

超声振动辅助激光金属成形 IN718 沉积态组织及性能的研究

王 潭 张安峰 梁少端 严深平 张连重 李添尘

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 在激光金属成形 IN718 过程中引入超声振动, 测量了成形件的表面粗糙度、残余应力和室温力学性能, 并对成形件的微观组织进行了分析。结果表明, 施加超声振动后, 成形件的表面粗糙度和残余应力得到显著改善, 微观组织得以细化, 抗拉强度和屈服强度均有提高。当超声频率为 17 kHz、超声功率为 44 W 时, 与未施加超声振动时相比, 超声振动作用下成形件的残余应力在 x 和 y 两个方向上分别降低了 47.8% 和 61.6%, 屈服强度、抗拉强度和断面伸缩率分别提高了 6.1%、2.7% 和 10.6%, 延伸率降低到 29.2%。

关键词 激光技术; 激光金属成形; 超声振动; 残余应力; 力学性能

中图分类号 TG665; TG113.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1102005

Research on As-Deposited Microstructures and Properties of IN718 Parts by Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Metal Forming

Wang Tan Zhang Anfeng Liang Shaoduan Yan Shenping Zhang Lianzhong Li Dichen

State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Ultrasonic vibration is introduced to the process of laser metal forming IN718, the surface roughness, residual stress, and mechanical property at room temperature of the forming parts are tested, and the microstructure of the forming parts is analyzed. The results show that, after the introduction of ultrasonic vibration, the surface roughness degree and residual stress of the forming parts are remarkably improved, the microstructural refinement is obtained, and the tensile strength and yield strength are both increased. When the ultrasonic power is 44 W and the ultrasonic frequency is 17 kHz, compared with those of the parts without experiencing ultrasonic vibration, the residual stresses along x direction and y direction respectively decrease by 47.8% and 61.6%, the yield strength, tensile strength and area reduction increase by 6.1%, 2.7% and 10.6%, and the elongation slightly decreases to 29.2%.

Key words laser technique; laser metal forming; ultrasonic vibration; residual stress; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

1 引 言

激光金属成形(LMF)是一种先进的增材制造技术。该技术利用高能激光束熔化同步输送的金属粉末, 通过逐点逐层累积的方式实现三维实体零件的成形, 可成形任意复杂结构的零件, 具有成本低、材料利用率高优点, 在镍基高温合金的快速成形中得到了广泛应用^[1-3]。

IN718 是一种沉淀强化型镍基高温合金, 在 650 °C 以下具有较高的强度、较好的抗蠕变性能、较长的疲

收稿日期: 2016-07-12; **收到修改稿日期:** 2016-08-16

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划(2015KTTSGY03-06)

作者简介: 王 潭(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事高性能激光金属成形方面的研究。

E-mail: wangtan315@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 张安峰(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光增材制造及其定向凝固技术方面的研究。

E-mail: zhangaf@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

寿命以及良好的加工性、焊接性和稳定性,广泛用于制造涡轮盘、鼓筒轴等航空发动机中的关键热端部件^[4-5]。在激光金属成形过程中,材料的熔化、凝固和冷却都是在极短时间内完成的,很容易产生气孔、熔合不良等缺陷,且温度场在时空上的不均衡分布会导致残余应力的产生,对成形件的动静强度产生不利影响。另外,激光金属成形制造的实体零件通常具有粗大的柱状晶组织,这使得涡轮盘等零件的激光快速成形受到一定限制。因此,实现激光金属成形零件组织的致密化、细化和均匀化具有重要的工程意义。利用超声振动处理金属熔体是改善金属凝固组织、细化晶粒、均化组织成分和减小应力的有效途径^[6-8]。本文将超声振动引入到 IN718 激光金属成形过程中,对超声振动作用下成形的实体零件的表面成形质量、残余应力、内部组织和拉伸性能进行了研究及分析,为获得高质量、高性能的激光金属成形零件提供了一定参考。

2 实验方法

超声振动辅助激光金属成形原理示意图如图 1 所示,其中 IPC 为工业控制计算机,CNC 为计算机数字控制。超声振动辅助激光金属成形系统由超声振动系统和激光金属成形系统组成。超声振动系统包括超声波发生器、超声换能器、超声载物台及换能器冷却系统。超声波发生器驱动换能器产生超声波,基板将超声波导入熔融的金属熔池中,使超声波持续作用于金属熔体,进而对金属结晶过程产生影响。超声波发生器的功率及频率可调,输入电压为 220 V,最大工作电流为 200 mA,输出频率为 17~34 kHz。

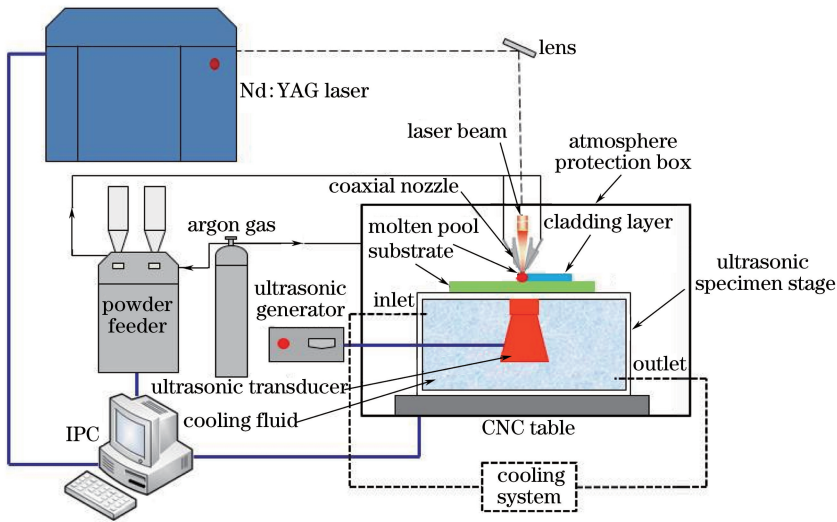


图 1 超声振动辅助激光金属成形系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted LMF system

实验在西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室自主研发的 LDF-1000A 型激光金属成形设备上完成^[9]。实验所用的 IN718 球形粉末粒度为 50~100 μm ,基板为 GH4169 板材,其尺寸为 100 mm \times 100 mm \times 4 mm,粉末和基板的化学成分见表 1。实验前将 IN718 粉末置于真空干燥箱中,在 120 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保温 4 h,以去除粉末中的水分,提高粉末流动性。GH4169 基板表面经砂轮打磨后,再用丙酮和酒精清洗,以去除表面的油渍和氧化膜。成形过程在氩气保护下进行,并用氩气作为载粉气。激光成形的工艺参数如下:光斑直径 0.5 mm,激光功率 180 W,扫描速度 10 mm/s,扫描间距 0.25 mm,单层提升量 0.06 mm,送粉速率 4 g/min。实体成形尺寸为 45 mm \times 10 mm \times 10 mm。

表 1 IN718 粉末和 GH4169 基板的主要成分(质量分数,%)

Table 1 Main compositions of IN718 powder and GH4169 substrate (mass fraction, %)

Element	C	Ni	Nb	Mo	Al	Ti	Cr	Fe
IN718 powder	0.026	53.07	4.86	3.01	0.33	0.92	18.48	Bal.
GH4169 substrate	0.043	52.73	5.11	3.10	0.57	0.92	19.75	Bal.

实验条件分为三组:一组为未施加超声振动;第二组为激光金属成形过程中引入超声频率为 17 kHz、超声功率为 44 W 的超声振动;第三组为成形过程中引入超声频率为 34 kHz、超声功率为 44 W 的超声振动。

成形结束后,采用 TR300 粗糙度形状测量仪测量实体成形件的表面粗糙度。采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪进行残余应力测量,测试方法采用侧倾固定倾角法。X 光管电压为 25.0 kV,管电流为 5.0 mA,应力常数为 $-601 \text{ MPa}/(^{\circ})$,倾角 Ψ 分别取 0° 、 24.2° 、 35.3° 和 45° ,扫描起始角和终止角分别为 132° 和 124° ,衍射角 (2θ) 扫描步距为 0.10° ,计数时间为 0.50 s。将成形试样按照 GB/T 228.1-2010 标准制成拉伸试样,在 Istrom5985 电子万能材料试验机上进行常温力学性能测试。使用 KEYENCE VH-600 型光学显微镜和 S-3000N 型扫描电子显微镜(SEM)进行微观组织分析。采用 HXD-2000TMSC/LCD 显微硬度计测试试样的显微硬度,加载载荷为 1.961 N,保持时间为 10 s。

3 实验结果与讨论

3.1 超声振动对实体成形件表面粗糙度的影响

以实体成形件长度方向为 x 轴、宽度方向为 y 轴、高度方向为 z 轴建立坐标系。不同超声参数下实体成形件表面形貌及表面粗糙度曲线如图 2 所示。

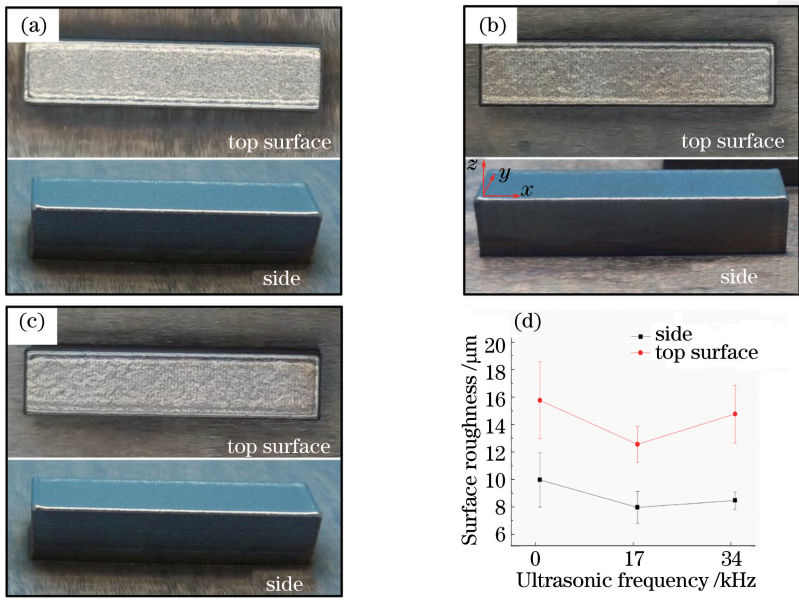


图 2 不同超声参数下激光金属成形件表面形貌和表面粗糙度。(a) 无超声振动;(b) 超声频率为 17 kHz;(c) 超声频率为 34 kHz;(d) 表面粗糙度曲线

Fig. 2 Surface morphology and surface roughness of LMF parts under different ultrasonic parameters. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic frequency of 17 kHz; (c) with ultrasonic frequency of 34 kHz; (d) surface roughness curves

由图 2(d)可知,施加超声振动后,实体成形件侧面和顶面的粗糙度均明显降低,且当超声频率为 17 kHz 时,成形件侧面粗糙度为 $R_{as}=7.8 \mu\text{m}$,顶面粗糙度为 $R_{at}=12.4 \mu\text{m}$,侧面和顶面粗糙度较未施加超声振动时分别降低了 20.4% 和 20.5%。未施加超声振动时,粉末利用率较低,随着成形层数的增加,成形件周围容易形成粉末堆积,导致成形件的散热条件变差,且在载粉气流的作用下,周围的粉末容易飞溅并黏结到成形件侧面,造成侧面粗糙度较高。施加超声振动后,在超声振动的作用下,成形件周围无粉末堆积,且从熔池中飞溅出的粉末不易黏结到侧面,所以施加超声振动后侧面成形质量较好。此外,施加超声振动后,在超声场的声流效应和机械搅拌作用下,熔池的流动性得到提高,熔池表面的张力情况得到改善,堆积层表面变得更加平坦。

3.2 超声振动对成形件表面残余应力的影响

对成形件表面残余应力取绝对值,不同超声参数对成形件残余应力的影响如图 3 所示,其中 σ_x 、 σ_y 分别为 x 和 y 两个方向上的残余应力。

由图 3 可知,与未施加超声振动相比,施加超声振动后成形件在 x 和 y 两个方向上的残余应力均明显减小,且当超声频率为 17 kHz 时, x 和 y 两个方向上的残余应力分别减小了 47.8% 和 61.6%。超声振动降低残余应力的机理可以从以下两个方面进行分析^[10]。

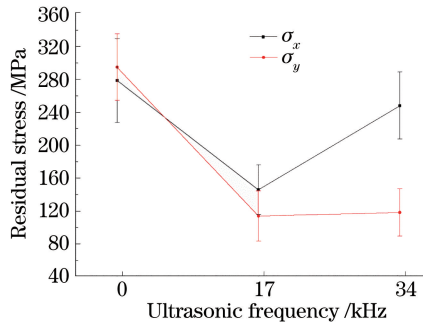


图 3 不同超声参数下激光金属成形件表面残余应力曲线

Fig. 3 Surface residual stress curves of LMF parts under different ultrasonic parameters

1) 从金属凝固过程考虑。引入超声振动后,在超声空化作用下,初生枝晶交错形成的固态结晶网被打碎,继续结晶时熔体得到补充,枝晶间产生的拉应力减小。同时,在超声场空化和机械搅拌作用下,熔池温度分布更加均匀,成形件的应变和热应力减小,且堆积层组织成分分布更加均匀,相与相之间的凝固应力减小。

2) 从位错理论考虑。位错反应是位错能量降低的过程,超声振动为位错反应提供了能量,促进了位错反应的发生,使更多的位错穿过周期排列的点阵。振动使晶界中的位错转化为错配位错,降低了位错的总能量和相界面的能量,减小了晶粒间的相互作用力。同时,位错反应促使材料发生微观塑性变形,使材料处于更加稳定的状态,减小了残余应力的峰值,使残余应力均匀化。

3.3 超声振动对成形件显微硬度的影响

不同超声参数下实体成形件微观组织形貌及显微硬度随熔覆层厚度的变化曲线如图 4 所示。

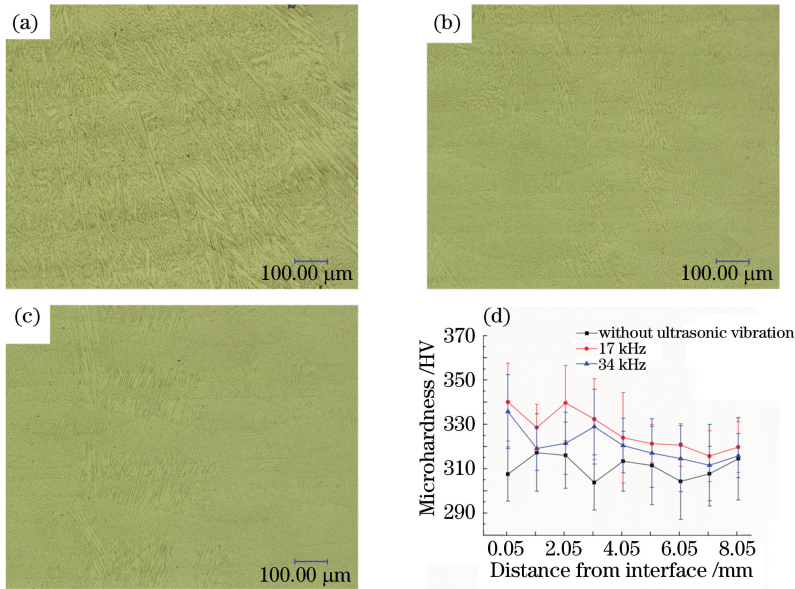


图 4 不同超声参数下激光金属成形件的微观组织形貌和显微硬度。(a) 300 \times ,无超声振动;

(b) 300 \times ,超声频率 17 kHz;(c) 300 \times ,超声频率 34 kHz;(d)显微硬度曲线

Fig. 4 Microstructures and microhardness curves of LMF parts under different ultrasonic parameters. (a) 300 \times , without ultrasonic vibration; (b) 300 \times , with ultrasonic frequency of 17 kHz; (c) 300 \times , with ultrasonic frequency of 34 kHz;

(d) microhardness curves

由图 4(d)可以看出,施加超声振动后两种频率下熔覆层的显微硬度均有所提高,且当超声频率为 17 kHz时,熔覆层的平均显微硬度较未施加超声振动时提高了约 5.2%。未施加超声振动时,熔覆层组织为外延连续生长的粗大柱状枝晶,如图 4(a)所示;施加超声振动后,晶粒尺寸明显减小,熔覆层组织得到细化,如图 4(b)、(c)所示。

从热力学角度分析,金属凝固时,过冷度越大,形核所需的临界晶核半径越小,形核率越高。金属凝固点

温度的变化 dT 和压力变化 dp 之间的关系服从 Clapeyron 方程^[11]

$$\frac{dT}{dp} = T_m \frac{\Delta V}{\Delta H}, \quad (1)$$

式中 T_m 为金属凝固点的温度,单位为 K; ΔV 为金属凝固时体积的变化,单位为 m^3 ; ΔH 为金属凝固时的焓变,单位为 J,压力改变对 ΔH 的影响可忽略不计。

超声空化效应可以在熔体局部产生瞬时高压,由(1)式可知,超声空化作用产生的高压冲击波使局部熔体的凝固点温度显著升高,有效过冷度也随之增加,提高了金属熔体的形核率,使空化泡周围产生很多微小的晶核。空化泡溃灭瞬间,在冲击波作用下,这些微小的晶核被发射到整个熔体中。在超声场的声流作用下,微小的晶核弥散分布于整个熔体,进行各向同性长大,凝固组织得到细化。同时,空化产生的高压冲击波将已经长大的晶粒打碎,使晶粒细化。凝固组织得到细化,组织更加致密,因而熔覆层的显微硬度得到提高。

3.4 超声振动对成形件拉伸性能的影响

不同超声参数下实体成形件拉伸断口形貌如图 5 所示,可以看出拉伸断口均为典型的韧性断裂。不同超声参数下实体成形件的室温拉伸性能测试结果见表 2,其中 σ_s 为屈服强度, σ_b 为抗拉强度, ψ 为断后伸缩率, δ 为延伸率。

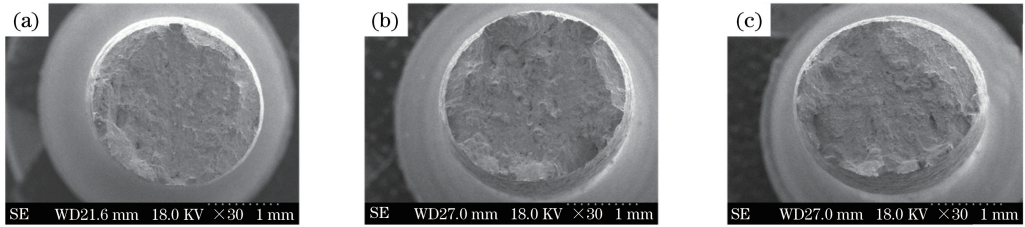


图 5 不同超声参数下激光金属成形件的断口形貌。(a)无超声振动;(b)超声频率 17 kHz;(c)超声频率 34 kHz
Fig. 5 Fracture morphologies of LMF parts under different ultrasonic parameters. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic frequency of 17 kHz; (c) with ultrasonic frequency of 34 kHz

表 2 不同超声参数下激光金属成形件室温拉伸性能测试结果

Table 2 Test results of tensile properties at room temperature of LMF parts under different ultrasonic parameters

Ultrasonic frequency /kHz	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%
0	641	954	30.0	40.7
17	680	980	29.2	45.0
34	675	963	29.0	44.7

由表 2 可知,施加超声振动后,成形件的屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 和断后伸缩率 ψ 均有所提高,成形件性能得到改善。当超声频率为 17 kHz 时,成形件的屈服强度、抗拉强度和断后伸缩率较未施加超声振动时分别提高了 6.1%、2.7% 和 10.6%。Hall-Petch 公式为^[12]

$$\sigma_i = \sigma_0 + Kd^{-1/2}, \quad (2)$$

式中 σ_i 为屈服或抗拉强度, σ_0 为移动单个位错所需克服的点阵摩擦力, K 为常数, d 为平均晶粒尺寸。由(2)式可知,施加超声振动后成形件晶粒得以细化。未施加超声振动时,熔覆层组织中有大量连续的条状共晶 Laves 相,如图 6(a)所示;当施加的超声频率为 17 kHz 时,超声场的声流效应和机械搅拌作用使熔池对流更加剧烈,并对枝晶间 γ +Laves 共晶反应中的 Laves 相产生强烈的冲刷作用,促使枝晶间的 Laves 相变成不连续的蠕虫状和细小的颗粒状,如图 6(b)所示。此外,对流作用阻碍了 Laves 相的快速生长,减少了 Laves 相在枝晶间共晶组织中的数量。Laves 相为脆性有害相,其数量的减少和形貌的变化是强度提高的另一个因素。

4 结 论

将超声振动引入到 IN718 激光金属成形过程中,对超声振动作用下成形的实体零件的表面成形质量、残余应力、内部组织和拉伸性能进行了研究及分析,得到以下结论:

- 1) 在激光金属成形 IN718 过程中引入超声振动,可提高实体成形件的表面成形质量;

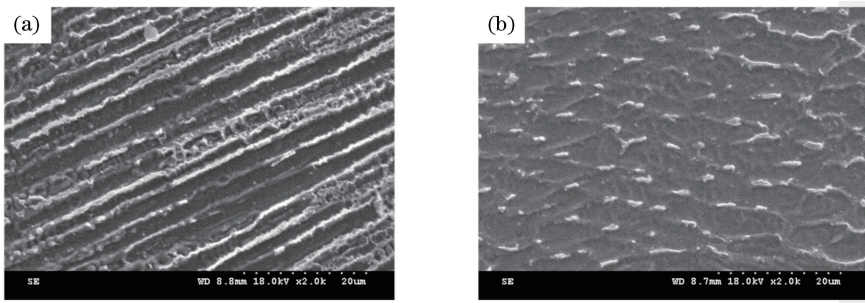


图 6 不同超声参数下激光金属成形件 SEM 图。(a) 2000 \times , 无超声振动; (b) 2000 \times , 超声频率 17 kHz

Fig. 6 SEM microstructures of LMF parts under different ultrasonic parameters. (a) 2000 \times , without ultrasonic vibration; (b) 2000 \times , with ultrasonic frequency of 17 kHz

2) 超声振动有利于激光金属成形件表面残余应力的释放;

3) 超声空化作用产生的高压冲击波和声流效应引起的熔池对流是细化熔覆层晶粒、减少 Laves 相数量从而提高成形件抗拉强度和屈服强度的主要原因。

参 考 文 献

- 1 Schlienger E, Dimos D, Griffith M, *et al.* Near net shape production of metal components using LENS[R]. Albuquerque: Office of Scientific & Technical Information, 1998: 1581-1586.
- 2 Wu X, Mei J. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2-3): 266-270.
- 3 Qi H, Azer M, Singh P. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1): 121-131.
- 4 Qi Huan. Review of INCONEL 718 alloy: Its history, properties, processing and developing substitutes[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(8): 92-100.
齐欢. INCONEL 718(GH4169)高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程, 2012(8): 92-100.
- 5 Liu Fencheng, Lin Xin, Yu Xiaobin, *et al.* Evolution of interface and crystal orientation of laser solid formed GH4169 superalloy during recrystallization[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(4): 463-470.
刘奋成, 林鑫, 余小斌, 等. 激光立体成形 GH4169 合金再结晶过程中的界面和晶体取向演化[J]. 金属学报, 2014, 50(4): 463-470.
- 6 Gao Shoulei, Zhai Qijie, Qi Feipeng, *et al.* Application and development of high-intensity ultrasonic in solidification process of metals[J]. Materials Review, 2002, 16(9): 5-6.
高守雷, 翟启杰, 戚飞鹏, 等. 超声波在金属凝固中的应用与发展[J]. 材料导报, 2002, 16(9): 5-6.
- 7 Fan Jinhui, Zhai Qijie. Effects of physical fields on solidification structure of metals[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(s1): 11-17.
范金辉, 翟启杰. 物理场对金属凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(s1): 11-17.
- 8 Chen Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli. The influence of ultrasonic vibration on the process of laser cladding[J]. Electromachining & Mould, 2005(3): 37-40.
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(3): 37-40.
- 9 Tatkhoa D, Li Dichen, Lu Bingheng, *et al.* Effect of scanning methods on the cracking of the DZ125L superalloy in laser direct metal forming[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003002.
Tatkhoa D, 李涤尘, 卢秉恒, 等. 扫描方式对激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件开裂的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003002.
- 10 Lu Changliang, Hu Fangyou, Hu Bin, *et al.* Effects of ultrasonic vibration on residual stress of K418 alloy plate treated by laser remelting[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2012, 40(5): 7-11.
卢长亮, 胡芳友, 胡滨, 等. 超声振动对激光局部重熔 K418 高温合金残余应力的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(5): 7-11.
- 11 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 59.
- 12 Armstrong R W. The influence of polycrystal grain size on several mechanical properties of materials[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1970, 1(5): 1169-1176.