

# 超声振动辅助 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接组织及力学性能

朱宗涛, 祝全超, 李远星, 陈辉

(西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 文中针对铝合金激光-MIG 复合深熔焊过程易出现气孔缺陷问题, 设计了超声振动辅助的焊接方法。通过对堆焊试样的 X 射线探伤和截面的宏观金相观察, 对比了超声振动对气孔的数量、大小以及分布位置的影响。同时研究了超声振动作用对 A7N01 铝合金激光-MIG 复合熔覆层的成形、组织及力学性能的影响。结果表明, 在超声振动作用下, 激光-MIG 复合堆焊熔覆层气孔的数量明显减少, 小尺寸气孔发生聚集并有上浮趋势; 熔合线附近的柱状晶组织宽度明显小于无超声辅助的熔覆层; 超声振动辅助激光-MIG 复合焊接接头各区的冲击吸收功和抗拉强度都有一定程度的提高, 具有一定的应用优势。

**关键词:** 铝合金; 激光-MIG 复合焊; 超声; 气孔

中图分类号: TG 456.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)06-0080-05

## 0 序言

激光-MIG 复合焊接技术是一种高效的铝合金焊接方法<sup>[1,2]</sup>, 与单一 MIG 电弧热源焊接相比, 它具有激光焊熔深深、热影响区窄、变形和残余应力小、效率高等优点, 并且接头性能优于 MIG 焊接接头<sup>[3]</sup>; 而与单一激光热源焊接相比, 由于 MIG 电弧的引入, 不仅有助于提高高反材料对激光的吸收率, 还可以提高对接头的桥接能力, 大大降低对焊接工装、定位的要求, 此外还有助于减缓熔池凝固时间, 便于气体的溢出, 减少气孔、裂纹等焊接缺陷。

但综合文献报道发现, 气孔缺陷(或缺欠)仍然是铝合金激光-MIG 复合焊接过程难以解决的主要问题<sup>[5,6]</sup>, 尤其是高效深熔焊接过程中, 激光功率大、熔深深, 而熔池金属凝固较快, 气体来不及溢出, 最后很容易在焊缝中形成气孔<sup>[7]</sup>, 降低铝合金焊接接头的强度, 特别是动载条件下的疲劳强度。

超声的破除氧化膜、细化晶粒作用在焊接过程中已有应用(如钎焊<sup>[8]</sup>、TIG/MIG 焊<sup>[9]</sup>、激光焊<sup>[10]</sup>), 但超声去除气孔的作用在焊接领域中一直未受到关注, 而在铸造领域已有研究<sup>[11]</sup>。液态金属在超声波的“湍动效益”和“微扰效益”下, 强化了液体传质过程, 气泡在超声场的作用下易于聚集变大,

最终浮出液体表面。Xu 等人<sup>[12]</sup>利用超声振动的方法有效地去除了液态 A356 铝合金中的气孔, 并且发现液态金属量越少, 超声对气孔的去除率越高(这一特点特别适合焊接熔池), 国内也有一些学者研究了超声功率和时间对除气效果的影响<sup>[13,14]</sup>。

文中选用高速列车车体常用 A7N01 铝合金材料, 通过在激光-MIG 复合焊接过程中在试板上施加超声振动, 对比了超声振动辅助作用对堆焊层的成形、气孔及熔覆层组织的影响, 并研究超声振动辅助对激光-MIG 复合焊接接头冲击和拉伸性能的影响规律。

## 1 试验方法

试验材料为 A7N01P-T4 铝合金板材, 堆焊试样尺寸为 300 mm × 150 mm × 10 mm; 对接接头试样尺寸为 300 mm × 150 mm × 6 mm, 采用 Y 形 40° 坡口, 留有 3 mm 钝边, 焊丝为直径 φ1.6 mm 的 ER5356。母材和焊丝的合金成分如表 1 所示。

激光-MIG 复合焊接系统中的激光器为 IPG YLS-4000 光纤激光器, 焊机采用 KEMMPI KempArc-450 一元化数字焊机。旁轴式复合焊枪由 IRB 2600 机器人装卡, 人工示教进行自动焊接。超声振动采用 Hy2050 型超声振动冲击设备施加在试板上表面中间距离一侧边缘 50 mm 处, 振动频率为 19.1 kHz, 最大振幅为 50 μm。复合方式为激光在前引导

电弧,光丝间距为3 mm,保护气体为99.999%的氩气。图1为超声振动辅助激光-MIG复合焊接过程示意图。为了避免直接采用对接接头完成熔透焊接时无法观察到熔深变化和引入背面保护对气孔影响的因素,在研究超声振动辅助对焊缝成形和气孔影响

规律时,用10 mm铝合金板进行堆焊试验,研究超声振动对接头力学性能的影响规律时采用6 mm铝合金对接接头焊接试验。堆焊和对接接头主要焊接试验参数见表2。

焊后用XXQ2505D-XK3.2型X射线探伤设备

表1 母材和焊丝的合金成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of A7N01P-T4 and filler metal

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
A7N01	≤0.30	≤0.35	≤0.20	0.20~0.70	1.0~2.0	≤0.30	4.0~5.0	余量
ER5356	≤0.25	≤0.10	≤0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	≤0.10	余量

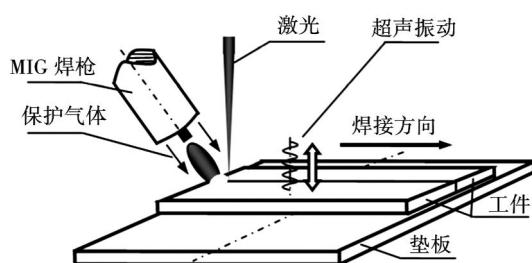


图1 超声振动辅助激光-MIG复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic of Laser-MIG hybrid welding assisted by ultrasonic vibration

对堆焊层内部缺陷情况进行探伤,并对堆焊和对接接头试样取样进行金相观察、组织及力学性能分析,用Carl Zeiss-A1M显微镜观察各区域的金相组织;采用JBN-300摆锤式冲击试验机测试接头各区的冲击吸收功,长条形试样尺寸为55 mm×10 mm×5 mm,表面去除余高并经过打磨处理,2 mm深“V”形缺口分别开在焊缝中心、热影响区和母材区域,缺口圆角半径0.25 mm;使用CMT4304电子万能试验机测试接头抗拉强度,测试方法参照国家标准GB/T2651-2008;通过JSM-6610 LV扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌。

表2 A7N01P-T4铝合金焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters of A7N01P-T4 alloy

编号	超声电流 $I_u$ /A	激光功率 $P_L$ /kW	焊接速度 $v_w$ /(m·min <sup>-1</sup> )	焊接电流 $I_a$ /A	电弧电压 $U_a$ /V	保护气体流量 $Q$ /(L·min <sup>-1</sup> )	
堆焊	1	0	3.5	0.48	211	22.7	25
	2	2.7	3.5	0.48	212	22.3	25
对接	3	0	2.5	0.96	249	23.9	40
	4	2.2	2.5	0.96	249	23.9	40

壁对激光的吸收,导致焊后熔深减小。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 外观成形

从外观成形上看,无超声振动辅助堆焊金属表面有一定的鱼鳞纹特征,而施加超声振动辅助后,液态金属的流动性和在母材表面的润湿铺展能力增强,堆焊后的熔覆金属表面较光滑(图2)。对堆焊熔覆层的截面进行观察并测量截面尺寸(表3),从表3中数据可以发现,有超声振动辅助激光-MIG复合焊堆焊层的熔宽和熔深都比无超声辅助时的小,并且深宽比也小。这可能是由于激光-MIG复合焊接过程中的“匙孔”在超声振动的作用下,易被熔池中的液态金属填充,从而一定程度上影响了“匙孔”

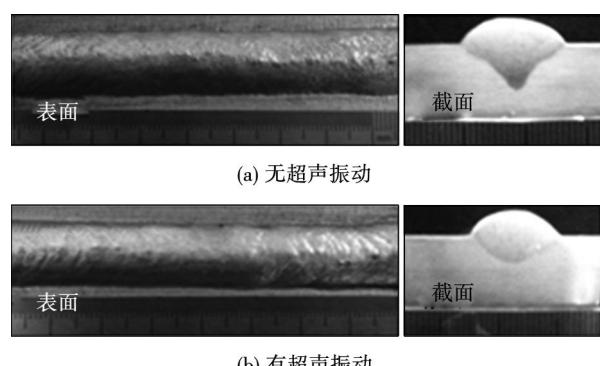


图2 激光-MIG复合堆焊熔覆层成形对比  
Fig. 2 Comparison of specimens built up by laser-MIG hybrid welding

表3 试样截面形状尺寸( mm)

Table 3 Sectional dimension of samples

类型	熔深 D	熔宽 W	余高 H	深宽比 (H/W)
无超声	6.3	14.1	3.6	0.45
有超声	4.2	13.4	3.5	0.32

## 2.2 气孔缺陷

为了观察超声振动对激光-MIG 复合焊接过程气孔的影响,对堆焊后的试样进行射线探伤,以观察熔覆金属整个长度方向的内部气孔情况。如图 3 所示,无论有无超声振动辅助,收弧或起弧的位置附近都存在明显的气孔缺陷,但在同样的堆焊参数下,有超声振动辅助作用的焊缝内部气孔数量明显要少于没有超声振动辅助时的试样。但 X 射线探伤照片并不能看到气孔在深度方向的分布,图 4 所示熔覆金

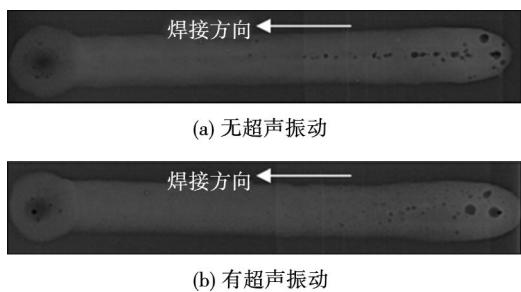


图3 试样 X 射线探伤图片  
Fig. 3 X-Ray detection photos of samples

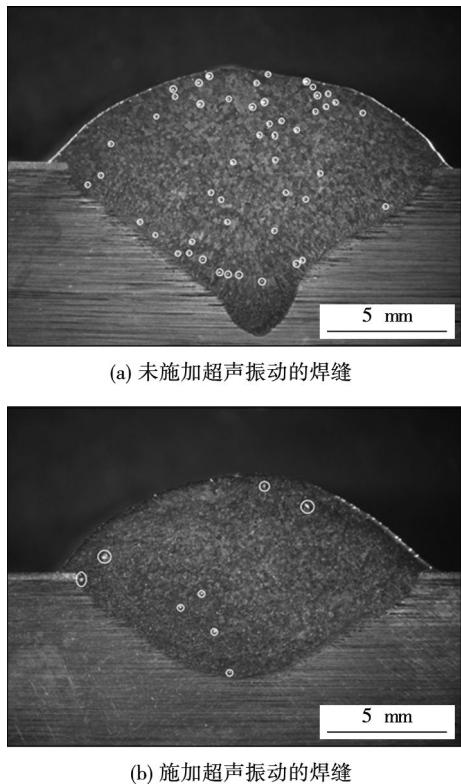


图4 截面照片  
Fig. 4 Cross-section photograph

属截面照片很好的反映了有无超声振动辅助作用的两种情况下气孔的分布情况。无超声振动时,熔覆金属内部有大量气孔,尤其在熔合线附近分布一些微小尺寸的气孔(尺度在 X 射线探伤的分辨率以下),如图 4a 所示。而有超声振动辅助时,熔覆金属内部气孔数量明显减少,气孔有相对聚集长大并有上浮趋势,这是由于超声振动的扰动作用,使得由熔池凝固过程中析出的气体元素发生了聚集,气泡体积增大,受到的浮力增大,加速了气泡的上浮造成的。但即便有超声振动的辅助作用,熔覆金属内的气孔并没有完全消除,需要进一步优化工艺参数,增强超声和熔池中气泡的耦合效果,如超声振动的施加位置、振幅和频率大小,以及激光功率、焊接速度、MIG 电弧电流和电压等,调整熔池凝固速度和气泡上浮速度的竞争关系,最终达到最佳的超声除气效果。

## 2.3 熔覆层组织

图 5 是熔覆层的微观组织,无论有无超声振动,熔覆层中心区域都为典型的等轴树枝晶组织,但当无超声振动辅助时,熔覆层金属内有离散分布微小气孔缺陷,如图 5a 所示;而有超声振动时,在金相照片中可以看到很多更小尺寸的形状不规则的黑点,这些黑点并不是气孔缺陷,分析可能是由于超声振动作用加速了合金元素的扩散,使得部分强化相快速析出并聚集长大,如图 5b 所示,具体物相成分将在后续研究中进一步分析鉴定。

除此之外,在超声振动作用下,熔合区附近的组织形态也发生明显的变化。常规铝合金堆焊过程熔覆层靠近熔合线附近由于较大的温度梯度,会出现一层柱状晶组织,分布区域大致在如图 5c 所示的两条虚线之间,厚度大约  $300 \mu\text{m}$ 。而有超声振动辅助时,柱状晶分布区域出现了一层细小的晶粒,厚度大约  $150 \mu\text{m}$ ,柱状晶特征基本消失,如图 5d 所示,这是由于在柱状晶生长过程中,结晶前沿受到超声振动作用,不断被震碎打断,阻碍了柱状晶的进一步长大,而出现了类似于细小等轴晶的组织,这一特性对于改善铝合金激光-MIG 复合焊接头组织,提高接头力学性能将起到积极的作用。

## 2.4 接头力学性能

以上通过铝合金表面的堆焊试验研究了超声振动辅助对气孔及组织的影响规律,而对焊接接头的力学性能影响规律并不清楚。通过对接接头的焊接试验,对比了激光-MIG 复合焊超声振动辅助前后接头的冲击韧性和抗拉强度。

图 6 所示是接头的冲击试验结果,从接头的各区域来看,由于热影响区 (HAZ) 受到焊接热输入的作用发生了一定程度的回复再结晶,冲击吸收功要

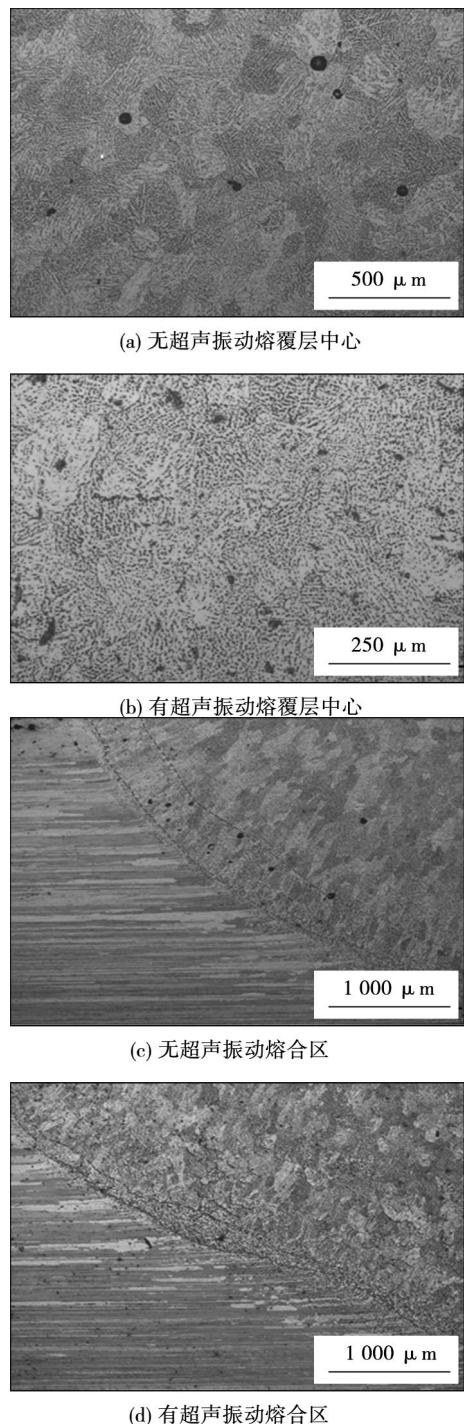


图5 熔覆层各部分显微组织

Fig. 5 Microstructure photograph of build-up welding layer

高于焊缝(WZ)和母材(BM),而WZ区内该区的成分更接近ER5356焊丝熔化后重新凝固的铸态组织,焊缝区材料的强度和韧性较7xxx系列母材低。另外,可能由于在等轴晶界上存在一些低熔点共晶相,脆性大,造成冲击吸收功较低;而施加超声振动辅助后焊接的接头,各个区域的冲击吸收功都有一定程度的提高。但冲击吸收功提高的幅度并不大。由此可见,超声振动辅助作用后反应到接头各区域

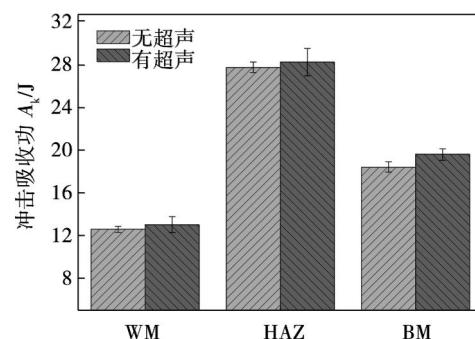


图6 焊接接头冲击试验结果

Fig. 6 Impact test results of butt weld

的冲击韧性能上,效果并不显著。

图7所示是接头的拉伸试验结果。超声振动辅助A7N01铝合金激光-MIG复合焊接接头的平均抗拉强度为271.7 MPa,比未施加超声振动辅助的抗拉强度268.6 MPa略有提高。而接头的断后伸长率变化不大,平均断率为3.0%。接头拉伸断裂后,焊缝区都发生了塑性变形,最终的断裂位置均在熔合线附近。可见熔合线附近仍然是整个焊接接头的最薄弱区域。超声振动使得熔合区附近的柱状晶层变窄、晶粒变小,故可提高A7N01铝合金激光-MIG复合焊接接头抗拉强度。

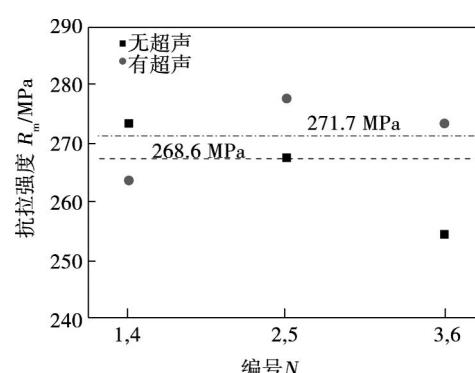


图7 焊接接头拉伸试验结果

Fig. 7 Tensile test results of butt weld

结合图8所示扫描电镜下的断口照片可知,断口上有明显的韧窝存在,都属于韧性断裂。而无超声辅助时的试样断口上可以看到一些内壁较光滑的圆形微小气孔存在,而有超声振动辅助时,气孔数量明显减少。但反映在抗拉强度的变化上,有超声振动辅助时虽然气孔数量减少很多,但抗拉强度提高幅度并不显著,这是由于焊缝中非密集型的微小气孔对静态抗拉强度影响不大,而相比之下微小气孔对接头的疲劳强度影响较为显著,相关结果见后续研究报道。

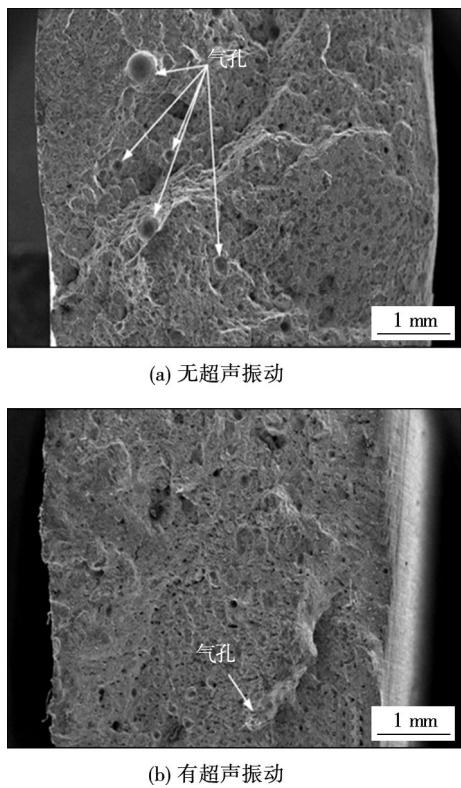


图8 拉伸试验断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of tensile test

### 3 结 论

(1) 研究了超声振动辅助 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接方法,通过 X 射线探伤和截面观察等测试验证了超声振动去除气孔的作用效果。

(2) 熔池凝固时受到超声振动作用,熔合线附近的柱状晶被震碎,使得柱状晶层厚度变薄,由原有粗大的柱状晶特征转变成细小的等轴晶。

(3) 超声振动辅助激光-MIG 复合焊接 A7N01 铝合金时,超声振动会促进强化相的析出和长大。

(4) 与不施加超声振动相比,超声振动辅助 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接接头各区域的冲击韧性和抗拉强度都有提高。

### 参考文献:

- [1] Ema M, Sasabe S. Joint strength of Al-Mg-Si alloys for automobiles by advanced welding technologies[J]. Welding International, 2004, 18(1): 11–15.
- [2] Fukami K, Setoda K. Development of high-efficiency MIG-laser hybrid welding technology[J]. Light Metal Welding and Construction, 2010, 48(11): 413–418.
- [3] 许良红, 田志凌, 彭云, 等. 高强铝合金的 MIG 以及激光-MIG 焊接工艺对比[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 38–43.
- [4] 严军. 光纤激光-电弧复合焊接高强铝合金工艺、缺陷产生与质量控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [5] 杨璟. 铝合金激光深溶焊接过程行为及缺陷控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [6] Katayama S, Nagayama H, Mizutani M, et al. Fibre laser welding of aluminium alloy[J]. Welding International, 2009, 23(10): 744–752.
- [7] 雷正龙, 李颖, 陈彦宾, 等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 40–44.
- [8] Lei Zhenglong, Li Ying, Chen Yanbin, et al. Effect of process parameters on porosity formation ratio in dual-beam laser welding of aluminum alloys with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 40–44.
- [9] Xu Zhiwu, Yan Jiuchun, Zhong Li, et al. Filling and wetting behaviors of liquid filler metal in the process of ultrasonic Solde-ring of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(10): 1–5.
- [10] 孙清洁. 超声-TIG 电弧复合焊接方法及电弧行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [11] Kim J S, Watanabe T, Yoshida Y. Ultrasonic vibration aided laser welding of Al alloys: improvement of laser welding-quality[J]. Journal of Laser Applications, 1995(7): 38–46.
- [12] Eskin G I. Principles of ultrasonic treatment: application for light alloy melts[J]. Advanced Performance Materials, 1997, 4(2): 223–232.
- [13] Xu H B, Jian X G, T, Meek T, et al. Degassing of molten aluminium A356 alloy using ultrasonic vibration[J]. Materials Letters, 2004, 58: 3669–3673.
- [14] 李军文, 付莹, 桃野正. 超声波处理时间对铝合金铸锭内的气孔生成及细化的影响[J]. 铸造技术, 2006, 27(10): 1063–1066.
- [15] Li Junwen, Fu Ying, Momono Tadaashi. Effect of ultrasonic treating time on the formation of blowhole and refinement in the aluminum ingot[J]. Foundry Technology, 2006, 27(10): 1063–1066.
- [16] 李军文, 桃野正, 付莹. 超声波功率对铸锭内的气孔及组织细化的影响[J]. 铸造, 2007, 56(2): 152–157.
- [17] Li Junwen, Momono Tadaashi, Fu Ying. Effect of ultrasonic power on density and refinement in aluminum ingot[J]. Foundry, 2007, 56(2): 152–157.

**作者简介:** 朱宗涛,男,1983年出生,博士,讲师,硕士研究生导师。主要从事高能束等特种焊接技术和教学工作。发表论文10余篇。Email: zongtaozhu@163.com