引用格式：徐斌，张明达，张永康，等. 三种超薄金属的拘束TIG电弧焊接焊缝质量和性能研究[J]. 材料工程，2026，54(8)：313-328.
XU Bin，ZHANG Mingda，ZHANG Yongkang，et al. Weld quality and performance of constrained TIG arc welding for three ultra-thin metals[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：313-328.

三种超薄金属的拘束TIG电弧焊接焊缝质量和性能研究

徐　斌[1*]，张明达[1]，张永康[1]，张轩浩[1]，高湘君[1]，杜琨红[2]，蒋　凡[1]，陈树君[1]
（1 北京工业大学 汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心，北京 100124；
2 嘉兴市弘川机电设备有限公司，浙江 嘉兴 314200）

摘要：超薄金属板焊接面临着易变形、熔深控制困难及接头性能波动大等挑战，而传统焊接方法往往难以克服这些困难获得高质量的焊缝。为了克服这些传统焊接工艺局限，采用拘束TIG电弧焊接工艺，对厚度为0.05～0.5 mm的304不锈钢、5052铝合金和T2紫铜三种超薄金属的焊缝质量和性能进行了具体研究和对比分析。通过金相分析深入探讨了焊缝微观组织，同时采用激光共聚焦显微镜定量表征了焊缝形貌与表面起伏度，并利用拉伸实验和四点探针法对焊缝的力学性能和导电性进行了量化评估。研究结果表明：拘束TIG电弧焊接工艺成功实现了三种超薄金属材料的稳定焊接，同时焊缝成形良好且力学性能较为优异。焊接接头的抗拉强度对比分析表明：304不锈钢焊缝抗拉强度可达母材的90%，5052铝合金和T2紫铜焊缝抗拉强度约为母材的50%；304不锈钢和T2紫铜焊缝金相组织显示无明显缺陷，但5052铝合金有轻微咬边。导电性测试显示，焊缝电阻率相较于母材仅有轻微增加，仍能满足应用要求。拘束TIG电弧焊接工艺在超薄金属板焊接中展现出较为显著优势，其所获得的焊缝质量和性能可有效满足实际应用需求。验证了该工艺在超薄板焊接中的良好应用前景，为超薄板拘束TIG电弧焊接的实际应用提供了理论指导。

关键词：超薄板焊接；拘束TIG电弧；焊接性能；304不锈钢；5052铝合金；T2紫铜
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000391　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000391
中图分类号：TG444　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0313-16

Weld quality and performance of constrained TIG arc welding for three ultra-thin metals

XU Bin[1*]，ZHANG Mingda[1]，ZHANG Yongkang[1]，ZHANG Xuanhao[1]，GAO Xiangjun[1]，
DU Kunhong[2]，JIANG Fan[1]，CHEN Shujun[1]
（1 Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China；2 Jiaxing Hongchuan Mechanical and Electrical Equipment Co.，Ltd.，Jiaxing 314200，Zhejiang，China）

Abstract：Ultra-thin metal plate welding presents several formidable challenges，including a high susceptibility to deformation，difficulties in precisely controlling weld depth，and significant fluctuations in joint performance. Traditional welding methods frequently fall short in overcoming these obstacles to achieve high-quality welds. To overcome the limitations inherent in conventional welding processes，the constrained tungsten inert gas（TIG）arc welding technique is adopted. A comprehensive and comparative analysis is conducted on the weld quality and performance of three ultra-thin metals：304 stainless steel，5052 aluminum alloy，and T2 copper. Through in-depth metallurgical analysis，the microstructure of the welds is thoroughly examined. Moreover，laser confocal microscopy is utilized to quantitatively characterize the weld morphology and surface roughness. Tensile tests and the four-point probe method are employed to assess the mechanical properties and electrical conductivity of the welds，respectively. The results

demonstrate that the constrained TIG arc welding process successfully achieve stable welding for all three ultra-thin metal materials, yielding well-formed welds with relatively excellent mechanical properties. A comparative analysis of the tensile strength of the welded joints reveal that the tensile strength of 304 stainless steel welds can reach 90% of that of the base material, while the tensile strengths of 5052 aluminum alloy and T2 copper welds are approximately 50% of the base material's. Metallurgical examination show no obvious defects in the welds of 304 stainless steel and T2 copper, but minor undercutting is detected in the 5052 aluminum alloy welds. Conductivity tests indicate only a slight increase in weld resistivity compared to the base material, which still satisfies application requirements. The constrained TIG arc welding process exhibits significant advantages in ultra-thin metal plate welding, with the resulting weld quality and performance effectively meeting the needs of practical applications. This validates the promising application prospects of this process in ultra-thin plate welding and offers theoretical guidance for its practical implementation.

Key words: ultra-thin plate welding; TIG arc constrained; welding performance; 304 stainless steel; 5052 aluminum alloy; T2 pure copper

现代工业对材料性能的更高需求推动了超薄板在电子、航空航天、医疗器械等高科技领域的广泛应用，其轻量化和功能性优势日益凸显[1-3]。然而，超薄板的焊接仍是超薄金属板实际应用的一个难题。因为传统的焊接方法，如常规 TIG 焊，往往存在因热输入过高、易导致焊件变形、熔深控制困难以及焊缝质量难以保证等问题，严重限制了超薄板在高端制造中的应用[4]。

为了克服这些挑战，科研人员已探索多种焊接方法：如纳秒激光束焊接（nanosecond laser beam welding，NLBW）因其高度局部化的热输入和较小的热影响区，在超薄板焊接中展现出潜力[5-6]。尽管 NLBW 能够实现厚度为 0.025～0.2 mm 的不锈钢、铝合金和铜的微焊接[7-10]，但其仍面临成本高昂、操作复杂以及易产生烧穿和夹杂等熔焊共性问题，这些缺陷会加速焊缝腐蚀并降低接头力学性能[11-13]；而微搅拌摩擦焊（micro friction stir welding，μFSW）作为一种固相连接技术，具有组织精细、无气孔裂纹、尺寸稳定性好等优点，被视为一种环保的焊接方案[14-18]。μFSW 已成功应用于厚度小于 1 mm 的铝合金和铜板[19-24]。然而，超薄板的高热导率、高反射率以及厚度限制，使得常规 μFSW 在 0.02～0.05 mm 等极薄材料，特别是铜箔的焊接中面临挑战，影响了焊缝质量[14,25-26]。

鉴于上述方法的局限性，亟须一种能有效控制热输入并实现高质量超薄板连接的新型焊接技术。Murata 等[11]开发了一种新型电弧焊系统，该系统利用特殊设计的喷嘴对气体进行整流和加速，从而对电弧进行有效压缩。这种“拘束 TIG 电弧焊接”技术能够显著抑制金属蒸气对电弧和钨丝的影响，有望为超薄金属的稳定焊接提供创新解决方案。尽管该技术潜力巨大，但目前针对其在超薄板焊接性能方面的系统研究仍显不足，特别是对于不同类型金属材料的适用性、焊缝质量和力学性能的量化评估尚不充分，此外，在电子器件等应用中，焊接接头的导电性是超薄金属连接的重要功能性指标，现有研究对此关注较少，这些均限制了其在实际应用中的推广。

由于 304 不锈钢、5052 铝合金和 T2 紫铜可分别代表工程应用中广泛使用的超薄钢、铝合金和铜材，其物理和化学特性（如导热性、熔点、氧化倾向等）差异显著，为全面验证拘束 TIG 电弧焊接工艺的普适性和针对性提供了必要的基础条件。为此，本工作采用正交实验方法，通过金相分析、力学性能测试、激光共聚焦等多种先进表征手段，深入分析了拘束 TIG 电弧对焊缝微观组织、宏观成形、力学性能（如抗拉强度）以及表面质量（如起伏度）的影响，其研究将为拘束 TIG 电弧焊接工艺在超薄板连接中的应用提供重要的理论依据和实践参考，有望突破传统电弧焊在超薄板厚度方面的局限难题。

1 实验设备与方法

1.1 焊接实验工艺

采用 MFW-100FT 型材料连接机（如图 1 所示）进行实验。该设备基于拘束 TIG 电弧焊接原理，配备高精度焊接控制系统，设备结构紧凑，操作简便，可实现对超薄板的高效、稳定焊接。新型压缩喷嘴[27]内部设置 6 个长缝与钨电极接触。钨电极可沿孔口上下位移，实现精确位置调节，从而精准控制热输入，为超薄

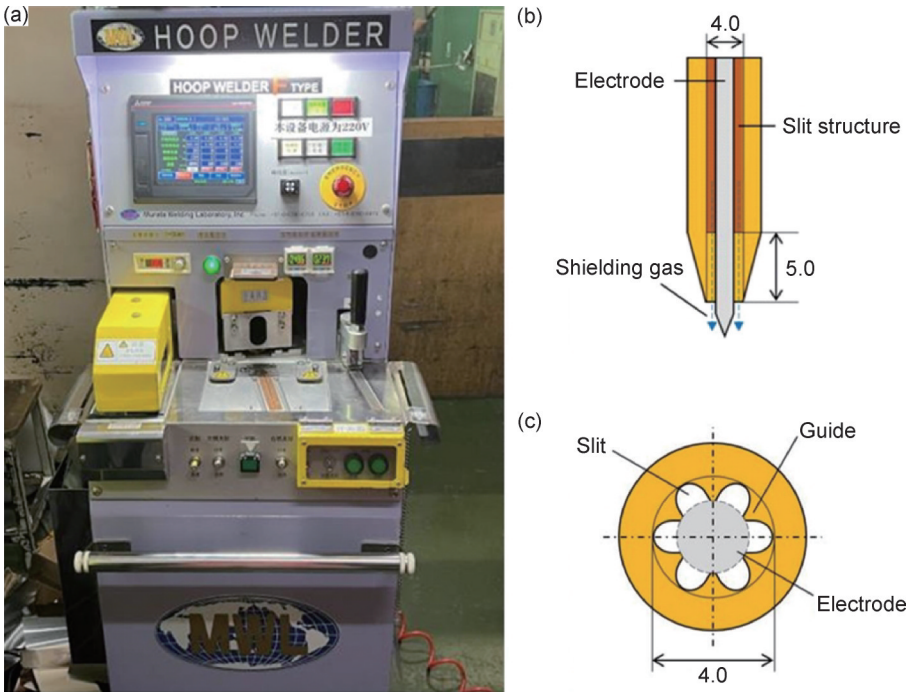


图 1　焊接实验装置

(a)焊接实验平台;(b)喷嘴结构垂直横截面;(c)喷嘴结构水平截面

Fig.1　Welding experiment setup

(a)welding test platform;(b)vertical cross-section of nozzle structure;(c)horizontal cross-section of nozzle structure

板焊接提供可靠保障。实验选取了 304 不锈钢、5052 铝合金和 T2 紫铜三种常见的金属材料,并针对不同材料设置了多组焊接厚度。在本次实验研究中,针对不同材料的物理特性,设定了相应的工艺参数。表 1 和表 2 分别列出了 304 不锈钢与 5052 铝合金的具体焊接工艺参数,其中 Frequency 为脉冲电流的频率。针对高导热材料,T2 紫铜的焊接参数如表 3 所示。通过对比表 1～3 的数据可以发现,T2 紫铜的焊接电流参数明显高于 304 不锈钢和 5052 铝合金。该现象主要源于 T2 紫铜极高的导热性和反射率。在焊接过程中,为了形成稳定的熔池并实现有效熔合,必须施加更高的热输入。这是为了有效补偿因紫铜快速散热以及对电弧能量的高反射所带来的能量损失,从而确保焊缝能够充分熔化并获得良好的成形质量。

表 1　304 不锈钢焊接参数

Table 1　304 stainless steel welding parameters

Thickness/mm	Electric current/A	Frequency/Hz	Velocity/(mm·min^{-1})
0.50	55	70	800
0.20	28	120	2000
0.10	16	120	3200
0.08	12	120	3800
0.05	10	120	7000

表 2　5052 铝合金焊接参数

Table 2　5052 aluminum alloy welding parameters

Thickness/mm	Electric current/A	Frequency/Hz	Velocity/(mm·min^{-1})
0.50	55	70	1000
0.20	50	120	3500
0.10	23	120	4500
0.08	20	120	5000
0.05	12	120	7000

表 3　T2 紫铜焊接参数

Table 3　T2 copper welding parameters

Thickness/mm	Electric current/A	Frequency/Hz	Velocity/(mm·min^{-1})
0.50	135	70	800
0.20	72	120	2000
0.10	41	120	3100
0.08	37	120	4800

1.2　焊接接头质量和性能综合测试分析方法

1.2.1　导电性测试

为了评估焊接接头的电阻特性,室温下采用四点法测量电阻,测试长度为 60 mm,所使用的设置如图 2(a)所示。测量电流为 2 A,持续 10 s,重复上述步骤,共采 10 组数据。对每组数据采集的电压值进行平均,

得到平均电压U。根据电阻率公式,计算出标准样品的横截面积S,将其作为焊接接头的横截面积S。利用已知电阻率的标准样品,测量其在相同电流下的电压。由于焊接接头和标准样品的材料相同,且电流通过的面积相等,根据欧姆定律,利用测得的平均电压U和已知的电流I计算出焊接接头的电阻R。将R、S和L(导线长度)代入公式(1),计算焊接接头电阻率ρ。通过与母材的电阻率进行对比,可以评估焊接对材料导电性能的影响。已在实验中对母材和焊缝区域分别进行了电阻测量。

$$\rho=\frac{RS}{L} \tag{1}$$

1.2.2 力学性能测试与微观组织分析

按照GB/T 228—2002标准,从母材和焊件上截取拉伸试样(如图2(b)所示),其切割方向垂直于焊缝。使用WDW-50电子万能试验机,以2 mm/min的拉伸速度进行拉伸实验。实验过程中采用夹具固定试样,以保护焊缝。实验获得了母材和焊缝的抗拉强度数据。本工作对通过焊接实验获得的焊接接头,使用Olympus FV3000激光共聚焦显微镜拍摄其微观形貌,以观察接头表面的弧纹和缺陷。此外,利用KC-X1000激光光谱共聚焦显微镜获取了焊缝形貌的3D图像,用于观察焊缝表面弧形纹的起伏并量化其起伏度。

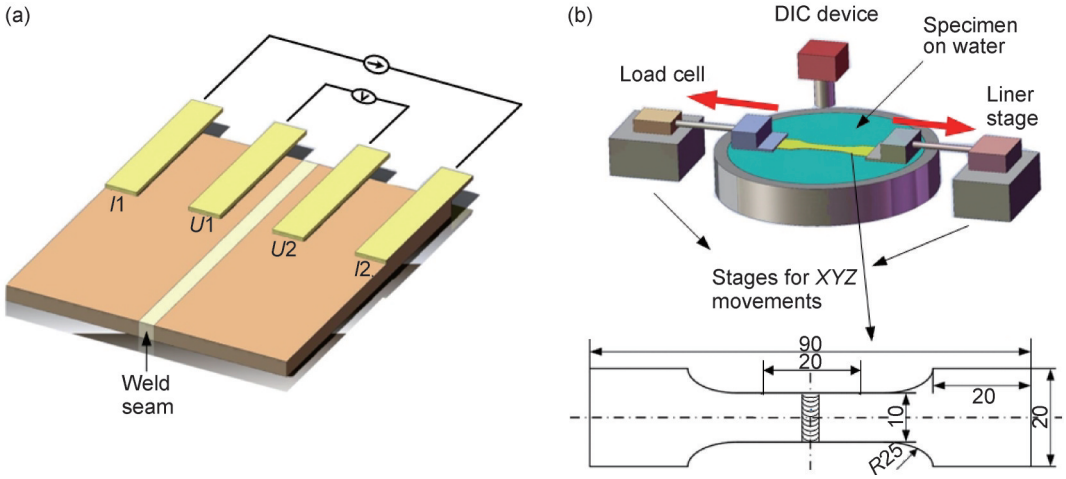


图2 四点法测电阻示意图(a)及拉伸试样尺寸图(b)

Fig.2 Schematic of four-point method resistance measurement(a) and diagram of tensile specimen size(b)

2 结果与分析

2.1 拘束TIG电弧焊接接头宏观成形质量分析

不同厚度304不锈钢、5052铝合金和T2紫铜的焊缝宽度如图3所示,从测量结果表明,不同厚度材料的焊缝宽度存在显著差异。其中,熔点较低、热导率较高的T2铜和5052铝合金形成了更宽的焊缝,而熔点较高、热导率较低的304不锈钢则形成了较窄的焊缝。

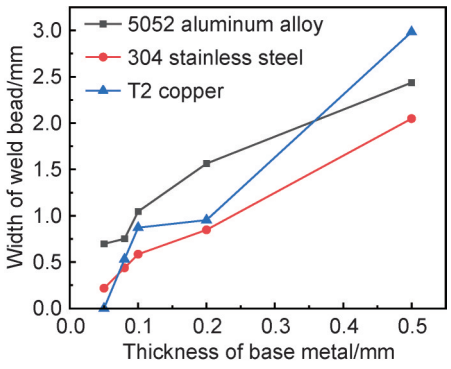


图3 不同厚度304不锈钢、5052铝合金和T2紫铜的焊缝宽度

Fig.3 Weld width of 304 stainless steel, 5052 aluminum alloy, and T2 copper at different thicknesses

图4为不同厚度304不锈钢焊缝的表面形貌。随着板厚的减小,焊缝宽度逐渐变窄,这主要是由于薄板焊接时热输入减少且熔池较小所致。较厚的焊缝(0.5 mm和0.2 mm)呈现出相对规则的形状和清晰的焊缝轮廓;较薄的焊缝(0.1、0.08 mm和0.05 mm)则表现出不规则性,其特点是焊缝宽度不均匀且表面粗糙。较厚的焊缝显示出清晰且熔合良好的熔合线,而较薄的焊缝则出现模糊的熔合线甚至未完全熔合的缺陷。综上所述,拘束TIG电弧焊技术适用于304不锈钢超薄板焊接。随着304不锈钢板厚度的减小,焊接过程变得更具挑战性,焊缝质量随之下降。因此,为获得高质量焊缝,必须根据不同板厚选择合适的焊接参数并采取相应的工艺措施。

图5为不同厚度304不锈钢焊缝的3D形貌高度图及视图。其中,0.5 mm和0.2 mm厚板的焊缝截取

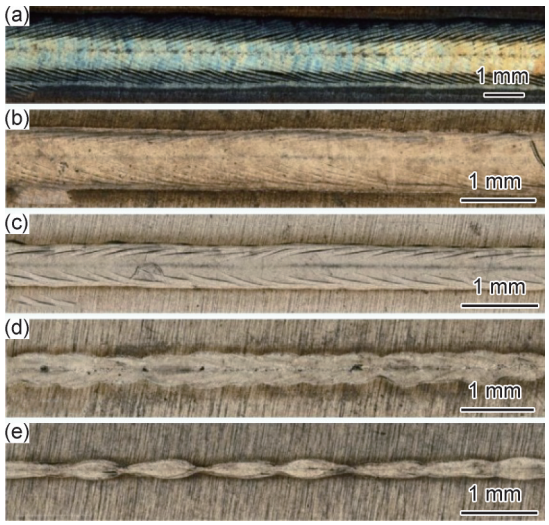


图 4　不同厚度 304 不锈钢焊缝表面形貌

(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm;(e)0.05 mm

Fig.4　Surface morphology of 304 stainless steel welds at different thicknesses

(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm;(e)0.05 mm

长度为 6 mm,其余厚度则为 3 mm。所有焊缝均表现出中部高于母材且表面光滑的特征。焊缝边缘呈现规则的鱼鳞状花纹,这主要是由不均匀的冷却和凝固过程所致。值得注意的是,板材越薄、焊接速度越快以及凝固速率越快,鱼鳞状花纹之间的间距也越大。

图 6(a)为不同厚度 304 不锈钢焊缝的径向高度图。测量结果显示,当厚度分别为 0.5、0.2、0.1、0.08 mm 和 0.05 mm 时,焊缝高度依次为 29.759、17.881、23.057、12.395 μm 和 8.875 μm。这些数据表明焊缝高度随厚度变化不大,且较薄的板材具有更低的焊缝高度和更光滑的表面。图 6(b)为不同厚度 304 不锈钢焊缝轴向边缘的高度图。高度波动较小,表明整体平整度良好。不同厚度下 304 不锈钢轴向焊缝高度差和鱼鳞纹平均宽度见表 4,由表中的数据进一步显示,随着板厚的减小,鱼鳞状花纹的平均宽度有所增加。这可能是因为焊接速度的提高导致焊池流动加快,从而形成了更宽的鱼鳞状花纹。此外,不同厚度 304 不锈钢焊缝中心轴向高度图如图 6(c)所示,从图中可见,轴向焊缝中心区域的高度变化相对较小,这表明与焊缝边缘相比,中心区域的表面平整度更好。由测量数据证实,焊缝中心的高度差异普遍较小,且低于边缘区

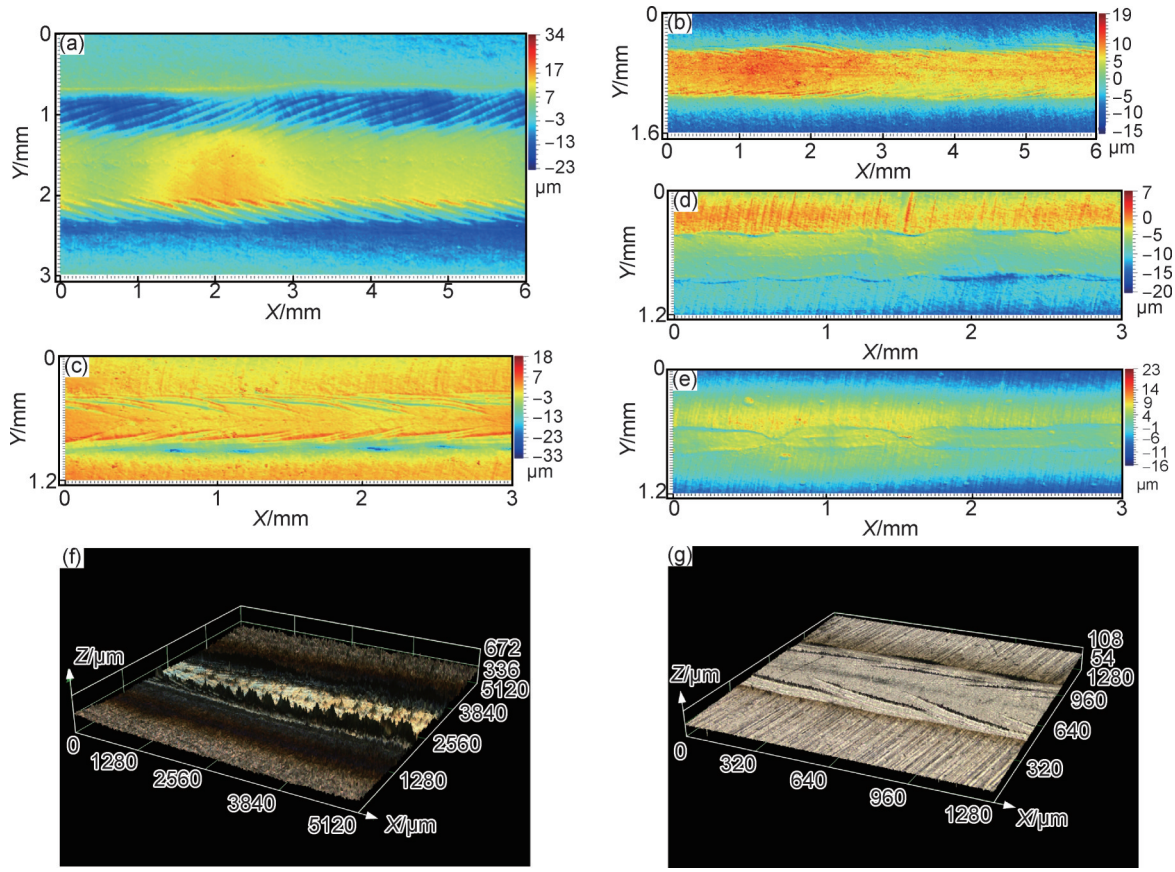


图 5　不同厚度 304 不锈钢焊缝的 3D 形貌高度图及视图

(a)0.5 mm; (b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm;(e)0.05 mm;(f)0.5 mm;(g)0.1 mm

Fig.5　3D height maps and views of 304 stainless steel welds at different thicknesses

(a)0.5 mm; (b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm;(e)0.05 mm;(f)0.5 mm;(g)0.1 mm

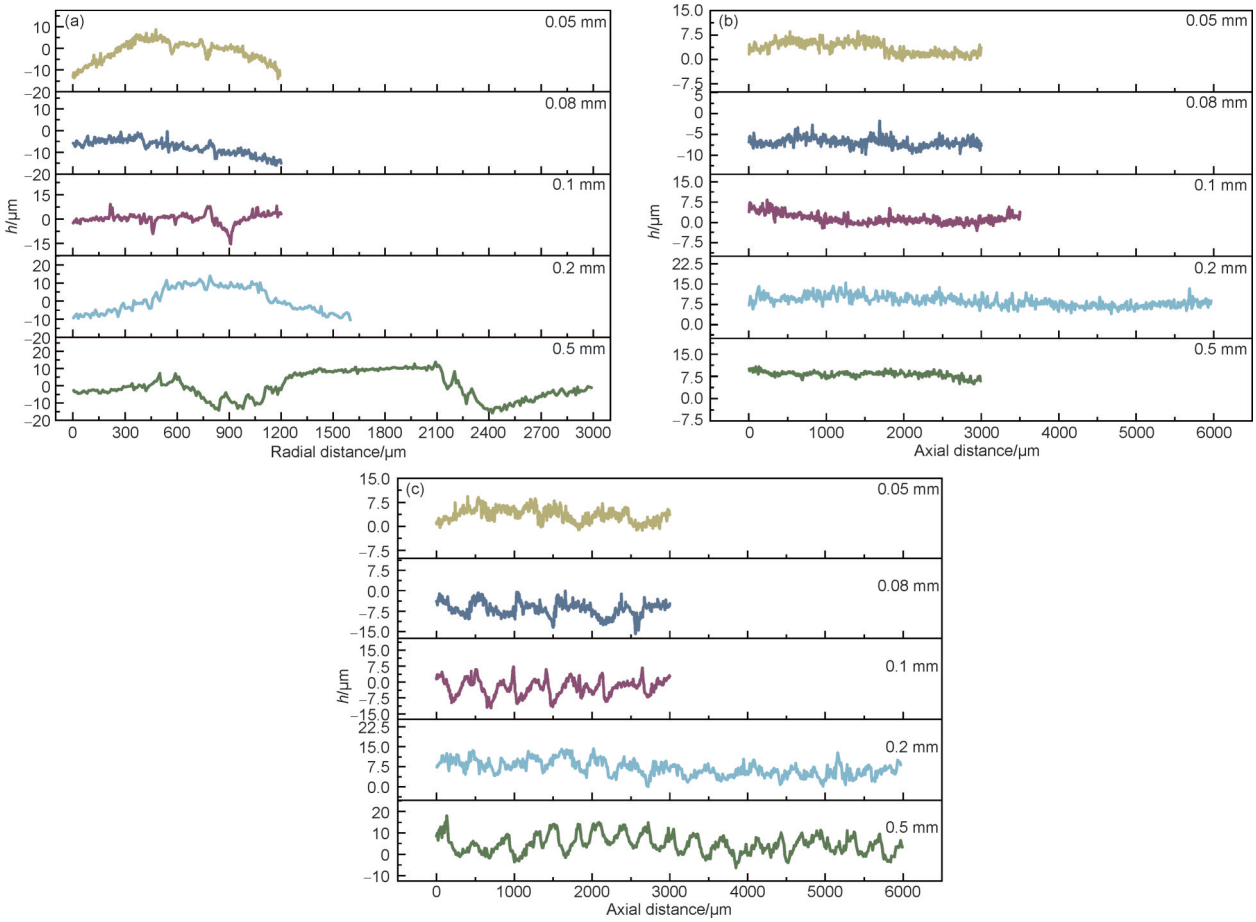


图 6　不同厚度 304 不锈钢焊缝空间几何尺寸分布图

(a)径向高度;(b)边缘轴向高度;(c)中心轴向高度

Fig.6　Spatial geometric dimension distribution of 304 stainless steel welds with different thicknesses

(a)radial height;(b)edge axial height;(c)center axial height

表 4　不同厚度 304 不锈钢轴向焊缝高度差和鱼鳞纹平均宽度

Table 4　Height difference and average width of fish scale patterns in axial welds of 304 stainless steel at different thicknesses

Thickness/mm	Height difference/μm	Width/μm
0.50	22.603	290.000
0.20	12.855	456.665
0.10	17.239	408.749
0.08	11.502	426.666
0.05	9.600	526.500

域。这很可能是由于焊接过程中焊池在中心区域的堆积效应,导致该区域的高度变化相对较小。

图 7 为不同厚度 5052 铝合金焊缝的表面形貌,焊缝厚度减小会导致表面形貌发生明显变化。值得注意的是,厚度为 0.5 mm 的焊缝表面光滑,几乎没有可见缺陷。当厚度减小到 0.2 mm 时,焊缝表面出现细微的波纹状起伏。进一步将厚度降至 0.1 mm,这些起伏变得更加明显,并开始出现小孔和裂纹。而厚度为 0.08 mm 和 0.05 mm 的焊缝表面则出现大量孔洞和裂纹,同时表面粗糙度显著增加。拘束 TIG 电弧焊接技术在连接较厚 5052 铝合金时表现良好,能够获得高质量焊缝。然而,随着材料厚度的减小,该技术的有效性降低,出现孔洞和裂纹等缺陷的可能性增加。这是因为板厚减小导致熔池变小,散热加快,进而引起凝固速度加快,熔融金属流动性降低,气泡难以逸出,最终导致气孔率增加。

图 8 为不同厚度 5052 铝合金焊缝的三维形貌分析结果。由高度分布图 8(a)及对应的三维形貌图 8(f)可以直观地看出,厚度为 0.5 mm 的焊缝呈现出明显的中心凹陷趋势,这主要是由于在该厚度下热输入相对过大,熔池金属受重力及表面张力影响产生了下塌。相比之下,厚度为 0.2 mm 的焊缝(见图 8(b))形貌良好,其中心略高于母材,边缘呈现出清晰且均匀的鱼鳞状花纹。然而,随着板材厚度进一步减小至 0.1 mm(见图 8(c)及三维视图((g))、0.08 mm(图 8(d))及 0.05 mm(图 8(e)),焊缝整体虽趋于平坦,但中心区域的鱼鳞状花纹变得极为密集。上述结果表明,板材厚度显著

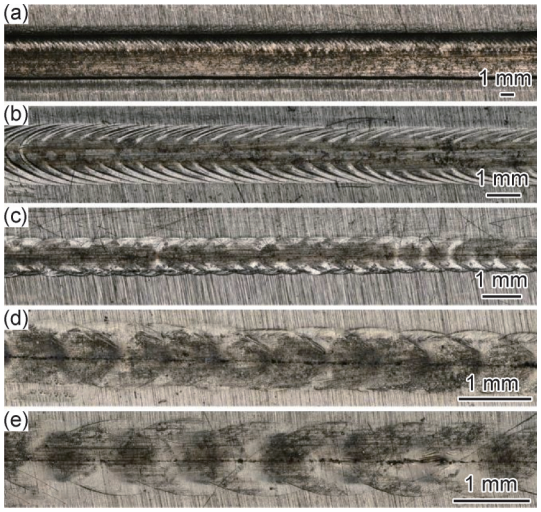


图 7　不同厚度 5052 铝合金焊缝表面形貌
(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;
(d)0.08 mm;(e)0.05 mm

Fig.7　Surface morphology of 5052 aluminum alloy welds of different thicknesses
(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm;(e)0.05 mm

影响了焊接热循环过程，厚度的减小改变了热传导路径，导致热量积累增强及冷却速率变化，进而决定了焊缝的最终成形质量。

图 9(a)为不同厚度下 5052 铝合金焊缝径向高度曲线图。由测量结果显示，厚度为 0.5、0.2、0.1、0.08 mm 和 0.05 mm 的焊缝高度分别为 198.902、15.113、28.807、21.149 μm 和 28.947 μm。除 0.5 mm 厚的焊缝外，其他焊缝高度差均在 −20～10 μm 之间波动，这表明它们的焊缝形状相对稳定。

图 9(b)为不同厚度 5052 铝合金焊缝边缘轴向高度图。其中，厚度为 0.5 mm 和 0.2 mm 板材的鱼鳞状花纹平均宽度分别为 619.132 μm 和 446.833 μm，而其他焊缝则未观察到鱼鳞状花纹。除了 0.5 mm 厚度的板材，其他焊缝的高度差均在 11.755～14.844 μm 之间波动，这表明它们的表面相对平坦。

图 9(c)为不同厚度 5052 铝合金焊缝中心的轴向高度图。其中，厚度为 0.2 mm 的焊缝中心形状平坦且良好。针对 0.5、0.1、0.08 mm 和 0.05 mm 厚度的板材，

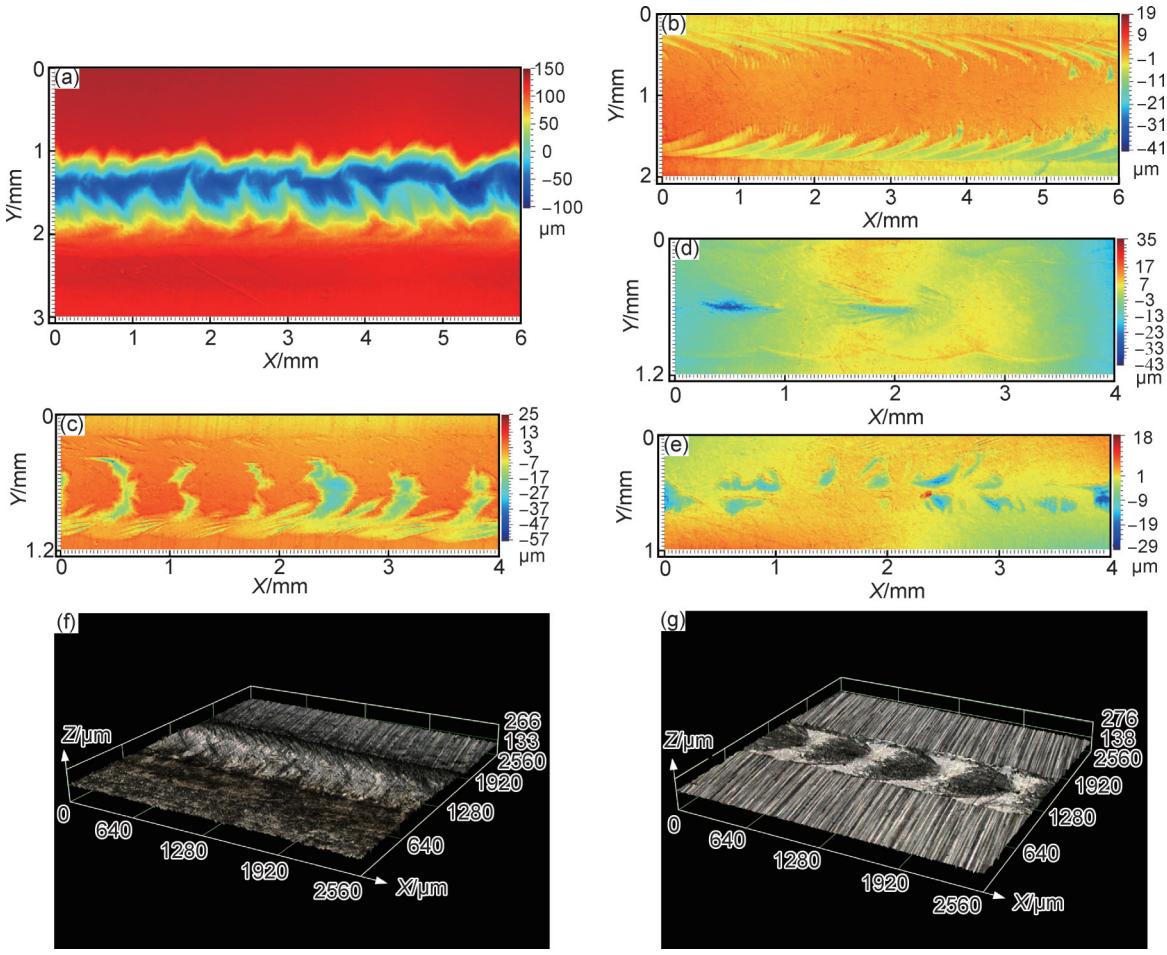


图 8　不同厚度 5052 铝合金焊缝的 3D 形貌高度图及视图
(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm;(e)0.05 mm;(f)0.5 mm;(g)0.1 mm

Fig.8　3D height maps and views of 5052 aluminum alloy welds at different thicknesses
(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm;(e)0.05 mm;(f)0.5 mm;(g)0.1 mm

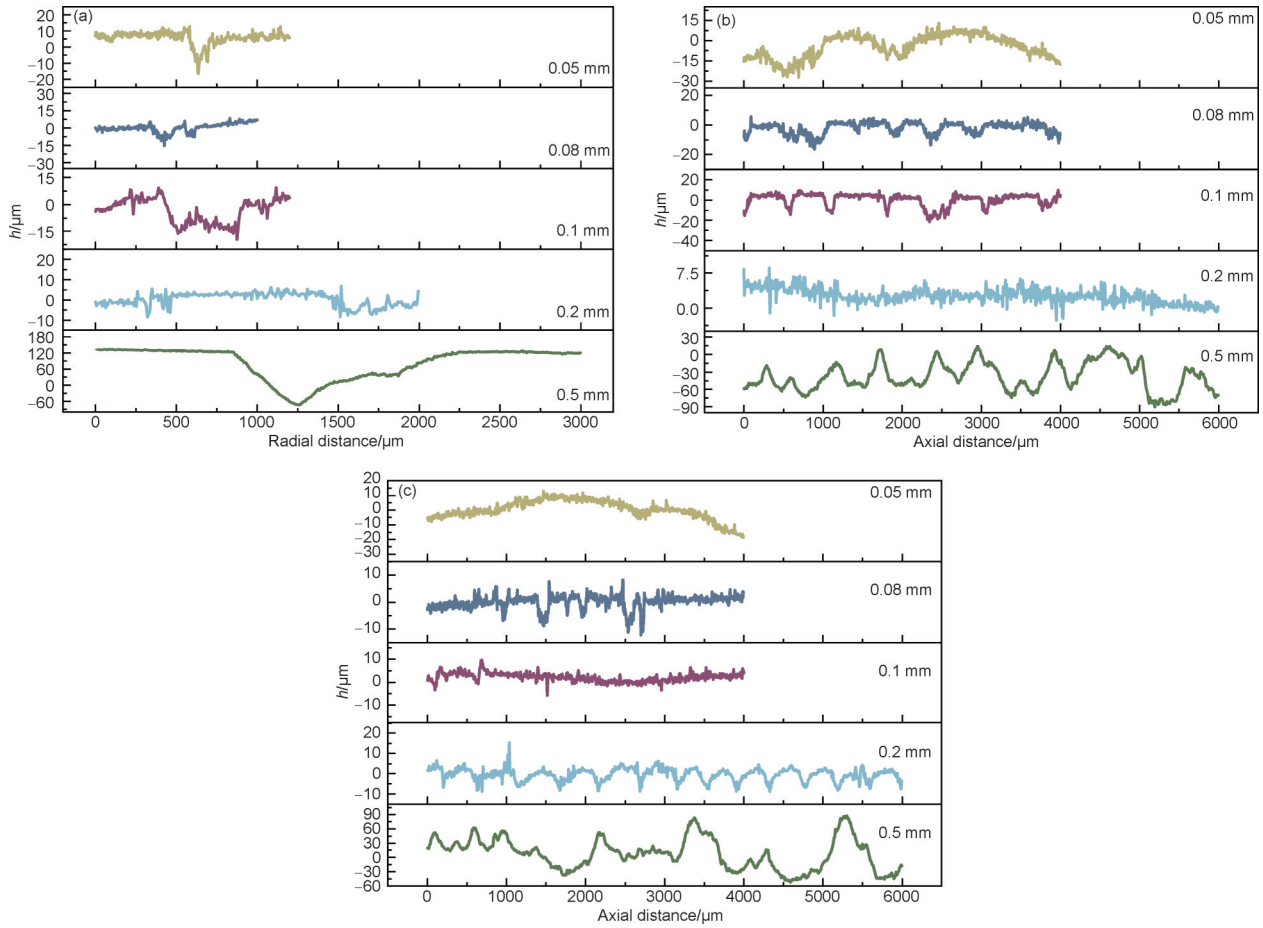


图9 不同厚度5052铝合金焊缝空间几何尺寸分布图

(a)径向高度;(b)边缘轴向高度;(c)中心轴向高度

Fig.9 Spatial geometric dimension distribution of 5052 aluminum alloy welds with different thicknesses

(a)radial height;(b)edge axial height;(c)center axial height

其鱼鳞状花纹的平均宽度分别为527.399、594.994、482.999 μm和1442.899 μm。所有厚度对应的焊缝高度差分别为97.353、11.268、25.196、17.428 μm和15.428 μm。除了厚度为0.5 mm的焊缝,其他焊缝的高度差均在11.268 ~25.196 μm之间波动,这表明它们的表面相对平坦。

图10为不同厚度T2铜焊缝的表面形貌。随着厚度的减小,焊缝宽度显著变窄,这主要是因为薄板材料的高导热性促进了热量散失,导致熔池尺寸减小。其中,厚度为0.5 mm的焊缝表面相对平坦(图10(a)),但仍可见少量焊珠和微孔。厚度为0.2 mm的焊缝表面更为光滑(图10(b)),焊珠和气孔数量有所减少。厚度为0.1 mm的焊缝(图10(c))表面出现明显的波纹,这可能是由于薄板材料变形和不稳定性造成的。厚度为0.08 mm的焊缝(图10(d))表面气孔密度更高,这可能归因于极薄的板材导致热量集中和显著的金属蒸发。鉴于薄板材料的独特性质,焊接更具挑战性,并且容易发生焊缝变形和气孔。然而,采用拘束TIG电弧焊接技术可以有效缓解这些问题并提升焊接质量。

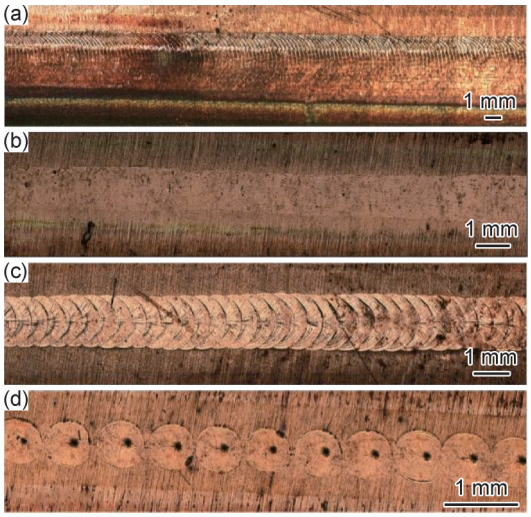


图10 不同厚度下T2紫铜焊缝表面形貌

(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm

Fig.10 Surface morphology of T2 copper welds at different thicknesses

(a)0.5 mm;(b)0.2 mm;(c)0.1 mm;(d)0.08 mm

图 11 展示了不同厚度 T2 紫铜焊缝的三维形貌分析结果。为了更清晰地展示焊缝细节，实验中根据板材尺寸调整了截取视野：厚度为 0.5 mm 和 0.2 mm 板材的焊缝截取长度为 6 mm，而厚度为 0.1 mm 和 0.08 mm 板材的焊缝截取长度设定为 3 mm。

从形貌特征来看，厚度为 0.5 mm 板材的焊缝（见图 11(a)及三维图(e)）中心区域较为平坦，边缘处的鱼鳞状花纹清晰且分布均匀。当厚度减小至 0.2 mm 时（见图 11(b)），焊缝大部分区域保持平坦，表面的鱼鳞状花纹显著减少，表现出较好的表面平整度。

然而，对于极薄板材，焊缝成形机制发生了显著变化。厚度为 0.1 mm（图 11(c)及三维图(f)）和 0.08 mm（图 11(d)）的焊缝中心呈现出明显的周期性鱼鳞状花纹，且花纹略微向内弯曲。这种形貌的变化反映了超薄板在焊接过程中，熔池边缘的受力状态与热量耗散速率与较厚板材存在本质差异，导致了独特的凝固轨迹。

图 12(a)为不同厚度 T2 紫铜焊缝径向高度曲线图。由测量结果显示，当厚度分别为 0.5、0.2、0.1 mm 和 0.08 mm 时，焊缝高度依次为 21.725、11.126、23.351 μm 和 22.851 μm。整体来看，所有焊缝的高度均相对较小且变化不大。

图 12(b)为不同厚度 T2 紫铜焊缝边缘轴向高度图。其中，厚度为 0.5 mm 板材的鱼鳞状花纹平均宽度为 197.331 μm，而厚度为 0.2 mm 板材的焊缝则较为平坦，且厚度为 0.1 mm 和 0.08 mm 板材未观察到鱼鳞状花纹。所有厚度对应的焊缝高度差分别为 10.432、3.418、11.069 μm 和 10.136 μm。这表明焊缝高度变化范围较小，且焊缝表面相对平坦。

图 12(c)为不同厚度 T2 紫铜焊缝中心轴向高度图。其中，厚度为 0.5 mm 和 0.2 mm 板材的焊缝中心形状平坦且良好。针对厚度为 0.1 mm 和 0.08 mm 的板材，其中心区域鱼鳞状花纹的平均宽度分别为 424.999 μm 和 666.994 μm。所有厚度对应的焊缝高度差分别为 4.832、3.094、17.981 μm 和 24.914 μm。这表明焊缝高度变化范围较小，且焊缝表面相对平坦。

拘束 TIG 电弧焊接技术在焊接上述超薄板材方面表现出色。所获得的焊缝表面非常平坦，高度稳定，并且鱼鳞状花纹可控。这些结果表明，该技术能有效控制熔池的流动和形状，使其适用于不同厚度板

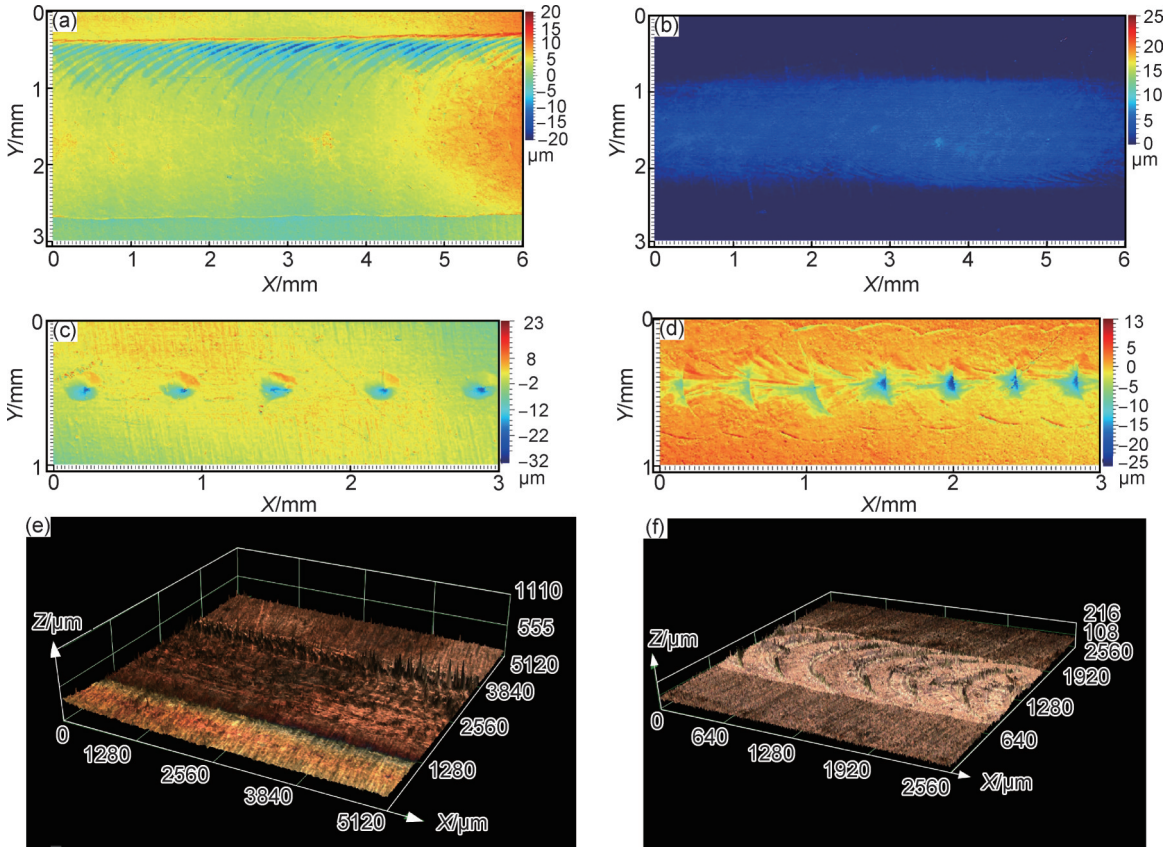


图 11　不同厚度 T2 紫铜焊缝的 3D 形貌高度图及视图

(a)0.5 mm；(b)0.2 mm；(c)0.1 mm；(d)0.08 mm；(e)0.5 mm；(f)0.1 mm

Fig.11　3D height maps and views of T2 copper welds at different thicknesses

(a)0.5 mm；(b)0.2 mm；(c)0.1 mm；(d)0.08 mm；(e)0.5 mm；(f)0.1 mm

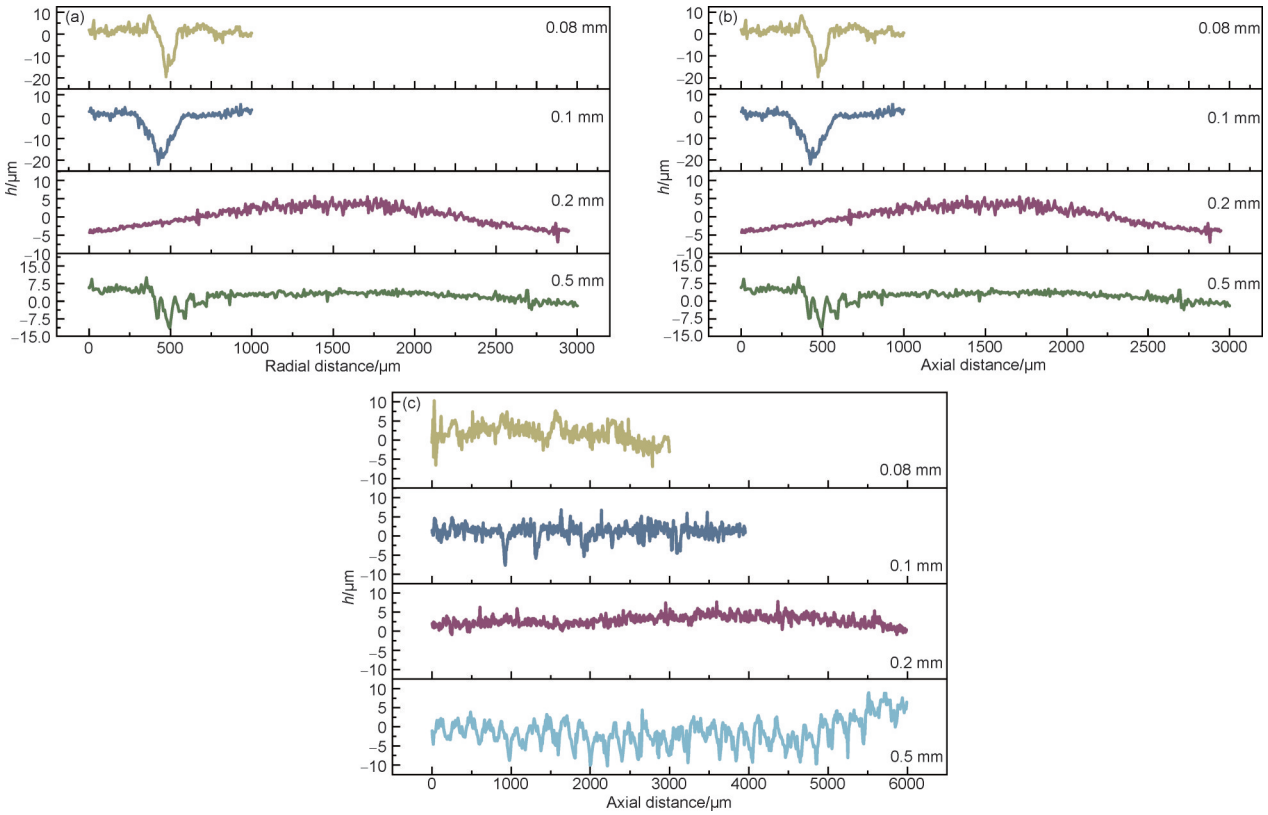


图 12　不同厚度 T2 紫铜焊缝空间几何尺寸分布图

(a)径向高度;(b)边缘轴向高度;(c)中心轴向高度

Fig.12　Spatial geometric dimension distribution of T2 copper welds with different thicknesses

(a)radial height;(b)edge axial height;(c)center axial height

材的焊接,并能生产出高质量的焊缝。

2.2　拘束 TIG 电弧焊接接头微观组织分析

通过金相分析深入探讨了拘束 TIG 电弧焊接对三种超薄金属焊缝微观结构的影响。通过图 13～18 所展示微观结构金相照片,发现焊缝组织无明显缺陷,表明拘束 TIG 电弧焊接工艺能够获得良好的焊接质量。图 13 为 0.5 mm 板厚 304 不锈钢焊缝的典型微观结构。焊缝区主要由奥氏体(γ)和铁素体(δ)相组

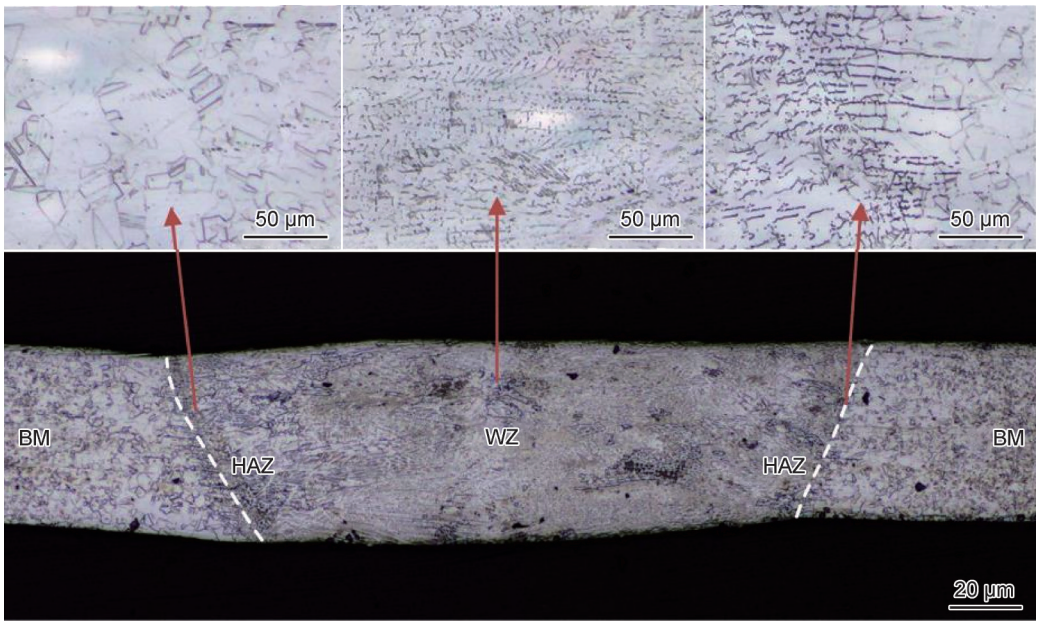


图 13　0.5 mm 板厚的 304 不锈钢焊缝的微观结构

Fig.13　Microstructure of 304 stainless steel welds of 0.5 mm plate thickness

成，其中柱状奥氏体晶粒沿热流方向生长，焊缝中心则为等轴晶。铁素体呈蠕虫状沿奥氏体晶界分布。熔合线附近的微观结构复杂，主要由奥氏体和铁素体构成，且铁素体呈线状分布。熔池表面与保护气接触导致快速冷却，促进了铁素体晶粒沿热流方向生长，从而细化了焊缝晶粒尺寸。相反，热影响区（HAZ）的冷却速率较慢，导致晶粒长大并形成大的柱状晶。此外，热影响区内沿晶界生长着许多针状奥氏体晶粒。这两种微观结构特征都可能降低接头的力学性能和耐腐蚀性，使热影响区成为接头的薄弱环节。基材（BM）则主要由板条状铁素体和岛状奥氏体组成。

图 14 为不同厚度 304 不锈钢焊缝的微观结构。随着板厚的减小，奥氏体晶粒尺寸增大，这与焊接热输入降低和相变时间缩短有关。晶粒长大导致晶界数量减少，从而降低了焊缝的抗拉强度。

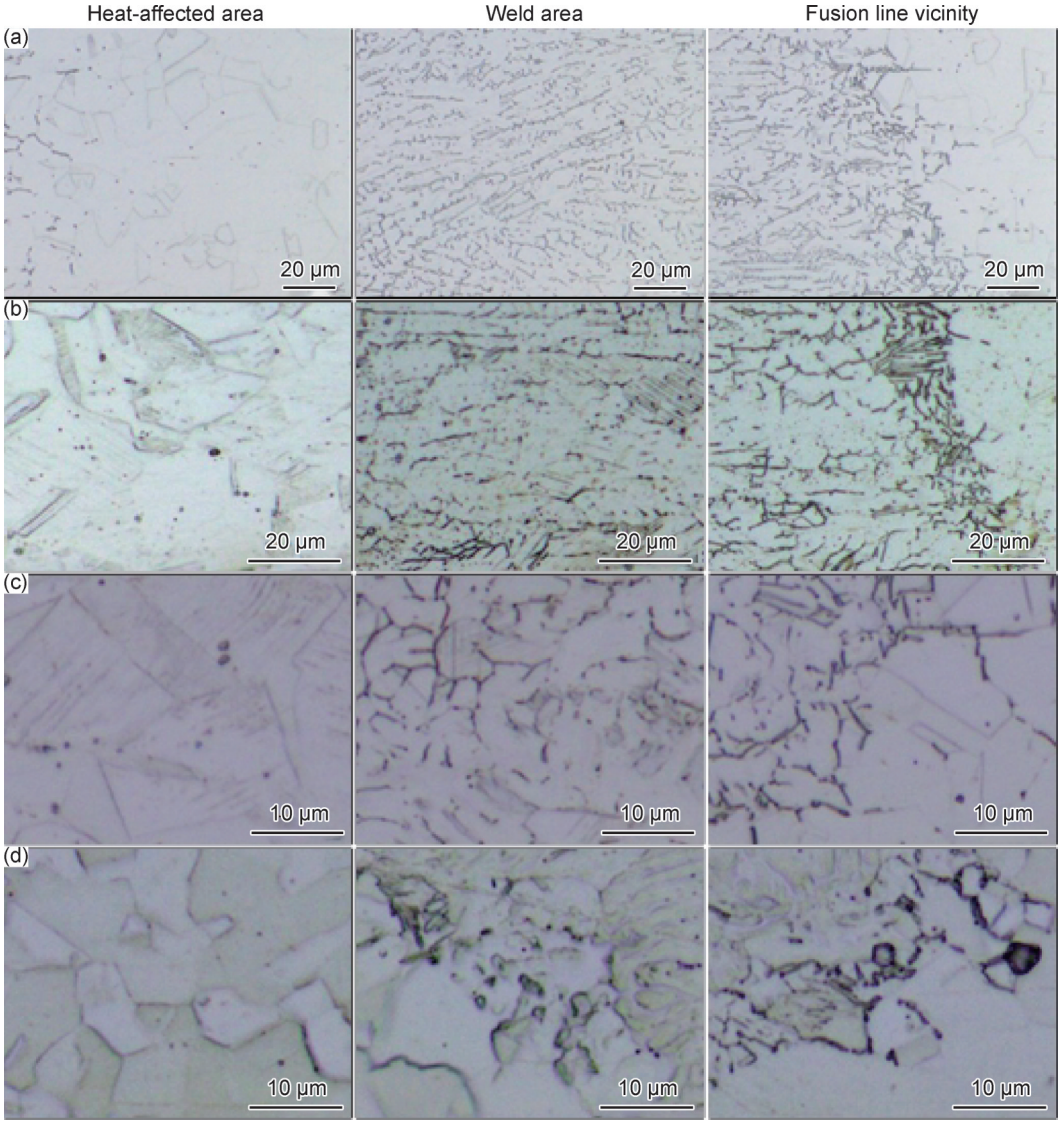


图 14　不同厚度 304 不锈钢焊缝的微观结构

(a)0.2 mm；(b)0.1 mm；(c)0.08 mm；(d)0.05 mm

Fig.14　Microstructure of 304 stainless steel welds at different plate thicknesses

(a)0.2 mm；(b)0.1 mm；(c)0.08 mm；(d)0.05 mm

图 15 为 0.5 mm 板厚 5052 铝合金焊缝的典型微观结构，该结构主要由 α 相铝和弥散的 β 固溶体组成。焊缝中心由于高温作用，等轴晶晶粒尺寸较大。热影响区则呈现出垂直于熔合线生长的柱状晶，这与焊接热源的定向冷却有关，导致晶粒沿热流方向生长。与基材相比，整个焊缝区的晶粒尺寸显著增大。值得注意的是，焊缝中心明显的凹陷是导致 0.5 mm 板厚铝合金焊缝性能相对较差的主要原因之一。

图 16 为不同板厚 5052 铝合金焊缝的微观结构，随着板厚减小（0.2、0.1、0.08 mm 和 0.05 mm），焊缝区

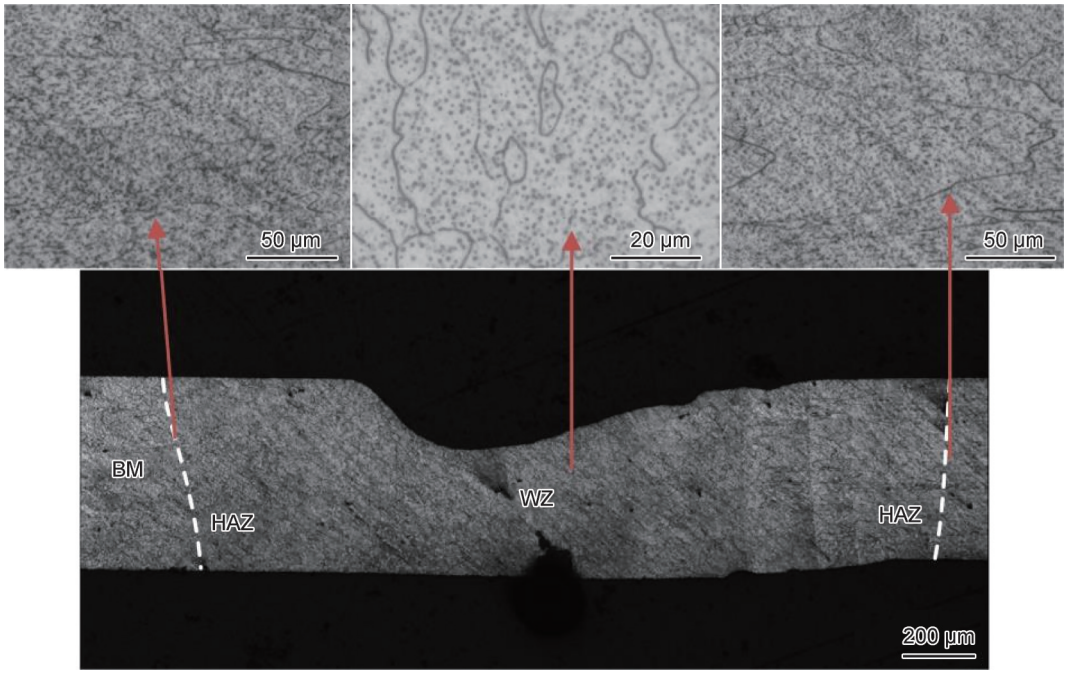


图 15　0.5 mm 板厚的 5052 铝合金焊缝的微观结构

Fig.15　Microstructure of 5052 aluminum alloy welds of 0.5 mm plate thickness

和热影响区的晶粒尺寸均逐渐减小。这是因为薄板冷却速度更快，促使形成大量晶核并抑制晶粒长大。其中，0.05 mm 板厚的晶粒尺寸最小且最均匀。晶粒尺寸对材料的力学性能影响显著，通常晶粒越小，强度和韧性越高。因此，预计 0.05 mm 板厚的焊缝将具有更高的抗拉强度。此外，薄板的热影响区更小，从而带来更好的焊缝质量。

图 17 为 0.5 mm 板厚的 T2 紫铜焊缝的微观结构，从图中可见，焊缝区（WZ）的晶粒尺寸随着板厚的增加呈现非单调趋势，即先增大、后减小，然后再次增大。这种现象可以通过焊接过程中热量和力引起的动态再结晶来解释。晶粒尺寸不仅受温度影响，还受焊接过程中晶粒转变程度的影响。

图 18 为不同板厚 T2 紫铜焊缝的微观结构，从图中可见，当板厚为 0.2 mm 时，焊缝区晶粒尺寸显著减小，这主要归因于该厚度下应变的显著增加。然而，当板厚增加到 0.5 mm 时，焊缝区晶粒尺寸显著增大。这是因为尽管 0.5 mm 处的应变大于 0.2 mm 处，但在此厚度下热输入的影响更大。换言之，热输入对晶粒尺寸的影响更为显著。不同板厚焊缝区的微观结构均表现为热影响区晶粒细小而中心晶粒粗大。此外，随着板厚的减小，焊缝中心的晶粒尺寸有增大的趋势，导致晶界数量减少，焊缝的抗拉强度下降。

图 17 和图 18 为 T2 铜焊缝的微观结构。焊缝区主要由大的柱状晶组成，而热影响区（HAZ）则为等轴晶，并伴有大量孪晶。孪晶是原子沿特定晶面呈对称滑动形成的缺陷，常出现于塑性变形过程中。热影响区内部经历复杂的变形，导致晶粒更小并形成大量孪晶。热影响区外部的晶粒尺寸则更小。随着板厚的减小，焊缝中心的晶粒尺寸增大，这可归因于动态再结晶。动态再结晶在高温和高应变速率下发生。板厚减小虽然降低了热输入，但提高了应变速率，从而促进了晶粒生长。板厚与应变的关系影响晶粒尺寸：应变对较厚板材的影响更大，而板厚对较薄板材的影响更大。焊缝区的晶粒尺寸大于基材，并随着板厚的减小而增大。较少的晶界会阻碍位错运动，从而降低材料的延展性和抗拉强度。在焊接过程中，界面附近的材料被加热至半熔融状态，结合界面呈现固液相，导致固液扩散并形成过渡相区。同时，由于温度梯度，焊缝区的液相开始沿温度梯度方向生长成大的柱状晶，以过渡区的晶界为起点。靠近热影响区时，随着 T2 铜基材温度的升高，以及基材中晶格畸变能的存在，会发生再结晶和晶粒长大，从而降低该区域的内应力。基材的微观结构尽管受到焊接热量的影响，但由于热能不足以引起晶粒长大，因此仍保持了轧制过程形成的细晶形貌，相对未发生显著变化。焊缝区的主要微观结构由大的柱状晶组成，这主要归因于垂直于熔合线的快速冷却，导致晶粒从熔合线向垂直方向生长。热影响区（HAZ）具有等轴晶结构，晶粒细小且伴有大量孪晶。与基材相比，整个焊缝区的晶粒尺寸显著增大。

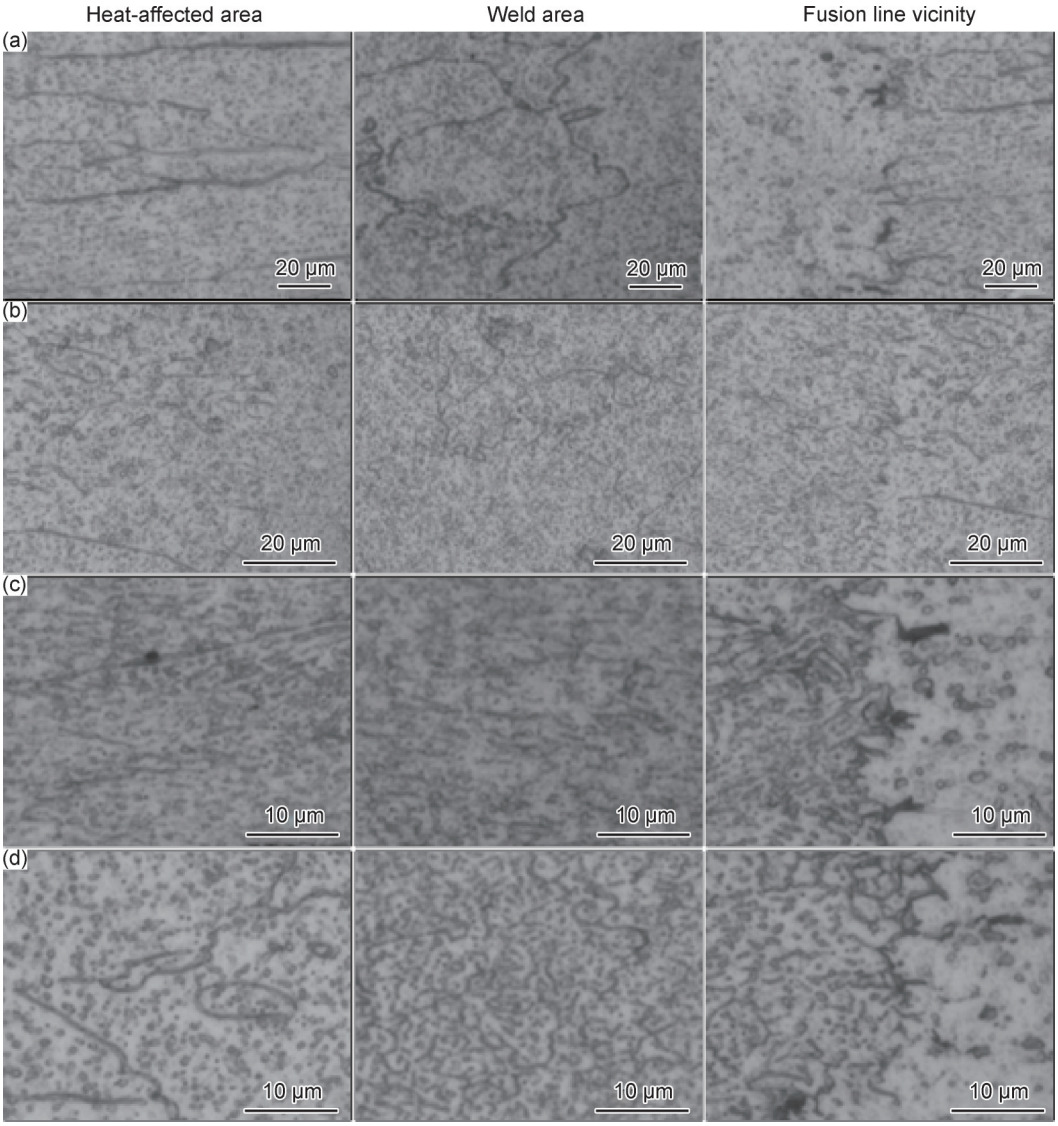


图 16　不同板厚 5052 铝合金焊缝的微观结构　(a)0.2 mm;(b)0.1 mm;(c)0.08 mm;(d)0.05 mm

Fig.16　Microstructure of 5052 aluminum alloy welds at different plate thicknesses　(a)0.2 mm;(b)0.1 mm;(c)0.08 mm;(d)0.05 mm

微观结构分析表明,拘束 TIG 电弧焊接技术适用于超薄板焊接。通过控制焊接参数,该工艺能够获得细小且均匀的晶粒组织,从而改善焊缝接头的性能。这为超薄板的焊接提供了可靠的保证。

2.3　拘束 TIG 电弧焊接接头抗拉强度分析

图 19 为三种材料母材与焊缝的抗拉强度,从图中可见,不同厚度 304 不锈钢、5052 铝合金和 T2 铜焊缝的抗拉强度与各自基材相比存在差异。在所测试的材料中,304 不锈钢焊缝的抗拉强度普遍达到其基材抗拉强度的 90%,这清晰地表明拘束 TIG 电弧焊接工艺能有效保证超薄不锈钢焊缝的力学性能。然而,相比之下,5052 铝合金和 T2 紫铜焊缝的抗拉强度则相对较低,约为其基材的 50%。这种显著的性能差异主要源于三种材料在拘束 TIG 电弧焊接过程中不同的物理冶金行为和缺陷敏感性。具体而言,304 不锈钢相对较低的热导率和熔化特性有助于形成稳定的熔池,减少热应力,并促进焊缝区细晶或等轴晶的形成,从而获得与母材性能接近的优质焊缝。与之形成对比的是,5052 铝合金由于其表面氧化膜的难去除性、较高的线膨胀系数以及熔池快速冷却时易形成气孔和裂纹,导致焊缝缺陷增多,进而显著降低了其力学性能,加之焊接过程中晶粒的粗化也可能削弱其强度。同时,T2 紫铜凭借其极高的导热性,导致焊接过程中热量散失迅速,熔池难以稳定维持;尽管采用了更高的焊接电流,但在快速凝固过程中仍易产生气孔和晶界缺陷,这些缺陷是导致其焊缝抗拉强度相对较低的主要原因。尽管铝合金和铜焊缝的抗拉强度相对较低,但这些结果依然展现了该工艺对不同超薄金属材料的普适性,并为特定应用场景下的超薄板连接提供了可行的解决方案。

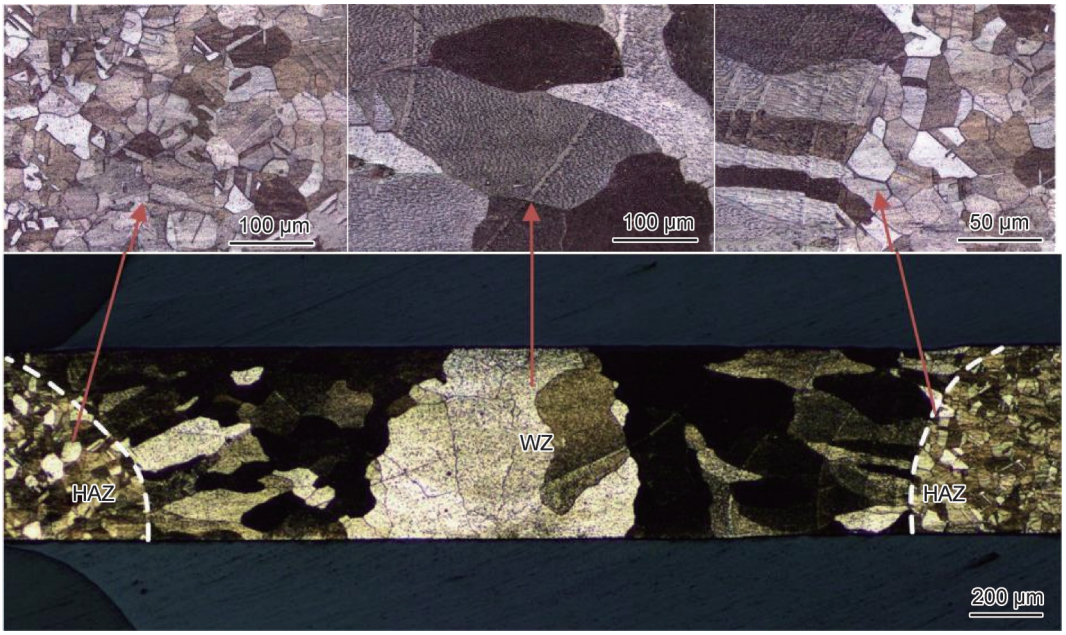


图 17　0.5 mm 板厚的 T2 紫铜焊缝的微观结构

Fig.17　Microstructure of T2 purple copper welds of 0.5 mm plate thickness

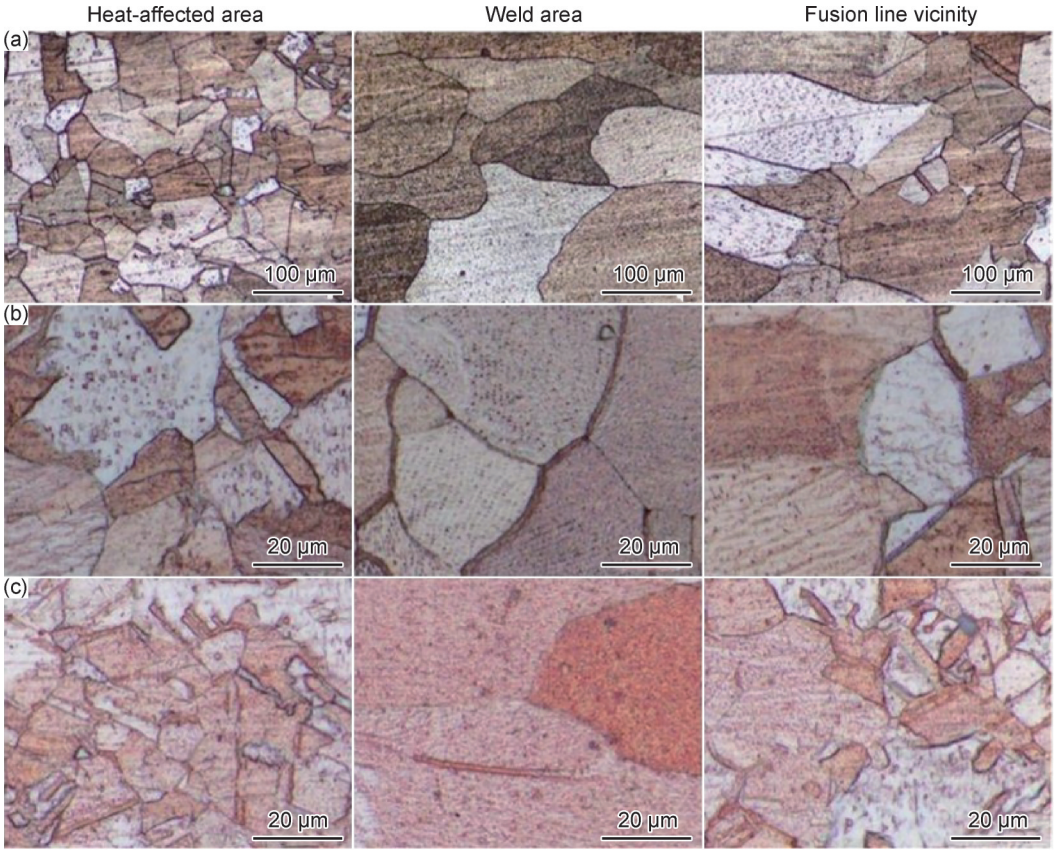


图 18　不同板厚 T2 紫铜焊缝的微观结构

(a)0.2 mm;(b)0.1 mm;(c)0.08 mm

Fig.18　Microstructure of T2 purple copper welds at different plate thicknesses

(a)0.2 mm;(b)0.1 mm;(c)0.08 mm

2.4　拘束 TIG 电弧焊接接头导电性能分析

图 20 为不同厚度 304 不锈钢、5052 铝合金和 T2 铜焊缝的电阻率测量结果。这些材料的基材电阻率分别为：304 不锈钢 0.73×10^{-6} Ω·m，5052 铝合金

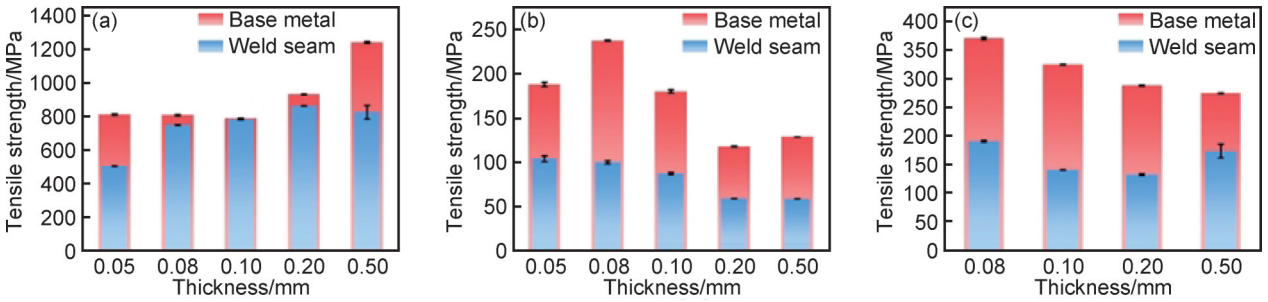


图 19　三种材料母材与焊缝的抗拉强度

(a)304 不锈钢;(b)5052 铝合金;(c)T2 紫铜

Fig.19　Tensile strength of base metal and weld seam of three materials

(a)304 stainless steel;(b) 5052 aluminum alloy;(c)T2 purple copper

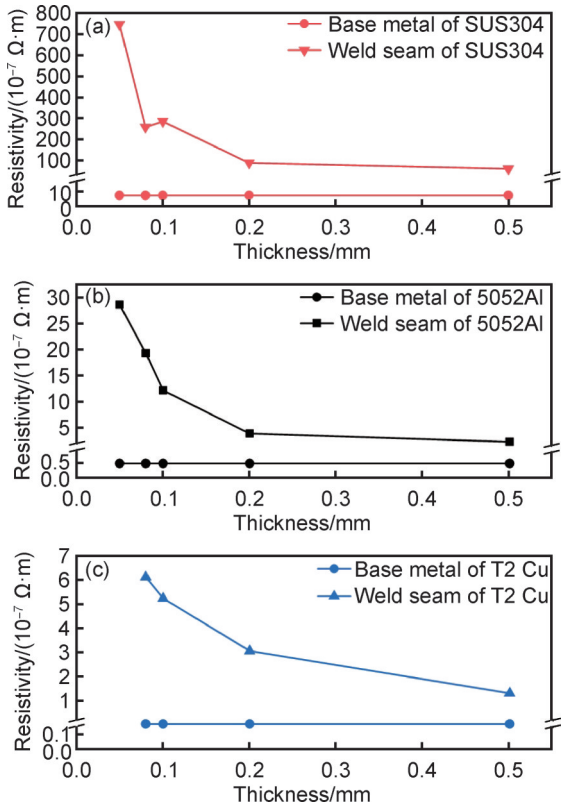


图 20　不同厚度 304 不锈钢(a)、5052 铝合金(b)和 T2 紫铜(c)焊缝及母材的电阻率计算结果

Fig.20　Calculated resistivity of weld seams and base materials of 304 stainless steel(a),5052 aluminum alloy(b),and T2 copper(c) with different thicknesses

4.84×10^{-8} Ω·m,以及 T2 铜 1.72×10^{-8} Ω·m。从图 20 可以看出,三种超薄金属的焊缝电阻率均高于其母材。这主要源于焊接热循环所导致的微观组织变化。具体而言,对于 304 不锈钢,其焊缝的电阻率随板厚的减小而显著增加,在板厚低于 0.2 mm 时尤为明显。这可能是由于在熔池凝固过程中,快速冷却导致晶粒尺寸细化,晶界密度增加,从而增强了电子在晶界处的散射。对于 5052 铝合金,其焊缝的电阻率普遍高于母材,且随着板厚的减小,增幅愈发显著。这主要归因于焊接热输入导致的热软化效应和合金元素的偏析。热循环可能促使固溶的 Mg 元素在晶界析出,形成 Mg_2Al_3 等金属间化合物,这些相的形成阻碍了电子的自由运动,显著增加了焊缝的电阻率。而对于高导电性的 T2 紫铜,其焊缝电阻率始终高于母材,并随板厚减小呈现增加趋势。这主要由于紫铜在焊接过程中微量杂质和合金元素在焊缝区的偏析,以及高温下铜晶格结构的轻微畸变,共同导致了导电性能的下降。此外,对于所有材料的超薄板,焊接过程中的轻微表面氧化也可能在一定程度上增加了焊缝区域的电阻。尽管焊缝电阻率随着板厚的减小略有增加,导致导电性轻微下降,但实验结果表明,拘束 TIG 电弧焊技术仍能有效保持超薄板焊缝的导电性能,其变化幅度在可接受范围内,基本满足大多数电子和电气应用对高导电性的要求。

3　结论

(1)利用气流作用可以有效地提升电弧拘束程度,改善电弧能量分布,可成功实现三种超薄金属材料的稳定焊接,可获得相对可靠的焊接接头,三种材料中超薄铝合金的焊接难度最大,容易出现咬边的成形缺陷。

(2)拘束 TIG 电弧焊接得到的接头的力学性能基本满足要求,其中 304 不锈钢焊缝的抗拉强度可达到母材的 90%,而 5052 铝合金和 T2 紫铜焊缝的抗拉强度约为母材的 50%,表明该工艺具有广泛的适用性,但在铝合金的焊接中需要进一步优化工艺。

(3)利用该拘束 TIG 电弧焊接得到的接头导电性能良好。三种材料焊接接头检测所得电阻率均略高于母材,主要原因应该是焊缝微观结构不均匀使电子运动受阻,但拘束电弧焊接得到的焊缝尺寸较小,对材料电阻率影响程度很低。

参考文献

[1] Khalid E, Shunmugasamy V C, Mansoor B. Dissimilar micro friction stir welding of ultra-thin Mg AZ31 to Al6061 sheets[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 1528-1533.

[2] Xu H, Guo X Y, Lei Y P, et al. Welding deformation of ultra-thin 316 stainless steel plate using pulsed laser welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105583.

[3] Brand M J, Schmidt P A, Zaeh M F, et al. Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances[J]. Journal of Energy Storage, 2015, 1: 7-14.

[4] Cui C, Weng Z J, Gu K X, et al. The strengthening role of post-welded cryogenic treatment on the performance and microstructure of 304 austenitic stainless steel weldments[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 5576-5584.

[5] Ventrella V A, Berretta J R, De Rossi W. Micro welding of Ni-based alloy monel 400 thin foil by pulsed Nd: YAG laser[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 347-354.

[6] Dong Z S, Pan R, Zhou T S, et al. Microstructure and mechanical property of Ti/Cu ultra-thin foil lapped joints with different weld depths by nanosecond laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 108: 88-97.

[7] P'Ng D, Molian P. Q-switch Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 486(1/2): 680-685.

[8] Petrich M, Stambke M, Bergmann J P. Examinations on laser remote welding of ultra-thin metal foils under vacuum conditions[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 768-775.

[9] Kim J, Kim S, Kim K, et al. Effect of beam size in laser welding of ultra-thin stainless steel foils[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 125-134.

[10] Xiang F, Hu X, Gong Q, et al. Application of nanosecond fiber laser welding in dissimilar metals[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(3): 9-12.

[11] Manh N H, Nguyen V A, Le Duy H, et al. Development of a novel GTAW process for joining ultra-thin metal sheets[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 80: 683-691.

[12] Jamaludin M N, Quazi M M, Aiman M H, et al. Distortion in laser micro welding of stainless steel SS304 foils[J]. Materials Today: Proceedings, 2024, 109: 81-86.

[13] Jazayerli M M, Kok C K, Sued K, et al. Effect of welding speed on micro-friction stir lap welding of ultra-thin aluminium and copper sheets[J]. Welding in the World, 2024, 68(7): 1853-1867.

[14] Verma M, Ahmed S, Saha P. Challenges, process requisites/inputs, mechanics and weld performance of dissimilar micro-friction stir welding (dissimilar μFSW): a comprehensive review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 249-276.

[15] Ni Y, Liu Y H, Zhang P X, et al. Thermal cycles, microstructures and mechanical properties of AA7075-T6 ultrathin sheet joints produced by high speed friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2022, 187: 111873.

[16] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005, 50(1/2): 1-78.

[17] Tan Y B, Wang X M, Ma M, et al. A study on microstructure and mechanical properties of AA 3003 aluminum alloy joints by underwater friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2017, 127: 41-52.

[18] Shehabeldeen T A, El-Shafai N M, El-Mehasseb I M, et al. Improvement of microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded aluminum/titanium joints via aluminum oxide nanopowder[J]. Vacuum, 2021, 188: 110216.

[19] Huang Y X, Meng X C, Zhang Y B, et al. Micro friction stir welding of ultra-thin Al-6061 sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 313-319.

[20] Yue Y M, Wang G Q, Yang K, et al. Friction stir butt welding thin aluminum alloy sheets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9/10/11/12): 3139-3147.

[21] Huang Y X, Meng X C, Lyu Z L, et al. Microstructures and mechanical properties of micro friction stir welding (μFSW) of 6061-T4 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 1084-1091.

[22] Zhang C Q, Wang W J, Jin X, et al. A study on microstructure and mechanical properties of micro friction stir welded ultra-thin Al-1060 sheets by the shoulderless tool[J]. Metals, 2019, 9(5): 507.

[23] Panchal M, Patel D, Vyas H, et al. Ultra-thin friction stir welding on aluminum alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 2888-2894.

[24] 许辉, 余爱武, 余子开, 等. 超薄不锈钢端接接头微束 TIG 工艺特性[J]. 电焊机, 2024, 54(1): 75-79.
Xu H, Yu A W, Yu Z K, et al. Micro-beam TIG process of ultra-thin stainless steel edge joint[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(1): 75-79.

[25] Sen M, Shankar S, Chattopadhyaya S. Micro-friction stir welding (μFSW)-A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 2469-2473.

[26] Ahmed S, Shubhrant A, Deep A, et al. Development and analysis of butt and lap welds in micro-friction stir welding (μFSW)[C]//Advances in Material Forming and Joining. New Delhi: Springer India, 2015: 134-147.

[27] Manh H N, Anh V N, Tuan V N, et al. Research and development of a novel TIG welding torch for joining thin sheets[J]. Applied Sciences, 2019, 9(23): 5260.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52375301,52275302)
收稿日期:2025-07-09;**录用日期**:2025-09-15

通讯作者:徐斌(1988—),男,教授,博士,主要研究方向为电弧等离子体物理、电弧焊接与增材制造、制造过程跨尺度建模、制造过程原位表征及超薄金属板焊接,联系地址:北京市朝阳区平乐园100号北京工业大学(100124),E-mail:xubin2019@bjut.edu.cn

(本文责编:张宝玲)