

引文格式: 夏佩云, 孟遥, 沈浩然, 等. 铝合金-聚醚醚酮异种材料激光连接工艺特性 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 30-35, 46.  
XIA Peiyun, MENG Yao, SHEN Haoran, et al. Process characteristics of laser direct joining of PEEK to aluminum alloy[J].  
Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 30-35, 46.

# 铝合金-聚醚醚酮异种材料 激光连接工艺特性\*

夏佩云<sup>1,2</sup>, 孟遥<sup>2</sup>, 沈浩然<sup>2</sup>, 吕红亚<sup>2</sup>, 刁磊<sup>2</sup>, 封小松<sup>2</sup>, 王春明<sup>1</sup>, 尹玉环<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 上海航天设备制造总厂有限公司国防科技工业特种焊接技术创新中心, 上海 200245)

[摘要] 采用激光连接技术实现了2mm厚2195铝锂合金与3mm厚聚醚醚酮(PEEK)搭接,对比分析了铝合金焊前表面未处理与磷酸阳极氧化处理两种情况,不同工艺参数条件下接头外观成形、连接界面的微观形貌以及抗拉剪切破坏力情况。结果表明,2195-PEEK异质接头的PEEK一侧可见“弧形”熔融区,对于表面磷酸阳极氧化处理的接头,该线形包络内可见大量尺寸不一的微小气孔,连接界面原始间隙消除形成有效连接;磷酸阳极氧化处理可显著提升接头结合强度,在激光功率1400W、扫描速度3mm/s时,可达到最大抗拉剪切破坏力4479N(PEEK试片宽度30mm),失效位置位于PEEK一侧,界面未被破坏;磷酸阳极氧化处理2195-PEEK激光直接接头界面形成了4 $\mu$ m厚度的过渡层,过渡层的厚度与磷酸阳极氧化膜厚度基本一致,Al、C元素浓度形成渐变过渡,推测该过渡层内形成“Al-O-PEEK”化学键,这是提高接头连接强度的重要原因。

关键词: 激光直连; 异质接头; 拉剪力; 磷酸阳极氧化; 化学键

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.12.030



夏佩云

高工, 博士研究生, 主要从事激光制造、特种焊接技术开发与应用工作。

金属与塑料的复合结构逐渐成为工业领域轻量化制造的重要解决手段<sup>[1]</sup>。金属-塑料常见的连接方法有胶接、机械连接。胶接方法存在效率低、对环境敏感、耐久性差等缺点<sup>[1-3]</sup>。机械连接破坏了结构的完整性,易引起应力集中问题<sup>[4]</sup>。而激光连接凭借其非接触、高效率、振动应力小优势,在塑料-金属的连接领域具有良好的应用前景<sup>[5]</sup>。现有研究表明,利用激光透射焊接可实现透光性较好的材料如聚丙烯(PP)<sup>[6]</sup>、聚乙烯对苯二甲基(PET)<sup>[7]</sup>、聚酰胺(PA)<sup>[8]</sup>、聚甲基丙烯酸甲酯

(PMMA)<sup>[9]</sup>与金属的连接,甚至玻璃纤维增强的复合材料<sup>[10-11]</sup>与金属。近年来,为了克服激光透射连接技术只适用于透光塑料的连接的局限性,国内外学者开展了激光直接连接技术研究,除了可实现前述的透光材料<sup>[12-13]</sup>,还可以实现碳纤维复合材料<sup>[14-16]</sup>等不透光材料的连接。目前对于塑料-金属的激光连接存在的主要问题为连接强度低,为了提高塑料-金属的连接强度,主要采用金属表面微构化预处理增加机械咬合力<sup>[17-18]</sup>,其次通过过渡层使之形成化学键<sup>[16,19]</sup>。

\* 基金项目: 上海市工业强基项目(GYQJ-2019-1-32)。

聚醚醚酮(PEEK)树脂是一种新型高性能热塑性聚合物,具有优异的耐热性,可在200℃下长期使用<sup>[20]</sup>,可望取代热固性树脂作为高性能复合材料的基体材料,在航空航天领域已有大量应用<sup>[21]</sup>。目前对于PEEK与金属的连接研究成果未见任何报道。本文采用激光焊接方法进行PEEK-2195铝合金连接试验,对比铝合金表面未处理和阳极氧化处理对异质接头强度的影响,进而分析PEEK-2195连接区域的微观形貌,分析异质材料的连接机理。

## 试验与材料

### 1 试验材料

聚醚醚酮(PEEK)板材规格有两种,分别为20mm×10mm×3mm、100mm×30mm×3mm,拉伸强度115MPa,密度1.3g/cm<sup>3</sup>。2195铝锂合金成分见表1,有两种规格:20mm×10mm×2mm、100mm×30mm×2mm。

### 2 试验方法

试验采用Rofin 4000W光纤激光器,聚焦光斑直径为0.4mm,波长为1070nm。为了降低试样加工对接头的破坏,金相分析试样和拉剪试样均采用整件式小规格试样进行试验。图1(a)为金相分析试样激光连接示意图,图1(b)为拉剪试样激光连接示意图,均采用铝合金置于PEEK板材上方,激光直接照射铝合金,使得铝合金形成熔池,热量以热传导的形式传递到铝合金与热塑复合材料的连接界面,界面处的铝合金未熔化,但界面处热塑复合材料表层的树脂达到熔融状态,在力与热的作用下与金属连接。采用的焊接工艺参数见表2,铝合金表面为未处理和磷酸阳极氧化处理两种状态。

金相试样连接后不进行分切制样操作,先进行试样镶嵌,后直接磨抛起头端,磨削量为1~3mm。拉伸试样连接后直接进行拉剪切试验。

利用Olympus-MPG3型光学显微镜(OM)观察接头微观组织,拉剪破坏采用XYB305C万能试验机,拉伸速率为10mm/min。

## 结果与讨论

### 1 2195-PEEK激光直连接头外观成形

图2为表面未处理铝合金-聚醚醚酮激光连接试样表面照片。当功率增加或速度降低时,容易在结束端形成焊瘤、烧穿。这是由于随着焊接热量的积累,塑料-金属的界面温度升高,在结束端热量积累最大,并且端面的散热条件最差,导致塑料分解出大量气体,气体的爆炸式压力促使铝合金熔池形成飞溅或烧穿。焊后的接头试样除编号11和15外,连

接试样均在焊后自然脱开。典型脱开试验的连接界面如图3所示,在铝合金界面未发现粘连塑料材料,说明在这些参数条件下,铝合金与聚醚醚酮并未形成有效连接。

图4为表面磷酸阳极氧化的铝合金-聚醚醚酮激光连接试验的表面照片。2195铝合金表面的焊缝成形良好,在个别参数的条件下的收尾段存在微小鼓包(编号21),所有的焊缝相对于表面未处理的试样来说,成形有所改善。铝合金焊缝的成形改善与界面形成有效连接相关。界面的有效连接减小了界面的热阻,减小了热量的积累效应,从而改善了焊缝结束端的爆炸烧穿。对于表面处理的接头,焊后所有试样在自然状态下均未发生脱开。因此,相对于未表

表1 2195铝锂合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 2195 alloy (mass fraction) %

Cu	Li	Mg	Zr	Ag	Al
4.0	1.0	0.25	0.11	0.27	余量

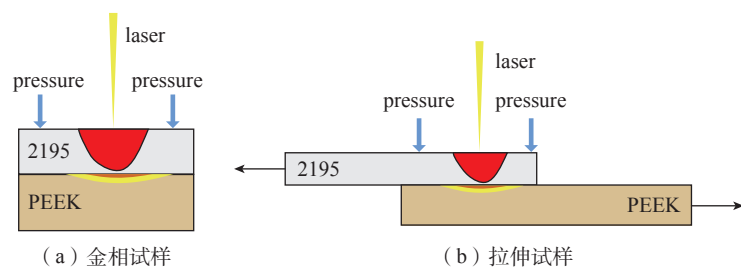


图1 聚醚醚酮-铝合金激光直连示意图

Fig.1 Diagram of laser direct joining of PEEK to aluminum

表2 试验采用的焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters used in experiments

序号	激光功率 / W	焊接速度 / (mm·min <sup>-1</sup> )	离焦量	铝合金表面状态与编号	铝合金表面状态与编号
1	1300	3	0	未处理 11	磷酸阳极氧化 21
2	1300	4	0	未处理 12	磷酸阳极氧化 22
3	1300	5	0	未处理 13	磷酸阳极氧化 23
4	1400	3	0	未处理 14	磷酸阳极氧化 24
5	1400	4	0	未处理 15	磷酸阳极氧化 25
6	1400	5	0	未处理 16	磷酸阳极氧化 26

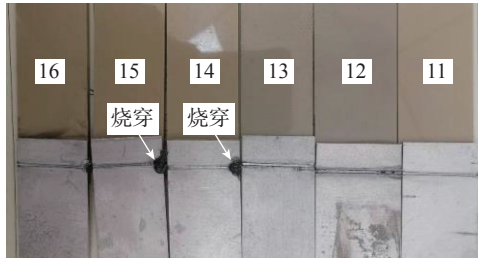


图2 2195 铝合金(表面未处理)-聚醚醚酮激光连接试样  
Fig.2 Laser direct joints of aluminum (surface untreated) and PEEK



图3 直接脱开的连接接头(试样编号 13)  
Fig.3 Specimen with low adhesion (sample 13)

面处理的接头,表面处理有利于改善异质界面的有效连接。

## 2 AI-PEEK 异质界面连接微观形貌

图5为典型磷酸阳极氧化2195铝锂合金-聚醚醚酮激光连接接头横截面金相。塑料一侧可见“弧形”熔融区域,在铝合金熔池正下方熔融深度最大,分别向两侧厚度减小。铝合金熔池是塑料-铝合金界面热量的来源,熔池壁相当于等温面呈放射状进行热传递,以致形成树脂弧形熔融区域。树脂熔融区域存在大小不一、分散状的气孔,靠近铝合金焊缝处其气孔数量更多、尺寸更大。焊缝中心线附近的树脂熔融区距离等温面更近,温度更高并且高温区域停留时间更长,热分解程度更大,与文献[8]中提到塑料热分解规律的结果一致。

图6为不同焊接参数下磷酸阳极氧化铝合金-聚醚醚酮激光连接接头横截面。随着激光功率的增加或焊接速度降低,铝合金熔池深度明显增加,面积增大,界面处塑料熔融区域变大,气孔尺寸变大,数量变多。图7为表面未处理AI-PEEK激光连接接头横截面。同样存在弧形连接区域,但区域内未见气孔。这是由于在未处理的2195-PEEK界面,2195铝锂合金本身与PEEK表面能相差较大,熔融树脂对Al的润湿性不足,导致界面热阻增大,传递至树脂一侧的热量更少,界面处树脂温度更低,从而减少了树脂的热分解,避免了气孔的形成。同样由于2195铝合金、PEEK润湿性不足和化学性

质差异大,很难形成化学键合,此类接头更多为物理连接(范德华力、机械咬合),结合强度较低,容易失效。因此,在界面处存在明显间隙(图7

图7)



图4 铝合金(表面磷酸氧化)-聚醚醚酮激光连接试样  
Fig.4 Laser direct joints of PEEK to Al (surface phosphoric acid oxidation)

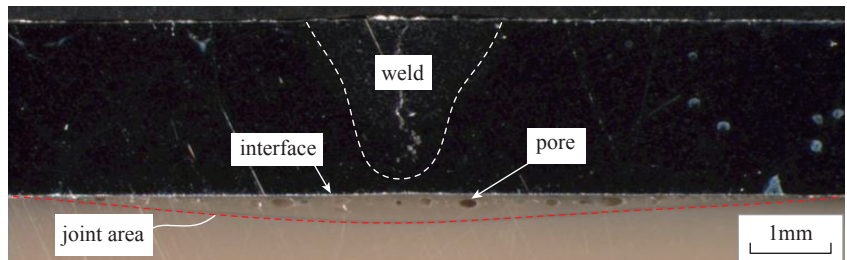


图5 典型铝合金-聚醚醚酮激光直接接头横截面  
Fig.5 Cross section of laser direct joints of PEEK and Al (surface phosphoric acid oxidation)

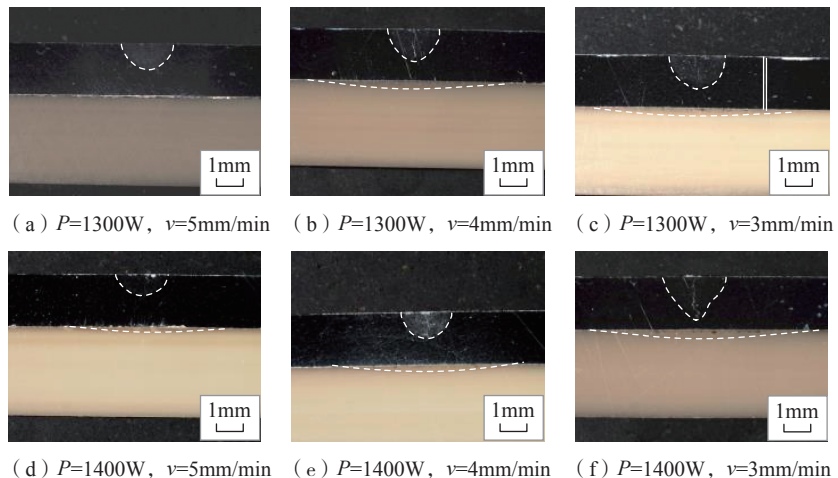


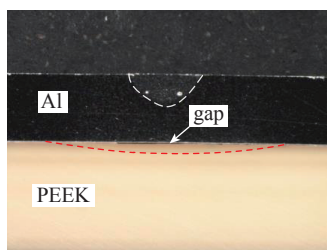
图6 不同参数条件磷酸阳极氧化AI-PEEK激光连接接头横截面  
Fig.6 Cross section of laser direct joints of PEEK and Al (surface phosphoric acid oxidation) under different parameters

(a)),甚至完全脱开(图7(b)),应为连接的强度不足,导致在制样过程中接头脱开。

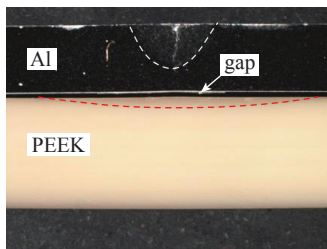
### 3 AI-PEEK 异质接头拉剪切破坏力

图8为不同参数条件下未脱开的试样的抗拉剪切破坏力情况。未处理的铝合金-聚醚醚酮接头的最大抗拉剪切破坏力为2825N(试样11)、2510N(试样15),均破坏于连接界面。破坏后的界面如图9所示,铝合金一侧可见粘连的塑料,塑料一侧可见近似高斯形的粘连区域。黏结区域宽度起焊处最小,随着焊接行进,粘连宽度迅速增大,然后保持相对稳定,在结尾处由于端面散热条件变差和热积累等情况,宽度有一定的增加。

磷酸阳极氧化处理的2195-PEEK接头试样编号21、25,抗拉剪切破坏力分别为3744N和3520N,失效于连接界面。破坏后的连接界面如图10(a)所示,铝合金表面仅在起头和结尾处有少量塑料粘连,连接区域轮廓呈高斯形,与未处理接头的连接区域形状一致。编号22、23、24、26试样断裂在塑料一侧,界面未失效,从断裂走向来看,近似高斯形状的一侧轮廓(图10(b)和(c))。因



(a) 试样11

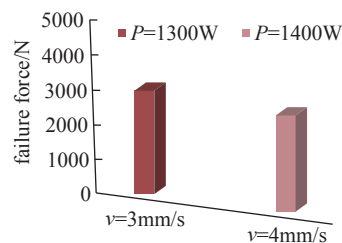


(b) 试样15

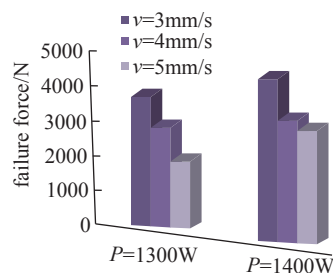
图7 表面未处理AI-PEEK连接接头横截面  
Fig.7 Cross section of laser direct joints of PEEK and Al (surface untreated)

此认为,拉剪破坏的位置接近连接区域的边缘。试样22、23、24、26接头抗拉剪破坏力差别较大,最大为4479N(试样24:1400W、3mm/min),最小为2100N(试样23:1300W、5mm/min),存在较大波动。若通过塑料母材的横截面积计算,抗拉强度为23.33~49.77MPa,远小于母材抗拉强度(115MPa)。

磷酸阳极氧化处理2195铝锂合金-聚醚醚酮接头抗拉剪切破坏力波动,一方面是由于焊接装配时塑料与铝合金的装配不平行;另一方面则可能是拉剪切破坏试验方法的局限性导致。若铝合金与聚醚醚酮焊接装配时存在一定的不平行度(图11),拉伸时施加的平行载荷,那么A点受力情况更为恶劣,导致提

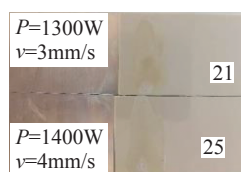


(a) 未处理铝合金-聚醚醚酮

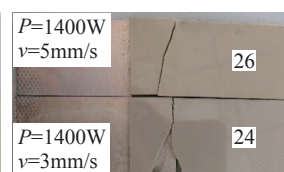


(b) 磷酸阳极氧化铝合金-聚醚醚酮

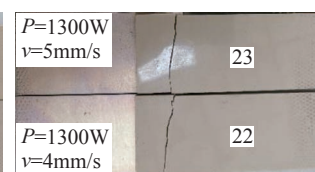
图8 不同参数条件下接头抗拉剪切破坏力  
Fig.8 Tensile shear force of joints under different parameters



(a) 试件编号21和25



(b) 试件编号24和26



(c) 试件编号22和23

图10 磷酸阳极氧化铝合金-聚醚醚酮接头破坏情况  
Fig.10 Joints of Al (surface phosphoric acid oxidation) and PEEK after tension test

前失效。复核了试样23、22,的确存在装配不平行问题,破坏力分别为2100N、2750N,低于其他试样。在试样焊接时平行度较好的情况下,连接界面有效连接强度较高时,接头的失效示意图如图12所示。接头连接区域边缘的A、B两点是应力集中点,但A点承力的基体为树脂材料,B点承力的基体为铝合金材料,由于树脂基体强度远低于铝合金基体,因此A点成了失效的高风险点。由于有效连接区域的存在限制了A点(有效连接区域的边缘)左侧的PEEK的变形,导致A点存在应力集中和弯曲载荷,因此失效时的载荷远远低于塑料母材抗拉强度。有效连接区域的轮廓因工艺参数的不同而不同,从而导致了塑料应力集中的情况不一致,因此接头抗拉剪切破坏力存在一定的波动。从失效的试样24、试样26断裂位置来看,失效的位置与有效连接区域的边缘基本吻合,基本呈高斯形状轮廓,从而证实了上述分析的准确性。

### 4 异质界面连接机理

图13为2195-PEEK激光连接接头横截面微观形貌与元素分析。

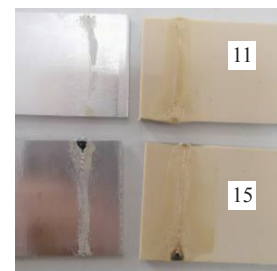


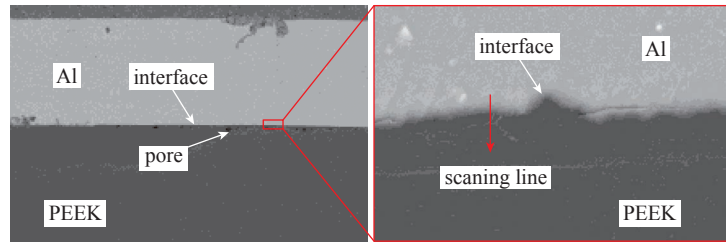
图9 破坏后的铝合金(表面未处理)-聚醚醚酮连接接头

Fig.9 Joints of Al (surface untreated) and PEEK after tension test

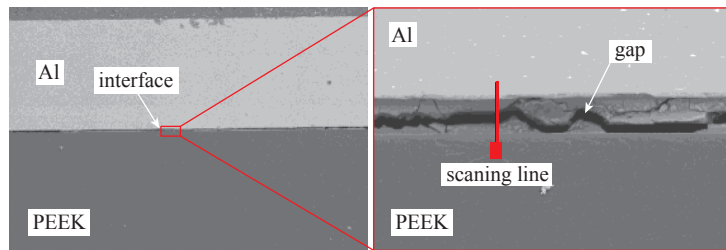
磷酸阳极氧化处理 2195-PEEK 接头界面间隙已经完全消除,连接界面处存在波浪形的过渡区,树脂与铝合金相互咬合。铝合金磷酸阳极氧化后表面呈凹凸不平的多孔结构,据有关研究表明表面磷酸阳极氧化处理可大幅降低表面能<sup>[22]</sup>,因此改善了熔融的 PEEK 树脂的润湿性。部分 PEEK 树脂进入了氧化膜的空隙内,从而形成界面相互“咬合”的效果。界面附近可见颜色渐变的过渡层,Al 和 C 元素浓度梯度变化,趋势正好相反(图 13 (c))。过渡区的厚度为 4 $\mu\text{m}$ ,与磷酸阳极氧化膜的厚度基本一致。过渡区内磷酸阳极氧化膜层与树脂形成了结合,Al 和 C 化学成分发生梯度变化。由于铝合金磷酸阳极氧化处理后,表面生成了极性的氧化物  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,极性的氧化物可以提高其在角接界面上与树脂的色散力和范德华力,同时可与聚合物中的极性团形成共价键<sup>[23]</sup>,因此推测本文中的 Al-PEEK 中形成类似“Al-O-PEEK”的共价键。同样,在已有文献中发现铝合金表面阳极氧化膜可与 PA6 形成“Al-O-PA6”化学键<sup>[17]</sup>。而表面未处理的 2195-PEEK 连接界面上存在锯齿状的间隙,Al、C 元素发生浓度有断层现象,未形成有效连接。一方面由于 2195 铝合金表面能高,熔融树脂在其表面无法良好润湿铺展;另一方面,树脂材料在热力作

用下,与 2195 铝合金表面互相贴合,两者之间存在范德华力、氢键的吸附

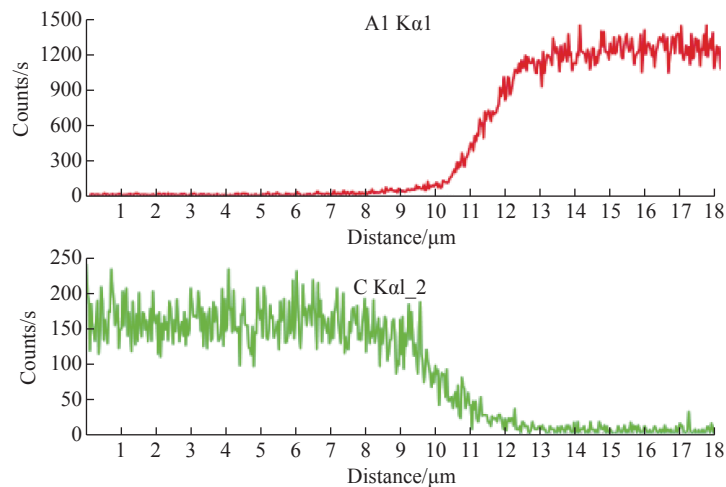
力,结合强度低,在后期磨抛试样时吸附界面失效,形成锯齿间隙。



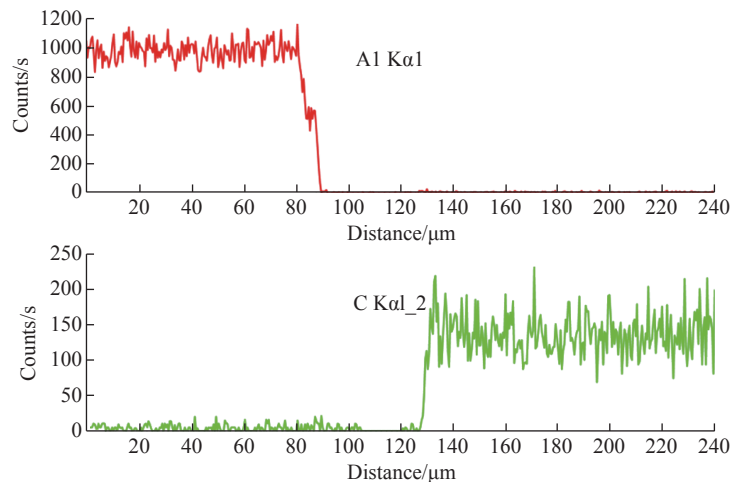
(a) 磷酸阳极氧化处理



(b) 表面未处理



(c) 磷酸阳极氧化处理元素分布



(d) 表面未处理元素分布

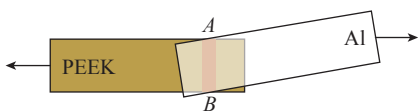


图 11 2195-PEEK 装配不平行的连接试样示意图

Fig.11 Schematic diagram of 2195-PEEK joints nonparallel assembled

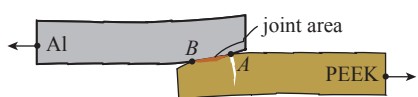


图 12 拉伸剪切失效示意图

Fig.12 Schematic diagram of tensile shear failure in 2195-PEEK joints

图 13 磷酸阳极氧化 Al-PEEK 连接界面微观形貌与元素分布  
Fig.13 Microstructure and element distribution of joints of Al-PEEK

## 结论

(1) 2195-PEEK 激光连接接头的树脂一侧形成弧形熔融区。磷酸阳极氧化处理的接头区域内可见大小不一、分散状气孔,中心位置气孔尺寸更大、更为密集,界面处未发现间隙。表面未处理 2195-PEEK 激光连接接头区域内未见气孔、界面处存在间隙。

(2) 磷酸阳极氧化处理 2195-PEEK 激光连接接头最大破坏力达到 4479N,抗拉剪破坏失效位置在塑料一侧。表面未处理 2195-PEEK 接头最大抗拉剪破坏力达到 2825N,失效于连接界面。铝合金表面磷酸阳极氧化处理可提高 2195-PEEK 激光连接接头强度至少 58% 以上。

(3) 不同参数条件下磷酸阳极氧化处理 2195-PEEK 激光连接接头抗拉剪破坏力存在波动性,与试样装配平行度以及连接接头应力集中有关。装配平行度较差时,可导致低应力下失效;在装配平行度良好的情况下,接头失效于连接区域边缘的 PEEK 基体一侧,与异质接头拉剪试验方法条件下低强度材料一侧应力集中有关。

(4) 磷酸阳极氧化处理 2195-PEEK 激光直接接头界面处存在约 4 $\mu\text{m}$  的过渡层,与磷酸阳极氧化膜厚度一致,推测过渡层存在 Al-O-PEEK 化学键,对提高接头的连接强度有重要作用。

## 参考文献

[1] AMANCIO-FILHO S T, DOS SANTOS J F. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2009, 49(8): 1461-1476.

[2] FINK A, CAMANHO P P, ANDRÉS J M, et al. Hybrid CFRP/titanium bolted joints: Performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor[J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(2): 305-317.

[3] JUNG K W, KAWAHITO Y, TAKAHASHI M, et al. Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 47: 179-188.

[4] 金峻峰. 金属/复合材料机械连接热

接触效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

JIN Junfeng. Study on thermal contact effect of metal/composite mechanical connection[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.

[5] 焦俊科, 王强, 管少平, 等. 碳纤热塑复合材料激光连接技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(19): 24-29.

JIAO Junke, WANG Qiang, ZAN Shaoping, et al. Research progress on CFRTP laser joining technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(19): 24-29.

[6] GHORBEL E, CASALINO G, ABED S. Laser diode transmission welding of polypropylene: Geometrical and microstructure characterisation of weld[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(7): 2745-2751.

[7] 黄磊, 陈希章, 郑怀忠. 304 不锈钢与 PET 激光焊接性能研究[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(S1): 121-124.

HUANG Lei, CHEN Xizhang, ZHENG Huaizhong. Laser welding performance of 304 stainless steel and PET[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(S1): 121-124.

[8] 夏佩云, 李颖, 张婧, 等. 聚酰胺-不锈钢激光透射焊接工艺特性[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 155-161.

XIA Peiyun, LI Ying, ZHANG Jing, et al. Characteristics of laser transmission welding polyamide-stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 155-161.

[9] BAUERNHUBER A, MARKOVITS T, TRIF L, et al. Adhesion of steel and PMMA by means of laser radiation[J]. *Materials Science Forum*, 2017, 885: 61-66.

[10] 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.

[11] JAESCHKE P, WIPPO V, SUTTMANN O, et al. Advanced laser welding of high-performance thermoplastic composites[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2): S29004.

[12] KATAYAMA S, KAWAHITO Y. Laser direct joining of metal and plastic[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(12): 1247-1250.

[13] MIYASHITA Y, TAKAHASHI M, TAKEMI M, et al. Dissimilar materials micro welding between stainless steel and plastics by using pulse YAG laser[J]. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2009, 3(2): 409-415.

[14] JUNG K W, KAWAHITO Y, TAKAHASHI M, et al. Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 47(9): 179-188.

[15] JUNG K W, KAWAHITO Y, TAKAHASHI M, et al. Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to aluminum alloy[J]. *Journal of Laser Applications*, 2013, 25(3): 530-533.

[16] 谭向虎, 单际国, 任家烈. 镀 Cr 层对低碳钢/CFRP 激光连接接头剪切强度及界面结合特征的影响[J]. *金属学报*, 2013, 49(6): 751-756.

TAN Xianghu, SHAN Jiguo, REN Jialie. Effects of Cr plating layer on shear strength and interface bonding characteristics of mild steel/cfrp joint by laser heating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(6): 751-756.

[17] RAUSCHENBERGER J, CENIGAONAINDIA A, KESEBERG J, et al. Laser hybrid joining of plastic and metal components for lightweight components[C]// SPIE LASE. Proc SPIE 9356, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications IV, San Francisco, 2015.

[18] ROESNER A, OLOWINSKY A, GILLNER A. Long term stability of laser joined plastic metal parts[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 169-171.

[19] ZHANG Z, SHAN J G, TAN X H, et al. Effect of anodizing pretreatment on laser joining CFRP to aluminum alloy A6061[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 70: 142-151.

[20] ATTWOOD T E, DAWSON P C, FREEMAN J L, et al. Synthesis and properties of polyaryletherketones[J]. *Polymer*, 1981, 22(8): 1096-1103.

[21] 张照. 碳纤维织物增强聚醚醚酮基(CFF/PEEK) 航空复合材料的制备及其界面改性[D]. 上海: 东华大学, 2017.

ZHANG Zhao. Preparations and interface modifications for carbon fiber fabrics reinforced polyetheretherketone (CFF/PEEK) aeronautical composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.

[22] OOSTING R. Towards a new durable and environmentally compliant adhesive bonding process for aluminium alloys[J]. *Material Protection*, 2014, 47(8): 59-61.

[23] 祝萌, 朱光明, 徐博. 磷酸阳极化工艺对铝合金胶接性能的影响[J]. *材料保护*, 2014, 47(8): 59-62, 8.

ZHU Meng, ZHU Guangming, XU Bo. Effect of phosphoric acid anodizing on adhesive bonding of aluminum alloys—A review[J]. *Materials Protection*, 2014, 47(8): 59-62, 8.

通讯作者: 王春明, 教授, 博士, 研究方向为激光加工技术。

(下转第 46 页)

## State-of-Art Review on Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding

CHEN Jian<sup>1,2,3</sup>, YAO Zhehe<sup>1,2,3</sup>, YAO Jianhua<sup>1,2,3</sup>, LIU Yan<sup>4</sup>

(1. Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310023, China;

3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

4. Maintenance Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China)

**[ABSTRACT]** Ultrasonic vibration-assisted laser cladding (ULC), based on the advantages of efficient surface modification and forming of laser cladding, applies ultrasonic energy field to overcome the defects caused by rapid solidification. ULC has become a research hotspot at home and abroad. The research shows that after the application of ultrasonic vibration, the grains of the laser cladding layer are refined and equiaxed grains are able to be formed. Meanwhile, the microcracks and porosity defects are significantly inhibited, and the hardness, wear resistance and oxidation resistance are improved. Combined with the research results of our group in the field of ULC and considering the characteristics of ultrasonic vibration, the research status of ULC technology at home and abroad is reviewed. The principle of ULC technology, the ultrasonic vibration device and ultrasonic applying mode in ULC technology, the microstructure characteristics and performance of ULC cladding layer are analyzed emphatically. Furthermore, the application of ULC technology is prospected.

**Keywords:** Laser cladding; Ultrasonic vibration; Cladding coating; Defects; Properties

(责编 阳光)

(上接第 35 页)

## Process Characteristics of Laser Direct Joining of PEEK to Aluminum Alloy

XIA Peiyun<sup>1,2</sup>, MENG Yao<sup>2</sup>, SHEN Haoran<sup>2</sup>, LÜ Hongya<sup>2</sup>, DIAO Lei<sup>2</sup>, FENG Xiaosong<sup>2</sup>,  
WANG Chunming<sup>1</sup>, YIN Yuhuan<sup>2</sup>

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

2. SASTIND Spacial Welding Technology Innovation Center, Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

**[ABSTRACT]** 2mm-thick aluminum alloy 2195 with phosphate anodizing pretreated and no pretreatment were joined to 3mm-thick PEEK (Poly ether-ether-ketone) by laser direct joining process, the differences of joint appearance, microstructure of interface and tensile shear force were analyzed under different process parameters. The results show that Al-PEEK dissimilar joint has an arc shaped melted zone in side of PEEK. Compared to Al-PEEK joints without pretreatment, there are dispersed pores with different size in melted zone but no visible gap at interface for anodized Al-PEEK dissimilar joints. Anodizing pretreatment could remarkably strengthen Al-PEEK dissimilar joints. The maximum tensile shear force could reached 4479N (PEEK with width of 30mm), when laser power at 1400W, welding speed at 3mm/s, while failure position is in PEEK with interface not separated. There is a transition layer between Al and PEEK about thickness of 4 $\mu$ m, the same with anodizing film. In this transition layer, it is speculated that chemical bonding of "Al-O-PEEK" may be formed, according to the variation trend of element Al and O concentration, which is the main reason for improving the joints strength.

**Keywords:** Laser direct joining; Hybrid joints; Tensile shear force; Phosphoric acid anodization; Chemical bond

(责编 阳光)