

# SLM 成形 Inconel 718 合金的组织性能调控研究

张冬云, 高 阳, 曹 明, 黄国亮, 张镡丹, 刘 臻, 牛 雯  
(北京工业大学 激光工程研究院 数字化医疗 3D 打印中心, 北京 100124)

**摘 要:** 针对 Inconel 718 合金零部件传统制造技术中存在的制造极限问题, 基于材料合金显微组织与力学性能之间的相关性等内容, 开展激光选区熔化(SLM)成形 Inconel 718 合金性能的研究, 建立了适用于 SLM 成形 Inconel 718 合金的热处理制度, 提高了该合金的室温与高温力学性能。考虑到 SLM 成形 Inconel 718 合金组织内部晶粒极其细小、内应力积累较大, 传统的热处理制度不再适合新技术成形的零部件, 根据基体中二次相的析出温度区间, 对该合金的传统后热处理制度进行改进。力学性能测试结果证明: 项目组提出的均匀化热处理+固溶处理+双时效的热处理制度能有效改善 SLM 成形 Inconel 718 合金的显微组织和综合力学性能, 并满足锻件的使用要求。

**关键词:** 激光选区熔化; Inconel 718; 数值模拟; 热处理; 力学性能

**中图分类号:** TG 166.7      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.03.011

## Study on Regulation of Microstructure and Mechanical Properties of SLM-Processed Inconel 718 Alloy

ZHANG Dongyun, GAO Yang, CAO Ming, HUANG Guoliang,

ZHANG Pudan, LIU Zhen, NIU Wen

(Beijing Engineering Research Center of 3D Printing for Digital Medical Health, Institute for Laser Engineering,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Aiming at the manufacturing limitation in the conventional technology of Inconel 718 alloy, based on the correlation between its microstructure and mechanical properties, the researches on the Inconel 718 alloy processed by selective laser melting (SLM) are carried out. Finally, the heat treatment scheme suitable for the SLM-processed Inconel 718 alloy is established, which improved its mechanical properties at room temperature and high temperature. Considering the finer grains and the large internal stress accumulating in the structure during the SLM process of Inconel 718 alloy, the conventional heat treatment scheme is no longer suitable for the innovative manufacturing technology. According to the precipitation temperature range of the secondary phase in the matrix, the heat treatment scheme is improved. The test for its mechanical properties shows that the innovative heat treatment scheme with homogenization treatment + solution treatment + double aging treatment can effectively improve its microstructure and comprehensive mechanical properties of the SLM-processed Inconel 718 alloy, and it meets the forging standards.

**Key words:** selective laser melting (SLM); Inconel 718; numerical simulation; heat treatment; mechanical property

## 0 引言

我国航天事业的快速发展对航天发动机的核心零部件提出更高要求。Inconel 718(国内牌号 GH4169)在  $-253\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度之间具有良好的综合力学性能, 已成为航天发动机中重要的高温材料之一<sup>[1-3]</sup>, 在 Inconel 718 合金零部件制造领域的研究

方面, 我国已取得了长足进步, 在长征三号火箭 YF-73 型发动机和长三甲系列火箭 YF-75 型发动机的诸多热端部件均取得应用<sup>[4]</sup>。但随着航天发动机性能要求的不断提高, Inconel 718 合金零件传统制造已面临了重要难题。

Inconel 718 合金传统零部件制造技术为铸造、

收稿日期: 2020-01-19; 修回日期: 2020-04-15

作者简介: 张冬云(1969—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属 3D 打印与激光焊接。

锻造以及粉末冶金等,锻造中模具设计周期长、成本高、难以制造复杂零部件,铸造中易产生缩松缩孔等缺陷,粉末冶金中易产生边界孔洞等缺陷。为解决这些难题,本文提出了采用激光选区熔化成形 Inconel 718 合金的零部件,并利用后热处理调控该合金显微组织与力学性能,使其满足服役要求。

## 1 激光选区熔化过程及其特点

激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术是 20 世纪 90 年代德国 Fraunhofer 激光技术研究所(ILT)发明的金属增材制造技术。该技术基于待建零部件的三维模型,以高能激光束为热源,采用分层制造、逐层叠加的方式将金属粉末成形为三维实体零件<sup>[5-6]</sup>。激光选区熔化技术的特点是以单组份、粉末状的工程材料为原材料,通过材料的完全熔化实现零部件致密度为 100%。上述特点决定该技术可以用于金属零部件的直接制造,因而成为增材制造中最具潜力的方法之一。

增材制造的优势在于无需模具实现单件、小批量复杂形状零部件的成形制造,提高材料的利用率和缩短产品开发周期<sup>[7-8]</sup>。在使用铸锻焊等传统技术制造复杂形状零部件时,存在制造“瓶颈”限制了新型设计方法的使用(如结构拓扑方法),而 SLM 可以制造具有复杂内腔结构以及网格结构零部件的优势则大大拓展了设计人员的思路。航天发动机零部件具有尺寸小、形状复杂、高性能以及数量少的特点,采用 SLM 成形 Inconel 718 合金的成功实施为制造新一代轻质、高性能、结构复杂的航天发动机零部件提供了可能。

SLM 成形 Inconel 718 合金时所用的激光器光束直径在 100  $\mu\text{m}$  左右,所用金属粉末的形状为球形,粉末颗粒直径在 15~50  $\mu\text{m}$  之间,层厚在 10~100  $\mu\text{m}$  之间。在成形过程中,液态金属熔池的尺寸在 100~200  $\mu\text{m}$  之间,停留时间为几纳秒,因而熔池中的液态金属具有超高的温度梯度和超快的冷却速度,这导致合金成形组织晶粒细小,具有较高延伸率。SLM 过程中,高能量激光束作用到粉末床时,粉末材料快速熔化并凝固,从而与周围及前一层已凝固材料形成冶金结合。处于高温状态的液态金属极易发生氧化、氮化从而降低待建零件的机械性能,因此,严格控制成形舱内的氧含量是非常重要的。在成形过程中,成形舱内氧含量一般控制

在 0.1% 以下。此外,SLM 技术对激光器具具有高光束质量的要求,稳定的激光能量输出和恒定的光斑直径,配合合适的激光参数才能保证冶金结合良好,成形件表面质量高,内部无孔洞等缺陷,同时也保证 SLM 制造零部件过程的重现性,保证待建零部件具有较高的机械性能。

## 2 SLM 成形 Inconel 718 合金热处理制度

传统的铸锻态 Inconel 718 通过热处理后,合金的力学性能得到极大改善,热处理制度已经比较成熟。但是正如上文所述,SLM 成形 Inconel 718 过程中熔池金属具有超高的温度梯度和超快的冷却速度,这使得熔池中的液态金属结晶后晶粒细小,合金具有较高的延伸率以及较低的强度。成形件的这种原始组织与铸锻件的原始组织差异较大,因此,开发适用于 SLM 成形的 Inconel 718 合金的热处理制度具有重要意义。传统制造 Inconel 718 零件的热处理制度主要包括 3 种,分别是:1) (1 010~1 065) $^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 1 h, 油冷、空冷或水冷+双时效;2) (950~980) $^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 1 h, 油冷、空冷或水冷+双时效;3) 双时效。其中双时效阶段为 (720 $\pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ , 8 h, 以 50  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  炉冷至 (620 $\pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ , 8 h, 空冷<sup>[9]</sup>。3 种热处理制度可充分提高铸锻件的力学性能,满足航空航天领域的高性能需求。

SLM 成形的 Inconel 718 合金热处理制度的制定需要考虑其原始组织,甚至 SLM 成形过程。以本团队进行的 SLM 成形 Inconel 718 合金过程和 Inconel 718 合金铸造过程的热历史模拟计算结果,研究其热处理制度的差异。铸态以及 SLM 态成形 Inconel 718 合金过程中的热通量如图 1 所示。结果表明:铸造过程中热量主要由铸件芯部向四周扩散,外部的热通量(最大热通量  $3.8 \times 10^5 \text{ W}/\text{m}^2$ )远高于芯部,因此,外部散热快,温度较低。而 SLM 成形过程的温度场较为复杂,熔池边缘部分的热通量约在  $0.5 \times 10^9 \sim 1.5 \times 10^9 \text{ W}/\text{m}^2$  之间,远大于铸件的热通量,说明 SLM 成形过程中的散热速度远大于铸件。

成形过程中热散失的差异直接导致了合金内部显微组织的差异,如图 2 所示。铸态 Inconel 718 合金在凝固过程中(图 2(a)),冷却速度较慢为 0.01~0.33  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,导致合金产生粗大的树枝晶结构,晶粒尺寸较大达到 200  $\mu\text{m}$  左右,二次枝晶臂间距达 45  $\mu\text{m}$ ,且存在较为严重的宏观偏析。相比之下,

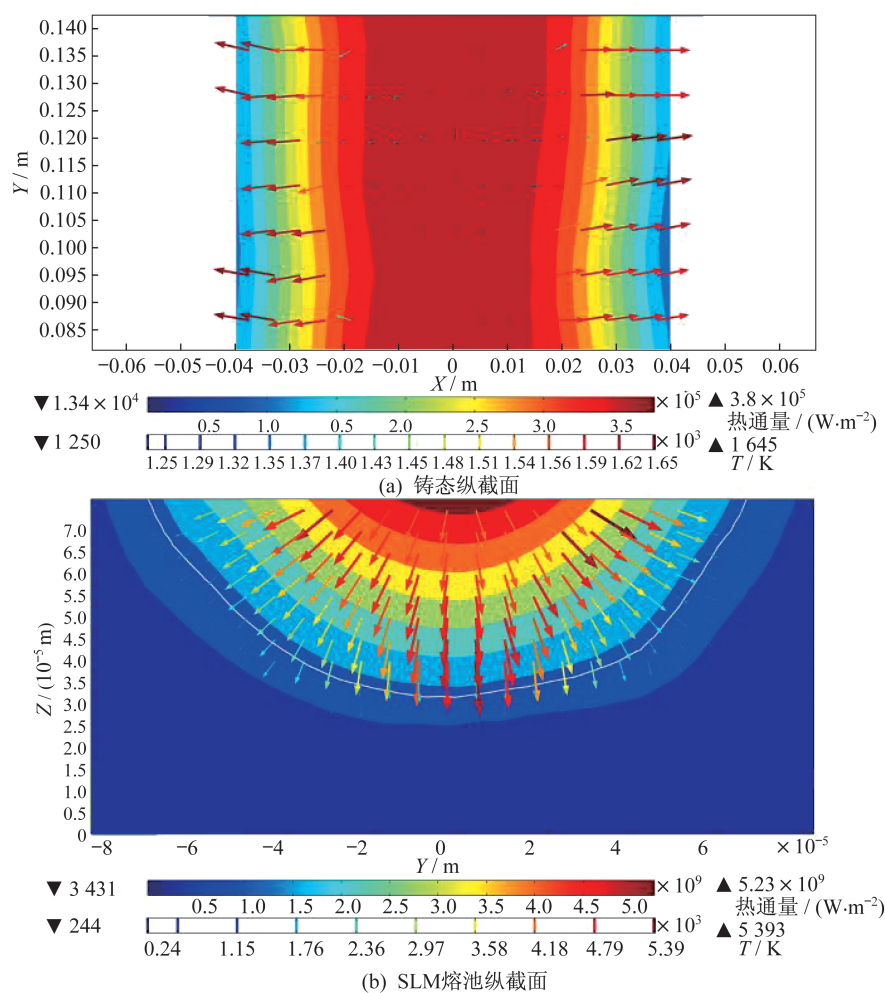


图 1 Inconel 718 合金热通量矢量图

Fig.1 Heat flux vector of Inconel 718 alloy

SLM 成形的 Inconel 718 合金冷却速度极快, 达到  $10^5$  °C/s, 所形成的显微结构非常细小(图 2(b)), 晶

粒尺寸在  $30\sim 40\ \mu\text{m}$  之间, 且仅存在一定程度的微观偏析。可见, 两者之间显微组织差异较大。

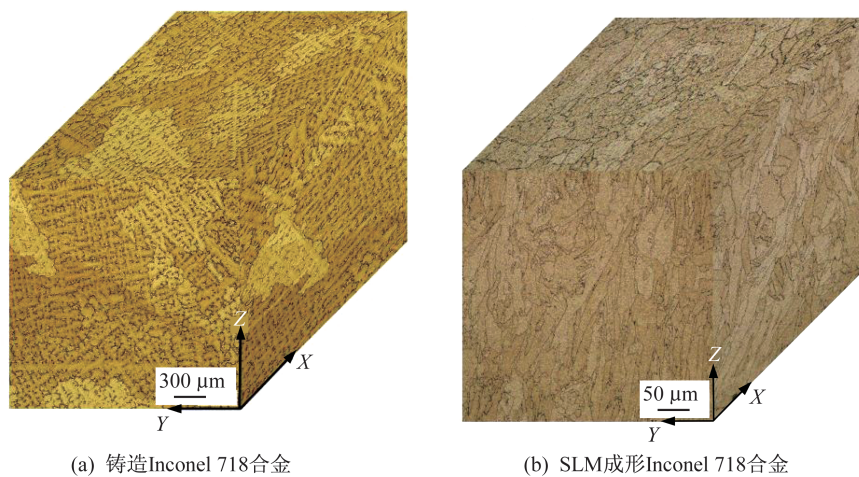


图 2 显微组织差异

Fig.2 Microstructural difference



鉴于铸造 Inconel 718 合金与 SLM 成形 Inconel 718 合金组织之间的差异,本团队基于传统铸锻件的热处理制度,制定了应用于 SLM 成形 Inconel 718 合金的热处理制度,见表 1。

表 1 SLM 成形 Inconel 718 三种固溶热处理制度  
Tab.1 Three kinds of solution heat treatment schemes for Inconel 718 forming by SLM

| 名称          | 固溶热处理阶段                  | 双时效热处理阶段            |
|-------------|--------------------------|---------------------|
| SHT1080     | 1 080 ℃/1.5 h            | 720 ℃/8 h,620 ℃/8 h |
| SHT980      | 980 ℃/1 h                | 720 ℃/8 h,620 ℃/8 h |
| SHT1080+980 | 1 080 ℃/1.5 h, 980 ℃/1 h | 720 ℃/8 h,620 ℃/8 h |

经过相应热处理后的 SLM 成形 Inconel 718 合金依次命名为 SHT1080 态合金、SHT980 态合金和 SHT1080+980 态合金,而未经热处理的 SLM 成形

Inconel 718 合金命名为成形态合金。研究表明:传统的 SHT1080 和 SHT980 两种单固溶处理制度并不完全适合 SLM 成形 Inconel 718 合金,而复合的 SHT1080+980(均匀化热处理+固溶热处理)热处理制度可显著改善合金组织。如图 3 所示,SHT980 态合金中,晶粒尺寸细小。在晶粒内部有大量呈十字交错分布的白色细针状  $\delta$  相析出,在晶界上有短棒状和粒状  $\delta$  相沿晶界析出。在 SHT1080 态合金中,平行于零件成形方向上晶内和晶界无明显大尺寸析出相,组织比较均匀,晶粒仍旧为柱状。在 SHT1080+980 态合金中,晶内无明显的大尺寸析出相,在晶界上有连续的粒状和短棒状的  $\delta$  相析出,这种显微结构更加优异,合金的力学性能将得以优化,如图 4 所示。

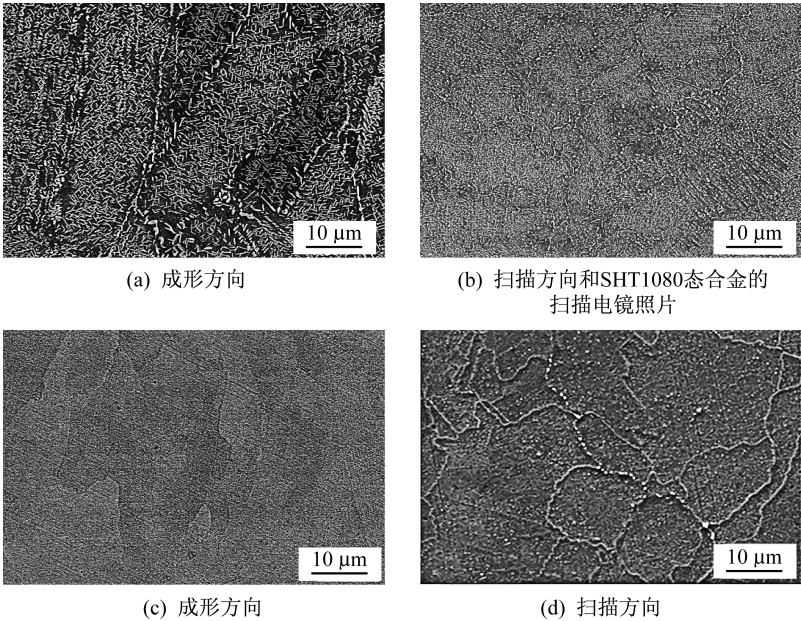


图 3 SHT980 态合金的扫描电镜照片  
Fig.3 SEM images of SHT980 specimens

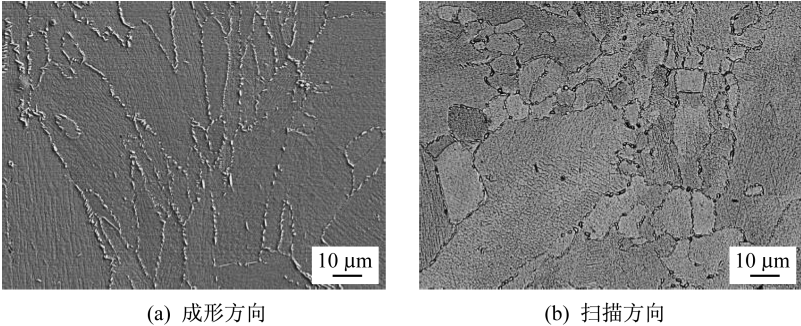


图 4 SHT1080+980 态合金的扫描电镜照片  
Fig.4 SEM images of SHT1080+980 specimens



### 3 热处理制度对 SLM 成形 Inconel 718 合金常温力学性能的影响

本团队测试了 SLM 成形 Inconel 718 合金的常温拉伸性能,该性能可以反映合金在常温下的力学性能,见表 2。性能实验结果表明:成形态 Inconel 718 合金的常温拉伸性能较差,抗拉强度和屈服强度仅为 1 126 和 848 MPa,未满足锻件标准(1 280 和 1 030 MPa)。原因在于 SLM 成形过程冷却速度较快,抑制了强化相的析出,基体内缺乏强化相,严重削弱合金的强度,但造就了合金较高的塑性,其延伸率达到 22.8%,相比锻件提高了 90%。

表 2 常温状态下 SLM 成形 Inconel 718 合金的力学性能  
Tab.2 Mechanical properties of Inconel 718 alloys formed by SLM at room temperature

| 名称              | 抗拉强度/<br>MPa | 屈服强度/<br>MPa | 延伸率/% |
|-----------------|--------------|--------------|-------|
| 标准锻件            | 1 280        | 1 030        | 12.0  |
| 成形态合金           | 1 126        | 848          | 22.8  |
| SHT1080 态合金     | 1 450        | 1 173        | 13.5  |
| SHT980 态合金      | 1 370        | 1 084        | 10.1  |
| SHT1080+980 态合金 | 1 371        | 1 046        | 12.3  |

相比之下,上述 3 种热处理均使合金基体中析出强化相,提高了合金的强度,但牺牲了合金的塑性。其中 SHT1080 态合金获得最高的抗拉强度和屈服强度(1 250 和 1 173 MPa),相比锻件标准分别提高了 13.3% 和 13.9%,合金塑性也较高,延伸率达到 13.5%,相比锻件提高 12.5%。SHT1080+980 态合金获得了良好的综合力学性能,合金抗拉强度达到 1 371 MPa,相比锻件提高了 7.0%,屈服强度达到 1 046 MPa,相比锻件提高了 1.6%,合金塑性同样满足锻件标准,延伸率为 12.3%,相比锻件提高了 2.5%。而 SHT980 态合金的抗拉强度与屈服强度也较高,分别达到 1 370 和 1 084 MPa,但合金的塑性大幅度降低,延伸率仅为 10.1%,未能达到锻件标准。不同的热处理制度造成组织中  $\delta$  相形貌和数量不同,极大地影响了 SLM 成形 Inconel 718 合金的常温力学性能。一般认为, $\delta$  相对合金的强度不会产生影响,但是  $\delta$  相与合金强化相  $\gamma''$  相的成分均为  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ , $\delta$  相的大量析出会消耗合金基体中的 Nb 元素,从而间接造成合金强化相  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  析出量减少,对合金力学性能产生负面影响。由于 SHT1080

态合金基体中  $\delta$  相的析出量最少,有更多的 Nb 元素用以组成强化相,提高了合金的强度,因此, SHT1080 态合金的常温强度最高,其余热处理态合金强度略低。

### 4 热处理制度对 SLM 成形 Inconel 718 合金高温力学性能的影响

Inconel 718 合金被广泛应用在航天发动机热端部件中,服役环境温度较高,高温环境中合金的强度往往会下降,晶界强度也会降低,长期受力部件还会发生高温持久变形。因此,研究合适的热处理制度,使 SLM 成形 Inconel 718 合金获得优异的高温力学性能尤为重要。

不同热处理制度下 SLM 成形 Inconel 718 合金的高温持久性能见表 3。实验过程中温度为 650 °C,应力值为 620 MPa,拉伸时间超过 23 h 后,每间隔 8 h 将施加应力增加 34.5 MPa,直到试样发生断裂。研究结果表明:成形态 Inconel 718 合金具有极差的高温持久性能,在经历 7.03 h 后便发生失效断裂,这是成形态合金晶粒细小、晶界面积广且晶内无强化相造成的。经过不同热处理后,合金的高温持久寿命发生不同程度延长。传统的两种热处理制度 SHT1080 和 SHT980 提高了合金的持久性能,持久寿命分别为 49.7 和 51.7 h,相比锻件标准分别提高了 116.1% 和 124.8%。新型 SHT1080+980 热处理制度显著提高了合金的高温持久寿命,持久性能居 3 种热处理合金中最高位,为 57.3 h,相比锻件提高了 149.1%。原因在于,合金组织除基体中析出大量强化相之外,沿晶分布的  $\delta$  相在合金高温持久变形过程中起到钉扎晶界的作用,提高了晶界强度,显著改善了合金的高温持久性能<sup>[10-11]</sup>。

表 3 650 °C 下不同热处理制度下 SLM 成形 Inconel 718 合金的高温持久性能

Tab.3 Stress rupture properties of Inconel 718 alloys formed by SLM under different heat treatment schemes at 650 °C

| 名称              | 高温持久寿命/h |
|-----------------|----------|
| 标准锻件            | 23.00    |
| 成形态合金           | 7.03     |
| SHT1080 态合金     | 49.70    |
| SHT980 态合金      | 51.70    |
| SHT1080+980 态合金 | 57.30    |

Inconel 718 合金不仅应该具有良好的高温持久性能,还应具有优秀的高温拉伸强度,才能使之在高温环境中保持较高的热强性,避免发生过早失效。不同热处理态 SLM 成形 Inconel 718 合金在 650 °C 下的高温拉伸性能见表 4。研究结果显示: SHT1080+980 热处理制度同样使得 SLM 成形的 Inconel 718 合金获得最优异的高温拉伸性能。合金的抗拉强度达到 1 126 MPa,相比锻件标准提高 12.6%,屈服强度达到 965 MPa,相比锻件提高了 11.9%,延伸率达到 21%,相比锻件提高了 75%,表现出优异的塑性。传统的 SHT1080 和 SHT980 热处理制度对合金高温力学性能的影响差异较大, SHT1080 热处理制度提高了合金的抗拉强度和屈服强度,分别达到 1 091 和 914 MPa,相比锻件标准分别提高 9.1% 和 6.0%,延伸率同样较高,达到 22%,相比锻件提高了 83.3%,表现出较优异的高温拉伸性能。但是 SHT980 热处理制度却不适用于 SLM 成形 Inconel 718 合金,其抗拉强度和屈服强度仅为 992 和 773 MPa,低于锻件标准。

表 4 650 °C 下 SLM 成形 Inconel 718 合金的高温拉伸性能  
Tab.4 Tensile properties of Inconel 718 alloys formed by SLM at 650 °C

| 名称              | 抗拉强度/<br>MPa | 屈服强度/<br>MPa | 延伸率/% |
|-----------------|--------------|--------------|-------|
| 标准锻件            | 1 000        | 862          | 12    |
| 成形态合金           | 914          | 677          | 40    |
| SHT1080 态合金     | 1 091        | 914          | 22    |
| SHT980 态合金      | 992          | 773          | 18    |
| SHT1080+980 态合金 | 1 126        | 965          | 21    |

不同于合金在常温下的力学性能表现, SHT1080+980 态合金表现出的更高高温拉伸强度。在高温环境中,一般来说晶界强度降低,趋于变为黏流态, SHT1080 态合金晶界上没有  $\delta$  相,在高温变形过程中,晶界最先失效使得合金较早发生断裂。SHT1080+980 态合金晶界上有适量的短棒状的  $\delta$  相析出,提高了晶界的强度,因此,其高温拉伸强度高于 SHT1080 态合金。SHT980 态合金晶粒内部有过多的  $\delta$  相析出,不仅对基体有割裂作用,而且严重影响强化相的析出,因此,高温强度最低。

综上所述,传统的热处理制度 SHT980 并不适用于 SLM 成形 Inconel 718 合金高温力学性能的调控,该热处理制度下合金虽表现出较优异的高温持

久性能,但高温拉伸性能较差,抗拉强度和屈服强度均不满足锻件标准。SHT1080 可一定程度提高 SLM 成形 Inconel 718 合金的高温力学性能,合金的高温持久性能和高温拉伸性能均有较优异的表现。复合的热处理制度 SHT1080+980,可以使合金获得最优异的高温持久性能和高温拉伸性能,均满足锻件标准。

## 5 结束语

近年来,我国航天事业快速发展,相应装备更新换代速度较快,但在形状复杂零件的成形制造方面,传统的制造瓶颈依然存在。SLM 作为一种创新型的金属零件直接制造技术,在航天零部件制造领域具有极大的应用潜力。Inconel 718 合金是航天发动机最为重要的高温材料之一,突破了传统制造技术的极限,采用 SLM 技术制造复杂形状 Inconel 718 零件对发动机零部件减重和性能提高具有极大的推动作用。

SLM 技术是最具潜力的金属零件直接制造方法之一,但是由于加工过程快,发生的物理化学冶金反应复杂,对这一过程的理解与控制异常重要。数值模拟再现了上述过程,使这一方面的研究从宏观进入介观甚至微观,有益于对 SLM 加工 Inconel 718 合金的热历史进行深入了解进而控制其凝固过程,抑制缺陷的产生,提高 SLM 过程的重复性。这是提高 SLM 成形件机械性能的基本要求。

采用 SLM 成形的 Inconel 718 合金在无热处理的情况下基体中缺乏强化相,合金常温力学性能和高温力学性能均不能满足锻件标准,需采用后热处理进行合金组织和力学性能的调控。传统铸锻件的热处理制度,因其加工过程的热历史与 SLM 过程差异较大,导致传统热处理制度不能完全适用于 SLM 成形的 Inconel 718 合金,参照传统热处理制度,制定完全适合于 SLM 成形的 Inconel 718 合金的热处理方案尤为重要。在传统热处理制度中,980 °C 单固溶+双时效的热处理制度使得 SLM 成形 Inconel 718 合金的高温力学性能和室温力学性能均不能满足锻件标准,不能应用于 SLM 成形 Inconel 718 合金力学性能的调控。1 080 °C 均匀化热处理+双时效的热处理制度可在一定程度上提高 SLM 成形 Inconel 718 合金的力学性能,但提高程度有限。建议采用新型的 1 080 °C 均匀化热处理+980 °C 固溶

处理+双时效的热处理制度,不仅充分优化 SLM 成形 Inconel 718 合金的显微组织,也显著提高合金的高温拉伸性能、高温持久性能和常温拉伸性能,且均满足锻件标准。

将 SLM 成形 Inconel 718 合金过程的数值模拟、成形过程与后期热处理对组织性能调控的影响等研究内容紧密结合,才能对该技术有更加深入的理解。相关高校、科研院所可在该领域通力合作,不断创新,进一步推进增材制造技术在航天零部件制造领域的应用,进一步推动我国航天事业的发展。

#### 参考文献

- [1] 庄景云,杜金辉,邓群,等.变形高温合金 GH4169[M]. 北京:冶金工业出版社,2006: 1-116.
- [2] ZHANG D Y, FENG Z, WANG C J, et al. Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 alloy processed by selective laser melting and casting. [J]. Materials Science & Engineering, 2018, 724: 357-367.
- [3] ZHANG D Y, NIU W, CAO X Y, et al. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufac-

tured Inconel 718 superalloy [J]. Materials Science & Engineering, 2015, 644: 32-40.

- [4] 师昌绪,钟增镛.中国高温合金五十年[M].北京:冶金工业出版社,2006: 66-67.
- [5] 胡富国,柯林达,肖美立,等.激光选区熔化成形 Ti6Al4V 合金的热处理组织演变机理[J].上海航天, 2019, 36(2): 96-103.
- [6] 柯林达,薛刚,朱海红,等.激光选区熔化成形 SiC\_P/AlSi10Mg 复合材料工艺及性能研究[J].上海航天, 2019, 36(2): 118-124.
- [7] 冯喆.SLM 成形 Inconel 718 合金显微组织和高温力学性能的研究[D].北京:北京工业大学,2018.
- [8] GAO Y, ZHANG D Y, CAO M, et al. Effect of  $\delta$  phase on high temperature mechanical performances of Inconel 718 fabricated with SLM process [J/OL]. 2020 (2019-08-28) [2020-04-15]. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138327>.
- [9] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册:第二卷[M].2版.北京:中国标准出版社,2004: 325.
- [10] 张海燕,张士宏,程明. $\delta$ 相对 GH4169 合金高温拉伸变形行为的影响[J].金属学报,2013, 49(4): 483-488.
- [11] 袁兆静.GH4169 合金  $\delta$  相析出规律及其对高温拉伸性能的影响[D].沈阳:沈阳理工大学,2010.

(上接第 81 页)

#### 参考文献

- [1] WANG Z R, WANG T, KANG D C, et al. The technology of the hydro-bulging of whole spherical vessels and experimental analysis [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1989, 18(1): 85-94.
- [2] 苑世剑,何祝斌,刘钢,等.内高压成形理论与技术的新进展[J].中国有色金属学报,2011, 21(10): 2523-2533.
- [3] WANG Z R, LIU G, YUAN S J, et al. Progress in shell hydro-forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2): 230-236.
- [4] YUAN S J, ZHANG W W, TENG B G. Research on hydro-forming of combined ellipsoidal shells with two axis length ratios [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 124-132.
- [5] HU W, WANG Z R. Deformation analyses of the integrated hydro-bulge forming of a spheroidal vessel from different preform types [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1): 275-283.
- [6] YUAN S J, XU Z, WANG Z R, et al. The integrally hydro-forming process of pipe elbows [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(1): 7-9.
- [7] YUAN S J, WANG Z R. Effect of the hydro bulging

process on mechanical properties of spherical pressure vessels [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(7): 829-834.

- [8] ZHANG W W, YUAN S J. Pre-form design for hydro-forming process of combined ellipsoidal shells by response surface methodology [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9/10/11/12): 1977-1986.
- [9] YUAN S J, ZHANG W W, TENG B G. Research on hydro-forming of combined ellipsoidal shells with two axis length ratios [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 124-132.
- [10] YUAN S J, ZHANG W W. Analysis of shape variation during hydro-forming of ellipsoidal shells with double generating lines [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 107: 180-187.
- [11] ZHANG W W, YUAN S J. Research on hydro-forming of combined prolate ellipsoidal shell with double generating lines [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1/2/3/4): 595-603.