头则存在缺料缺陷,导致断裂位置随机分布。

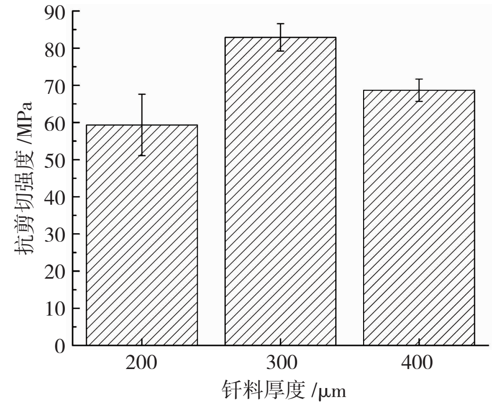

图 12　不同厚度钎料所得接头的抗剪切强度

Fig. 12　Shearing strength of joints obtained with filler metals of different thicknesses

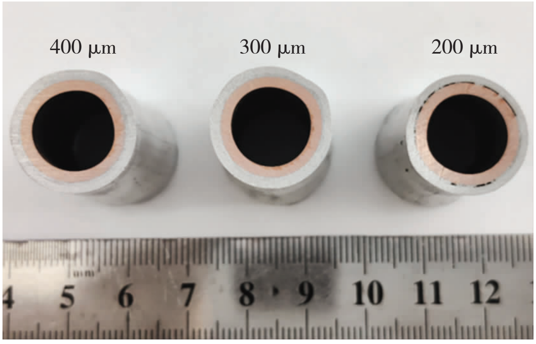

图 13　不同厚度的钎料钎焊接头

Fig. 13　Filler metal joints of different thicknesses

4　结　论

1)在磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管过程中,钎焊接头中部受压、剪应力复合作用最弱,较顶部和底部更易产生连接缺陷。一方面,钎料越薄,在焊接过程中所受压、剪应力的复合作用越

强,去除母材表面氧化膜的效果越好,能有效避免界面连接缺陷;但另一方面,由于钎料轴向流速增大,挤出搭接区域的钎料越多,接头中钎料剩余体积分数越小,易导致接头出现缺料缺陷,影响接头整体强度。当钎料厚度为 300 μm 时,能够获得优质的磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管接头,抗剪切强度达 82.89 MPa。

2)磁脉冲辅助半固态钎焊能获得以球晶组织为主的 Cu/Zn-15Al-1.0Si/Al 接头,其钎缝区主要由 Zn-Al 共晶基体以及分布其中的 α-Al、η-Zn、金属间化合物 $CuZn_5$ 和 Al-Si 共晶组成。该新工艺能有效抑制界面区 $CuAl_2$ 等脆性金属间化合物的尺寸,从而提高接头性能。

参考文献:

[1] NITIN P, RAMI T. A review on recent advances in friction stir lap welding of aluminium and copper[J]. Materials Today: Proceedings,2017,4(8):8387-8393. DOI:10.1016/j.matpr.2017.07.182

[2] TEKKAYA A E, ALLWOOD J M, BARIANI P F, et al. Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64: 629-653. DOI:10.1016/j.cirp.2015.05.001

[3] 高远, 黄尚宇, 邓凌波, 等. 温度条件对铜管/铝管磁脉冲-半固态复合辅助钎焊接头微观组织的影响[J]. 锻压技术, 2019, 44(10): 169-175.
GAO Yuan, HUANG Shangyu, DENG Lingbo, et al. Influence of temperature condition on microstructure of Cu tube /Al tube brazed joint produced by magnetic pulse and semi-solid composite auxiliary technology[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44 (10): 169-175.
DOI:10.13330/j.issn.1000-3940.2019.10.030

[4] COLMENERO A N, MARIO S O, EMILIO J M, et al. Optimization of friction stir spot welding process parameters for Al-Cu dissimilar joints using the energy of the vibration signals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100 (9-12): 2795-2802.
DOI:10.1007/s00170-018-2779-y

[5] LEI Yu, HUANG Shangyu, LIU Wei, et al. Dissimilar Cu/Al tube joint by EMF-assisted brazing [J]. Springer London, 2018, 95(9): 4039-4047.
DOI:10.1007/s00170-017-1535-z

[6] NIU Zhiwei, YE Zheng, HUANG Jihua, et al. Interfacial structure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn - Al filler metals [J]. Materials Characterization,2018,138: 78-88.
DOI:10.1016/j.matchar.2018.01.054

[7] 羊浩, 黄继华, 陈树海, 等. Zn-Al 钎料成分对 Cu/Zn-Al/Al 钎焊接头界面结构及性能的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 364-370.
YANG Hao, HUANG Jihua, CHEN Shuhai, et al. Influence of the composition of Zn-Al filler metal on the interfacial structure and property of Cu/Zn-Al/Al brazed joint [J]. Acta Metallurgica Sinica. 2015, 51 (3): 364-370.
DOI:10.11900/0412.1961.2014.00522

[8] 董博文, 董显, 鲍丽, 等. 铜-铝异种金属钎焊材料的研究现状[J]. 焊接, 2019(5):7-12,65.
DONG Bowen, DONG Xian, Bao Li, et al. Research status of brazing and soldering materials for Cu - Al dissimilar metals[J]. Welding & Joining,2019(5): 7-12,65.
DOI:10.12073/j.hj.20181107004

[9] 羊浩, 黄继华, 陈树海, 等. Zn-Al-Si 钎料钎焊铜/铝接头显微组织及性能研究[J]. 航空制造技术, 2015(7): 64-67,71.
YANG Hao, HUANG Jihua, CHEN Shuhai, et al. Research on Microstructure and Property of Cu/Al Joint Brazed by Zn - AI - Si Filler Metal [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015 (7): 64-67,71.
DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.07.064

[10] YE Zheng, HUANG Jihua, YANG Hao, et al. Effect of Si addition on corrosion behaviors of Cu/Al dissimilar joint brazed with novel Zn - Al - *x*Si filler metals [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(6):5171-5179.
DOI:10.1016/j.jmrt.2019.08.040

[11] 黄海川,黄尚宇, 李清宁, 等. 放电电压对 Cu/Al 管磁脉冲-半固态复合辅助钎焊质量的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(2): 60-67.
HUANG Haichuan, HUANG Shangyu, LI Qingning, et al. Effect of discharge voltage on quality of Cu /Al tube magnetic pulse-semisolid hybrid assisted brazing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (2): 60-67.
DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20190061

[12] 黄尚宇,黄海川,雷雨,等. 一种半固态无钎剂辅助的异种金属钎焊装置及方法: 中国, 201811132724.6[P]. 2018-09-27.
HUANG Shangyu, HUANG Haichuan, LEI Yu, et al. Semi-solid flux-free dissimilar metal brazing device and method: China, 201811132724.6[P]. 2018-09-27.

[13] 王梓宇, 黄尚宇, 雷雨, 等. 铝-铜异种金属管磁脉冲辅助钎焊研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (2): 147-153,188.
WANG Ziyu, HUANG Shangyu, LEI Yu, et al.

Research on magnetic pulse assisted brazing of Al-Cu dissimilar metal tube [J]. Journal of Plasticity Engineering,2018,25(2): 147-153,188.
DOI:10.3969/j.issn.1007-2012.2018.02.021

[14] 王振东, 黄尚宇, 李佳琪, 等. Zn-Al 钎料固相率及组分对 Cu/Al 管磁脉冲-半固态复合辅助钎焊接头质量的影响初探[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(4): 1-7.
WANG Zhendong, HUANG Shangyu, LI Jiaqi. et al. Preliminary study on the influence of soldersolid phase rate and composition of Zn - Al filler metal on the quality of magnetic pulse-semisolid hybrid assisted soldering of Cu /Al tubes[J]. Materials Science and Technology, 2020,28(4): 1-7.
DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20190061

[15] 慈明森. 金属在大变形、高应变率和高温条件下的本构模型和数据[J]. 弹箭技术, 1998(3): 32-44.
CI Mingsen. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain-rates and high temperatures[J]. Projectile Technology,1998(3):32-44.

[16] 余忠土, 张恒华, 邵光杰, 等. 半固态铝合金中固相分数差热扫描法的研究[J]. 物理测试, 2002, 20(1): 22-25,44.
YU Zhongtu, ZHANG Henghua, SHAO Guangjie, et al. Study of solid content in aluminum alloys reheated to semisolid state by DSC[J]. Physics Examination and Testing, 2002, 20(1): 22-25,44.
DOI:10.3969/j.issn.1001-0777.2002.01.007

[17] SHI Lei, YAN Jiuchun, HAN Yanfei, et al. Behaviors of oxide layer at interface between semi-solid filler metal and aluminum matrix composites during vibration [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(8): 746-752.
DOI:10.1016/S1005-0302(11)60137-0

[18] 石磊, 闫久春, 韩焱飞, 等. 一种具有球晶组织的半固态 Zn-Al 合金钎料[J]. 材料工程, 2010(10): 65-68.
SHI Lei, YAN Jiuchun, HAN Yanfei, et al. Development of a Semi-solid Zn-Al Alloy Filler Metal with Globular Grains [J]. Journal of Materials Engineering, 2010(10): 65-68.
DOI:10.3969/j.issn.1001-4381.2010.10.015

[19] FENG Ji, XUE Songbai, LOU Jiyuan, et al. Microstructure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn - Al filler metals [J]. Transactions of the Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 281-287.
DOI:10.1016/S1003-6326(11)61172-2

(**编辑**　任明星)

本文引用格式:
冯　珂,黄尚宇,邓凌波,等. Zn-Al-Si 钎料厚度对磁脉冲辅助半固态钎焊 Cu/Al 管接头组织性能的影响[J]. 材料科学与工艺,2021,29(5):39-47. DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20210118
FENG Ke, HUANG Shangyu, DENG Lingbo, et al. Effect of Zn-Al-Si filler metal thickness on microstructure and properties of Cu/Al tube joints by magnetic pulse assisted semi-solid brazing[J]. Materials Science and Technology,2021,29(5):39-47. DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20210118

封面图片说明

目前大多数给药途径均为口服给药,药物的利用效率较低,不具备靶向性,只能加大药物的使用剂量来获得理想的效果,因此人们对能够靶向递送药物的材料抱有巨大的期望。氧化铁纳米粒子(IONPs)能够在磁场的作用下受控移动,在特定的组织中聚集,实现靶向性。表面的多糖涂层不仅保证了 IONPs 的稳定性,还能降低纳米粒子毒性,同时为药物以及特异性识别分子提供附着位点。在本期刊载的论文"多糖涂覆的氧化铁纳米粒子的合成及其药物递送应用研究进展"中,广西大学的陈山教授等人对多糖与 INOPs 复合材料的构建方法、过程调控以及药物递送的特点与挑战进行了综述总结,指出尽管目前多糖涂覆的 IONPs 在药物递送方面存在一些挑战,但在不久的将来,通过不断深入研究,其一定能够成为令人满意的药物递送材料。

(图文提供:张润峰,王清,徐欣东,陈山.广西大学轻工与食品工程学院)