

非晶合金焊接研究进展

龚攀¹, 刘孝洪¹, 黄虎², 汤新龙¹, 卓军³, 张茂¹, 唐学峰¹, 王新云¹, 刘辉¹

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

(2. 吉林大学数控装备可靠性教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

(3. 上海萨斐技术测量有限公司, 上海 201500)

摘要: 非晶合金具有良好的物理和化学性能, 但尺寸问题限制了其实际应用, 而焊接技术可以突破其应用瓶颈。非晶合金焊接方法可分为液相焊接和固相焊接, 两类方法焊接过程中非晶接头形成方式不同, 有效避免晶化是获得高质量接头的关键, 本文就非晶合金焊接领域的研究进行了系统全面的梳理与归纳, 综述了非晶合金/非晶合金焊接、非晶合金/晶态金属焊接的研究现状, 重点阐述了不同焊接方法获得完全非晶态焊件的特点与局限, 同时本文还综述了非晶合金作为钎料的研究现状, 分析了非晶钎料的应用前景, 并总结了提高非晶钎料钎焊接头力学性能的方法, 继而对非晶合金焊接研究及发展提出了展望。

关键词: 非晶合金; 焊接技术; 非晶钎料; 晶化

中图法分类号: TG139+.8; TG457

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)01-0243-11

非晶合金(MG), 也称金属玻璃, 是近几十年来通过快速凝固技术和熵调控理念开发出的新型高性能金属材料。通过抑制合金熔体原子结晶调制而成的这类材料, 具有长程无序、短程有序的结构特征, 兼具玻璃、金属等物质的特性, 突破了传统金属材料原子结构有序的概念, 并且表现出了良好的物理和化学性质, 如过冷液相区的超塑性、高强度、高硬度、抗腐蚀性等, 具有重要的研究价值和广阔的应用前景^[1]。但是非晶合金在制备过程中会受到临界冷却速度的限制, 导致制备得到的非晶合金通常存在尺寸小、形状简单等问题, 这极大限制了非晶合金这类新型高性能金属材料的应用范围^[2]。

为了突破非晶合金面临的应用瓶颈以及更好地将非晶合金组件集成到机器或其他产品的结构中, 除了研发新型的非晶合金和改进非晶合金制备工艺外, 很多学者尝试用焊接方法将非晶合金自身及其他非晶或晶体材料相结合^[3]。近年来, 研究人员不断探索和发展了各种各样的非晶合金焊接方法。按焊接时界面两侧金属的状态, 大致可分为2类: 液相焊接和固相焊接。

非晶合金的液相焊接, 其过程一般为通过局部高温熔化的过程使非晶合金在液态状态下相互混合, 随后通过快速冷却形成焊接接头。典型的方法包括激光焊^[4-5]、电子束焊^[6]等。非晶合金的无序结构是其关键特点, 赋

予其出色的性能, 在非晶合金焊接中, 保持焊接界面非晶态的连续性至关重要, 而液相焊接虽然具有效率高、参数便于调节且能为熔化的非晶母材凝固时提供较大的冷却速率等优势, 但焊缝处熔化所产生的高温可能导致非晶合金发生晶体相变, 生成脆硬的晶化区, 破坏其非晶态性质, 对非晶合金性能, 尤其是力学性能产生不利影响, 这是需要注意且在实际生产过程中尽量避免的。

非晶合金的固相焊接, 即在施加一定的外力条件下, 通过塑性变形破碎非晶合金表面的氧化膜, 并利用非晶合金在过冷液相区的超塑性实现焊接。这类方法包括搅拌摩擦焊^[7-8]、超声波焊^[9]等。尽管这类方法依靠非晶母材过冷液相区的热稳定性和超塑性, 在焊接过程中非晶母材不发生熔化, 焊接温度较低, 有利于避免焊接接头的晶化问题, 但焊前通常需要对焊件表面进行清理, 且焊接效率通常比上述外加热源的焊接方法低。

目前, 已经通过多种方法实现了同种非晶合金之间的焊接。然而, 对于异种非晶合金或非晶合金与其他材料之间的焊接, 由于存在性能差异或结构差异等复杂问题, 给焊接工艺的选择和运用带来了一定挑战。本文总结了非晶合金/非晶合金焊接技术、非晶合金/晶态金属焊接技术以及钎焊工艺中非晶合金作为钎料的研究现状, 并对非晶合金焊接的未来发展趋势进行了探讨。

收稿日期: 2024-02-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52371154); 吉林大学数控装备可靠性教育部重点实验室开放基金(JLU-cnrc-202307); 中央高校基本科研业务费专项资金(2021GCRC003)

作者简介: 龚攀, 男, 1984年生, 博士, 副教授, 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074, E-mail: pangong@hust.edu.cn

1 非晶合金/非晶合金焊接

1.1 同种非晶合金焊接

1.1.1 同种非晶液相焊接

对于同种非晶合金液相焊接,在一定工艺参数条件下,焊缝完全焊透且其中熔化的合金均匀混合,一般不会出现焊件未接合等焊接失效情况。对同种非晶合金液相焊接而言,焊接失效主要指焊接接头内部非晶合金完全或部分结晶而导致焊接接头出现裂纹或力学性能大幅度下降等现象。因此,同种非晶合金液相焊接成功的关键在于避免晶化相的析出。然而,在非晶合金液相焊接过程中,焊缝区以及焊接热影响区的晶化机制并不相同,为了实现焊接必须同时满足焊缝金属和热影响区避免晶化的条件。

在液相焊接方法中焊缝金属经历熔化和凝固过程,焊后焊缝区是否保持非晶态主要与其非晶合金形成能力相关。非晶形成能力越强,非晶形成所需的临界冷却速度就越小,焊接过程中焊缝区金属就越容易保持非晶态。值得注意,非晶合金的形成能力与过冷液相区的宽度($\Delta T = T_x - T_g$,其中 T_x 为晶化温度, T_g 为玻璃转变温度)直接对应的关系,具体表现为 ΔT 越大,非晶形成能力越强^[10]。

对于焊缝金属而言,只需要提供足够的冷却速度就能避免结晶。因此,液相焊接方法中高能束焊接工艺,如激光焊接和电子束焊接等,具有高密度热源,焊接速度快,形成的焊道窄而深,能够为焊缝金属提供较快的冷却速度,以实现焊缝区非晶合金的快速冷却和凝固,现阶段被广泛应用。马焰议等^[11]在探究激光焊接过程中热输入调控对Zr基非晶合金焊接接头的影响规律时发现,激光焊接过程中焊缝区避免了晶化现象,而热影响区却因为晶化导致了该区域材料硬度大幅度下降。另外,王廷等^[12]研究了 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{46}\text{Al}_8$ 非晶合金的电子束焊接,在焊接接头中焊缝区绝大部分维持非晶态,而热影响区非晶内发生晶化转变,生成了ZrCu、CuZr₂等相,导致该区域硬度值最低。

与焊缝区非晶结晶机制不同,焊接热影响区在固态下经历升温 and 降温这样一个热循环。经研究发现根据非晶合金的特征温度,利用Vogel-Fulcher-Tammann(VFT)方程和Kissinger方程能很方便地拟合出非晶合金焊接区域的连续加热相变(CHT)曲线,该曲线可以准确地描述焊接过程中非晶合金热影响区的结晶过程^[13]。常见热影响区CHT曲线如图1所示,当焊接热影响区的热循环曲线与非晶合金的CHT曲线相交时,就会导致非晶合金发生结晶^[14]。Yan等^[15]分别利用VFT方程和Kissinger方程拟合了 $\text{Zr}_{41.2}\text{Ti}_{13.8}\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{22.5}$ (Vit1)非晶合金激光焊接区域的CHT曲线,两者拟合的效果并不相同,与实际实验结果对比后发现,发现利用VFT方程拟合的CHT曲线预测激光焊接中Vit1的结晶过程更为准确。同样

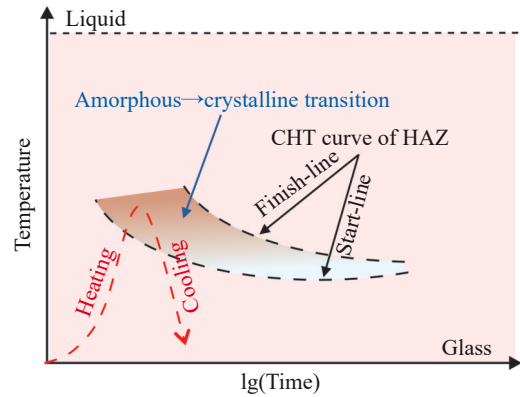


图1 非晶合金焊接热影响区的CHT曲线

Fig.1 CHT curve of heat affected zone (HAZ) in MG welding^[14]

地,Wang等^[16]通过Kissinger方程拟合电子束焊接 $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ 非晶合金的CHT曲线,发现其可以准确地描述 $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ 非晶合金热影响区的结晶过程。

值得注意,非晶合金焊接热影响区的CHT曲线之中起始线和终点线之间的时间间隔与非晶向晶体转变的生长能力相关,即时间间隔越宽,晶体生长能力越低。在实际焊接过程中,当非晶合金焊接热影响区的热循环曲线与CHT曲线的起始线相交,热影响区发生部分结晶时,晶体生长速率低的非晶合金焊接热影响区生成的结晶相比比例往往越少,焊接热影响区抗结晶能力越强^[14]。

1.1.2 同种非晶固相焊接

对于同种非晶合金的固相焊接而言,最主要的问题为临界面的接触问题,关乎着非晶合金能否成功接合,非晶合金表面的氧化膜不同于基体的亚稳态结构,而是自由能更低的热稳定物,为了实现连接,需要将氧化膜破除,以达到光洁的原子间接触界面,并通过原子间扩散才能完成连接。

常见的非晶合金的固相焊接方法,如热塑性焊接,可以较好地实现同种非晶合金的焊接。Chen等^[17]提出一种在空气中实现非晶合金的热塑性焊接的方法,流程如图2a,他们利用该方法在低温低压条件下,在空气中实现了 $\text{Zr}_{35}\text{Ti}_{30}\text{Cu}_{7.5}\text{Be}_{27.5}$ 非晶合金的焊接,同时在此方法中建立了利用非晶合金的抗剪强度、施加的应变量和初始表面粗糙度来定量预测接头强度的模型。

而且这种热塑性焊接方法还可以实现非晶合金构件结构的复杂化。Liu等^[18]以 $\text{Zr}_{35}\text{Ti}_{30}\text{Cu}_{8.25}\text{Be}_{26.75}$ 非晶合金板为原料,结合热塑性焊接方法,制造出了蜂窝状的非晶合金架构,如图2b,同时研究发现,制备的蜂窝状结构非晶合金具有超弹性,再结合其高强度,能呈现出出色的弹性储能能力。这种具有优异特性的蜂窝状的非晶合金架构的制备,也将进一步扩大非晶合金的应用潜力。

但在热塑性焊接方法中,为了能够有效破除非晶合

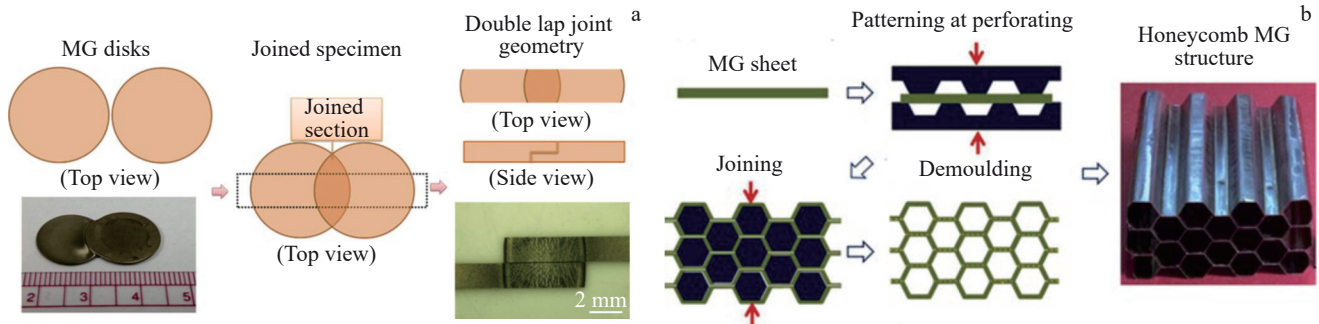


图2 热塑性搭接原理图和蜂窝状的非晶合金架构制备流程

Fig.2 Thermoplastic lapping principle diagram (a)^[17] and preparation process of honeycomb-shaped MG structure (b)^[18]

金表面的氧化膜,并促进原子间的扩散,形成良好的焊接接头,一般选择适当提高焊接温度或延长焊接保温时间,这一定程度上会导致晶化问题的出现,同时这种方法对待焊接面的要求较高。而搅拌摩擦焊是通过搅拌头施加热、机双重作用使非晶母材产生塑性变形,相对于热塑性焊接方法,不仅更有利于材料表面氧化膜的破除,而且效率更高,可以在避免晶化的基础上实现非晶合金之间的连接,形成力学性能优良的接头。Ji等^[19]成功用3°凹轴肩搅拌头实现大块非晶合金 $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ 的焊接,焊接接头的非晶结构及力学性能维持不变。Ma等^[20]以多晶立方氮化硼作旋转焊针,采用搅拌摩擦焊,对 $Zr_{58.5}Nb_{2.8}Cu_{15.6}Ni_{12.8}Al_{10.3}$ 非晶合金进行了连接,实验结果表明,在转速为400 r/min和行进速度为25.4 mm/min的条件下,形成的焊件经历快速氩淬后能够完全保持非晶态结构。但搅拌摩擦焊过程中对于搅拌销的磨损消耗较严重,而且焊接结束后将搅拌销提出焊件时,会给焊缝端头带来不可避免的孔缺陷^[21]。

相比于热塑性焊接方法,还存在一种更加适用的固相焊接方法,即超声焊接,是利用超声波的特性使非晶母材之间产生相互摩擦而破除氧化膜。对于大多数非晶合金而言,超声焊接过程中会呈现“超声塑性”,即在超声振动环境下即使温度未达到 T_g 也可以表现出超塑性^[22],同时由于超声波的作用,焊接界面处非晶母材会呈现出更高的原子迁移率^[23]。因此,超声焊接可在避免结晶的条件下,快速形成焊后影响更小的牢固接头。Wu等^[24]采用超声波焊逐层堆积焊接了 $Ni_{82.2}Cr_7B_3Si_{4.8}Fe_3$ 非晶合金,在适当参数条件下,非晶合金不发生结晶,热学性能基本不变,而且形成的材料内部硬度和模量均高于原材料。而且,Zhu等^[25]采用超声波焊成功实现了多层 $Fe_{78}Si_{13}B_9$ 非晶合金薄板的焊接,未观察到非晶材料的结晶,并确定了超声波焊接 $Fe_{78}Si_{13}B_9$ 非晶薄板的最佳参数。

而且相比于其他需要热作用的焊接方法,超声焊接的适用范围也更加广阔,其可以在特殊液体环境中,如乙醇等易燃易爆环境以及液氮等极端低温环境中,实现对

非晶合金的焊接。Li等^[26]在纯水、海水、乙醇以及液氮4种不同液体环境中对Zr基非晶合金进行了对接(圆柱形)、对接(板状)、搭接以及T形焊接4种不同形式的超声焊,焊接示意图如图3a,成功使非晶合金在无热条件下结合,焊后非晶焊件仍具有优异的抗拉强度(1522 MPa,接近铸态试样抗拉强度1615 MPa)、抗弯强度(2930 MPa,接近铸态试样抗弯强度3109 MPa),如图3b~3c。

1.2 异种非晶合金焊接

通过选择不同非晶合金组合进行焊接,能够充分发挥非晶合金的特性,起到优化性能的作用,如增加强度、导热性、耐腐蚀性或导电性等,同时实现多功能性,满足定制化设计要求^[27]。

与同种非晶合金不同,异种非晶合金焊接不但需要考虑非晶合金形成能力差等因素而易导致的晶化问题,还需要综合考虑多个重要因素。首先,异种非晶合金的热膨胀系数差异可能导致热应力等问题;其次,在液相焊接过程中,由于异种非晶合金的熔点不同,需要调控焊接温度等因素,以确保均匀融合;另外,在固相焊接过程中,由于异种非晶合金的过冷液相区的差异,界面两侧非晶可能无法同时达到粘性流动状态,也会给异种非晶焊接带来挑战。

1.2.1 异种非晶液相焊接

因为异种非晶合金的熔点差异,常见的如激光焊接、电子束焊接等液相焊接方法,需要输入更高的能量或需将焊点偏置才能实现焊接,工艺参数调控变得更为复杂,现阶段利用这些方法来实现异种非晶连接的研究也较少。

但存在一种液-固焊接方法,即将一种固态非晶合金插入模具内,而后再将另一非晶合金熔体浇注于该模具内,该方法由Huang等^[28]提出,焊接过程中固相一侧非晶合金会因另一液态非晶合金的热作用而在界面处瞬时熔化,从而形成良好的连接,他们利用该方法焊接了 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 和 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ 非晶合金,尽管在连

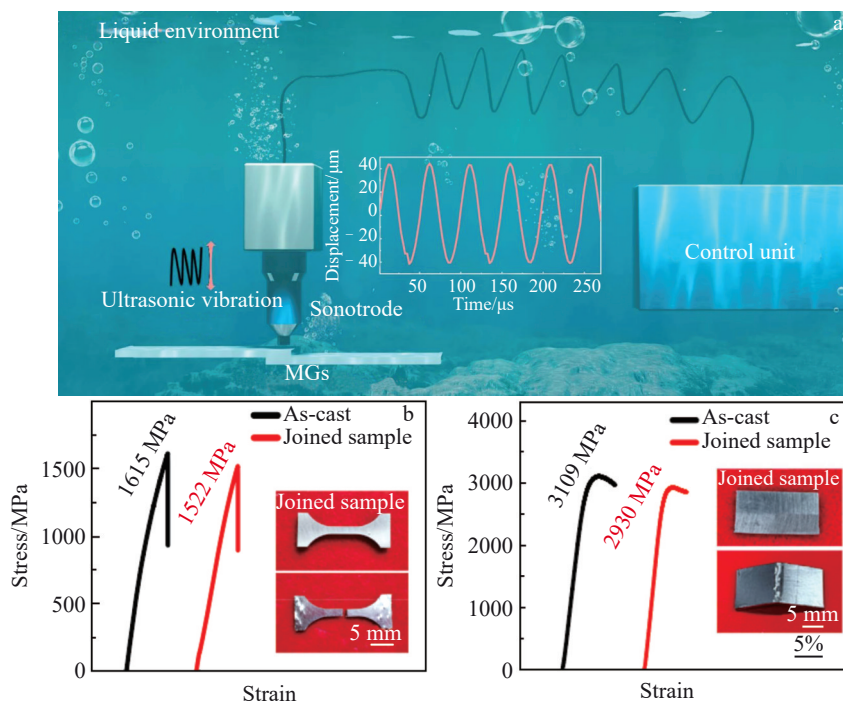


图3 液体环境下超声焊示意图与焊后非晶合金试样抗拉强度和抗弯强度力学性能与铸态试样对比图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic welding in liquid environment (a); comparison diagrams of mechanical properties of welded MG specimens with as-cast specimens: (b) tensile strength and (c) bending strength^[26]

接的界面处发生了晶化,但是液-固复合焊件形状设计灵活以及对设备要求简单,液-固连接仍然是一种有效的方法,可用来连接2种性能优异的金属材料。

1.2.2 异种非晶固相焊接

不同于异种非晶的液相焊接方法,对于异种非晶的固相焊接方法,如摩擦焊、热塑性焊等,无需考虑两侧材料的熔点差异,但这些方法都需要有共同的过冷液相区,可表现为部分重叠的过冷液相区。因此,常规固相焊接工艺参数下不同非晶合金的焊接组合有限。而且受到非晶形成能力的限制,可供进行摩擦焊、热塑性焊等固相焊接的异种非晶组合将更少。Kou等^[29]采用热塑性焊接方法对 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ (S1)、 $\text{Zr}_{47.5}\text{Cu}_{47.5}\text{Al}_5$ (S2)以及 $\text{Zr}_{52.5}\text{Cu}_{17.9}\text{Ni}_{14.6}\text{Al}_{10}\text{Ti}_5$ (S3)3种过冷液相区有重叠区域的非晶合金进行了不同组合的焊接,其中S1/S1、S3/S3和S1/S3这3种组合焊接成功,焊接接头内没有明显的焊接界面且保持非晶结构,其余组合则由于S2的非晶形成能力差,焊接过程中发生结晶,并导致微裂纹的产生,从而导致焊接失败。

此外,在这些固相焊接方法中,不同非晶合金在重叠部分的过冷液相区中也必须有差距不大的粘度。Shoji等^[30]研究了4组具有共同过冷液相区的异种非晶合金组合的摩擦焊,焊后试样如图4,前2组4a和4b之间实现了良好焊接,焊接界面无结晶且无明显缺陷,而后2组4c和4d无法连接,其原因是当非晶母材温度处于共同过冷液

相区时,其粘度存在3~4个数量级的差异,导致连接过程中界面一侧的非晶表面氧化膜未破除,从而阻止连接,并且提出成功连接允许的临界粘度差约在2个数量级内。

而当常规焊接工艺条件下过冷液相区无重叠部分时,摩擦焊、热塑性焊等固相焊接方法可行性无相关报道,但此时可以考虑非晶合金特征温度随升温速率的变化特性,即非晶合金的玻璃化转变温度和结晶温度随升温速率升高,过冷液相区向高温区转移的特征,再结合异种非晶合金的特征温度在升温速率上的依赖性差异,可使得异种非晶合金组合在高升温速率下产生过冷液相区部分重叠的现象,从而使异种非晶合金组合得以实现焊接。这一实现异种非晶合金的焊接的新思路由Yang等^[27]在研究 $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ (Zr1)和 $\text{Ti}_{41}\text{Zr}_{25}\text{Be}_{28}\text{Cu}_6$ (Ti1)2种低升温速率条件下无共同过冷液相区的非晶合金的脉冲电流焊时提出,其研究结果如图5a所示,随着升温速率的增大,Ti1和Zr1的玻璃化转变温度和结晶温度向高温方向偏移,由于Ti1的结晶温度变化更快,会与Zr1的过冷液相区相交形成4个区域,在I区,Ti1结晶,Zr1保持非晶态;在II区,Ti1和Zr1均保持非晶态;在III区,Ti1保持非晶状态,Zr1结晶;在IV区,Ti基和Zr基非晶均结晶,同时其研究还发现高升温速率条件下,非晶合金粘度差异会减小,并成功通过脉冲电流焊实现了Ti1和Zr1非晶合金的连接,脉冲电流为4.1 kA时所得的焊件焊接接头无晶化,如图5b和5c,且具有良好的抗拉剪切强度。

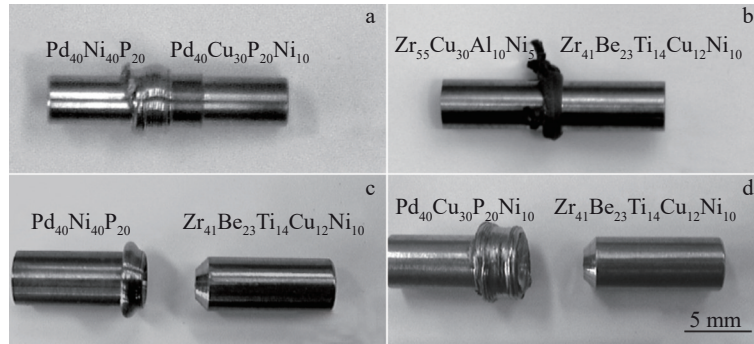


图4 异种非晶合金组合焊后样品形貌

Fig.4 Morphologies of samples obtained by dissimilar MG combination welding^[30]

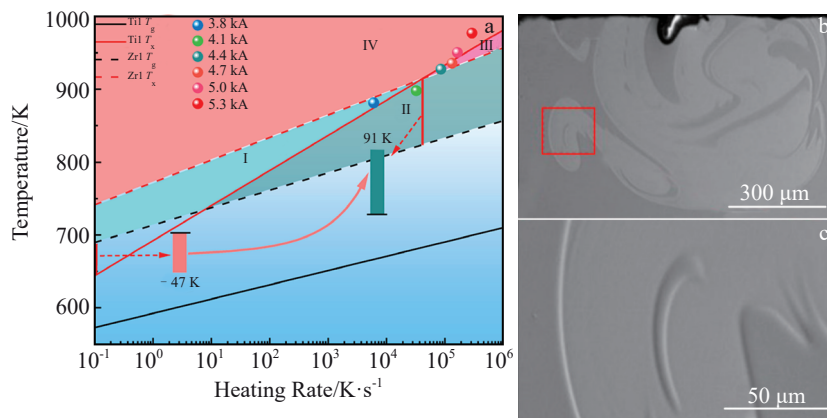


图5 Zr1 和 Ti1 非晶合金的特征温度 T_g 和 T_x 随升温速率变化曲线和脉冲电流为 4.1 kA 时焊接接头截面形貌和标记区域放大图

Fig.5 Characteristic temperature T_g and T_x curves of Zr1 and Ti1 MGs with heating rate (a); cross-section morphology of the welded joint with pulse current of 4.1 kA (b) and enlarged view of the marked area in Fig.5b (c)^[27]

2 非晶合金/晶态金属焊接

随着制造业的不断发展,人们越来越重视材料的性能要求。大多数产品需要适应各种恶劣环境,如耐腐蚀、耐高温蠕变等,单层金属材料已不能满足现代工业发展的需要。因此,异种材料的连接以发挥其自身的优势成为工业应用的必然趋势。

非晶合金通常表现出高硬度和脆性,而在受力时容易形成剪切带,这可能降低材料的强度和塑性。将非晶合金与晶态金属结合在一起可以减少剪切带的扩展,提高材料的强度和塑性性能^[31]。Wen 等^[32]在 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 非晶合金与铝合金扩散焊接工艺参数探索的基础上,提出了两步法扩散焊接工艺,并以铝合金为过渡层,实现了非晶合金/铝/铜/铝/非晶合金的 5 层连接,焊后非晶合金硬度明显提升,且晶态金属的出现能阻碍非晶合金中裂纹的扩展,导致接头破裂不是灾难性的,而是以防爆玻璃的方式破裂。而且非晶合金和晶态金属组合还有助于扩展非晶合金复合材料的工程应用和发展^[33]。

非晶合金的结构是高度无序的,而晶态金属具有有

序的晶体结构,为了解决材料之间的结构不匹配问题,同时增强焊接接头的机械性能,当非晶合金与晶态金属焊接时,往往会在焊接接头中引入一个过渡层。该过渡层通常同时具备非晶组织和晶态结构且具有一定厚度。Wang 等^[34]采用磁脉冲焊方法对 $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ 非晶合金与 Al 板进行了搭接焊接,形成了良好的焊接接头,接头内形成了由非晶相和纳米 Al 颗粒组成的具有涡旋结构的过渡层。Liang 等^[35]采用铵油炸药水下爆炸焊技术焊接铝板和 $Zr_{60}Ti_{17}Cu_{12}Ni_{11}$ 非晶合金时,形成了约 7 μm 的过渡层。

到目前为止,搅拌摩擦焊^[36]等固相焊接方法以及电子束焊接^[37-38]等液相焊接方法都成功实现了非晶合金与晶态金属的焊接。但无论是在液相焊接方法还是固相焊接方法中,非晶合金与晶态金属焊接过渡层的形成都依赖于原子的扩散过程,该过程对焊接接头性能有较大影响。

2.1 液相焊接

对于非晶合金和晶态金属之间液相焊接,由于非晶

合金和晶态金属存在一定的熔点差,通常需要采用一定的手段来解决焊接界面熔化不均的问题,这一点在异种非晶之间的液相焊接中也有体现,但由于焊接界面两侧组织并不相同,焊接过程中高温下靠近晶态金属侧的熔融晶态金属易与扩散而来的非晶合金中原子结合并快速形核生长,生成金属间化合物,而非晶合金一侧更多是由于其本身熔化而形成新相,另外在焊接热循环作用下,非晶热影响区也易发生晶化现象。陈伟专等^[39]将 $Zr_{57}Nb_5Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}$ 非晶合金与 3 种不锈钢进行了激光焊接,研究发现通过调节激光焦点偏移量可以改善非晶和不锈钢之间熔化不均的问题,提升产品性能,同时发现在非晶热影响区内生成了许多小颗粒结晶,而且发现在熔化混合形成的过渡层内不仅有非晶合金本身熔化后形成的相,也有非晶合金与铁结合的金属相,呈颗粒状与树枝状,经检验为 Zr-Ni 相和 Zr-Fe 相。Yu 等^[40]研究 $Zr_{44}Ti_{11}Ni_{10}Cu_{10}Be_{25}$ 非晶合金与 1100 铝板的脉冲激光焊接时,发现焊后形成的熔合区与 Al 界面形成了岛状结构,其内部不均匀分布着十字形 Zr_2Al 金属间化合物,同时非晶热影响区内生成了 Zr_2Ni 金属间化合物。

在室温条件下,大多数金属间化合物呈现出低脆性和低塑性的特征,易使材料失效断裂^[41]。因此,当连续且具有一定厚度的金属间化合物过渡层产生时,会很大程度上影响焊接接头的强度。但可以通过适当的工艺参数调控,将连续的金属间化合物转变为局部少量的组织,从而减小其产生的负面影响,而且还可以通过低温回火适当降低内应力与改善组织,以提高性能与强度^[39]。

焊接过程中,非晶合金与晶态金属之间原子扩散过程中出现的结晶现象并非单指金属间化合物的生成,还包括晶态金属在接头内部的再结晶现象等,而再结晶的晶粒由于受到非晶合金的限制,往往很小。这些细小晶粒的出现,会起到分散强化作用,从而对焊接接头硬度有一定的提升效果。Zhang 等^[42]在研究 $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 非晶合金和铜金属的脉冲激光焊时,将焊点设置在非晶

一侧,发现 Cu 与 Zr 基非晶合金中元素相互扩散至对方母材内部,扩散示意图如图 6,由于焊接界面非晶一侧局部熔化,大量的 Cu 原子随着熔化态合金扩散至处于过冷液相区的非晶合金中,使得非晶基体内部 Cu 含量升高,并于非晶一侧界面处形成富 Cu 区,而后扩散的 Cu 原子结晶,呈现出细小的晶粒结构,此处显微硬度较高,同时非晶侧形成过渡层内也发现 Zr_2Cu 、 Zr_2Ni 等金属间化合物的生成。

值得注意,熔融态的焊缝中,晶态金属中元素扩散至熔融的非晶合金内,会改变非晶合金的化学成分,并对其非晶形成能力有着显著影响,不利于焊缝中的非晶合金维持非晶态。Kim 等^[43]在利用电子束焊接 STS316L 不锈钢板与 $Zr_{41}Be_{23}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}$ 非晶合金板时,发现焊缝中不锈钢中的元素会扩散至非晶合金中,使非晶合金的非晶形成能力下降。同样的,Bhowmick 等^[44]在研究纯 Zr 与 $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}Be_{23}$ 非晶合金的电子束焊接时,发现 Zr 会向熔融的非晶合金中扩散,导致非晶合金的非晶形成能力下降,并使得焊缝中非晶凝固时发生结晶。

2.2 固相焊接

在非晶合金与晶态金属的固相焊接过程中,当发生冶金结合形成过渡层时,过渡层内部同样会发生结晶现象,如生成金属间化合物以及晶态金属的再结晶等。Saadati 等^[45]对纯铝与 $Cu_{50}Zr_{43}Al_7$ 非晶合金进行了直接扩散焊接,由于原子相互扩散在焊接界面处形成一定厚度过渡层,其内产生了金属间化合物相。另外,Feng 等^[46]采用爆炸焊接方法将 $Zr_{53}Cu_{35}Al_{12}$ 非晶合金与结晶铜制备成了复合板材,实验过程中通过将非晶合金埋入铜块的方法,有效避免了非晶合金脆性侧的断裂,焊接过程中产生的热量,促使了非晶合金界面一侧 Cu 纳米晶的生成,最后形成了硬度大于铜和原始非晶合金的厚度为 2.5~3.5 μm 的无缺陷过渡层。

但对于非晶合金与晶态金属的固相焊接方法而言,并非必须通过原子间扩散形成过渡层才能实现有效连

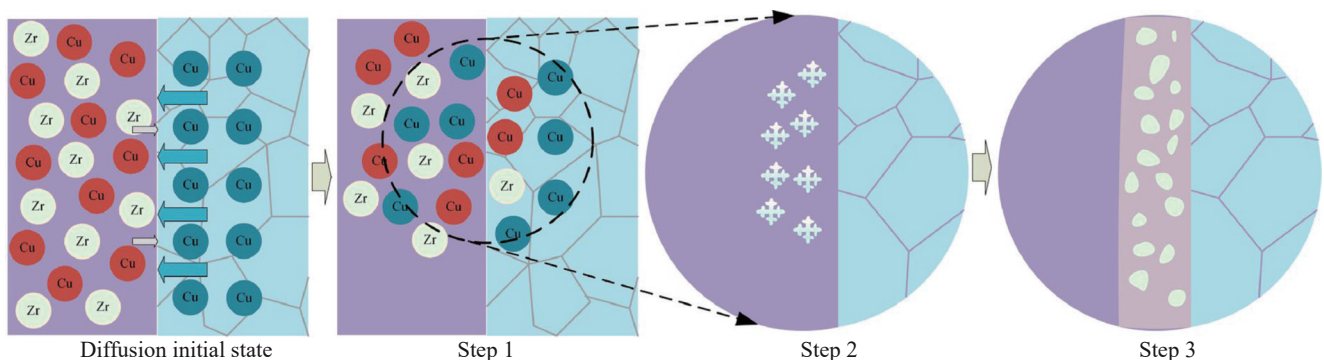


图 6 Zr 基非晶合金和 Cu 脉冲激光焊接界面原子扩散结晶示意图

Fig.6 Schematic diagrams of atomic diffusion and crystallization process at Zr-based MG and Cu interface during laser pulse welding^[42]

接,还可以仅通过塑形变形来实现,即让界面两侧材料仅机械连接在一起。此类情况主要出现在爆炸焊、激光冲击焊等高速冲击焊接方法中。Wang等^[47]将激光冲击焊接方法运用在了铜箔和铁基非晶合金(GB1K01)的连接,在整个焊接过程中,铁基非晶合金仍然保持非晶态,焊后形成波形界面,如图7,界面无金属间层和元素扩散,界面两侧纳米压痕硬度均有所提升,且搭接剪切试验中断裂位置在铜箔一侧。

值得注意,这些高速冲击焊接方法可以避免非晶合金晶化。Vivek等^[48]采用蒸发箔固态冲击焊实现了 $Zr_{58.5}Cu_{15.6}Ni_{12.8}Al_{10.3}Nb_{2.8}$ 非晶合金和铜的焊接,整个焊接过程中未发现非晶合金结晶,且接头强度大于母材。Chiba等^[49]在研究铜板与 $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{10}Ni_{12.5}Be_{22.5}$ 非晶合金的爆炸焊时,发现非晶合金未发生晶化。

3 非晶合金在钎焊中的应用

传统钎焊过程中,钎接头的冶金结合是熔化的钎料与母材之间发生较强的扩散、反应等作用,而形成固溶体、金属间化合物等界面结构的结果。其中钎料的润湿和铺展是钎焊的前提,非晶态钎料通常成分均匀、流动性好,而且具有较好的润湿性能,这意味着它们在液态状态下可以均匀地附着在基体表面,形成均匀的涂层。

非晶钎料作为一种具有潜在发展前景的新型材料,在过冷液相状态下实现对两侧材料的连接是可行的。而且非晶钎料成型性好,制备所得的非晶合金厚度可低至几十微米,能够弥补一些因含有脆性化合物的传统钎

料(如Cu-P基钎料)难加工成箔带的缺陷,适用范围更广。现已被广泛用于金属/金属、陶瓷/陶瓷以及陶瓷/金属间的连接。

3.1 金属间钎焊

传统的钎料熔化的金属间钎焊方法,常见的如炉中钎焊、真空钎焊等。在这些钎焊方法中,钎焊温度普遍高于钎料熔点,无论采用何种钎料均易使钎接头内出现脆性金属间化合物相,但相比于同成分晶态钎料,在同条件下,非晶态钎料钎接头区域元素的扩散深度及分布的均匀程度均更大,这有利于降低钎缝中脆性化合物相生成的概率,钎接头的钎缝中心组织也要明显均匀、细小,如图8^[50]。

为了进一步提升钎接头力学性能,可以通过对钎焊工艺参数的调控来使脆硬的金属间化合物相减少或消失。Song等^[51]采用 $Ti_{37.5}Zr_{37.5}Ni_{15}Cu_{10}$ 非晶钎料成功将 $TiB_w/TC4$ 复合材料钎焊至Ti60合金上,在940℃条件下钎焊10 min形成的接头界面组织为 $TiB_w/TC4$ 复合材料/ $\beta-Ti+TiB$ 晶须/ $(Ti,Zr)_2(Ni,Cu)$ 金属间层/ $\beta-Ti/Ti60$ 合金,其中 $(Ti,Zr)_2(Ni,Cu)$ 金属间层厚度随钎焊温度的升高而减小,1020℃时消失。

还可通过对非晶钎料进行组分设计,以提高钎接头的力学性能。除了考虑加入可以提高非晶形成能力的元素外,非晶钎料的设计原则通常优先考虑钎料元素与母材的固溶性,良好的固溶性有利于保证界面能形成冶金结合;其次考虑减少致使脆硬金属间化合物相生成的成分在非晶钎料内的含量,或加入能抑制脆硬金属间化

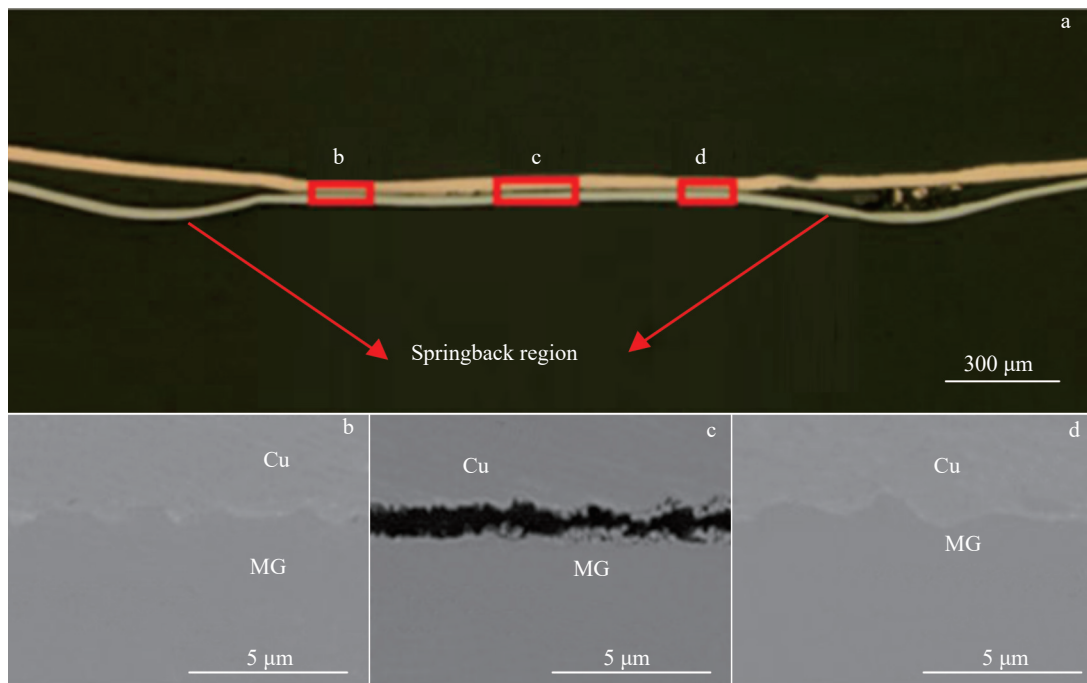


图7 激光冲击焊下Cu和非晶合金焊接界面和标记区域的放大图

Fig.7 Welding interface of Cu and MG joint by laser impact welding (a) and enlarged views of marked areas in Fig.7a (b-d)^[47]

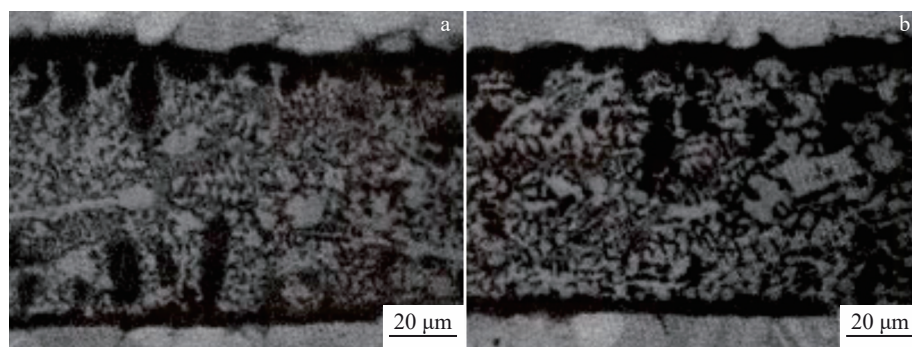


图8 Cu基合金晶态和非晶态钎料同条件下钎焊接头的显微组织

Fig.8 Microstructures of brazed joints of Cu-based alloy with crystalline (a) and amorphous (b) brazing materials under the same conditions^[50]

合物生成的元素^[52]；另外还得考虑研制的非晶钎料在焊件表面的润湿性。Dong等^[53]研制了2种组分不同的Cu基非晶态填充箔，分别为 $\text{Cu}_{43.75}\text{Ti}_{37.5}\text{Ni}_{6.25}\text{Zr}_{6.25}\text{V}_{6.25}$ 和 $\text{Cu}_{37.5}\text{Ti}_{25}\text{Ni}_{12.5}\text{Zr}_{12.5}\text{V}_{12.5}$ ，并利用这2种非晶箔对TiAl合金和40Cr钢板进行了真空钎焊，均获得了无微孔和裂痕的接头，在同样钎焊温度下，前者Ti含量较多，形成钎焊接头中会生成更多的 Ti_9Al_6 和 Ti_2Cu 等脆性金属间化合物，其接头平均抗剪强度远低于另一非晶箔钎焊接头，而且V与Fe和Ti均具有无限固溶性，有利于焊件间形成冶金结合层，综合研究发现，设计Ti少V多的CuTiNiZrV非晶合金钎料有助于钎焊TiAl合金与钢。

值得注意，上述传统的钎料熔化的金属间钎焊方法，因钎焊温度较高，会给焊接接头带来一定程度热损伤，而一种名为表面活化过冷液相区钎焊的使非晶钎料处于固相的钎焊方法，由Kato等^[54]提出，该方法将表面活化钎焊技术去除氧化层的优势与非晶合金过冷液相区的低粘度的特性相结合，有望在相对较低温度下获得热损伤较小的良好刚性接头，Kato等利用这种方法，以 $\text{Pt}_{60}\text{Ni}_{15}\text{P}_{25}$ 非晶合金做钎料，实现了纯铜的连接，接头中非晶相保存良好，此时形成的接头强度与纯铜一致。

3.2 陶瓷/陶瓷钎焊

与非晶合金类似，陶瓷具有良好的耐热性、耐磨性和绝缘性能等优良特性，但其韧性值较低，属于脆性材料，仅使用陶瓷制造大型复杂结构仍然是一个挑战。为了克服陶瓷的脆弱性及难加工等问题，拓宽其进一步的应用与发展，同样也可采用焊接技术将陶瓷材料连接起来。

在现有的连接陶瓷的技术中，钎焊技术因工艺简单、成本低、接头尺寸和形状限制小等优点，适合大规模工业生产，得到了广泛的应用^[55]。

为了使陶瓷材料能够实现连接，首要问题是使钎料能够润湿其表面，因此，钎料的选择是陶瓷钎焊的关键问

题之一。研究发现，活性合金钎料在陶瓷表面表现出了良好的润湿性^[56-57]，当前发展比较成熟的是添加了活性元素Ti的Ag-Cu基钎料，但这类富Ag基合金（60~70%，质量分数）的高成本严重限制了其发展。

非晶合金钎料，作为一种亚稳态材料，已被证实陶瓷表面有着良好的润湿性能，有望取代传统的Ag-Cu-Ti合金，而且非晶合金钎料在高温钎焊过程中有着较高的原子扩散速率，能够加快表面反应。Wang等^[58]在研究 $\text{Cu}_{41.83}\text{Ti}_{30.21}\text{Zr}_{19.76}\text{Ni}_{8.19}$ 非晶钎料钎焊 ZrB_2 -SiC陶瓷时，发现非晶合金钎料对 ZrB_2 -SiC陶瓷润湿性良好，随着加热温度的升高，润湿角逐渐减小，而且发现在1183 K条件下保温300 s后，润湿角减小至 10° ，600 s后，润湿角达到平衡值 5° ，表明该条件下非晶合金钎料在 ZrB_2 -SiC陶瓷有着较高扩散速率，1183 K条件下保温900 s形成的接头界面结合良好，其抗弯强度达240 MPa。

与金属间钎焊类似，在陶瓷间的钎焊过程中，非晶态钎料钎焊接头区域元素的扩散深度及分布的均匀程度大于晶态钎料^[59]，所形成的钎焊接头力学性能同样也更加优异。Zou等^[60]在采用相同成分的 $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 晶态钎料和非晶钎料钎焊了 Si_3N_4 陶瓷，在1323 K温度下钎焊120 min时，晶态钎料的接头抗弯强度为87 MPa，而非晶态钎料的接头抗弯强度为160 MPa。

3.3 金属/陶瓷钎焊

将陶瓷和金属进行焊接十分必要，两者在性能上能形成一种互补关系，使之能成为理想的结构和工程材料，以满足现代工程的应用，大大扩展陶瓷材料的应用范围^[61]。

生产中常用钎焊将陶瓷和金属连接起来，但陶瓷和金属之间普遍润湿性差以及两者之间存在较大的热膨胀系数差异等问题仍然存在，多数情况下无法避免连接界面处出现高残余应力集中的现象，钎焊接头力学性能往往较差。

而基于非晶钎料在金属间和陶瓷间钎焊的可行性和

所展现的优于晶态钎料的性能,在钎焊金属/陶瓷时采用非晶合金钎料一定程度上可以解决上述问题。Liu等^[62]利用 $\text{Ti}_{33}\text{Zr}_{17}\text{Cu}_{50}$ 非晶合金作钎料,在真空条件下,成功钎焊了 ZrO_2 陶瓷和TC4合金,研究发现,随着钎焊温度、加热时间和冷却速度的变化,钎焊界面的组织和成分发生了变化,钎焊的抗剪强度随之改变,在钎焊温度为1173 K、加热时间为10 min、冷却速度为5 K/min的最佳工艺参数下,可获得最大抗剪强度162 MPa。同样的,Liu等^[63]将 $\text{Ti}_{30.21}\text{Cu}_{41.83}\text{Zr}_{19.76}\text{Ni}_{8.19}$ 非晶合金钎料运用到了超高温陶瓷 ZrB_2 -SiC与TC4合金的钎焊中,钎焊接头中生成了 β -Ti、 $(\text{Ti,Zr})_2(\text{Cu,Ni})$ 、TiCu、 Ti_2Cu 、TiC、 Ti_5Si_3 、TiB以及 TiB_2 ,研究发现,随着保温时间的延长,钎焊接头的抗剪强度会随着这些共晶结构和脆性金属间化合物的增多而变化,最高可达345 MPa。

4 未来发展趋势

目前,非晶合金焊接是研究非晶合金并拓展其应用的重要方向之一。随着制造业的不断发展,单一的非晶合金成形工艺不足以满足市场对非晶合金应用的需求,而且非晶合金钎料在钎焊领域呈现出了巨大的应用潜力,人们对于非晶合金焊接的关注不断增加,其未来发展趋势仍然具有广泛的探索空间。本文将在对非晶合金焊接研究进展进行全面论述的基础上,对该研究方向未来的发展趋势进行展望:

1)一般按非晶合金的焊接原理,将焊接分为两类:非晶固相焊接和液相焊接,前者焊缝温度处于非晶的过冷液相区,后者焊缝温度高于非晶熔点。但Yang等^[64]提出了一种新的非晶合金焊接类别,即结晶相焊接,在非晶合金的结晶温度范围内实现焊接,在其研究中结晶相焊接接头强度大于液相和固相焊接,依据其研究结果可将焊接方式具体分为过冷液相区连接、结晶相连接以及液相连接。结晶相焊接的提出,使得连接一些过冷液相区小、非晶形成能力差的非晶合金体系成为可能,此类焊接工艺还有待进一步探索。

2)虽然现阶段非晶合金焊接研究中,无论非晶间焊接还是非晶与异种材料焊接通过工艺参数优化后均已能够获得力学性能较好的焊接接头,但非晶合金部分容易产生晶化的问题仍然存在。因此,寻找更加合适的焊接方法有着重要意义。例如,在焊接过程中加入冷却设备辅助,Wang等^[65]利用激光焊接方法,配合液冷装置,较好地避免了Zr基非晶合金焊接过程中各部分的晶化现象发生。又或者是采用超声设备辅助焊接,超声塑性的存在使得非晶合金可以在低温下实现连接,这种性质也同样适用于异种非晶的焊接,可以有效避免过冷液相区的差异带来的问题。

(3)目前,在非晶合金作为钎料的领域,对于金属间

或陶瓷间,亦或者是金属/陶瓷间的钎焊,都主要是利用非晶钎料与基体材料的反应,形成冶金结合层,而实现良好连接。焊后非晶钎料都发生了晶化,而对于利用非晶钎料过冷液相区的特性实现钎焊以及焊后非晶钎料维持非晶态的报道则很少,利用非晶钎料过冷液相区的特性实现钎焊,通常焊接温度较低,一定程度上能够避免接头残余应力的产生,而焊后非晶钎料维持非晶态是否于焊件性能有利尚且未知,这都需要重点关注。

参考文献 References

- [1] Wang Weihua(汪卫华). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* (中国科学院院刊)[J], 2022, 37(3): 352
- [2] Lei Yang(雷杨), Wang Pei(王沛), Deng Liang(邓亮) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(4): 1497
- [3] He Peng(何鹏), Chai Kan(柴戡), Lin Tiesong(林铁松). *Welding & Joining*(焊接)[J], 2012(10): 19
- [4] Li J F, Sun Y H, Ding D W et al. *Journal of Non-Crystalline Solids* [J], 2020, 537: 120016
- [5] Wang H Y, Yu C, Xu W H et al. *Metals and Materials International*[J], 2021, 27(12): 5314
- [6] Li X P, Zhang Z Y, Yang Y et al. *Materials*[J], 2020, 13(16): 3488
- [7] Zhang X Y, Zhang M, Chen W B et al. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*[J], 2021, 36(5): 624
- [8] Jamili-Shirvan Z, Haddad-Sabzevar M, Vahdati-Khaki J et al. *Materials & Design*[J], 2016, 100: 120
- [9] Huang Z Y, Fu J N, Li X et al. *Science China Materials*[J], 2022, 65(1): 255
- [10] Huang Zhenghua(黄正华), Qi Wenjun(戚文军), Zheng Kaihong(郑开宏) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2010, 34(4): 509
- [11] Ma Yanyi(马焰议), Wang Haiyan(王海燕), Zhang Yupeng(张宇鹏) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(12): 138
- [12] Wang Ting(王廷), Shi Zhiyuan(石志远), Li Ning(李宁) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2018, 39(8): 38
- [13] He M K, Zhang Y, Xia L et al. *Science China(Physics, Mechanics & Astronomy)*[J], 2017, 60(7): 76
- [14] Ouyang D, Zhang P C, Zhang C et al. *Applied Materials Today*[J], 2021, 23: 100988
- [15] Yan S J, Song C L, Huang L L et al. *Metals*[J], 2023, 13(7): 1283
- [16] Wang G, Huang Y J, Cao W et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 32: 93
- [17] Chen W, Liu Z, Schroers J. *Acta Materialia*[J], 2014, 62(1): 49
- [18] Liu Z, Chen W, Carstensen J et al. *Acta Materialia*[J], 2016, 105(1): 35

- [19] Ji Y S, Fujii H, Sun Y F *et al. Materials Transactions*[J], 2009, 50(6): 1300
- [20] Ma X Q, Howard S M, Jasthi B K. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2014, 136(5): 051012
- [21] Gou Kexing(郭克星), Gao Jie(高杰). *Nonferrous Metals Processing(有色金属加工)*[J], 2024, 53(4): 1
- [22] Li X, Wei D, Zhang J Y. *Applied Materials Today*[J], 2020, 21: 100866
- [23] Ma J, Yang C, Liu X D *et al. Science Advances*[J], 2019, 5(11): 1
- [24] Wu W Z, Jiang J L, Li G W *et al. Journal of Non-crystalline Solids*[J], 2019, 506: 1
- [25] Zhu Z Q, Wang Y J, Zhang Y F. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*[J], 2016, 18(7-8): 723
- [26] Li L Y, Li X, Huang Z Y *et al. Nature Communications*[J], 2023, 14(1): 6305
- [27] Yang Y, Kong J, Dong K W *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2023, 864: 144608
- [28] Huang Y J, Xue P, Guo S *et al. Scientific Reports*[J], 2016, 6: 30674
- [29] Kuo P H, Wang S H, Liaw P K *et al. Materials Chemistry and Physics*[J], 2010, 120(2-3): 532
- [30] Shoji Takuo, Kawamura Yoshihito, Ohno Yasuhide. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 375-377: 394
- [31] Zhu Y Y, Liao G L, Shi T L *et al. Acta Materialia*[J], 2016, 112(1): 378
- [32] Wen C, Shi T L, Chen B *et al. Materials & Design*[J], 2015, 83: 320
- [33] Chen B, Shi T L, Liao G L. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*[J], 2014, 29(4): 786
- [34] Wang D Z, Li N, Liu L. *Intermetallics*[J], 2018, 93: 180
- [35] Liang H L, Luo N, Chen Y L *et al. Composite Interfaces*[J], 2021, 28(10): 997
- [36] Wang D, Xiao B L, Ma Z Y *et al. Scripta Materialia*[J], 2009, 60(2): 112
- [37] Kim J, Kawamura Y. *Scripta Materialia*[J], 2007, 56(8): 709
- [38] Kim J, Kawamura Y. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 207(1-3): 112
- [39] Chen Weizhuan(陈伟专), Wang Chengyong(王成勇), Zhu Xuguang(朱旭光) *et al. Laser Technology(激光技术)*[J], 2023, 47(2): 185
- [40] Yu X Q, Huang J K, Shao L. *Materials Research Express*[J], 2019, 5(1): 015203
- [41] Wang Yan(王妍), Cui Chunjuan(崔春娟), Zhang Kai(张凯) *et al. Materials Reports(材料导报)*[J], 2022, 36(24): 20100245
- [42] Zhang W Z, Huang J K. *Journal of Non-crystalline Solids*[J], 2023, 612: 122358
- [43] Kim J, Kawamura Y. *Scripta Materialia*[J], 2011, 65(12): 1033
- [44] Bhowmick R, Bysakh S, Kawamura Y *et al. Journal of Materials Research*[J], 2007, 22(2): 437
- [45] Saadati A, Malekan M, Khodabakhshi F *et al. Materials Characterization*[J], 2023, 195: 112480
- [46] Feng J R, Chen P W, Zhou Q. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2018, 27(6): 2932
- [47] Wang X, Luo Y P, Huang T *et al. Materials*[J], 2017, 10(5): 523
- [48] Vivek A, Presley M, Flores K M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 634: 14
- [49] Chiba A, Kawamura Y, Nishid M. *Materials Science Forum*[J], 2008, 566: 119
- [50] Zou Jiasheng(邹家生), Wang Chao(王超), Xu Xiangping(许祥平) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2011, 32(12): 33
- [51] Song X G, Zhang T, Feng Y J *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27(10): 2193
- [52] Qiu Q W, Wang Y, Yang Z W *et al. Materials & Design*[J], 2016, 90: 650
- [53] Dong H G, Yang Z L, Wang Z R *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2015, 31(2): 217
- [54] Kato H, Yu S G, Setyawan A D *et al. Scripta Materialia*[J], 2013, 68(9): 699
- [55] Chen H Y, Zhao S, Nai X *et al. Ceramics International*[J], 2021, 47(15): 21433
- [56] Li J K, Liu L, Wu Y T *et al. Materials & Design*[J], 2008, 30(2): 275
- [57] Zhou Y H, Liu D, Niu H W *et al. Materials & Design*[J], 2016, 93: 347
- [58] Wang G, Xiao P, Huang Z J *et al. Ceramics International*[J], 2016, 42(4): 5130
- [59] Zou Jiasheng(邹家生), Zhao Hongquan(赵宏权), Jiang Zhiguo(蒋志国). *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2007, 28(3): 45
- [60] Zou J S, Jiang Z G, Zhao Q Z *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 507(1-2): 155
- [61] Jiao Renbao(焦仁宝), Rong Shoufan(荣守范), Li Hongbo(李洪波) *et al. Foshan Ceramics(佛山陶瓷)*[J], 2018, 28(3): 6
- [62] Liu Y H, Hu J D, Shen P *et al. Materials & Design*[J], 2013, 47: 281
- [63] Liu Y P, Wang G, Cao W *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2017, 30: 516
- [64] Yang Y, Kong J, Dong K W *et al. Intermetallics*[J], 2022, 144: 107520
- [65] Wang H S, Chen H G, Jang J S C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 528(1): 338

Research Progress on Welding of Metallic Glasses

Gong Pan¹, Liu Xiaoqi¹, Huang Hu², Tang Xinlong¹, Zhuo Jun³, Zhang Mao¹, Tang Xuefeng¹, Wang Xinyun¹, Liu Hui¹

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2. Key Laboratory of CNC Equipment Reliability, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China))

(3. Shanghai Safi Technology Measurement Co., Ltd, Shanghai 201500)

Abstract: Metallic glasses with excellent physical and chemical properties are hindered by their size constraints, limiting their practical applications. However, welding technique holds the potential to overcome these limitations. Welding methods of metallic glasses can be classified into liquid phase welding and solid phase welding, each involving distinct mechanisms to form amorphous joints. Effective preventing crystallization is crucial for obtaining high quality joints. This paper provides a systematic and comprehensive review of the research in the field of metallic glass welding, and summarizes the research status of metallic glass and metallic glass welding as well as metallic glass and crystalline metal welding. It focuses on the characteristics and limitations of different welding techniques to achieve fully amorphous welded parts. Additionally, it reviews the research status of metallic glasses as solder materials in brazing process and analyzes the potential applications of metallic glass-based brazing materials, and summarizes approaches for enhancing the mechanical properties of brazed joints. Finally, this paper outlines prospects for the future research and development of metallic glass welding.

Key words: metallic glass; welding technique; metallic glass-based brazing material; crystallization

Corresponding author: Liu Hui, Master, State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China, E-mail: zqliuhui@hust.edu.cn