

超声振动对激光立体成形 GH3536 合金拉伸性能的影响



吕诗劼¹, 刘丰刚¹, 黄春平², 裘成¹, 耿永祥¹

1. 南昌航空大学, 南昌 江西 330063

2. 中国航空研究院研究生院, 江苏 扬州 225003

摘要: 研究增材制造中引入超声振动辅助, 作为一种新兴且有效的改善组织和力学性能的方法, 有助于优化材料的组织与性能。本文主要研究了超声振动对激光立体成形(LSF)GH3536 合金组织和拉伸性能的影响。结果表明, 超声振动使激光立体成形 GH3536 合金试样由外延生长的柱状晶向等轴晶的转变(CET)为等轴晶。在激光立体成形 GH3536 合金的过程中施加超声振动辅助, 显微硬度由 225HV 提升至 276HV, 提升幅度为 22.7%。随着超声振幅的增加, 显微硬度变化不大。未施加超声振动的激光立体成形 GH3536 合金沉积试样的抗拉强度为 539MPa, 断后伸长率为 13.9%, 断口呈韧性断裂的特征。施加超声振动后, 拉伸强度显著提高, 其中 60 μ m 超声振幅时, 激光立体成形 GH3536 合金试样的抗拉强度与断后伸长率最高, 分别为 813MPa 和 19%, 相较于未施加超声振动的试样分别提升了 50.8%、36.7%。本文探索了超声辅助技术在激光立体成形镍基高温合金中的应用, 旨在为该技术在航空航天领域的应用奠定基础。

关键词: 激光立体成形; GH3536 合金; 超声振动; 微观组织; 拉伸性能

中图分类号: TG146.1+5

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.007

GH3536 合金是一种典型的固溶强化型镍基高温合金, 该合金具有良好的强度与耐热性能, 并兼具优异的抗氧化与腐蚀特性, 在 900 $^{\circ}$ C 以下有中等的持久和蠕变强度。同时由于其铁含量较高, 钼、钽等元素含量较低, 因此成本较低, 是航空发动机热端部件常用材料^[1-2]。近年来, 随着先进航空发动机技术的发展, 对其热端部件的结构、性能和功能等方面提出了更为苛刻的要求^[3]。采用传统的制造技术存在研制周期长、技术难度大、材料浪费等问题, 制约了航空发动机技术的创新发展。

激光立体成形技术的基本原理是: 在成形过程中聚焦后的激光能量集聚在基材上, 使其局部熔化形成熔池, 同时粉末由送粉装置通过气流约束同步送入熔池, 在进入熔池后迅速熔化^[4]。与此同时, 激光束不断地移动, 由点到线、由线到面、由面到体, 得到三维实体零件。由于激光立体成形技术具有沉积效率高、成形性能好并且可用于金属零件高性能精确修复等优点, 目前已广泛应用于高温合金、钛合

金、高强度钢等高性能复杂金属零件的制造及修复^[5-6]。

然而, 由于激光立体成形是一个非平衡近快速凝固的过程, 熔池要经历快速的熔化和凝固, 造成沉积态的高温合金组织具有独特的微观组织特征, 不存在宏观偏析, 仅存在微观偏析, 枝晶细小致密, 并表现为力学性能的各向异性^[7-8]。超声波具有能量密度高、方向性好等优势, 在激光增材制造过程中引入超声振动, 能够实现激光熔覆层的微观组织调控, 促进熔覆层组织细化, 改善力学性能各向异性^[9]。超声振动可辅助(UVA)激光增材制造在钛合金、高温合金、铝合金等方面的众多研究。陈畅源等^[10-11]将超声振动引入激光熔覆 Ni60 中, 研究发现施加超声振动后熔池各处温度场趋于均匀化, 晶粒得到明显的细化效果。钦兰云等^[12]研制了一种超声辅助激光沉积装置, 进行钛合金 TC4 的熔覆沉积试验。结果表明, 沉积层中的树枝晶平均长度由未施加超声振动时的 110 μ m 减小至 50 μ m。Ning Fuda 等^[13-14]研究了超声对 IN718 高温合金的作用效果, 研

收稿日期: 2024-08-06; 退修日期: 2024-10-31; 录用日期: 2025-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(52265053, 52165050); 航空科学基金(2022Z049056001); 江西省研究生创新专项资金(YC2023-S722)

引用格式: Lyu Shijie, Liu Fenggang, Huang Chunping, et al. Effect of ultrasonic vibration on tensile properties of laser solid formed GH3536 alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(4): 56-63. 吕诗劼, 刘丰刚, 黄春平, 等. 超声振动对激光立体成形 GH3536 合金拉伸性能的影响[J]. 航空科学技术, 2025, 36(4): 56-63.

究表明,超声振动可以显著降低 Laves 相有害相的尺寸,并呈颗粒状分布于熔覆层。Cong Weilong 等^[15]研究了超声辅助激光近净成形的组织演变,发现超声振动可以使得熔覆层空隙减小,微观组织更细,提升零部件的机械性能。Gorunov 等^[16]通过超声振动辅助激光熔覆成形技术获得成形件的极限强度和塑性相比于未施加超声振动时提高了近 1.3 倍。

目前为止,超声振动辅助已应用在多种场合,如激光和线材增材制造、激光熔化沉积制造、铸造及电弧焊等。超声振动辅助作为一种新兴且有效的改善组织和力学性能的方法,有效地提升了材料的组织与性能^[17-20]。基于此,本文在激光立体成形过程中引入超声振动,综合激光立体成形技术与超声振动的优点,以期获得高性能的 GH3536 合金试样,为其在航空航天领域的应用奠定基础。

1 实验材料及方法

实验所采用的材料为旋转电极法制备的 GH3536 合金粉末,粉末直径为 53~150 μm ,化学成分见表 1。激光立体成形实验是在南昌航空大学增材制造研究中心自行搭建的系统平台上完成的。

表 1 GH3536 合金粉末的化学成分(单位: wt%)

Table 1 Chemical composition of GH3536 powder (Unit: wt%)

C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	B	Si	Cu	Ni
0.09	22.12	1.56	0.59	9.03	0.06	0.01	19.08	0.002	0.06	0.01	余量

该系统包括一台 YSL-4000 YAG 激光器、MOTOMAN Yaskawa 电子工业机器人,一台 DPSF 送粉器、一台 DX20 机器人控制柜、水冷系统、一个自制惰性气体保护罩。本文试验采用四路同轴送粉方式,使高纯氩气作为载粉气。在激光立体成形实验过程中同步施加超声振动。振动头通过空压机与基板底部紧密连接,超声振动通过基板作用于熔池。所使用的超声发生设备固定频率为 20kHz,为更好地探索超声振幅对合金的影响,在设备振幅发射区间内(50~100 μm)选择 50 μm 、60 μm 、70 μm 、80 μm 、90 μm 、100 μm 共 6 个参数进行超声振动辅助激光立体成形实验。根据先前研究^[21-22],成形工艺参数将对制备样品质量有较大影响。其中,当激光功率为 1300W,扫描速度为 60cm/min,搭接率为 50%,光斑尺寸为 3mm,送粉量为 7g/min 时,所制备试样质量最好。因此按照上述实验参数进行制备,成形试样尺寸为 40mm \times 10mm \times 10mm。

对于超声振动前后激光立体成形试样,采用电火花线切

割的方法,切取尺寸为 5mm \times 5mm \times 2mm 的片状试样,制备成标准金相试样,使用 8g 的 FeCl₃ 和 14mL 的 HCl 和 20mL 的 C₂H₅OH 进行化学腐蚀,腐蚀 40s,进行光学金相显微镜、扫描电子显微镜的组织观察。使用型号为 HV-1000 的显微硬度计对不同状态的试样进行显微硬度分析。每个试样测试 15 个点,取平均值。测量时所用载荷为 200g,保压时间为 15s。

在成形试样中切取厚度为 2mm 的板状试样进行室温力学性能测试,拉伸速率为 1mm/min,拉伸试样尺寸如图 1 所示。

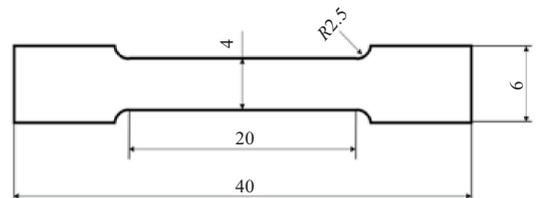


图 1 拉伸试样尺寸示意图(单位: mm)

Fig.1 Schematic diagram of the dimensions of the tensile specimen (Unit: mm)

2 实验结果和讨论

2.1 超声振动对激光立体成形 GH3536 合金微观组织的影响

图 2 为不同超声振幅下激光立体成形试样的显微组织光镜图。其中,图 2(a)为未施加超声振动试样,图 2(b)~图 2(g)依次为 50 μm 、60 μm 、70 μm 、80 μm 、90 μm 、100 μm 超声振幅下成形试样金相组织。

由图 2(a1)、图 2(a2)可以看出,未施加超声振动的试样,其最后一层熔覆层上出现少量等轴晶组织,即熔池顶部发生了柱状晶向等轴晶的转变(CET)。这是由于熔池顶部区域温度梯度较低,凝固速度较快,成分过冷达到了 CET 的条件,因而形成了少量等轴晶组织。而中部和底部区域未发现等轴组织,则是因为试样内部温度梯度 G 较大,凝固速度 R 较小,温度梯度与凝固速度的比值 G/R 更大,因此试样内部区域的晶粒呈柱状晶形态,而试样顶部表面的 G/R 值较小,因而其组织呈等轴状^[23]。此外,由于激光立体成形是逐层成形,下一层熔覆时激光会对前一层的表面进行重熔,重熔区域的深度大于发生 CET 的区域,因此中部和底部区域内观察不到先前形成的等轴晶组织。

施加超声振动后,激光立体成形 GH3536 合金的组织转变为等轴晶。对比不同振幅下的试样可以发现,较低超

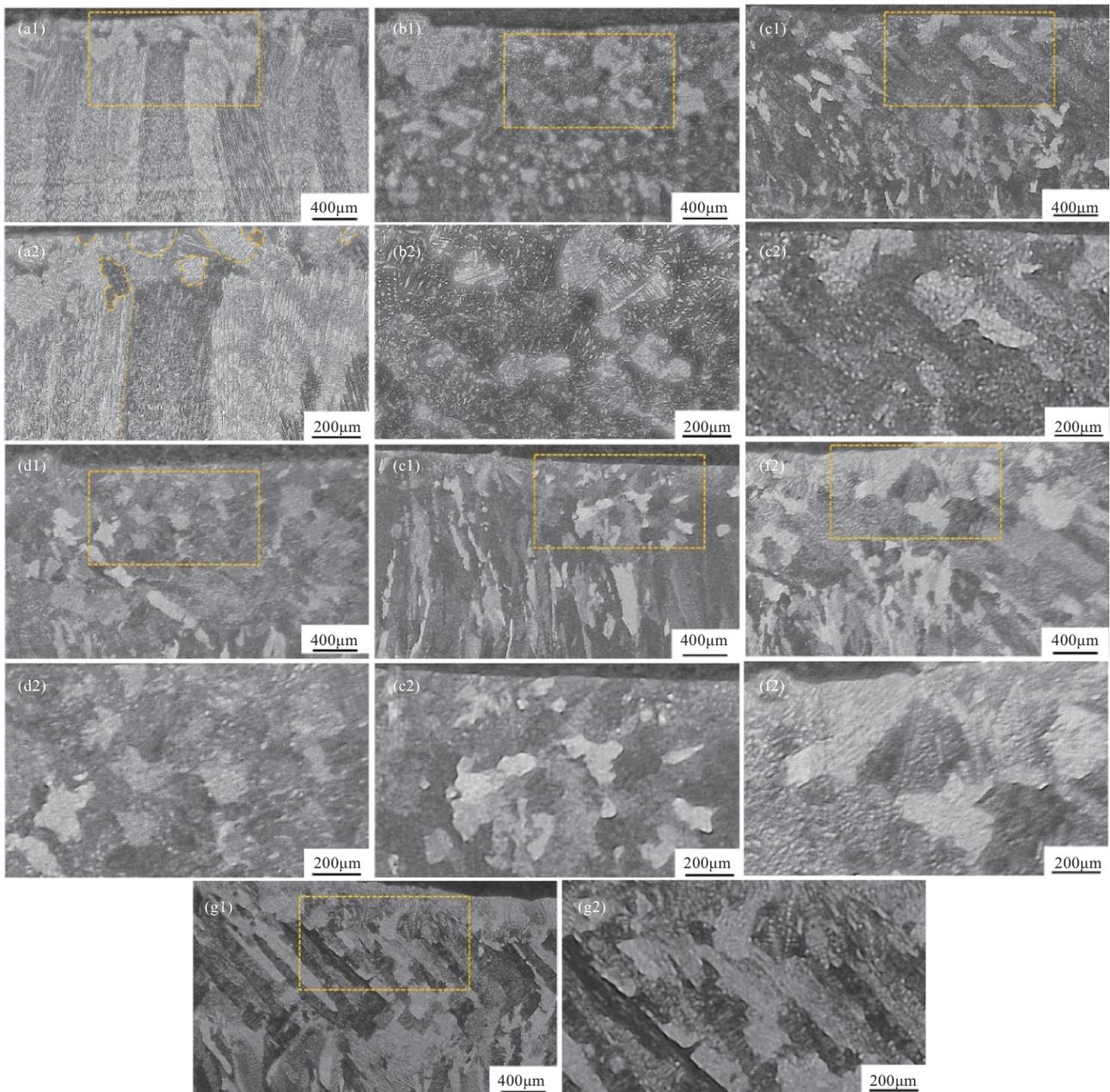


图2 不同超声振幅下激光立体成形试样的光镜图

Fig.2 Photomicrographs of laser solid formed specimens at different ultrasonic amplitudes

声振幅下(50 μm 、60 μm),超声振动导致的UVA-CET所形成的等轴晶粒尺寸远小于温度梯度与凝固速度共同作用导致的“原始”CET所形成的等轴晶尺寸。而较高超声振幅(80 μm 、90 μm 、100 μm)下,超声振动破碎柱状枝晶形成的等轴组织与“原始”CET转变所形成的等轴组织尺寸相近。这种CET形式与未施加超声振动所导致的CET有所不同,试样表面发生的CET为温度梯度与凝固速度共同作用下所导致,称为“原始”CET;超声振动试样中发生的CET是超声振

动使柱状晶破碎产生异质形核所导致,称为UVA-CET。两种CET所形成的等轴晶组织形态也有所不同,“原始”CET由于凝固速度较快,且其向熔覆层表面各个方向导热,因而产生了部分发散状的类半球形等轴晶,同时由于凝固速度较快,超声未来得及破碎晶粒就已凝固,因而超声试样表面也可观察到这种CET形式产生的等轴晶组织。而UVA-CET是由振动破碎柱状晶产生异质形核,因此其等轴组织呈块状。

2.2 超声振动对激光立体成形 GH3536 显微硬度的影响

为探究不同超声振幅对激光立体成形 GH3536 合金显微硬度的影响,对未施加超声振动试样、较低振幅试样(60 μm)、过大振幅试样(80 μm 、100 μm)进行显微硬度测试。测试点位于试样中间,由底部至顶部,每个测试点之间间隔 0.25mm,每个试样取 120 个点求平均值,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,施加超声振动前的试样,其平均硬度为 225HV,其波动值在 25HV 左右。而施加了超声振动辅助的试样,其显微硬度得到了显著的提升,同时波动值下降至 20HV 左右。在 60 μm 的振幅下,平均显微硬度达到了 276HV,提升幅度为 22.7%。而随着超声振幅的增大,平均显微硬度并未随之增大,相反,在 80 μm 超声振幅时,平均显微硬度下降至 263HV。100 μm 超声振幅时,平均显微硬度进一步下降至 242HV。施加超声振动的试样,其平均显微硬度均大于未施加超声振动辅助的试样,且在振幅过大时出现下降的情况,这与前文中晶粒尺寸变化的趋势相似。

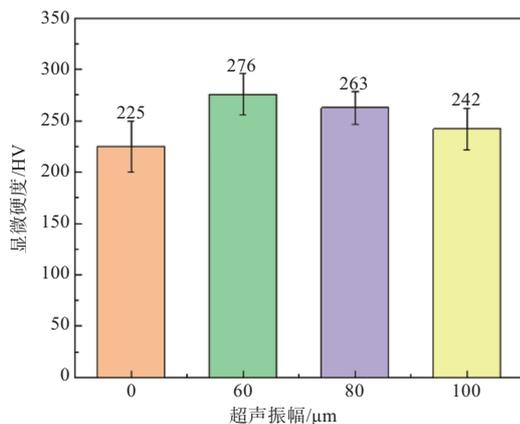


图3 不同超声振幅下激光立体成形 GH3536 合金平均显微硬度图

Fig.3 Average microhardness of laser stereoforming GH3536 alloy under different ultrasonic amplitudes

根据 Hall-Petch 关系^[24]

$$H_v = H_0 + Kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, H_v 为强度; H_0 , K 为常数; d 为平均晶粒尺寸。由式(1)可知,材料的强度与材料的晶粒尺寸呈反比,材料的平均晶粒尺寸越小,其强度越大。然而硬度同强度呈正相关。通过前文的分析可知,施加超声振动辅助并未对激光立体成形 GH3536 合金的析出相产生较大影响。因此,试样的显微硬度主要由晶粒尺寸决定,晶粒尺寸在一定程度范围内越小,产生大量晶界,这些晶界在局部阻碍了位错的运动,从而改变合金强度,影响变形,提高了材料的硬度^[25]。

施加了超声振动辅助的试样发生了 CET,由粗大的柱状晶转变为等轴晶,其晶粒尺寸大大下降,而过大振幅下晶粒尺寸不再继续减小,而是呈增大的趋势。因此,施加超声振动辅助的试样会有更高的显微硬度,过大振幅时显微硬度开始下降,这与图 3 展示的显微硬度变化规律相符。

2.3 超声振动对激光立体成形 GH3536 合金拉伸性能的影响

根据前文分析,超声振动辅助可以有效降低激光立体成形 GH3536 的晶粒尺寸,起到细晶强化的作用。而细晶强化是金属材料的强化效果中唯一能够在提升材料强度、硬度的同时,又能提升材料的塑性与韧性的强化方式。因此有必要对施加超声振动前后的试样进行拉伸测试,得到其抗拉强度及延伸率等,以研究超声振动对激光立体成形 GH3536 合金拉伸性能的影响。对未施加超声振动、60 μm 振幅、较高振幅(80 μm 、100 μm)进行室温拉伸测试,结果如图 4、表 2 所示。

可以看出,施加超声振动辅助的试样,其抗拉强度均高于未施加超声振动辅助的试样。未施加超声振动辅助的试样抗拉强度为 539MPa,施加超声振动后,试样的抗拉强度得到了较大提升,60 μm 超声振幅下提升最大,试样的抗拉强度达到 813MPa,提升幅度为 50.8%,断后伸长率由 13.9% 提升至 19%,提升幅度为 36.7%。80 μm 超声振幅下试样的抗拉强度达到 668MPa,提升幅度为 23.9%,断后伸长率为 13.7%,与未施加超声振动试样相近。100 μm 超声振幅下试样的抗拉强度达到 547MPa,略高于未施加超声振动试样,断后伸长率为 10.1%,相较于未施加超声振动试样下降较大。可以看出,施加超声振动能有效提升激光立体成形 GH3536 合金的拉伸性能,然而,随着超声振幅的增大,试样的拉伸性能并未随之提升,变化规律与前文中晶粒尺寸、显微硬度的变化规律相近。

由图 4 可以看出,施加超声振动前后的试样,其断口处均存在部分气孔,未施加超声振动试样与 100 μm 超声振幅试样的气孔较大,60 μm 、80 μm 超声振幅试样气孔较小。超声振动辅助激光立体成形过程中,较低超声振幅时可降低气孔尺寸,振幅过大会诱导形成较大尺寸气孔。对比表 2 所示的拉伸性能可以发现,断口处的气孔对激光立体成形 GH3536 合金的抗拉强度影响不大,但削弱了材料的塑性和韧性,对其延伸率有一定影响。

分析认为,施加超声振动提升激光立体成形 GH3536 合金的拉伸性能的原因与试样的晶粒形貌有关。施加超声振动后试样内部发生了 CET,转变后的等轴组织相较于未

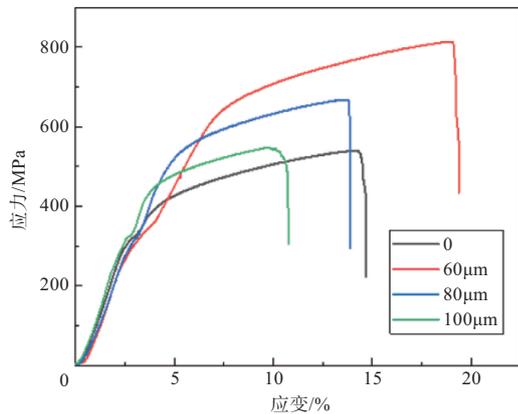


图4 不同超声振幅下激光立体成形GH3536合金室温拉伸应力应变曲线

Fig.4 Room temperature tensile stress-strain curve of laser stereoformed GH3536 alloy under different ultrasonic amplitudes

表2 不同超声振幅下激光立体成形GH3536合金室温拉伸性能

Table 2 Room temperature tensile properties of laser stereoformed GH3536 alloy at different ultrasonic amplitudes

超声振幅/ μm	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
0	539	13.9
60	813	19
80	668	13.7
100	547	10.1

施加超声振动试样的粗大柱状晶组织具有更多的晶界,晶界可以阻碍位错的运动,并且曲折的晶界可以阻碍裂纹的扩展,进而提高试样的抗拉强度。此外,更为均匀、细小的等轴晶粒组织可以使试样在外力作用下发生塑性变形时,令该塑性变形分散在更多的晶粒当中,变形更为均匀,进而得到更高的塑性。因此,施加超声振动可有效提升激光立体成形GH3536合金的拉伸性能,在较低超声振幅时,抗拉强度和断后伸长率均高于无超声振动辅助试样。随着超声振幅的增大($> 60\mu\text{m}$),试样的塑性逐渐降低,抗拉强度与断后伸长率随之下降。超声振幅过大时($100\mu\text{m}$),试样的抗拉强度仍高于未施加超声振动试样,但由于过大振幅诱导形成的气孔,导致材料的塑韧性下降,使其断后伸长率低于无超声振动辅助试样。

图5为不同超声振幅下激光立体成形GH3536合金的拉伸断口形貌结果。其中,图5(a)为未施加超声振动试样,图5(b)~图5(d)依次为 $60\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 超声振幅下成

形试样断口形貌图。

由图5(a1)、图5(a2)可以看出,未施加超声振动的试样断口处存在众多大小深浅不一的韧窝,并存在韧性特征的河流状花样,说明其断裂机制为韧性断裂。由图5(b1)、图5(b2)可以看出, $60\mu\text{m}$ 超声振幅试样断口中存在大量韧窝,相比于未施加超声振动的试样,其韧窝更为规则、均匀,同时,河流状花样消失。由图5(c1)、图5(c2)可以看出, $80\mu\text{m}$ 超声振幅试样断口中存在大量韧窝,并存在少部分撕裂棱,其断裂机制以韧性断裂为主。由图5(d1)、图5(d2)可以看出, $100\mu\text{m}$ 超声振幅试样断口中韧窝较少,并出现了较大撕裂棱,其断裂机制仍以韧性断裂为主,但其韧性大幅下降。因此,韧性的降低同高振幅超声振动所导致的夹气有关,高振幅的超声过多地对熔池进行了搅拌,使部分气体卷入,反而生成了一定的缺陷使合金韧性有所下降,并在断口处呈现明显的撕裂棱。

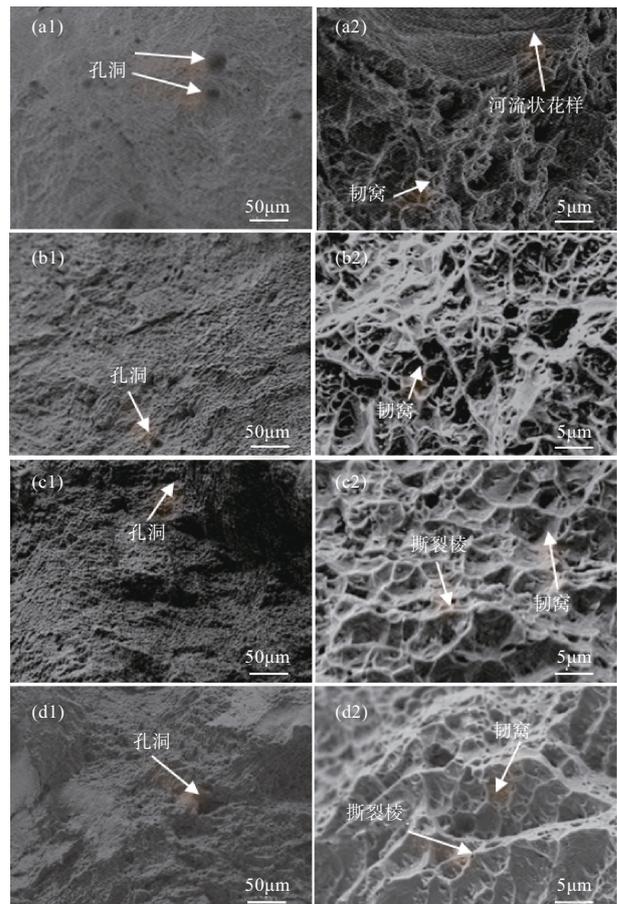


图5 不同超声振幅下激光立体成形GH3536合金拉伸断口形貌图

Fig. 5 Tensile fracture morphology of LSF GH3536 alloy under different ultrasonic amplitudes

2.4 超声振动在激光立体成形中的作用

本文重点关注了固定发生频率下不同振幅作用激光立体成形试样的显微组织和力学性能的变化。通过对比,不难得出 60 μm 超声振幅下成形试样效果最佳。因此可以看出,超声对合金试样质量的优化效果存在一定的窗口范围。类似的现象在 Chen Jiabin 对 TF550 阻燃钛合金的研究中也有出现。本文认为这与超声搅拌熔池的过程产生的空化效应相关。

在低超声作用熔池时,通常会发生在瞬间破裂的空化泡,该空化泡破裂产生的冲击,一方面加速了熔池中气体的逸出,另一方面对已凝固枝晶进行破碎,使破碎晶粒在熔池中游离,在后凝固过程中充当新的形核点位。然而,若超声振幅过大,空化泡的数量随之提升,对熔池产生作用加剧,此时,反而使部分气体卷入,影响合金质量。另外,由于快速的搅动作用,一定程度上加速了熔池的凝固速度,减弱了超声破碎枝晶的效果,从而造成 100 μm 振幅下晶粒相比于 60 μm 振幅晶粒有所变大。

本文探索了超声辅助技术在激光立体成形镍基高温合金中的应用,进一步研究并讨论了超声振幅对合金质量的影响,认为在较低振幅(60 μm)下作用效果最佳。

3 结论及展望

通过研究,可以得出以下结论:

(1)未施加超声振动的试样,其最后一层熔覆层上出现少量等轴晶组织,即熔池顶部发生了柱状晶向等轴晶的转变。施加超声振动后,激光立体成形 GH3536 合金的组织转变为等轴晶。在低超声振幅(50 μm 、60 μm)下,超声振动导致等轴晶粒尺寸较细小。而较高超声振幅(80 μm 、90 μm 、100 μm)下,晶粒尺寸开始增大。

(2)在激光立体成形 GH3536 合金的过程中施加超声振动辅助,可以提高试样的显微硬度,显微硬度由 225HV 提升至 276HV,提升幅度为 22.7%,波动值由 $\pm 25\text{HV}$ 下降至 $\pm 20\text{HV}$ 。试样的显微硬度不会随超声振幅的增大而增大,过大超声振幅时显微硬度呈下降趋势,但均比无超声振动辅助试样硬度高。

(3)未施加超声振动的激光立体成形 GH3536 合金沉积试样的抗拉强度为 539MPa,断后伸长率为 13.9%,断口呈韧性断裂的特征。60 μm 超声振幅时,激光立体成形 GH3536 合金试样的抗拉强度与断后伸长率最高,分别为 813MPa 和 19%,相较于未施加超声振动的试样分别提升了 50.8%、36.7%,断口处韧窝分布更为均匀且规则,呈现韧性

断裂的特征。随着超声振幅的提高,抗拉强度逐渐下降,但均比未施加超声振动辅助试样高,断裂机制仍为韧性断裂。

将超声辅助技术与增材制造相结合将有助于增材制造零件质量的提升,这将进一步扩大增材制造技术的使用。虽然目前针对超声辅助改善增材制造金属零件组织的作用机理和强化机制的相关研究已经取得了一定的进展,但未来仍需从以下几个方面进行系统深入的研究:(1)不同金属材料在超声作用下,相组织及织构的演变规律,以及合金元素的偏析和富集,热裂纹的形成机理等方面。(2)增材制造中,超声作用对熔池内部熔体流速的变化以及温度场的分布的影响。(3)超声发生后,其在不同合金试样成形中的衰减规律。(4)超声辅助装置与增材制造设备结合的改进,如增大超声辅助对成形区域的作用效率,降低超声振动对激光焦距的干扰等。

AST

参考文献

- [1] 秦琴, 毛子荐, 刘昭凡. 高温合金在航空发动机领域的应用现状与发展[J]. 工具技术, 2017, 51(9): 3-6.
Qin Qin, Mao Zijian, Liu Zhaofan. Application and future prospect of high-temperature alloy in aero-engine industry[J]. Tool Engineering, 2017, 51(9): 3-6. (in Chinese)
- [2] 师利中, 刘鹏宇. 氧化损伤对航空发动机涡轮叶片裂纹扩展影响[J]. 航空科学技术, 2024, 35(7): 65-75.
Shi Lizhong, Liu Pengyu. Influence of oxidation damage on the crack growth of aero-engine turbine blades[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(7): 65-75. (in Chinese)
- [3] 万宏远, 刘壮壮, 韩泉泉, 等. 激光增材制造高温合金抗开裂行为研究进展[J]. 航空科学技术, 2022, 33(9): 26-42.
Wan Hongyuan, Liu Zhuangzhuang, Han Quanquan, et al. Laser additive manufacturing of cracking-resistant superalloys [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(9): 26-42. (in Chinese)
- [4] 顾波. 增材制造技术国内外应用与发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2022(3): 1-16.
Gu Bo. Application and development trend of additive manufacturing technology at home and abroad[J]. Metal Forming, 2022(3): 1-16. (in Chinese)
- [5] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(22): 16-22.
Zhang Anfeng, Li Dichen, Liang Shaoduan, et al. Development of laser additive manufacturing of high-performance metal

- parts[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(22): 16-22. (in Chinese)
- [6] Debroy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties [J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112-224.
- [7] Mazumder J. Laser direct metal deposition technology and microstructure and composition segregation of Inconel 718 superalloy[J]. *Journal of Iron & Steel Research International*, 2011, 18(4): 73-78.
- [8] 李金国, 于金江, 赵乃仁, 等. 一种镍基单晶高温合金的显微偏析行为[J]. *钢铁研究学报*, 2003, 15(s1): 260-263.
Li Jinguo, Yu Jinjiang, Zhao Nairen, et al. Microsegregation behaviour of a nickel-based single-crystal high-temperature alloy[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2003, 15(s1): 260-263. (in Chinese)
- [9] 董宝昆, 张宇航, 行登海, 等. 超声冲击强化工艺对钛合金表面质量及磨损性能影响研究[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(12): 43-58.
Dong Baokun, Zhang Yuhang, Xing Denghai, et al. Research on the effect of ultrasonic impact strengthening on the surface property and wear properties of titanium alloy[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(12): 43-58. (in Chinese)
- [10] 陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. 超声振动对激光熔覆过程的影响[J]. *电加工与模具*, 2005, 37(3): 37-40.
Chen Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli. The influence of ultrasonic vibration on the process of laser cladding[J]. *Electromachining & Mould*, 2005, 37(3): 37-40. (in Chinese)
- [11] 陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. Ni含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(b11): 44-48.
Chen Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(b11): 44-48. (in Chinese)
- [12] 钦兰云, 王维, 杨光. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 76-81.
Qing Lanyun, Wang Wei, Yang Guang. Experimental study on ultrasonic assisted laser metal deposition of titanium alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 76-81. (in Chinese)
- [13] Ning Fuda, Hu Yingbin, Liu Zhichao, et al. Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of inconel 718 parts: a feasibility study[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 10: 771-778.
- [14] Ning Fuda, Cong Weilong. Microstructures and mechanical properties of Fe-Cr stainless steel parts fabricated by ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping process[J]. *Materials Letters*, 2016, 179: 61-64.
- [15] Cong Weilong, Ning Fuda. A fundamental investigation on ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of stainless steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 121: 61-69.
- [16] Gorunov A I, Nyukhlaev O A, Gilmudtinov A K. Investigation of microstructure and properties of low-carbon steel during ultrasonic-assisted laser welding and cladding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99(9): 2467-2479.
- [17] Todaro C J, Easton M A, Qiu D, et al. Grain structure control during metal 3D printing by high intensity ultrasound[J]. *Nature Communications*, 2020, 11:1-9.
- [18] Huang Haijun, Xu Yifan, Shu Da, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on structure refinement of solidified high purity aluminum[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 2414-2419.
- [19] Tao Yuan, Kou Sindo, Zhen Luo. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool[J]. *Acta Materialia*, 2016, 106: 144-154.
- [20] Chen Jiaxin, Liu Fenggang, Huang Chunping, et al. Microstructure and flame-retardant properties of the TF550 titanium alloy by ultrasonic vibration assisted laser solid forming[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1003: 175695.
- [21] Gao Jiaying, Liu Fenggang, Liu Lixin, et al. Effect of TiB2 content on microstructure and mechanical properties of GH3536 superalloy formed by laser solid forming[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 107168.
- [22] Zhang Wenjun, Liu Fenggang, Liu Fencheng, et al. Microstructural evolution and cracking behavior of Hastelloy X superalloy fabricated by laser directed energy deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 905: 164179.
- [23] Tan Qiyang, Zhang Jingqi, Mo Ning, et al. A novel method to 3D-print fine-grained AlSi10Mg alloy with isotropic properties via inoculation with LaB6 nanoparticles[J]. *Additive*

Manufacturing, 2020, 32: 101034.

711: 524-532.

[24] Zhu Zhiguang, Sun Yufeng, Ng F L, et al. Friction-stir welding of a ductile high entropy alloy: microstructural evolution and weld strength[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018,

[25] Zhu Zhiguang, Sun Yufeng, Goh M H, et al. Friction stir welding of a CoCrFeNiAl0.3 high entropy alloy[J]. Materials Letters, 2017, 205: 142-144.

Effect of Ultrasonic Vibration on Tensile Properties of Laser Solid Formed GH3536 Alloy

Lyu Shijie¹, Liu Fenggang¹, Huang Chunping², Qiu Cheng¹, Geng Yongxiang¹

1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

2. Graduate School of Chinese Aeronautical Establishment, Yangzhou 225003, China

Abstract: The introduction of ultrasonic vibration assistance in additive manufacturing was an emerging and effective method to improve the microstructure and mechanical properties. Relevant research on this would help to optimize the microstructure and properties of materials. The effect of ultrasonic vibration on the microstructure and tensile properties of laser solid forming (LSF) GH3536 alloy was studied in this paper. The results show that the epitaxial columnar to equiaxed transformation (CET) transformation occurs in the LSF GH3536 alloy by ultrasonic vibration. The microhardness of LSF GH3536 alloy increases from 225HV to 276HV, increases by 22.7%, when ultrasonic vibration was applied in the process of LSF. The microhardness changes little with the increase of ultrasonic amplitude. The tensile strength of LSF GH3536 alloy without ultrasonic vibration is 539MPa, the elongation after fracture is 13.9%, and the fracture is ductile fracture. When ultrasonic vibration is applied, the tensile strength of GH3536 alloy samples significantly improves. When ultrasonic amplitude is 60 μ m, the tensile strength and elongation after fracture of LSF GH3536 alloy samples are the highest, which are 813MPa and 19%, respectively, and increases by 50.8% and 36.7%, respectively, compared with the samples without ultrasonic vibration. In this paper, the application of ultrasonic assisted technology in laser solid formed nickel-based superalloy is explored, aiming to lay a foundation for the application of this technology in the aerospace field.

Key Words: laser solid forming; GH3536 alloy; ultrasonic vibration; microstructure; tensile properties

Received: 2024-08-06; **Revised:** 2024-10-31; **Accepted:** 2025-01-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52265053, 52165050); Aeronautical Science Foundation of China (2022Z049056001); Special Funds for Graduate Student Innovation in Jiangxi Province (YC2023-S722)