

基于激光毛化的不锈钢与 GFRP 单面单点电阻焊接工艺及性能研究

檀财旺^{1,2*}, 王世嘉¹, 苏健晖^{1,2}, 韩晓辉³, 陈波^{1,2}, 宋晓国^{1,2}

¹哈尔滨工业大学(威海)材料科学与工程学院山东特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209;

²哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

³中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

摘要 不锈钢与玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)的异质材料复合结构在汽车轻量化领域有着广阔的应用前景。采用激光毛化技术在不锈钢表面制备网格微结构,开展了微结构的引入对不锈钢与GFRP单面单点电阻连接界面的强化机理研究。研究表明:表面微结构的引入显著改善了不锈钢表面的润湿性,熔化的GFRP在不锈钢表面由不润湿性转变为润湿性;随着微结构间距的增大,接触角先减小后增大,当微结构间距为0.2 mm时,接触角达到最小值62.4°,此时表面微结构的引入对界面机械嵌合的促进效果最佳;此外,微结构的引入促进了界面化学扩散,使得接头拉剪力达到最大值3548 N,界面失效形式由界面断裂转变为界面断裂与内聚断裂混合的失效形式。

关键词 激光技术; 纳秒激光; 微结构; 单面单点电阻焊; 润湿性; 机械嵌合

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231128

1 引言

轻量化已经成为我国工业发展的战略需求,金属与复合材料的可靠连接已经成为国内外轻量化的重点研究方向^[1]。不锈钢具有优异的耐磨损、耐低温特性,在行业中得到广泛应用^[2]。而玻璃纤维树脂基复合材料具有高韧性、低成本、高比强度、耐腐蚀等特点,且避免了传统热固性塑料抗冲击性能差、回收难度较大等缺点,在制造业中显示出巨大的应用潜力^[3]。二者的连接既能满足轻量化需求又能够扩大复合材料的应用范围^[4-5]。

目前金属与热塑性复合材料的连接以机械连接^[6-7]、胶接^[8-9]、超声波连接^[10-11]、搅拌摩擦连接^[12-13]和激光连接^[14-15]为主。机械连接产生应力集中,破坏连接界面。胶黏剂易受环境温度等因素的影响,老化后胶接接头连接失效。超声波连接改变了复合材料增强体的分布,降低了接头强度。搅拌摩擦连接对设备要求较高。激光连接的连接区域窄,难以保证接头强度^[16]。与上述方法相比,电阻点焊具有热量集中、热影响区小及易于实现机械化和自动化等优点,具备较大的应用潜力^[17]。然而,由于塑料为绝缘体,无法实现传统电阻点焊上下电极间的电路循环,不能形成焊核,难以达成有效连接^[18]。因此实现金属与纤维增强复合材

料的电阻焊连接成为目前研究的难点。Szallies等^[19]验证了单面双点电阻焊的可行性,改进了传统电阻点焊装备的正负电极,使其位于金属侧,实现了PA66塑料与金属的连接。但是该方法存在热量不集中的问题,使接头的连接强度较低。Ren等^[20-22]提出了单面单点电阻焊技术,并开展了铝合金和碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)的连接研究,结果发现,断口区域分为有效连接区、熔融分解区、挤压粘接区,其中有效连接区决定了接头的强度。然而,由于金属与塑料在热物理性能及化学结构等方面存在较大差异,两种材料的高强度电阻点焊连接仍然较为困难,故进一步优化金属与塑料的单面单点电阻焊工艺,实现该技术在工业应用领域中的突破,成为国内外的研究热点。

由于工艺参数的优化对于界面强度的进一步提高无法起到显著作用,国内外学者对金属与塑料界面的机械嵌合强化开展了大量研究。Kwon等^[23]采用砂纸打磨方法改变了铝合金表面的微观形貌,提升了表面粗糙度,与未处理的铝合金相比,接头强度提高了5倍左右,接头断裂机制由原始的界面断裂转变为胶层内部高分子内聚断裂。可见可以通过促进界面机械嵌合实现金属与塑料的高强度连接。Rodríguez-Vidal等^[24]开展了钢表面不同几何形状凹槽对玻璃纤维增强聚酰胺与钢激光连接接头拉伸剪切力的影响研究,结果表

收稿日期: 2023-08-22; 修回日期: 2023-09-14; 录用日期: 2023-10-09; 网络首发日期: 2023-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(52074097)、山东省泰山学者青年专家计划(tsqn202211307)、山东省优秀青年基金(ZR2021YQ30)

通信作者: *tancaiwang@hitwh.edu.cn

明,凹槽的纵横比和材料高度与接头的失效力密切相关。Zhang 等^[25]利用激光毛化技术在 A7075 铝合金表面制备了毫米级织构,实现了与碳纤维增强复合材料的连接,接头强度明显提高,接头破坏位置由界面断裂转变为断裂于铝合金母材。上述结果表明,在金属表面制备微织构,实现机械嵌合强化,有利于金属与塑料的连接。因此,本文采用单面单点电阻焊设备,将表面制备有微织构的不锈钢与玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)进行连接,探究了微织构间距对接头强度的影响,分析了不锈钢表面微织构的引入对 304 不锈钢/GFRP 单面单点电阻

焊接头的界面强化机理。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本文选用 304 不锈钢为金属材料,尺寸为 50 mm×30 mm×2 mm,其化学成分如表 1 所示。GFRP 由 PA66 树脂基体与填充体积分数为 30% 的玻璃纤维组成,尺寸为 50 mm×30 mm×3 mm。焊前使用角磨机打磨去除 304 不锈钢表面的氧化膜,将打磨完毕的不锈钢置于乙醇与丙酮混合的烧杯中,使用超声波清洗仪清洁,随后烘干表面,备用。

表 1 304 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	Fe
Mass fraction / %	0.03	1.50	0.75	18.00-20.00	8.00-10.00	0.02	Bal.

2.2 表面微织构的制备

本试验采用脉冲光纤纳秒激光系统在不锈钢表面上制备微织构,其原理图如图 1 所示。利用激光加工系统配套软件预设扫描路径,计算机将路径信息转为电信号发送至激光器,对不锈钢表面进行加工刻蚀。选用十字形网格微织构作为不锈钢表面微织构制备的基础形貌,通过前期工艺优化,选用表 2 所示的激光毛化工艺参数进行 304 不锈钢表面微织构的制备。激光

扫描次数为 10 次,微织构间距为 0.1~0.5 mm。加工完成后,将板材置于乙醇与丙酮的混合溶液中,超声波清洗 3 min,去除表面油污,备用。

2.3 单面单点电阻焊工艺

基于不锈钢与 GFRP 的热物理特性,采用不锈钢在上、GFRP 在下的搭接形式进行单面单点电阻焊连接,搭接宽度设置为 20 mm,如图 2 所示。通电后,电极头到达不锈钢表面,电极与不锈钢构成电流回路,不锈钢内部产生电阻热,热量传递至不锈钢/GFRP 界面处,达到 GFRP 熔化温度使其熔化,在外部电极压力的作用下熔融的 GFRP 铺展于不锈钢表面形成稳定的连接界面。为获得表面成形良好的 304 不锈钢/GFRP 接头,采用表 3 所示的单面单点电阻焊工艺参数。

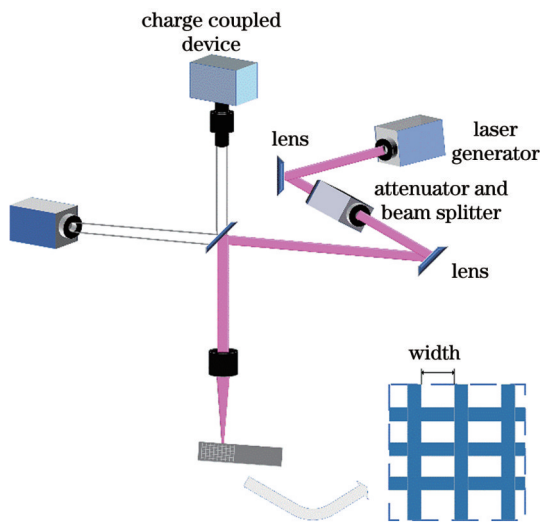


图 1 纳秒激光制备微织构的原理图

Fig. 1 Schematic of micro-texture preparation by nanosecond laser

表 2 激光毛化平台工艺参数

Table 2 Process parameters of laser texturing platform

Process parameter	Value
Laser power /W	80
Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	1000
Defocus distance /mm	0
Width of micro-texture /mm	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

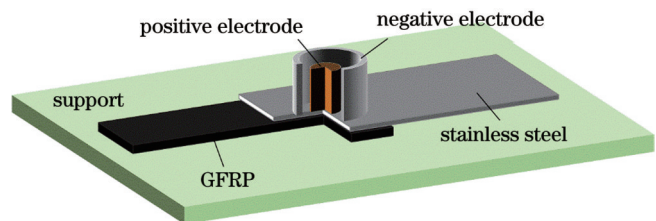


图 2 单面单点电阻焊示意图

Fig. 2 Schematic of single-side resistance spot welding

表 3 单面单点电阻焊工艺参数

Table 3 Process parameters of single-side resistance spot welding

Process parameter	Value
Welding current /A	2600
Welding time /s	1.0
Electrode pressure /MPa	0.3
Negative electrode outer diameter /mm	20
Negative electrode inner diameter /mm	16
Positive electrode diameter /mm	10

2.4 分析测试方法

采用光学数码显微镜观察不锈钢表面微织构并进行 3D 形貌观察,以分析纳秒激光制备微织构后的不锈钢表面结构。将 GFRP 置于不锈钢板材表面,采用恒温加热平台将不锈钢板材加热至 GFRP 熔化温度,利用高温润湿角测量系统对不锈钢表面的 GFRP 接触角进行测量以表征其润湿性。采用万能材料试验机对 304 不锈钢(SUS304)/GFRP 单面单点电阻焊连接接头进行拉剪测试,如图 3 所示,由于接头为搭接形式,为了使拉剪力与连接构件保持平行且共线,在拉剪力

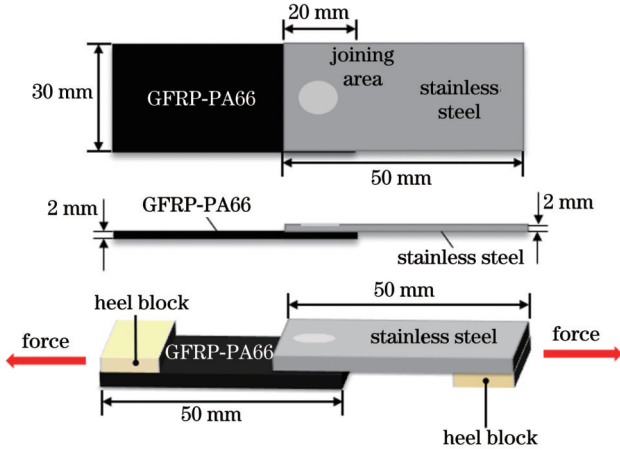


图 3 SUS304/GFRP 单面单点电阻焊接头拉剪测试示意图
Fig. 3 Schematic of tensile-shear testing on SUS304/GFRP joint by single-side resistance spot welding

测试过程中,在两侧放置厚度互补的垫片,拉剪速率保持 1 mm/min。每组试验参数下至少测量 3 组试件,取均值并进行误差分析。使用 ImageJ 软件计算断口熔合区树脂-玻璃纤维混合物的粘结比率。利用光学数码显微镜及场发射扫描电子显微镜对 SUS304/GFRP 单面单点电阻焊接头的界面及断口形貌进行观察,并结合场发射扫描电子显微镜(SEM)装配的能谱仪(EDS)进行元素分布分析。

3 试验结果与分析

3.1 微织构三维形貌及润湿性分析

图 4 为纳秒激光加工后在不锈钢表面上制备的不同微织构间距下的网格微织构的 3D 形貌,较未处理的不锈钢表面,纳秒激光处理后的不锈钢表面形成了网格形貌。由于设定扫描次数均为 10 次,故微织构沟槽深度与宽度基本一致,沟槽宽度为 40 μm ,深度为 170 μm 。随着纳秒激光加工系统预设扫描间距的增加,不锈钢表面实际的微织构间距增加。由于纳秒激光能量较高,在制备过程中,激光扫描不锈钢表面,表层不锈钢熔化、蒸发、飞溅,在激光扫描路径边缘处形成金属氧化物层,其粘连在微织构区域。随着微织构间距的减小,激光在不锈钢表面上扫过的面积增大,热积累增多,部分区域成形不均匀。当微织构间距过小时,飞溅的金属氧化物堆积于局部位置,不锈钢表面形成网格点状凸起形貌。

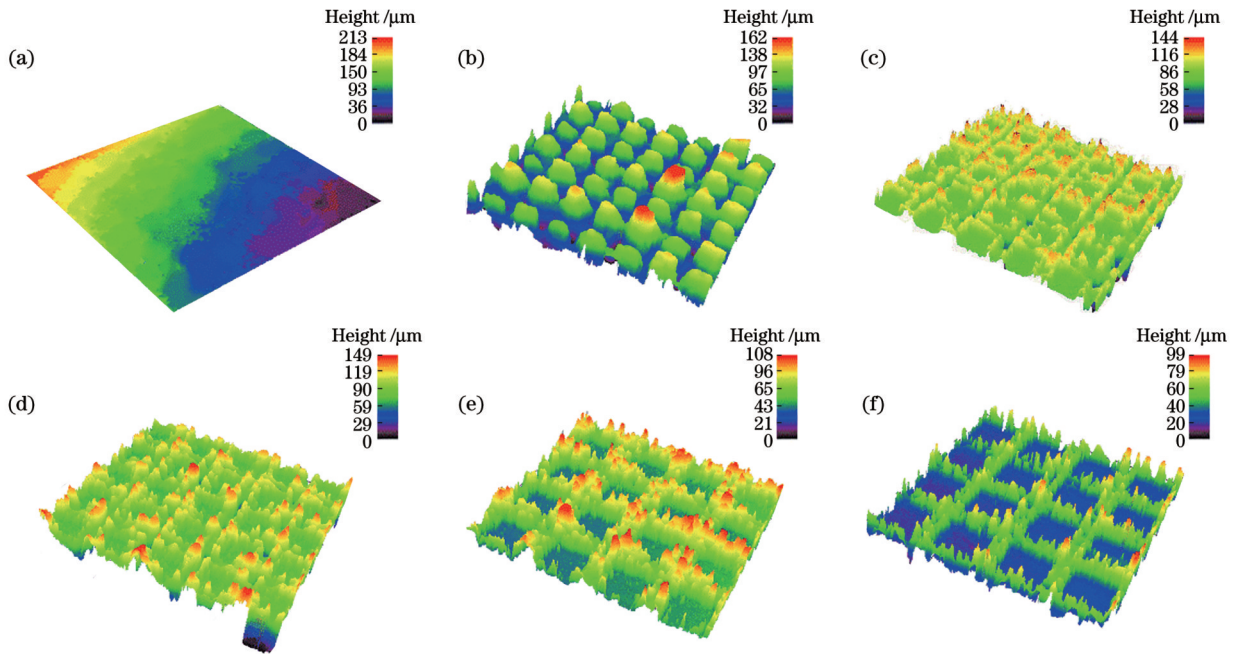


图 4 不同微织构间距下不锈钢表面微织构 3D 形貌。(a) 未处理;(b) 0.1 mm;(c) 0.2 mm;(d) 0.3 mm;
Fig. 4 3D morphologies of micro-textures with different widths on stainless surface. (a) Untreated; (b) 0.1 mm; (c) 0.2 mm; (d) 0.3 mm; (e) 0.4 mm; (f) 0.5 mm

微织构的引入使得熔化的 GFRP 在不锈钢表面上的润湿性发生明显变化。图 5 为不同微织构间距下

不锈钢表面熔化的 GFRP 的接触角,为保证 GFRP 在不锈钢表面上完全熔化和铺展,润湿温度设置为

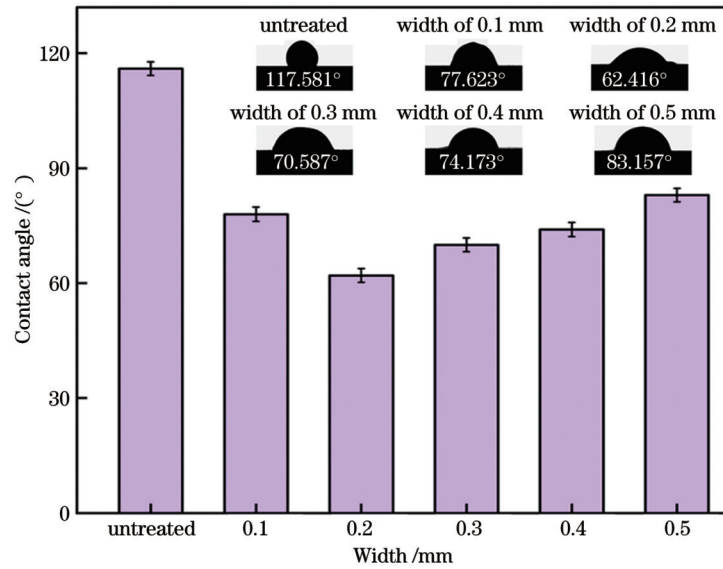


图 5 不同微织构间距下熔化的 GFRP 在 SUS304 表面上的润湿角

Fig. 5 Contact angles of molten GFRPs on SUS304 surfaces with different micro-texture widths

280 °C, 保温时间为 3 min。在未处理的不锈钢表面上,熔化的 GFRP 在不锈钢表面上的接触角是 117.5°, 即熔化的 GFRP 在未经纳秒激光处理的不锈钢表面上具有不润湿性;而经过激光毛化处理,熔化 GFRP 在不锈钢表面上由不润湿性转变为润湿性。随着微织构间距的增加,熔化的 GFRP 在不锈钢表面上的接触角先减小后增大。当微织构间距为 0.2 mm 时,润湿角达到最小值 62.4°, 这表明熔化的 GFRP 在微织构间距为 0.2 mm 的不锈钢表面上的润湿性达到最佳。这说明不锈钢表面微织构的引入有利于熔化

的 GFRP 在不锈钢表面上的铺展, GFRP 填充进入微织构内部,提高了不锈钢表面对熔化 GFRP 的吸附能力。

3.2 宏观成形

图 6 为典型 SUS304/GFRP 单面单点电阻焊连接接头的宏观形貌。由于采用前期优化的工艺参数,焊接过程稳定,连接后接头正面成形良好,在电极压力的作用下不锈钢表面有少量金属飞溅,压痕深度与压痕直径保持稳定,无热缺陷形成。反面未发现被挤出的树脂,无明显宏观缺陷。

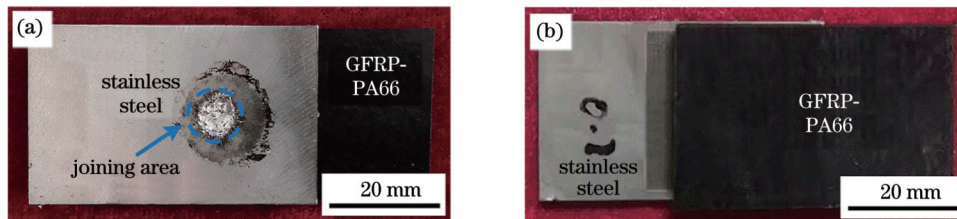


图 6 典型不锈钢/GFRP 连接接头的宏观形貌。(a) 正面;(b) 反面

Fig. 6 Macroscopic morphologies of typical stainless steel /GFRP joint. (a) Front surface; (b) back surface

3.3 界面形貌

图 7 为不同不锈钢表面微织构间距下典型单面单点电阻焊连接界面的形貌图。如图 7(a) 所示,基于前期工艺参数的优化,界面成形较好,未发现明显的界面缺陷。不锈钢表面引入微织构后,熔化的 GFRP 在电极压力的作用下进入织构内部,形成机械嵌合。当微织构间距为 0.2 mm 时,如图 7(c) 所示,微织构内部被熔化的 GFRP 完全填充,机械嵌合效果达到最佳,这与不锈钢表面的润湿性相关,此时润湿性达到最佳。当微织构间距过宽时,如图 7(c)~(f) 所示,不锈钢表面润湿性下降,其对熔化 GFRP 的吸附能力降低,熔化的 GFRP 无法完全填充微织构内部。值得注意的是,当微织构间距为 0.1 mm 时,填充效果

优于微织构间距为 0.3 mm、0.4 mm 时,这将于后文进一步研究。

图 8、9 为不同微织构间距下不锈钢/GFRP 单面单点电阻焊接头界面的 SEM 形貌及 EDS 元素分析结果。由于未处理的不锈钢表面的润湿性较差,熔化的 GFRP 在不锈钢表面上的铺展性较差,故界面结合处存在部分孔隙。引入微织构后,不锈钢表面的润湿性提升,熔化的 GFRP 填充到不锈钢表面的微织构内部。如图 8(a)、(b) 所示,在合适的微织构间距下,受热熔化的 GFRP 在电极压力的作用下完全填充微织构内部,冷却后连接界面形成机械嵌合。随着微织构间距的增加,不锈钢表面的润湿性降低,如图 8(c)~(e) 所示,熔化的 GFRP 无法完全填充不锈钢表面微

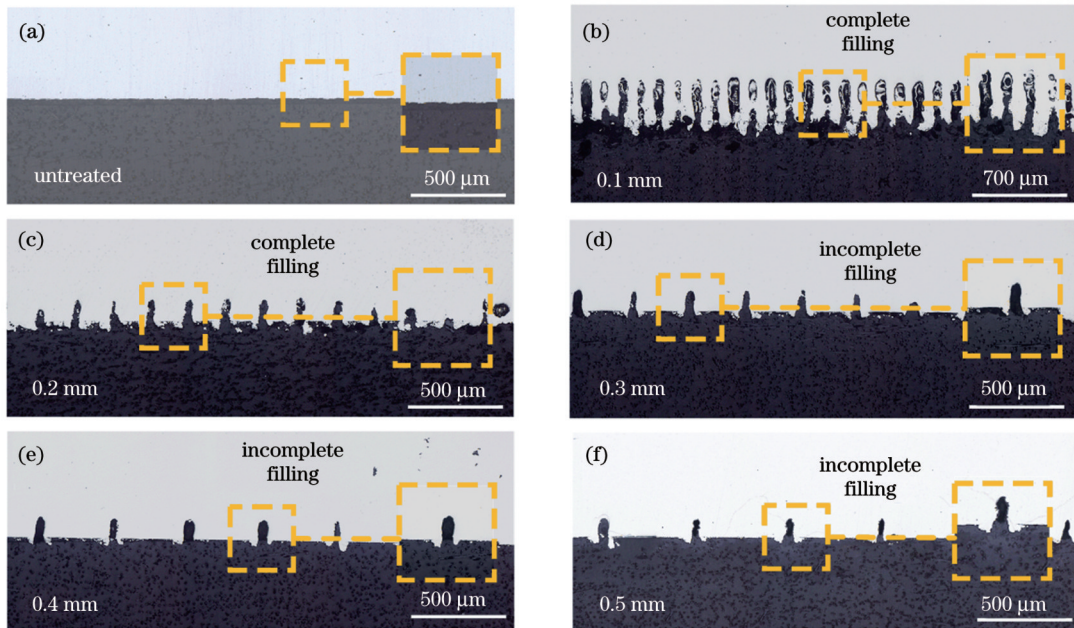


图7 不同微结构间距下典型不锈钢/GFRP连接接头在界面处的光镜形貌。(a)未处理;(b) 0.1 mm;(c) 0.2 mm;(d) 0.3 mm;(e) 0.4 mm;(f) 0.5 mm

Fig. 7 Optical morphologies of typical stainless steel/GFRP joints at interface under different micro-texture widths. (a) Untreated; (b) 0.1 mm; (c) 0.2 mm; (d) 0.3 mm; (e) 0.4 mm; (f) 0.5 mm

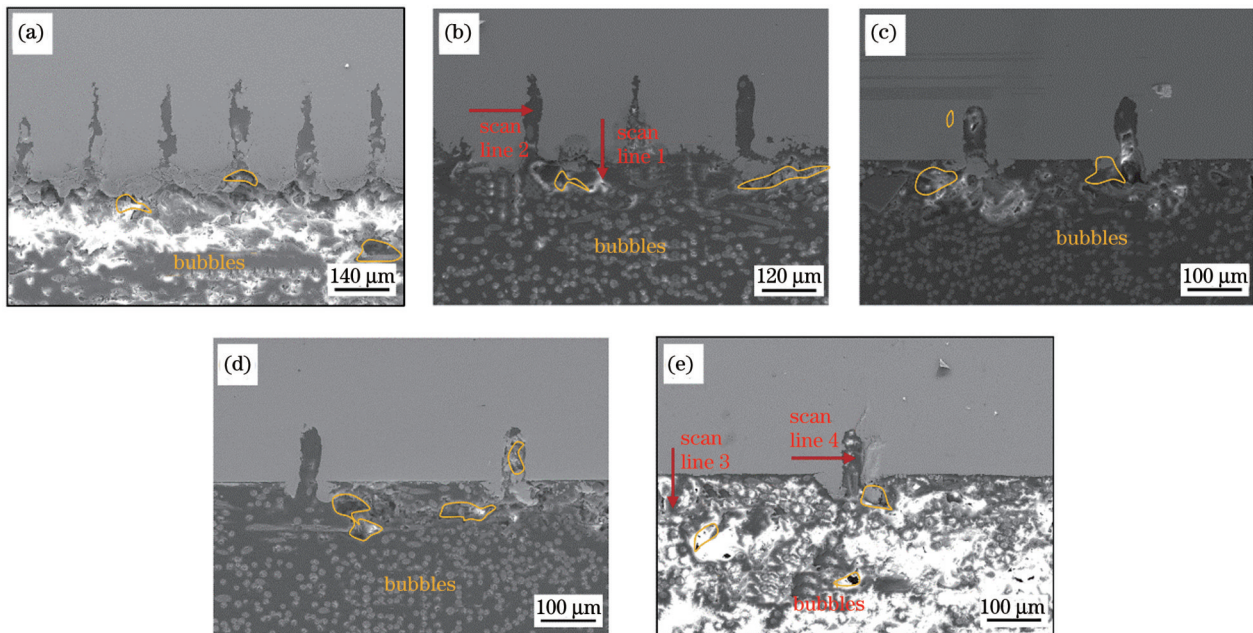


图8 不同微结构间距下典型不锈钢/GFRP接头连接界面的SEM形貌。(a) 0.1 mm;(b) 0.2 mm;(c) 0.3 mm;(d) 0.4 mm;(e) 0.5 mm
Fig. 8 SEM morphologies of interfaces of typical stainless steel/GFRP joints with different micro-texture widths. (a) 0.1 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.3 mm; (d) 0.4 mm; (e) 0.5 mm

织构内部。可见合适的微结构间距能促进界面的机械嵌合。分析了界面(垂直于竖直方向)和微结构(垂直于水平方向)处的元素分布,可以发现,连接界面处的C、Fe元素发生扩散,出现元素扩散层。这是由于纳秒激光处理后,不锈钢表面的润湿性提升,熔化的GFRP与不锈钢表面的接触面积增加,活性较强的Fe、C元素在高温环境下发生扩散。如图9(a)~(d)所示,当微结构间距为0.2 mm时,界面处的元素扩散

层厚度为 $8\ \mu\text{m}$,当微结构间距为0.5 mm时,界面处的元素扩散层厚度为 $6\ \mu\text{m}$,前者大于后者;同时,当微结构间距为0.2 mm时,微结构处的元素扩散层厚度为 $8\ \mu\text{m}$,当微结构间距为0.5 mm时,微结构处的元素扩散层厚度为 $5\ \mu\text{m}$,前者大于后者。出现这种现象的原因是在不锈钢与GFRP的单面单点电阻焊连接过程中,外加压力直接作用于界面,反应时间较长,界面处的元素扩散充分,而受热熔化的流动性较好的GFRP

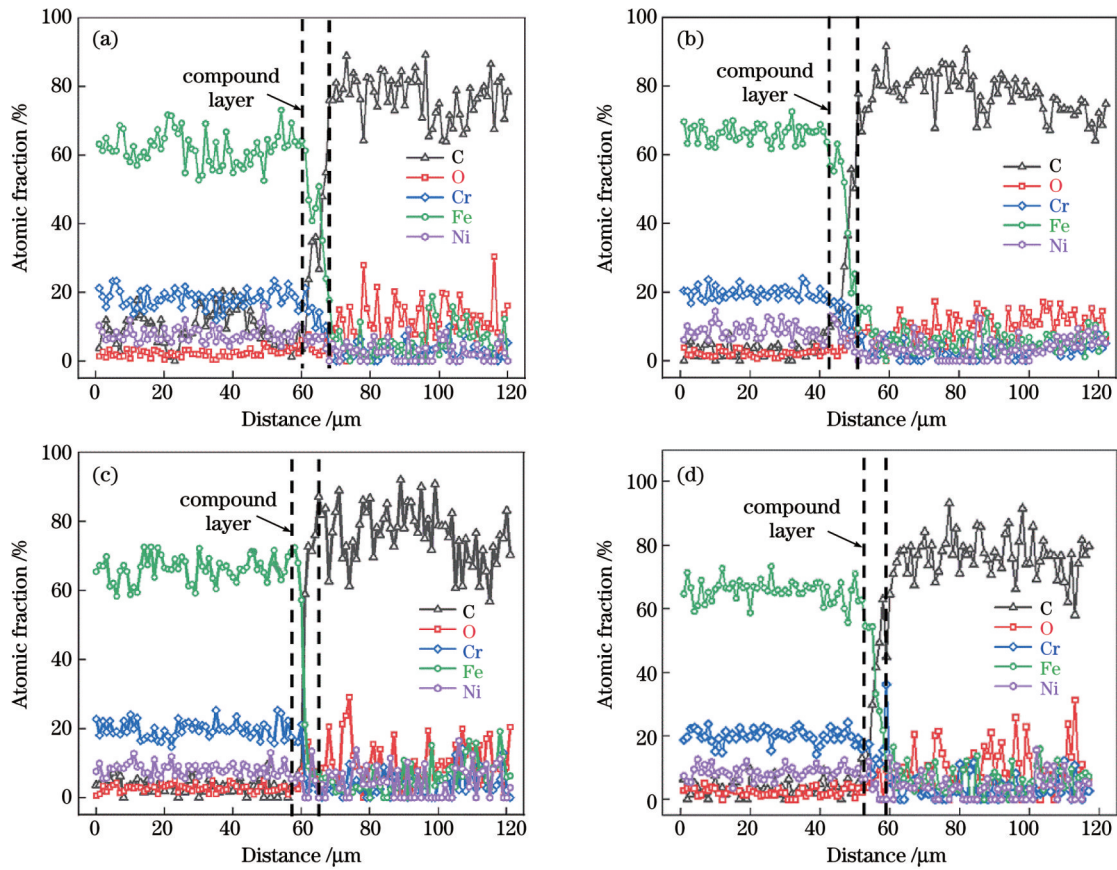


图9 不同路径下典型不锈钢/GFRP接头连接界面的元素分布。(a) Line 1; (b) line 2; (c) line 3; (d) line 4

Fig. 9 Elements distributions of interfaces of typical stainless steel/GFRP joints along different paths. (a) Line 1; (b) line 2; (c) line 3; (d) line 4

流入不锈钢表面微织构内部,反应时间较短,元素扩散不充分。

3.4 力学性能及断口分析

图10为不同不锈钢表面微织构间距下单面单点电阻焊连接接头的拉剪力。随着不锈钢表面微织构间距的增加,不锈钢/GFRP单面单点电阻焊连接接头的最大拉剪力呈现先增大后减小的变化趋势,这与不锈钢表面润湿角的变化趋势对应。当微织构间距为0.2 mm时,拉剪力达到最大值3548 N,其拉伸曲线如

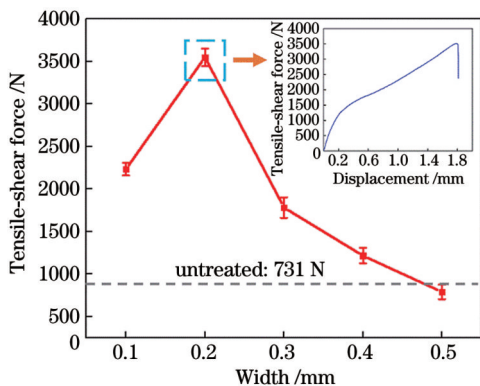


图10 不同微织构间距下不锈钢/GFRP接头拉剪力

Fig. 10 Tensile-shear force values of stainless steel/GFRP joints with different micro-texture widths

图10所示,与未处理的不锈钢/GFRP单面单点电阻焊连接接头相比,拉伸剪切力提升了385%,此时不锈钢表面的润湿性达到最佳。当不锈钢表面的微织构间距较小时,熔化的GFRP填充到不锈钢表面微织构内部,但是实际接触面积较小,因此接头拉剪力较低;当微织构间距较大时,不锈钢表面的润湿性较差,熔化的GFRP无法完全填充到不锈钢表面微织构内部,且表面微织构数量减少,实际接触面积较小,拉剪力下降。由此可见,间距合适的微织构的引入显著提升了不锈钢/GFRP单面单点电阻焊接头的力学性能。

图11为典型不锈钢/GFRP单面单点电阻焊连接接头的不锈钢侧与GFRP侧断口的3D形貌。如图11(a)所示,未处理的接头断口处存在少量树脂纤维混合物。引入微织构后,接头断口的中心区域存在大量树脂-玻璃纤维混合物,断裂于GFRP内部,主要断裂方式为内聚断裂;周围部分区域表面光滑,主要断裂形式为界面断裂。为了进一步探究两种断裂形式,将树脂-玻璃纤维混合物所占面积与整体断口区域面积的比值定义为树脂-玻璃纤维混合物的粘结比率,采用ImageJ软件进行统计分析。可以发现,随着微织构间距的增加,如图11(b)~(f)所示,粘结比率先增大后减小,当微织构间距为0.2 mm时粘结比率达到最大值27.3%,这与不锈钢表面润湿角和不锈钢/GFRP接头的拉剪力的变

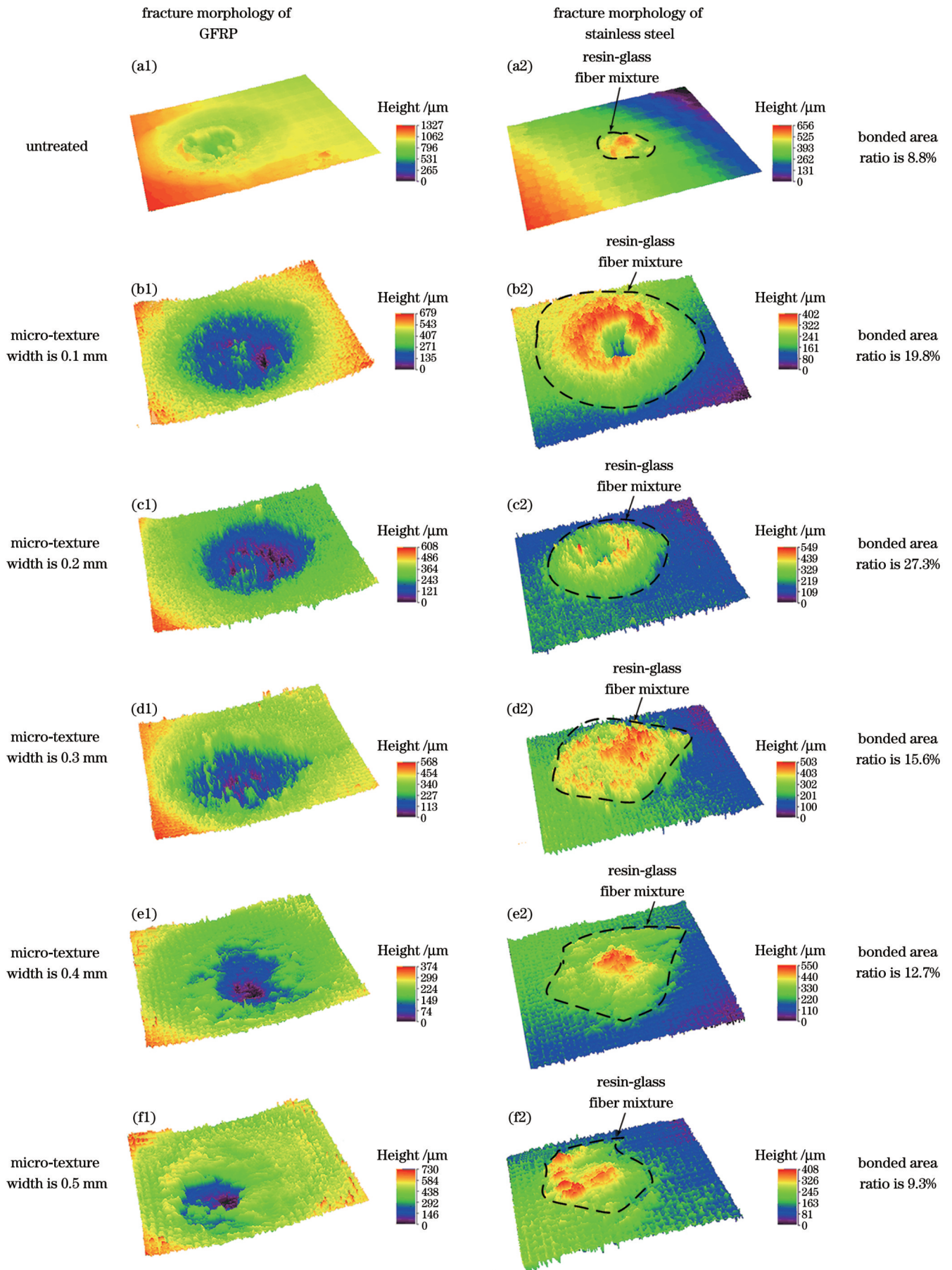


图 11 SUS304/GFRP 接头断口的 3D 形貌
Fig. 11 3D fracture images of SUS304/GFRP joints

化趋势对应,表明不锈钢表面对熔化的 GFRP 的吸附能力影响了不锈钢/GFRP 接头的性能。已有研究^[26]指出,金属表面毛化处理,热量主要通过表面突出部分传递,即微织构间距越小,界面处的突出面积越小,界面温度越低。当微织构间距为 0.1 mm 时,树脂分解量最少,虽然微织构间距为 0.1 mm 时的润湿角大于微织构间距为 0.3 mm 和 0.4 mm 时的润湿角,但是前者熔化树脂量远大于后者,所以树脂填充效果更佳,这与界面光镜及电镜形貌相对应。

图 12 为不锈钢/GFRP 接头断口典型区域的 SEM 形貌图。未引入微织构调控的接头断口形貌如

图 12(a1)、(b1)所示,局部出现玻璃纤维,出现这种现象的原因是该区域焊接时界面温度超过树脂分解温度,树脂气化,冷却后玻璃纤维保留。如图 12(a2)、(a3)所示,GFRP 侧出现平滑区域。如图 12(b2)、(b3)所示,不锈钢侧的树脂纤维混合物较少,断裂位置为不锈钢与 GFRP 界面处,证明未引入微织构时接头断裂形式主要为界面断裂。引入微织构调控的接头断口形貌如图 12(c1)、(d1)所示。可以发现大量树脂纤维混合物位于断口中心,不锈钢表面微织构被 GFRP 填充,表明在电极压力的作用下,部分区域的 GFRP 嵌合到不锈钢微织构内部。如图 12(c1)所示,GFRP 表面粗

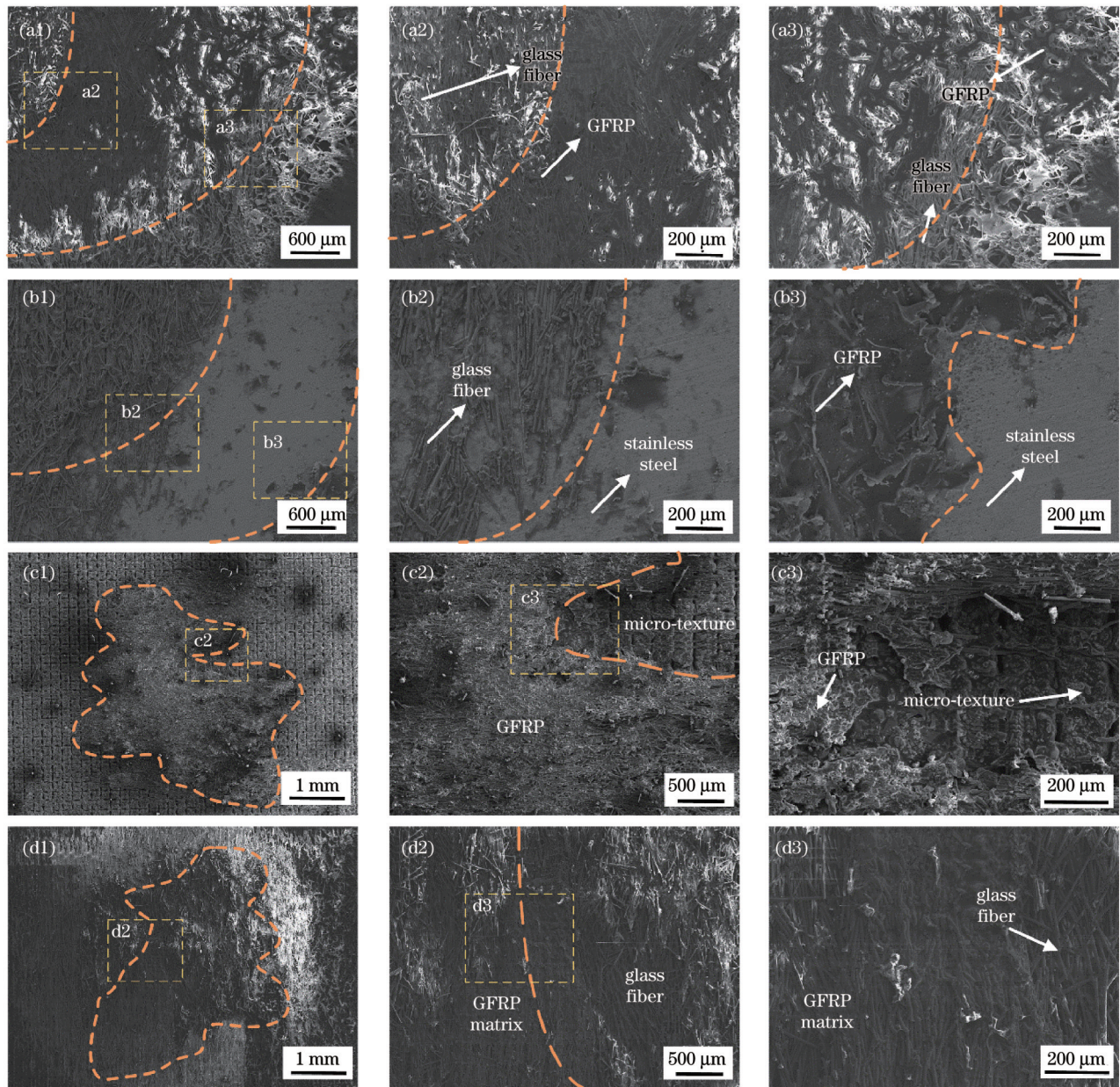


图 12 典型不锈钢/GFRP 接头的断口形貌。(a1)~(a3)未引入微织构的 GFRP 侧断口;(b1)~(b3)未引入微织构的不锈钢侧断口;(c1)~(c3)引入微织构的不锈钢侧断口;(d1)~(d3)引入微织构的 GFRP 侧断口
 Fig. 12 Fracture morphologies of typical stainless steel/GFRP joints. (a1)–(a3) Fracture at GFRP side without micro-texture; (b1)–(b3) fracture at stainless steel side without micro-texture; (c1)–(c3) fracture at stainless steel side with micro-texture; (d1)–(d3) fracture at GFRP side with micro-texture

糙,为大量树脂纤维粘合物,这表明断裂发生于GFRP基体内部,断裂形式为内聚断裂。如图12(c2)、(c3)所示,与未引入微织构的不锈钢侧断口相比,断口部分区域裸露的不锈钢周围的树脂纤维混合物的粘结量明显增加,进一步证明了微织构的引入提高了接头强度。值得注意的是,GFRP基质部分区域同样出现杂乱的玻璃纤维,这是由于焊接结束后,玻璃纤维保留在该区域,但拉伸断裂时接头在纤维处被撕裂,破坏了纤维的有序分布,如图12(d2)、(d3)所示。这表明不锈钢表面微织构的引入促进了不锈钢/GFRP接头的机械嵌合。

3.5 连接机理

基于上述分析,引入微织构后不锈钢与GFRP单面单点电阻焊接机理如图13所示。在焊接过程中,电流通过不锈钢内部,产生电阻热,热量从不锈钢传导到不锈钢/GFRP界面,温度高于GFRP的熔点,GFRP

熔化,如图13(b)所示,在电极压力的作用下熔化的GFRP与未引入微织构的不锈钢表面形成可靠连接。采用纳秒激光在不锈钢表面上制备微织构后,熔化的GFRP在不锈钢表面上的润湿性显著提高,相较于未引入微织构的接头,在合适的微织构间距下,如图13(c)所示,当不锈钢表面的润湿性达到最佳状态时,熔化的GFRP完全填充到微织构内部,接头在树脂内部失效,断裂形式为内聚断裂。当不锈钢表面微织构间距较宽或较窄时,如图13(d)所示,不锈钢表面的润湿性较差,微织构对熔化的GFRP的吸附能力较差,熔化的GFRP无法完全填充到不锈钢表面微织构内部,出现不完全机械嵌合现象,接头失效于界面处。同时,在电阻热界面的高温作用下,活性较强的Fe、C元素发生化学扩散,形成元素扩散层,进一步提高了接头强度。

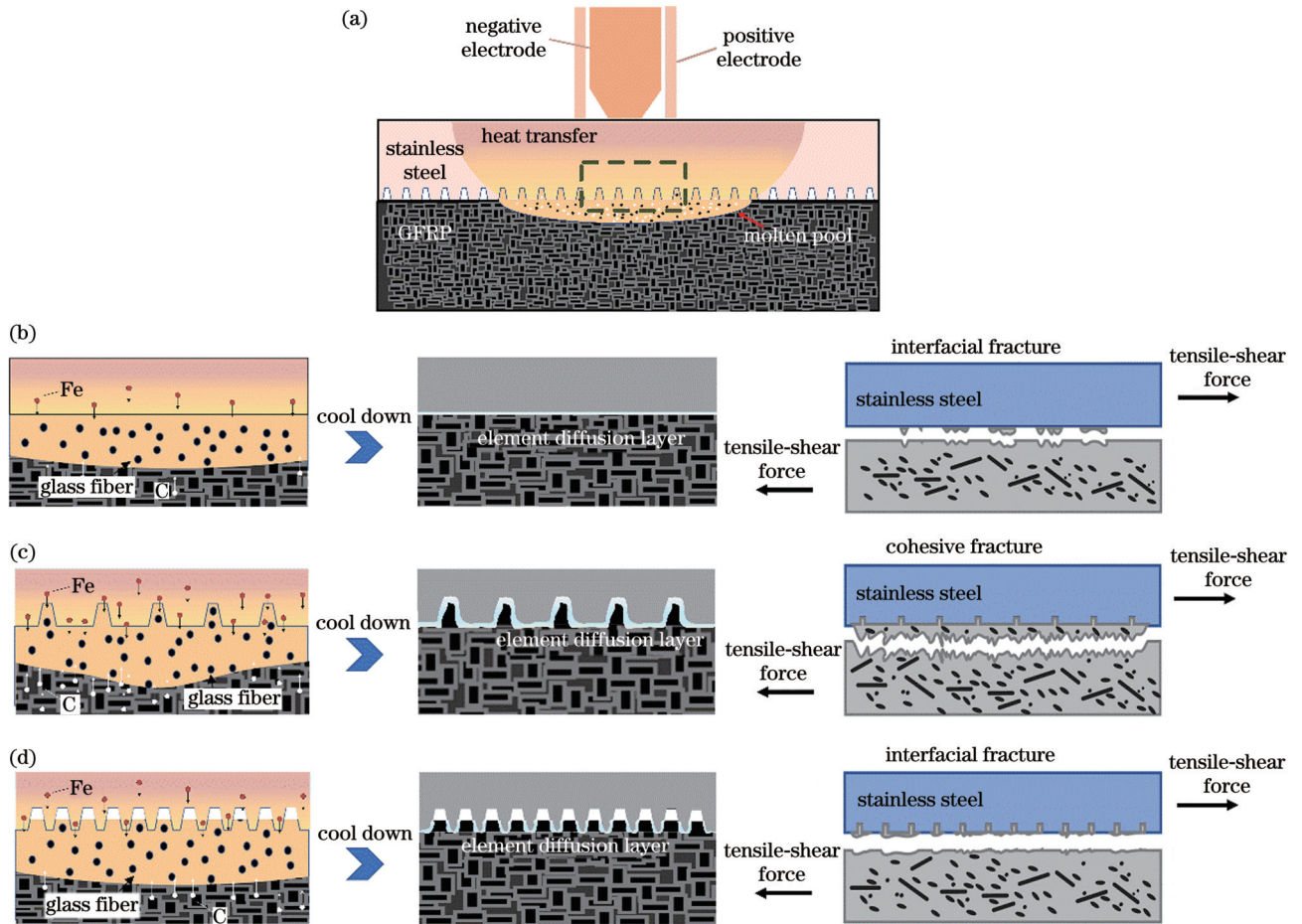


图13 微织构调控下不锈钢/GFRP单面单点电阻焊接机理图。(a)宏观热传导连接;(b)未处理;(c)微织构间距合适;(d)微织构间距过宽或过窄

Fig. 13 Mechanism of single-side resistance spot welding of stainless steel/GFRP under micro-texture control. (a) Macroscopic heat conduction joining; (b) untreated; (c) micro-texture width is suitable; (d) micro-texture width is wide or narrow

4 结 论

采用单面单点电阻焊设备实现了不锈钢与GFRP的连接,并采用纳秒激光器在不锈钢表面上制备了网格微织构,提升了SUS304与GFRP的接头强度。通

过对纳秒激光处理后不锈钢表面形貌、润湿性、不锈钢/GFRP接头宏观成形、界面形貌、力学性能及断口进行研究,分析了微织构的引入对不锈钢/GFRP接头的影响机理,得到如下结论:

1) 通过纳秒激光处理引入微织构后,不锈钢表面

熔化 GFRP 的润湿性显著提升,由不润湿性转变为润湿性。在前期优化的工艺参数下,不锈钢/GFRP 接头的宏观成形良好,无明显热缺陷。

2) 微织构的引入提高了不锈钢/GFRP 接头的力学性能,当微织构间距为 0.2 mm 时不锈钢/GFRP 单面单点电阻焊接头的剪切力达到最大值 3548 N,相较于未引入微织构接头的剪切力(731 N)提升了近 358%。

3) 不锈钢/GFRP 单面单点电阻焊接头界面的失效形式为界面断裂与内聚断裂的混合失效形式。在断口部分区域不锈钢内部可以明显观察到 GFRP 填充到不锈钢表面微织构内部,这说明不锈钢表面微织构的引入显著促进了界面的机械嵌合。

4) 微织构的引入增加了不锈钢与 GFRP 的接触面积,显著促进了界面的机械嵌合。在合适的微织构间距下,GFRP 可完全填充微织构内部,当微织构间距过窄或过宽时,受润湿性的影响,GFRP 不完全填充微织构内部。除机械嵌合外,在界面高温作用下,活性较高的 Fe、C 元素在界面处发生化学扩散,形成化合物层,进一步促进接头强度的提高。

参 考 文 献

- [1] Liu H B, Liu J, Ding Y Z, et al. A three-dimensional elastic-plastic damage model for predicting the impact behaviour of fibre-reinforced polymer-matrix composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 201: 108389.
- [2] Joesbury A M, Colegrove P A, Van Rymenant P, et al. Weld-bonded stainless steel to carbon fibre-reinforced plastic joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 241-250.
- [3] 张书平, 曹宇, 杨文峰, 等. 表面硅烷改性和激光加工微倒钩结构对铝合金-CFRP 胶接接头性能的影响[J]. *中国激光*, 2023, 50(12): 1202203.
Zhang S P, Cao Y, Yang W F, et al. Effects of surface silane modification and laser machining microbarb structure on performance of aluminum alloy-CFRP adhesive joint[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(12): 1202203.
- [4] 景若木, 徐洁洁, 肖荣诗, 等. 碳纤维增强复合材料与钛合金激光连接仿真[J]. *中国激光*, 2023, 50(8): 0802101.
Jing R M, Xu J J, Xiao R S, et al. Simulation study of laser joining for carbon fiber reinforced plastics and titanium alloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(8): 0802101.
- [5] 刘一凡, 周宝升, 张涛, 等. 基于表面微织构的钛合金与 CFRP 激光连接研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1803001.
Liu Y F, Zhou B S, Zhang T, et al. Study on laser bonding of titanium alloy and CFRP based on surface microtexture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1803001.
- [6] Cao Y J, Cao Z Q, Zuo Y J, et al. Numerical and experimental investigation of fitting tolerance effects on damage and failure of CFRP/Ti double-lap single-bolt joints[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 78: 461-470.
- [7] Wang Z M, Bi X Y, Liu B S, et al. Adhesion enhancement of PEEK/6161-T6 FLJ joints via laser surface modification[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 216: 108797.
- [8] Hu Y S, Zhang J H, Wang L, et al. A simple and effective resin pre-coating treatment on grinded, acid pickled and anodised substrates for stronger adhesive bonding between Ti-6Al-4V titanium alloy and CFRP[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 432: 128072.
- [9] Huang Y X, Meng X C, Xie Y M, et al. Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 105: 235-257.
- [10] Lionetto F, Mele C, Leo P, et al. Ultrasonic spot welding of carbon fiber reinforced epoxy composites to aluminum: mechanical and electrochemical characterization[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 144: 134-142.
- [11] Lionetto F, Balle F, Maffezzoli A. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 289-295.
- [12] Lambiase F, Paoletti A. Friction assisted joining of titanium and polyetheretherketone (PEEK) sheets[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 254-261.
- [13] Lambiase F, Paoletti A. Mechanical behavior of AA5053/polyetheretherketone (PEEK) made by Friction Assisted Joining [J]. *Composite Structures*, 2018, 189: 70-78.
- [14] Wang Y Q, Rao Z H, Liao S M, et al. Ultrasonic welding of fiber reinforced thermoplastic composites: current understanding and challenges[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149: 106578.
- [15] 檀财旺, 苏健晖, 冯紫薇, 等. 金属与塑料激光连接的研究现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(6): 85-94.
Tan C W, Su J H, Feng Z W, et al. Research status and development on laser joining of metal to plastic[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6): 85-94.
- [16] 韩晓辉, 张志毅, 马国龙, 等. 热源角度对 6A01 铝合金激光-MIG 复合焊成形及气孔的影响[J]. *中国激光*, 2022, 49(2): 0202020.
Han X H, Zhang Z Y, Ma G L, et al. Effects of heat source angle on weld formation and porosity defects of laser-MIG hybrid welding of 6A01 aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(2): 0202020.
- [17] Kim K Y, Ahmed F. Semantic weldability prediction with RSW quality dataset and knowledge construction[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 38: 41-53.
- [18] Nagatsuka K, Xiao B L, Wu L H, et al. Resistance spot welding of metal/carbon-fibre-reinforced plastics and applying silane coupling treatment[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(3): 181-186.
- [19] Szallies K, Bielenin M, Schrickler K, et al. Single-side resistance spot joining of polymer-metal hybrid structures[J]. *Welding in the World*, 2019, 63(4): 1145-1152.
- [20] Ren S D, Ma Y W, Ma N S, et al. 3-D modelling of the coaxial one-side resistance spot welding of AL5052/CFRP dissimilar material[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 940-950.
- [21] Ren S D, Ma Y W, Saeki S, et al. Fracture mechanism and strength evaluation of Al5052/CFRP joint produced by coaxial one-side resistance spot welding[J]. *Composite Structures*, 2020, 252: 112766.
- [22] Ren S D, Ma Y W, Saeki S, et al. Numerical analysis on coaxial one-side resistance spot welding of Al5052 and CFRP dissimilar materials[J]. *Materials & Design*, 2020, 188: 108442.
- [23] Kwon D J, Kim J H, Kim Y J, et al. Comparison of interfacial adhesion of hybrid materials of aluminum/carbon fiber reinforced epoxy composites with different surface roughness[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 170: 11-18.
- [24] Rodriguez-Vidal E, Sanz C, Lambarri J, et al. Experimental investigation into metal micro-patterning by laser on polymer-metal hybrid joining[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 104: 73-82.
- [25] Zhang Z, Shan J G, Tan X H, et al. Improvement of the laser joining of CFRP and aluminum via laser pre-treatment[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9): 3465-3472.
- [26] Zhang Z, Tan X H, Zhang J, et al. Suppression of shrinkage porosity in laser-joining of CFRP and steel using a laser surface modification process "Surfi-Sculpt®" [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 85: 184-192.

Single Side Resistance Spot Welding Process and Performance of Stainless Steel and Glass Fiber Reinforced Plastics Based on Laser Texturing

Tan Caiwang^{1,2*}, Wang Shijia¹, Su Jianhui^{1,2}, Han Xiaohui³, Chen Bo^{1,2}, Song Xiaoguo^{1,2}

¹Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, Shandong, China;

²State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

³CRRC Qingdao Sifang Co., LTD., Qingdao 266111, Shandong, China

Abstract

Objective Hybrid material structures have various applications in the automotive industry owing to their light weight. Stainless steel, which exhibits good corrosion resistance and remarkable mechanical properties, is widely used in automotive applications. Glass fiber reinforced plastics (GFRPs) that exhibit high specific strength and cost performance have replaced existing materials in applications requiring lightweight materials. Single-side resistance spot welding of stainless steel and GFRP can help combine the advantages of the two materials. However, owing to the difference in the thermal physical properties and chemical structures of these two materials, the combined strength cannot meet industrial requirements. Improving mechanical interlocking and chemical bonding is an effective approach for enhancing the joint performance. The laser joining process can be used to fabricate micro-textures and change the surface chemical state. Thus, micro-textures on the surface of stainless steel are prepared using a nanosecond laser, and the strengthening mechanism of the interface under the influence of the micro-textures is studied.

Methods Initially, 304 stainless steel and GFRP are selected as base materials. The 304 stainless-steel sheets are subjected to laser texturing. The cruciform mesh micro-texture is selected as the basic morphology of the stainless-steel surface. The grid line uses contained multiple equally spaced scan lines, and a laser processing system supporting software is used to preset different micro-texture widths. The number of laser scanning times is set as 10, and the micro-texture width is set as 0.1–0.5 mm. An optical digital microscope and a field-emission scanning electron microscope are used to detect the laser texture, surface morphology, and fracture surface of the joint. A constant-temperature heating platform and a high-temperature wetting angle measurement system are used to measure the GFRP contact angle on the stainless-steel surface to characterize its wettability. A universal material testing machine is used to conduct tensile-shear tests on the 304 stainless steel/GFRP single-side resistance spot welding joints.

Results and Discussions The introduction of micro-textures on the surface of stainless steel significantly improves the wettability of the surface. The surface of stainless steel changes from an untreated non-wetting state to a wet state after laser treatment. As the width of the micro-texture increases, the wettability initially increases and then decreases (Fig. 5). When the micro-texture width is 0.2 mm, the wettability reaches the optimum value. The interior of the micro-textures is completely filled with molten GFRP. When the micro-texture width is too large, the molten GFRP cannot completely fill the interior of the micro-textures (Fig. 7). C and Fe diffuse at the interface, and an element diffusion layer is formed (Figs. 8 and 9). When the micro-texture width is 0.2 mm, the tensile-shear force reaches the maximum value of 3548 N, which is 385% higher than that of the untreated stainless steel/GFRP single-side resistance spot welding joint. The tensile-shear force first increases and then decreases as the micro-texture width increases. Compared with the case of the joint without micro-textures, after laser treatment of the stainless-steel surface, a large amount of the resin-glass fiber mixture is observed in the center area of the fracture of the joint (Fig. 11). The fracture mode changes from an interfacial fracture to a mixed form of interfacial and cohesive fractures. Corresponding to the wettability and joint tensile-shear force, the bonded-area ratio first increases and then decreases, indicating an improvement in mechanical properties.

Conclusions Laser texturing is used to improve the performance of stainless steel/GFRP single-sided resistance spot welding joints. After the nanosecond laser treatment, the wettability of the molten GFRP on the stainless-steel surface is significantly improved, and the state changes from non-wetting to wetting. The introduction of the micro-textures improves the mechanical properties of the stainless steel/GFRP resistance spot welding joint. When the micro-texture width is 0.2 mm, the tensile-shear force of the stainless steel/GFRP single-side resistance spot welding joint reaches the maximum value of 3548 N. Compared to the case wherein the micro-textures are not introduced, the tensile-shear force of the textured joint is 731 N. The introduction of the micro-textures increases the contact area between the stainless steel and GFRP, thereby significantly enhancing mechanical interlocking. When the micro-texture width is suitable, the GFRP completely fills the inside of the micro-textures. When the micro-texture width is too small or too large, the GFRP does not completely fill the inside of the micro-textures owing to the influence of wettability. In addition to mechanical interlocking, Fe and C chemically diffuse at the interface to form a compound layer, which further improves joint strength.

Key words laser technique; nanosecond laser; micro-texture; single-side resistance spot welding; wettability; mechanical interlocking