文章编号:1674-2974(2025)06-0088-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025179

飞秒激光焊接Al_2O_3陶瓷的裂纹特征与接头性能研究

陈聪[1,2†],吴宇凡[1,2]
(1. 湖南大学 整车先进设计制造技术全国重点实验室,湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:氧化铝陶瓷因卓越的介电特性和稳定的物理化学性质,在电子封装领域得到了广泛应用.然而,较大的焊缝裂纹倾向削弱了接头的性能,严重限制了陶瓷接头的应用.针对该问题,采用飞秒激光焊接氧化铝陶瓷,研究了激光束扫描轨迹、激光功率、扫描速度对焊缝裂纹特征与接头性能的影响规律,提出了基于裂纹平均宽度的焊缝等级分类方法.结果表明,相较于椭圆、螺旋线、垂直8字和水平8字,采用正弦扫描激光焊接氧化铝陶瓷能够获得更小的裂纹平均宽度和更高的剪切力.提升激光功率、降低扫描速度有助于减小裂纹的平均宽度,增加焊缝熔深,从而提高接头的剪切力.剪切力最大值可达1 980 N,大约是母材剪切力的61%.建立了基于焊缝裂纹平均宽度和熔深的接头剪切力预测模型,通过实验验证了模型的准确性,预测值与测量值最小偏差仅为0.45%.研究结果为陶瓷高性能焊接提供了技术指导和理论支撑.

关键词:陶瓷材料;激光束焊接;裂纹扩展;剪切应力;焊缝熔深
中图分类号:TG456.7 **文献标志码**:A

Research on Crack Characteristics and Joint Properties of Femtosecond Laser Welding Al_2O_3 Ceramics

CHEN Cong[1,2†], WU Yufan[1,2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Alumina ceramics are widely used in the field of electronic packaging because of their excellent dielectric properties and stable physical and chemical properties. However, the large crack tendency of its weld reduces the joint performance and greatly limits the application of ceramic joints. In this paper, a femtosecond laser is used to weld alumina ceramics. The effects of laser beam scanning trajectory, laser power, and scanning speed on weld crack characteristics and joint properties are studied. A classification method of weld grade based on average crack width is proposed. The results show that compared with ellipse, helix, vertical 8 characters, and horizontal 8 characters, sinusoidal scanning laser welding alumina ceramics can obtain smaller average crack width and higher

* **收稿日期**:2024-05-23
基金项目:整车先进设计制造技术全国重点实验室自主研究课题(72275008),Independent Research Project of State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle(72275008);湖南省自然科学基金面上项目(2024JJ5080), Natural Science Foundation of Hunan Province(2024JJ5080)
作者简介:陈聪(1990—),男,湖北潜江人,湖南大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail:chencong@hnu.edu.cn

shear force. Increasing the laser power and decreasing the scanning speed is beneficial to reduce the average crack width, increase the weld penetration, and then increase the shear force of the joint. The maximum shear force reaches 1980 N, which is about 61% of the base material shear force. A prediction model of joint shear force based on the average crack width and penetration depth of the weld is established, and the model's accuracy is proved by verification experiments. The minimum deviation between the predicted value and the measured value is only 0.45%. The research results provide technical guidance and theoretical support for high-performance welding of ceramics.

Key words: ceramics materials; laser beam welding; crack propagation; shear stress; weld penetration

陶瓷材料硬度极高，耐磨性好，高温下的化学稳定性好，适用于高温环境，同时，其良好的绝缘性能和低介电损耗特性让其在电子封装领域中具有巨大的应用潜力[1-4]. 特别是在超高速飞行器应用领域中，研究人员需要将特定的电路嵌入飞行器天线的外部，使得飞行器具有透波和隐身特性，这就要求陶瓷接头必须具有良好的耐高温性能、气密性以及稳定的机械和化学性能. 然而陶瓷的高熔点和硬脆性使其难以被加工，目前常用的焊接方式主要是钎焊和固相扩散焊等[5-8]，Lu 等[9]在 1 350 ℃的温度下钎焊 Al_2O_3 陶瓷 30 min，获得了剪切强度为 125.63±4.87 MPa 的焊接接头，Song 等[10]采用 Ni 作为中间层，在真空炉中以 1 000 ℃和 20 MPa 的外加载荷下保温 30 min 成功扩散连接 ZrC-SiC 复合材料. 上述焊接方式均需整体加热加压，工艺条件复杂，并且长时间的加热加压容易使内部电子元器件因温升过高而失效，同时，采用中间层连接的陶瓷接头容易随时间推移而氧化，存在使用寿命的局限性，此外，接头通常只能在 600 ℃以下环境中工作，无法充分发挥陶瓷的高温性能[11-13].

随着激光技术的迅猛发展，它已能够在常规环境下工作，柔性化程度高、能量密度大的激光焊接方式被应用到陶瓷焊接上，非接触式的焊接方式避免了机械应力的产生. 然而，高功率激光焊接时热冲击较大，直接焊接陶瓷易产生裂纹，在焊接时往往需要对陶瓷进行预热[14-15]，Riviere 和 Harris 等学者通过预热的方式得到了裂纹较少的陶瓷焊接接头[16-17]，尽管预热能有效改善裂纹的情况，但是这样也失去了激光焊接局部加热的优势. Zuo 等[18]采用高功率激光成功焊接了氧化铝陶瓷，并且通过有限元软件模拟得到了焊缝裂纹与应力之间的关系，成功获得无裂纹的陶瓷焊接接头，然而该研究并没有给出接头的强度，无法得知焊接接头的强度是否能够满足实际应用要求.

飞秒激光由于其极短的脉冲时间和极高的峰值功率，在陶瓷焊接领域得到了广泛的应用. 飞秒激光焊接陶瓷的原理为：将峰值功率极高的激光聚焦到母材表面来激发材料的非线性吸收，从而引发雪崩电离，通过电子与声子的耦合使焦点区域的温度升高来熔化母材，实现焊接[19-20]. 国外的 Penilla 等[21]已经采用飞秒激光在室温下焊接了 Al_2O_3 和 ZrO_2 陶瓷，国内哈尔滨工业大学的 Yuan 等[22]采用重复频率为 1 MHz、脉冲持续时间为 300 fs、波长为 1 035 nm 的红外超短脉冲激光实现了室温下 Al_2O_3 陶瓷的直接焊接，得到了最高强度为 266 MPa（约为基材的 60%）的焊接接头. 然而，超快激光焊接陶瓷仍然存在很多问题：焊缝裂纹与接头性能之间的关系尚不明确，超快激光与陶瓷材料的作用机理还有待研究.

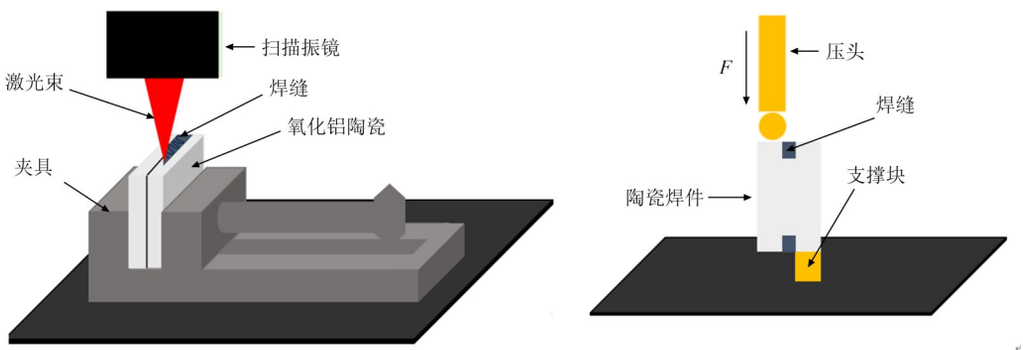
本文针对超高速飞行器陶瓷零件的焊接问题，研究了飞秒激光焊接氧化铝陶瓷的裂纹特征和接头性能，重点研究了扫描轨迹、激光功率和扫描速度对焊接接头裂纹特征及力学性能的影响，提出了基于裂纹平均宽度的焊缝等级分类方法. 由于陶瓷零件结构在使用过程中主要承受剪切力，因此，本文建立了基于裂纹平均宽度和熔深的焊缝剪切力预测模型，最后通过实验验证了模型的正确性. 研究结果为提高陶瓷焊缝力学性能提供了理论依据，对于后续研究有着重要的指导意义.

1　实 验

1.1　材料和方法

实验采用尺寸为 40 mm×30 mm×5 mm，纯度为 99% 的氧化铝陶瓷作为试样，其最大断裂载荷为 3 264 N. 实验在团队自行搭建的超快激光焊接平台

上进行,激光功率最大为87.4 W,激光波长为1 030 nm,重复频率为1 MHz,扫描速度最高可达2 000 mm/s.为了避免杂质污染,焊接前对试样进行打磨,然后用丙酮对表面进行清洗.焊接示意图如图1(a)所示,两片陶瓷通过夹具紧密夹持,确保焊接接缝处无间隙.激光束垂直于试样表面,利用振镜扫描技术进行精确移动,从而实现陶瓷的焊接.焊接后的样品通过万能材料试验机进行剪切试验,剪切测试如图1(b)所示,每次测试5个样品,去掉最大值和最小值之后取平均值计算剪切力.通过光学显微镜(ZEISS Smart Zoom 5)观测焊缝表面和切开后的截面,通过Image J软件测量裂纹面积和焊缝熔深.



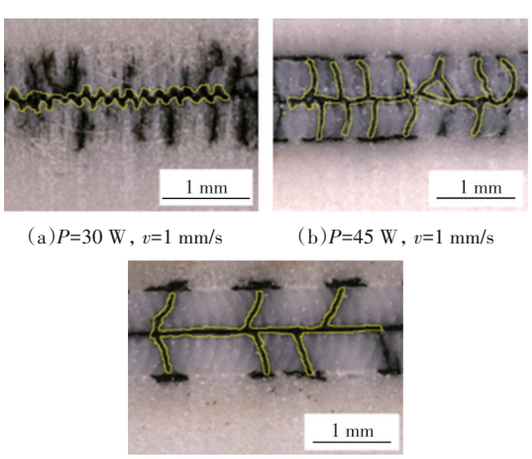
(a)焊接示意图 (b)剪切测试

图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1.2 分析方法

通过一系列实验得知,焊缝表面形貌对焊缝质量影响较大,图2表示在不同激光功率下的飞秒激光焊接氧化铝陶瓷得到的3种典型焊缝表面形貌,从图2(a)可以看出,当扫描速度为1 mm/s,激光功率为30 W时,热输入较低,裂纹宽度较大,母材没有很好地结合在一起,焊缝中心沿焊接方向出现了一条波浪式的裂纹.当激光功率升高至45 W时,裂纹数量增多,裂纹宽度减小,母材结合较好,表面出现呈犬牙交错式分布的裂纹;当激光功率升高至60 W时,焊缝表面变得光滑,裂纹数量减少,焊缝中心沿焊接方向出现了一条几乎连续的贯穿性裂纹.



(a)P=30 W, v=1 mm/s (b)P=45 W, v=1 mm/s

(c)P=60 W, v=1 mm/s

图2 典型焊缝表面形貌

Fig.2 Typical weld surface morphology

通过高倍显微镜拍摄焊缝表面形貌,均发现了裂纹的存在,裂纹作为缺陷的一种,严重影响焊接质量.本文通过大量实验发现,调整工艺参数以减少裂纹的平均宽度,可以显著提高焊接的强度.因此,本文选择将裂纹的平均宽度与焊缝的剪切性能联系起来,通过裂纹的平均宽度来评估焊缝的质量.裂纹平均宽度的测量方法如图3所示,在Image J软件中通过阈值分割的方法标记出裂纹所在区域,利用比例尺计算出裂纹长度L,把裂纹区域内的像素数量换算成面积S,然后用面积除以长度得到裂纹平均宽度$\bar{d}$,计算如下:

$$\bar{d} = S/L \tag{1}$$

众多实验结果表明,焊缝裂纹的平均宽度与焊缝性能之间存在强关联性.然而,在现行的国家标准中,尚未明确制定裂纹与焊缝质量的分类评级方法.为了更好地描述焊缝质量,本文采用裂纹平均宽度$\bar{d}$和焊缝剪切性能对焊缝等级进行分类,如表1所示.当焊缝裂纹平均宽度$\bar{d}$小于40 μm时,焊缝品质为Ⅰ级,质量最好;当焊缝裂纹平均宽度$\bar{d}$为40~70 μm时,焊缝品质为Ⅱ级;当焊缝裂纹平均宽度$\bar{d}$大于70 μm时,焊缝品质为Ⅲ级,质量最差.

2 结果与讨论

2.1 扫描轨迹对接头特性的影响

激光扫描有不同轨迹的扫描路径,如图4所示.

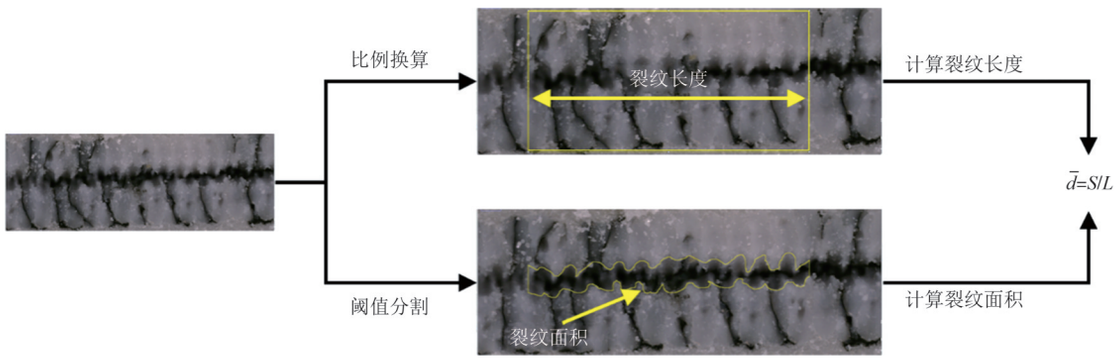
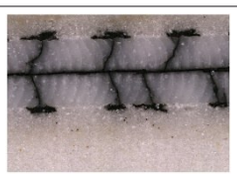


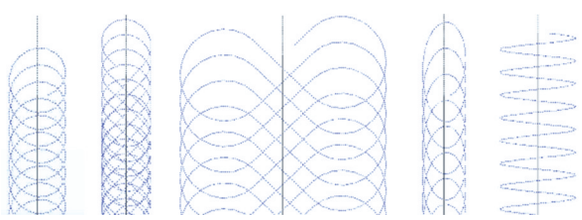
图 3　焊缝表面裂纹面积测量示意图

Fig.3　Schematic diagram for measuring the surface crack area of weld

表 1　焊缝等级分类

Tab.1　Classification of weld grade

等级	裂纹平均宽度 $\bar{d}$/μm	表面形貌	接头剪切性能 F/N
Ⅰ	$\bar{d}$<40		F≥500
Ⅱ	40≤$\bar{d}$≤70		300<F<500
Ⅲ	$\bar{d}$>70		F≤300



(a)螺旋线 (b)水平8字　(c)垂直8字　(d)椭圆　(e)正弦曲线

图 4　不同轨迹扫描路径图

Fig.4　Scanning path diagram of different trajectories

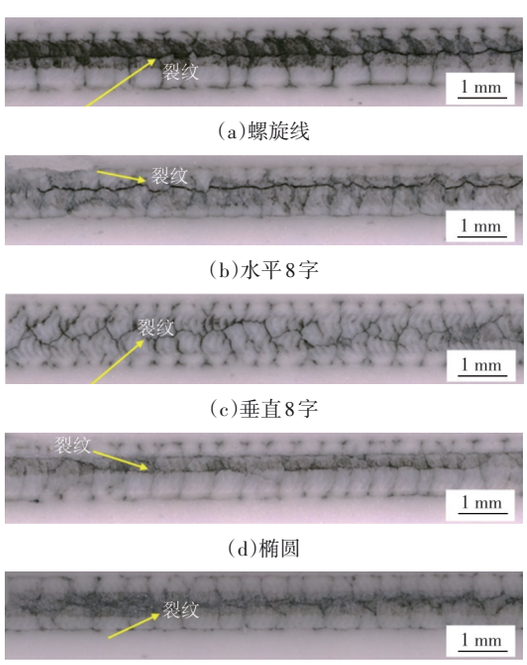


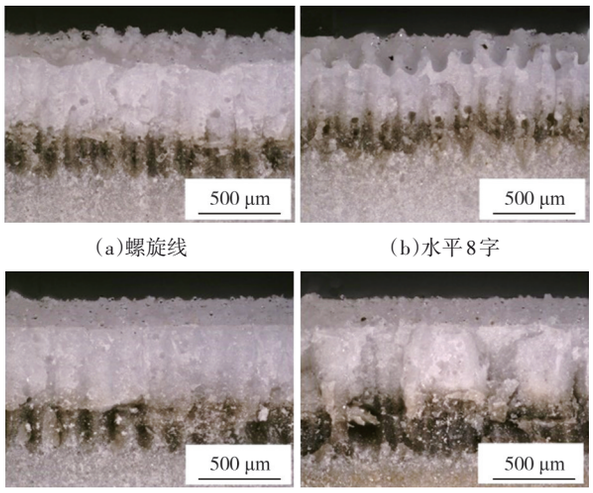
图 5　不同轨迹下焊缝表面形貌

Fig.5　Surface morphology of welds under different trajectories

不同扫描轨迹对应不同的能量分布.当激光功率为50 W,扫描速度为1 mm/s,采用不同的扫描轨迹焊接陶瓷时能得到不同的焊缝成型特征,如图5所示.当扫描轨迹为螺旋线或水平8字时,能量分布更加集中,热应力更大,焊缝中心出现明显的开裂现象.当扫描轨迹为椭圆或正弦曲线时,焊缝中心没有出现明显的开裂现象.

如图6(a)、6(b)所示,扫描轨迹为螺旋线和水平8字时在焊接时的熔池流动性较差,焊接后的焊缝表面凹凸不平.如图6(c)、6(d)所示,当扫描轨迹为椭圆和正弦曲线时,熔池流动性好,焊缝表面比较光滑,熔深一致性好.

图7为焊缝剪切力、焊缝熔深、裂纹平均宽度和扫描轨迹的对应关系.当只改变扫描轨迹时,其对于热输入的影响不大,焊缝熔深在0.7~1.0 mm范围内波动,熔深最浅为722.47 μm,最深为980.18 μm,其对应的扫描轨迹分别为水平8字和正弦曲线.通过对比可以发现,当扫描轨迹为正弦曲线时,熔池的流动性最好,焊缝裂纹平均宽度最小(16.56 μm),焊缝熔深最深(980.18 μm),对应的焊缝剪切力最大



(a)螺旋线 (b)水平8字

(c)椭圆 (d)正弦曲线

图6 不同轨迹下焊缝侧面形貌

Fig.6 Profile morphology of weld under different trajectories

(1 587.2 N),因此,后续研究采用正弦曲线作为焊接的扫描轨迹.

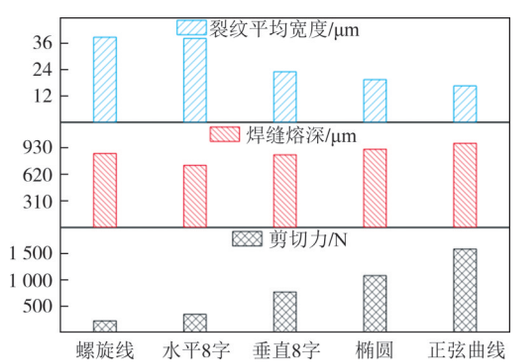


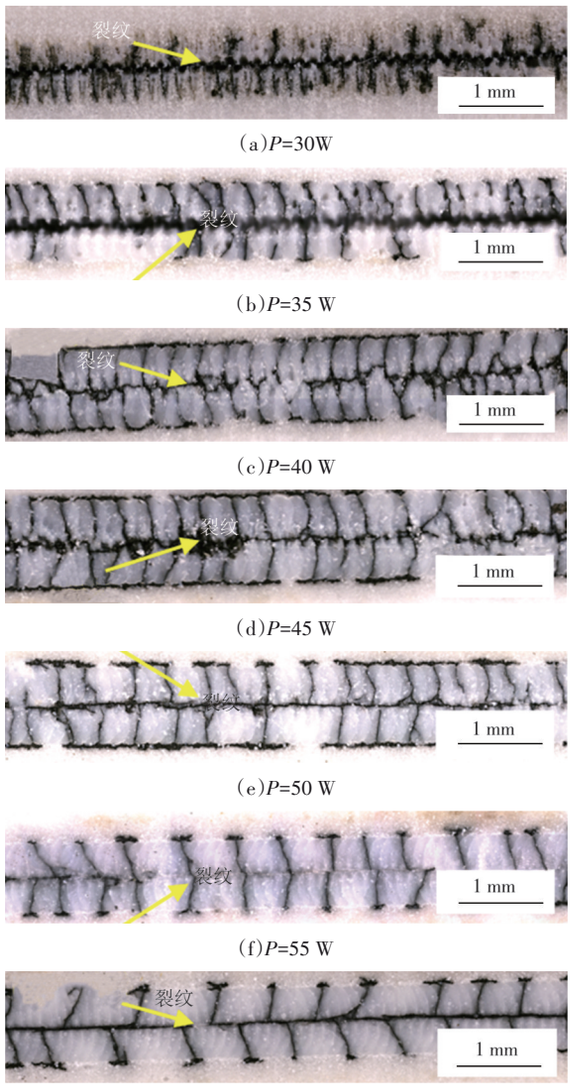
图7 裂纹平均宽度、焊缝熔深、剪切力与扫描轨迹的关系

Fig.7 Relationship between average crack width, weld penetration, shear force and scanning trajectory

2.2 激光功率对接头特性的影响

如图8所示,当扫描速度为1 mm/s,扫描轨迹为正弦曲线,激光功率分别为30 W、35 W、40 W、45 W、50 W、55 W、60 W进行焊接时,陶瓷激光焊缝表面存在大量垂直于焊接方向的横向裂纹和沿着焊接方向的焊缝中心线裂纹.随着激光功率的增大,热输入升高,熔池流动性增强,焊缝表面中心线裂纹呈减弱的趋势,横向裂纹数量减少.如图9所示,焊缝截面熔合区存在明显的重熔现象,当激光功率较低时,加工影响区域较小,内部结合不均匀,焊缝表面非常粗糙,当激光功率增大时,焊缝截面熔合区深度增大,焊缝内部成型更加均匀.

图10为焊缝剪切力、焊缝熔深、裂纹平均宽度和激光功率的对应关系.如图10(a)所示,当激光功



(a)P=30W

(b)P=35 W

(c)P=40 W

(d)P=45 W

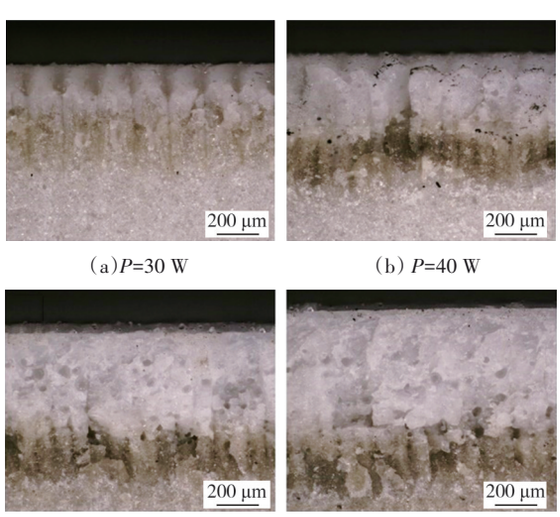
(e)P=50 W

(f)P=55 W

(g)P=60 W

图8 不同激光功率下焊缝表面形貌

Fig.8 Surface morphology of weld under different laser power



(a)P=30 W (b) P=40 W

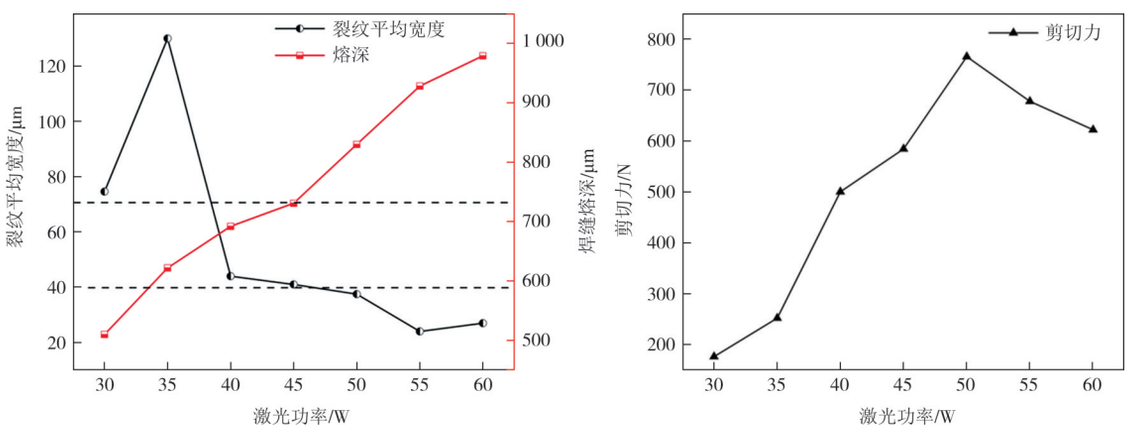
(c) P=50 W (d) P=60 W

图9 焊缝典型侧面形貌

Fig.9 Typical profile morphology of weld

率从 30 W 增大到 60 W 时，焊缝熔深从 510 μm 逐渐增大到 979 μm，裂纹平均宽度呈先增加后减小的趋势，当激光功率增大到 45 W 之后，裂纹平均宽度小于 40 μm，焊缝品质达到 Ⅰ 级．如图 10(a)、10(b)所示，随着激光功率增大，焊缝剪切力整体呈先增大后减小的趋势，当激光功率达到 50 W 时，焊缝熔深为 830 μm，焊缝裂纹平均宽度为 37.5 μm，焊缝剪切力达到最大值，约 766 N．

综上所述，增大激光功率不能持续提高焊缝的力学性能，当激光功率在 50 W~60 W 范围内时，焊缝裂纹平均宽度较低，剪切性能较好，为 Ⅰ 级焊缝，当激光功率达到 50 W 时具有最优焊缝质量．



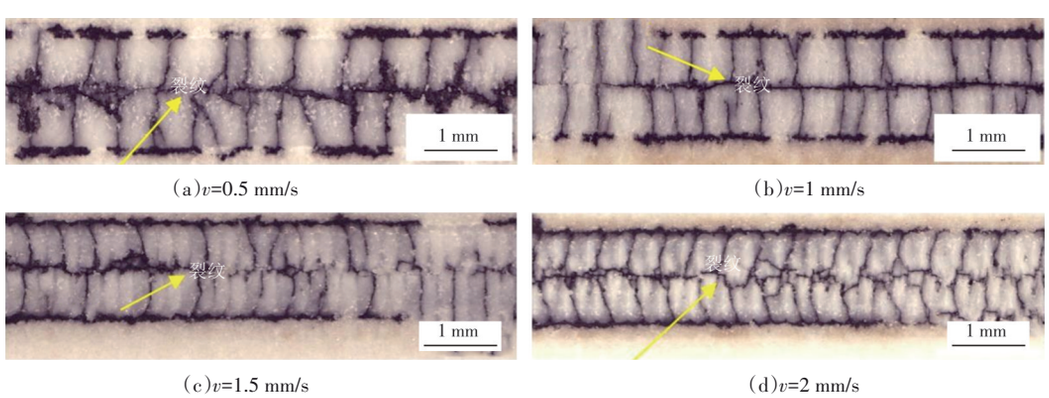
(a)裂纹平均宽度、熔深与激光功率的关系　　(b)剪切力与激光功率的关系

图 10　焊缝熔深、裂纹平均宽度、剪切力与激光功率的关系

Fig. 10　Relationship between weld penetration, average crack width, shear force and laser power

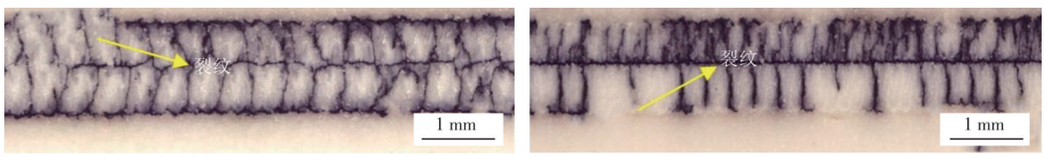
2.3　扫描速度对接头特性的影响

图 11 和图 12 分别展示了激光功率为 50 W，扫描轨迹为正弦曲线，扫描速度在 0.5~3 mm/s 范围内变化时焊缝表面形貌和焊缝侧面形貌．图 13 为焊缝熔深、裂纹平均宽度、剪切力与扫描速度的关系．图 11 中焊缝中心均出现了明显的开裂现象，表面成型特征变化不明显．当扫描速度为 0.5 mm/s 时，如图 12(a)所示，由于功率保持恒定，不会引起过高的热应力．增加的热输入延长了熔池的存续时间，从而提升了熔池的流动性．这不仅能够有效补充焊接过程中材料的去除和熔池形变，还有助于焊接区域内部气泡的排出，使得焊缝结合得更加均匀紧密．当扫描速度增大到 1 mm/s 和 1.5 mm/s 时，如图 12(b)、12(c)所示，熔池冷却加快，热输入降低，焊缝熔深随着速度增大而降低，焊接过程中产生的气泡因熔池凝固速度的提高而来不及逸散导致焊缝内部气孔增多．当速度继续增大到 2 mm/s 时，如图 12(d)所示，焊缝表面开始出现加工不均匀的现象，加工区域底部产生的大量气泡来不及逸散就冷却形成了气孔．当速度提高至 2.5 mm/s 和 3 mm/s 时，如图 12(e)、图 12(f)以及图 13 所示，焊缝熔深均小于 600 μm，加工影响区域逐渐减小，焊缝剪切力降低至 300N 以下，焊缝等级为 Ⅲ 级．如图 13 所示，当扫描速度从 0.5 mm/s 增大到 3 mm/s 时，焊缝裂纹平均宽度从 16.5 μm 增加到 96.2 μm，焊缝熔深从 1 016 μm 减小到 530 μm，焊缝剪切力从 1 980 N 降低到 109 N，最大剪切力约为母材的 61%．结果表明，降低扫描速度能通过增加热输入来影响焊缝熔深、裂纹平均宽度和剪切力，有利于改善焊缝性能．



(a)v=0.5 mm/s　　(b)v=1 mm/s

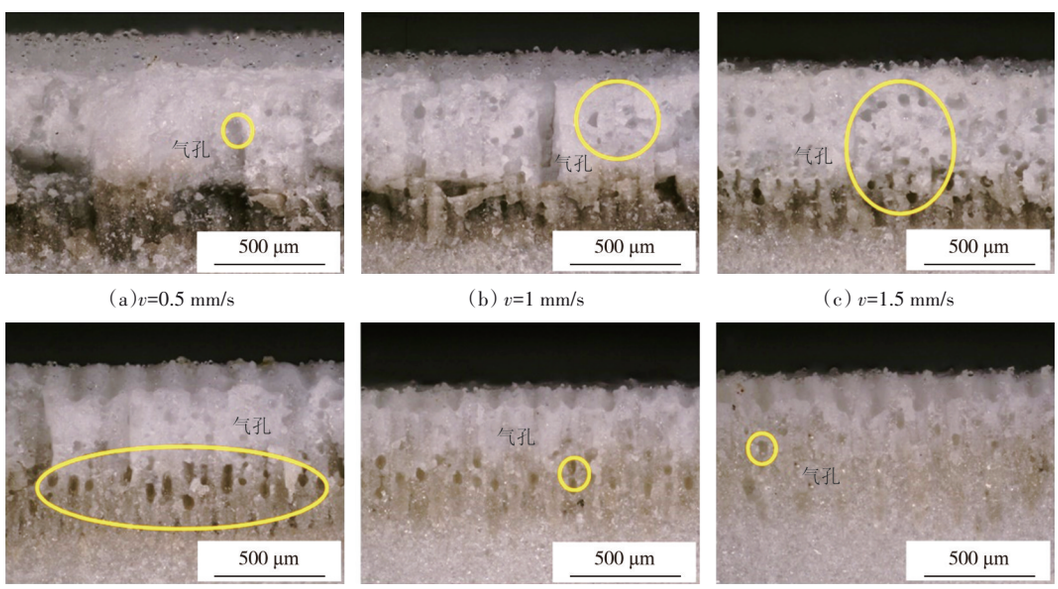
(c)v=1.5 mm/s　　(d)v=2 mm/s



(e)v=2.5 mm/s (f)v=3 mm/s

图 11 不同速度下焊缝表面形貌

Fig.11 Surface morphology of weld at different speeds

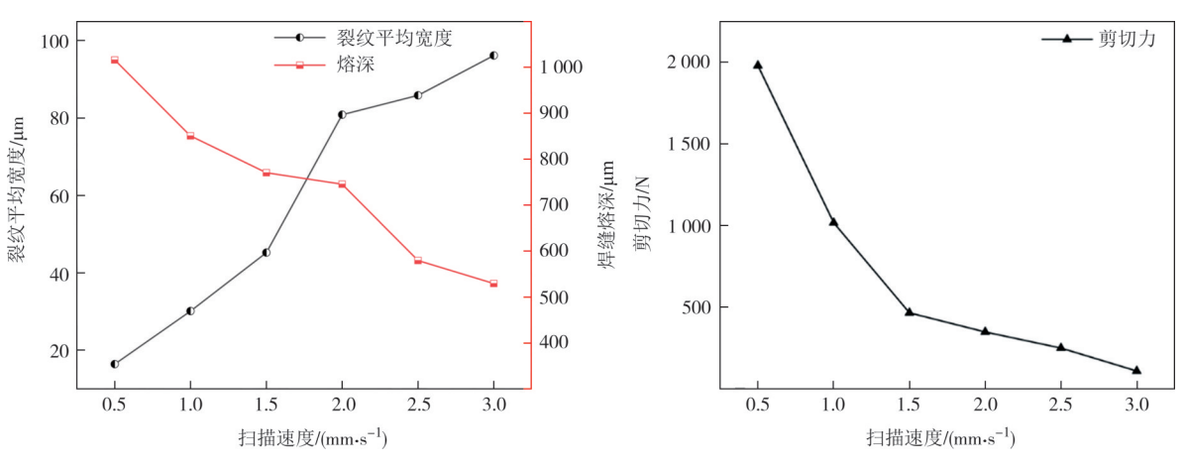


(a)v=0.5 mm/s (b) v=1 mm/s (c) v=1.5 mm/s

(d) v=2 mm/s (e) v=2.5 mm/s (f) v=3 mm/s

图 12 不同速度下焊缝侧面形貌

Fig.12 Profile morphology of weld at different speeds



(a)裂纹平均宽度、熔深与扫描速度的关系 (b)剪切力与扫描速度的关系

图 13 焊缝熔深、裂纹平均宽度、剪切力与扫描速度的关系

Fig.13 Relationship between weld penetration, average crack width, shear force and scanning speed

2.4 裂纹平均宽度、焊缝熔深与剪切力的关系

根据上述实验结果可以发现,裂纹平均宽度和焊缝熔深与剪切力存在明显的对应关系.随着裂纹平均宽度减小和焊缝熔深增加,焊缝剪切力逐渐增大,当激光功率达到50 W时,焊缝剪切力达到最大值.选取激光功率小于50 W时的实验结果,建立如图14所示的关联关系.拟合所用到的实验数据如表2所示,裂纹平均宽度最小为20.7 μm,最大为270.2 μm,焊缝熔深最浅为510 μm,最深达1 016 μm.

通过对实验数据的拟合得出的模型如图14所示,方程为

$$z = z_0 + ax + by + cx^2 + dy^2 \tag{2}$$

表 2　拟合实验数据

Tab. 2　Fitting experimental data

试样编号	裂纹平均宽度/μm	焊缝熔深/μm	剪切力/N
1	20.7	1 016	1 980.0
2	30.2	851	1 017.2
3	45.3	771	465.1
4	80.9	746	348.3
5	85.9	580	249.5
6	96.2	530	108.9
7	171.8	510	176.4
8	270.2	622	252.1
9	44.0	692	500.2
10	41.0	731	584.3
11	37.5	830	765.6

$$z_0 = 4\,380.755\,9 \pm 958.233\,9$$

$$a = -8.842\,7 \pm 3.473\,94$$

$$b = -11.609\,12 \pm 2.040\,46$$

$$c = 0.026\,21 \pm 0.010\,38$$

$$d = 0.009\,26 \pm 0.001\,22$$

式中：z 为剪切力，单位为 N；x 为裂纹平均宽度，单位为 μm；y 为焊缝熔深，单位为 μm.

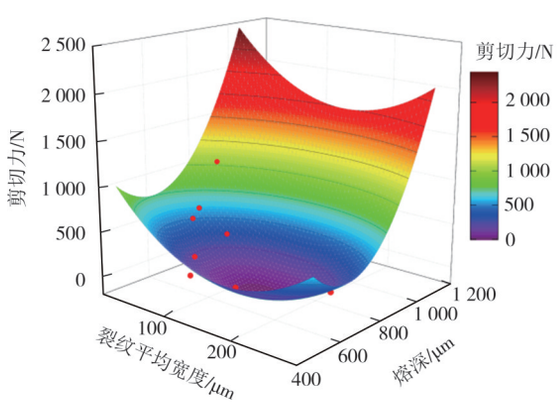


图 14　拟合方程模型

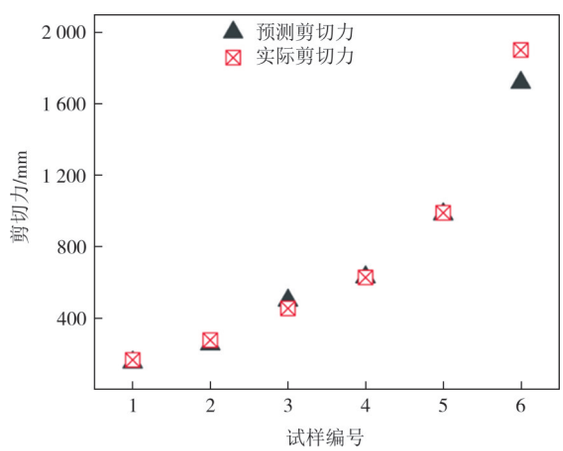
Fig. 14　Fitting equation model

为了验证拟合模型的准确性，采用如表 3 所示的焊接参数进行焊接试验. 由表 3 可知，不同焊接参数对应的裂纹平均宽度和焊缝熔深均不相同，把测得的裂纹平均宽度和焊缝熔深代入方程计算得出相应的剪切力，结果如图 15(a)所示. 将计算得出的剪切力减去实际测得的剪切力再除以实际剪切力得到剪切力的相对误差，结果如图 15(b)所示. 剪切力相对误差分别是 −8.04%、−8.05%、9.81%、0.45%、−0.78%、−9.56%，均在±10% 以内，这说明本文所提出的飞秒激光焊接氧化铝陶瓷剪切力拟合方程模型较为准确.

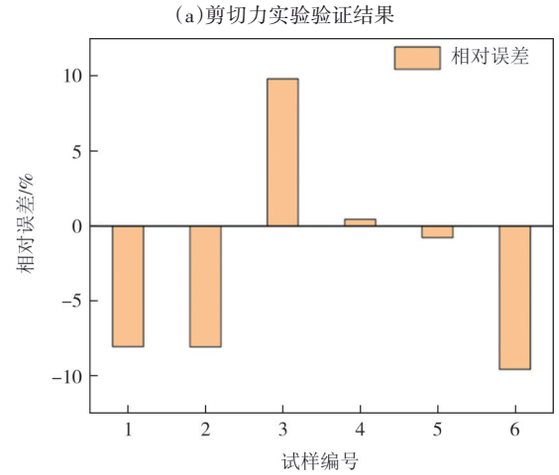
表 3　焊接模型验证参数

Tab. 3　Verification parameters of welding model

试样编号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s^{-1})	裂纹平均宽度/μm	焊缝熔深/μm
1	30	1	130	514
2	35	1	74.6	573
3	40	1	30.2	638
4	45	1	26.4	733
5	50	1	20.2	837
6	50	0.5	15.6	973



(a)剪切力实验验证结果



(b)误差范围

图 15　剪切力测试结果和误差范围

Fig.15　Shear force test results and error range

3　结 论

本文成功实现了在室温环境下对氧化铝陶瓷的直接焊接，并研究了激光扫描轨迹、激光功率、焊接速度对焊缝裂纹特征及接头性能的影响规律，主要结论如下：

1) 提出了基于裂纹平均宽度的焊缝质量等级分类方法. 当裂纹平均宽度小于 40 μm 时，焊缝接

头性能最优,当裂纹平均宽度大于70 μm时,焊缝接头性能最差.

2)与椭圆、螺旋线、水平8字、垂直8字扫描路径相比,在相同激光焊接参量条件下,采用正弦曲线扫描激光焊接氧化铝陶瓷得到的焊缝表面成型更美观、熔深一致性好、表面裂纹平均宽度小、接头剪切力高.

3)随着激光功率增大,裂纹平均宽度呈先增大后减小的趋势,焊缝熔深逐渐增大,接头剪切力呈先增大后减小的趋势.随着焊接扫描速度增加,裂纹平均宽度逐渐增大,焊缝熔深逐渐减小,接头剪切力呈减小的趋势.当裂纹平均宽度为16.5 μm,熔深为1 016 μm时,接头剪切力最大,为1 980 N,达到母材的61%.

4)建立了基于焊缝裂纹平均宽度和熔深的接头剪切力预测模型,剪切力与熔深正相关,与裂纹平均宽度负相关;通过验证实验证明了模型的准确率,预测值与测量值最小偏差仅为0.45%.

参考文献

[1] RUNG S, HÄCKER N, HELLMANN R. Micromachining of alumina using a high-power ultrashort-pulsed laser[J]. Materials, 2022, 15(15): 5328.

[2] ZHANG Y, CHEN Y K, YU D S, et al. A review paper on effect of the welding process of ceramics and metals [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 16214-16236.

[3] YI R X, CHEN C, LI Y X, et al. Brazing of SiO_2 ceramic[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(7): 1799-1816.

[4] 郭力, 邓喻, 霍可可. 氧化铝陶瓷磨削金刚石砂轮磨损的声发射监测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 34-40.
GUO L, DENG Y, HUO K K. Acoustic emission monitoring of diamond wheel wear with grinding alumina ceramics grinding[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(4): 34-40.(in Chinese)

[5] TIAN W B, SUN Z M, ZHANG P, et al. Brazing of silicon carbide ceramics with Ni-Si-Ti powder mixtures [J]. Journal of the Australian Ceramic Society, 2017, 53(2): 511-516.

[6] 徐晓卫, 李宁, 刘自豪, 等. 碳化硅陶瓷连接技术研究现状[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 10-19.
XU X W, LI N, LIU Z H, et al. Research Status of Joining Technology for SiC Ceramic[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(8): 10-19.(in Chinese)

[7] GUO W, LIN T S, HE P, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of $ZnAl_2O_4$-reinforced Al_2O_3/Al_2O_3 joints brazed with a bismuth borate zinc glass[J]. Materials & Design, 2017, 119: 303-310.

[8] PAN R, LIN T S, HE P, et al. Design of the multiple transition metals interlayer process to diffusion bond ZrCx ceramics [J]. Materials & Design, 2018, 137: 47-55.

[9] LU Y, ZHU M X, ZHANG Q, et al. Microstructure evolution and bonding strength of the Al_2O_3/Al_2O_3 interface brazed via Ni-Ti intermetallic phases[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(4): 1496-1504.

[10] SONG C B, LIN T S, HE P, et al. Microstructure evolution and its effect on the mechanical properties of the ZrC-SiC composite joint diffusion bonded with pure Ni foil [J]. Ceramics International, 2014, 40(1): 17-23.

[11] 李家科, 刘磊, 刘欣. 22Ti-78Si高温共晶钎料对SiC陶瓷的钎焊连接[J]. 无机材料学报, 2011, 26(12): 1314-1318.
LI J K, LIU L, LIU X. Joining of SiC ceramic by 22Ti-78Si high-temperature eutectic brazing alloy [J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(12): 1314-1318.(in Chinese)

[12] FEDOTOV S, LIPATEVA T, LIPATIEV A, et al. Local and high-strength joining of transparent glass and glass-ceramics by femtosecond Bessel beam [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106(12): 7411-7418.

[13] YIN X N, ZHANG Y, CHEN C. Effect of process parameters on surface formation in laser welding of Al_2O_3 ceramic[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 169: 110199.

[14] LI X P, FENG J, FAN J K, et al. Parametric investigation of femtosecond laser welding on alumina using Taguchi technique [J]. Optik, 2021, 225: 165891.

[15] 张屹, 梁志超, 张哲豪, 等. B340LA变厚截面板变功率激光焊接试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(2): 51-57.
ZHANG Y, LIANG Z C, ZHANG Z H, et al. Experimental research on variable power laser welding of the B340LA tailor rolled banks[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(2): 51-57.(in Chinese)

[16] RIVIERE C, ROBIN M, FANTOZZI G. Comparison between two techniques in laser welding of ceramics [J]. Le Journal de Physique IV, 4(C4): C4-135-C4-138.

[17] HARRIS J, AKARAPU R, SEGALL A E. Welding of alumina using a pulsed dual-beam CO_2 laser[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133(1): 011001.

[18] ZUO Q Q, ZHANG Y, LI P, et al. Effect of process parameters on crack characteristics in laser welding of Al_2O_3 ceramic [J]. Ceramics International, 2023, 49(20): 32440-32447.

[19] 丁腾, 王雪辉, 王关德, 等. 高重频飞秒激光焊接石英玻璃[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0701007.
DING T, WANG X H, WANG G D, et al. Welding of fused silica by using high repetition frequency femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0701007.(in Chinese)

[20] 孙轲, 孙盛芝, 邱建荣. 超短脉冲激光焊接非金属材料研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111422.
SUN K, SUN S Z, QIU J R. Research progress on ultrashort pulsed laser welding of non-metallic materials [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111422.(in Chinese)

[21] PENILLA E H, DEVIA-CRUZ L F, WIEG A T, et al. Ultrafast laser welding of ceramics [J]. Science, 2019, 365 (6455): 803-808.

[22] YUAN H, LI C, YANG B, et al. Direct welding of diffuse alumina ceramics by ultrashort pulse laser [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(1): 574-578.