

# 激光增材制造 DZ40M 的微观组织及热处理研究

孟翔<sup>1,2,3,4,5</sup>, 田象军<sup>1,2,3,4,5</sup>, 程序<sup>1,2,3,4,5\*</sup>, 汤海波<sup>1,2,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100191;

<sup>2</sup>北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191;

<sup>3</sup>国防科技工业激光增材制造技术研究应用中心, 北京 100191;

<sup>4</sup>大型整体金属构件激光直接制造教育部工程研究中心, 北京 100191;

<sup>5</sup>大型关键金属构件激光直接制造北京市工程技术研究中心, 北京 100191

**摘要** 采用激光增材制造技术制备了钴基高温合金 DZ40M, 研究了沉积态 DZ40M 的微观组织, 对比分析了不同热处理制度下 DZ40M 的微观组织及力学性能。结果表明, 激光增材制造技术得到的 DZ40M 组织比传统定向凝固的更细, 拉伸强度及塑性都有不同程度的增大。1280 °C 固溶处理能够使 DZ40M 的初生碳化物充分固溶并析出新的共晶组织, 再经 950 °C 或者 1020 °C 的时效处理, 有二次碳化物析出, 时效处理对 DZ40M 力学性能起到良好的强化作用, 并在一定范围内保留其塑性, 其中 1280 °C/4 h+1020 °C/12 h 热处理制度处理试样, 能够在提高室温抗拉强度的同时, 最大程度地保留沉积态塑性。

**关键词** 激光技术; 激光增材制造; 钴基高温合金; 微观组织; 静拉伸力学性能; 热处理

中图分类号 TG132.3+2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1002008

## Microstructure and Heating Treatment of DZ40M Prepared by Laser Additive Manufacturing

Meng Xiang<sup>1,2,3,4,5</sup>, Tian Xiangjun<sup>1,2,3,4,5</sup>, Cheng Xu<sup>1,2,3,4,5\*</sup>, Tang Haibo<sup>1,2,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>3</sup>Research and Application Center of Laser Additive Manufacturing for Defense Industries, Beijing 100191, China;

<sup>4</sup>Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing for Large Metallic Components, Beijing 100191, China;

<sup>5</sup>Beijing Engineering Technological Research Center on Laser Direct Manufacturing for Large Critical Metallic Components, Beijing 100191, China

**Abstract** Cobalt-based superalloy DZ40M sample is prepared by laser additive manufacturing method and its microstructure is studied. The microstructure and mechanical properties of the alloy under different heat treatments are compared. Results show that the dendrites size of DZ40M microstructure obtained by the laser additive manufacturing method is finer than the traditional directional solidification structure, and the tensile strength and plasticity are improved in different degrees. Solution treatment under 1280 °C can make the primary carbide achieve full solid solution and new eutectic structure appears. Then after 950 °C or 1020 °C aging treatment, the secondary carbides are obtained. The samples after aging treatment show better mechanical properties. Especially, 1280 °C/4 h+1020 °C/12 h heat treatment system can improve the tensile strength at room temperature and keep the maximum degree of ductility of the deposition state sample.

**Key words** laser technique; laser additive manufacturing; Co-based superalloy; microstructure; tensile properties; heating treatment

**OCIS codes** 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-01-16; 录用日期: 2018-06-12

\* E-mail: chengxu@buaa.edu.cn

# 1 引 言

DZ40M 高温合金具有良好的高温力学性能,主要应用于航空发动机的静态构件。相比 X40 合金,传统定向凝固方法得到的 DZ40M 合金的室温及高温强度、初熔温度和塑性有一定的提升,这主要依赖于微合金化的固溶强化作用及定向凝固消除横向晶界的强化作用<sup>[1-2]</sup>。姜文辉等<sup>[3]</sup>的研究表明,使用定向凝固方法能够得到定向性良好的、平行于 $\langle 001 \rangle$ 方向生长的定向凝固组织,且枝晶间和晶界处存在初生碳化物  $M_7C_3$  和 MC。然而,传统定向凝固方法得到的合金的树枝晶粗大,强度和塑性仍存在提升的空间。此外,传统定向凝固方法得到的合金经热处理后,其塑性往往会受到严重损坏,因此,通常在铸态下使用该材料<sup>[4-5]</sup>。

激光增材制造技术是金属粉末在激光束下原位熔化、快速凝固并逐层堆积,从而得到晶粒

细小、成分均匀、组织致密的零件成形加工技术,所制备的零件具有优异的综合力学性能<sup>[6-10]</sup>。目前,已开展的研究主要针对钴基合金激光熔覆和性能测试<sup>[11-13]</sup>,但采用激光增材制造技术制备 DZ40M 合金的相关研究鲜有报道。本文通过激光增材制造技术制备了 DZ40M 合金,研究了其微观组织特征,分析了组织形成机理;在获得优异综合力学性能的同时,获取了更大的热处理窗口。同时,研究了不同热处理制度对 DZ40M 合金微观组织及性能的影响。

## 2 实验方法

选用 DZ40M 粉末作为实验原料,粉末粒径为  $75 \sim 250 \mu\text{m}$ ,其化学成分见表 1。采用激光增材制造技术制备了 DZ40M 成形件,在普通碳素钢 A3 基板上进行单道单向扫描,激光束直径为  $5 \sim 6 \text{ mm}$ ,功率为  $2700 \text{ W}$ ,扫描速度为  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

表 1 DZ40M 粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of DZ40M alloy powder (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	W	Al	Ta	Mo	Ti	Zr	B	Si	Mn	P	S	Co
Content	0.47	25.26	10.57	7.67	0.91	0.37	0.23	0.20	0.15	0.013	0.10	0.10	0.005	0.0013	Bal.

采用  $1240, 1260, 1280 \text{ }^\circ\text{C}$  保温  $4 \text{ h}$  的三种方法固溶处理成形件,利用 STA-449F3 型同步热分析仪测试成形件的差示扫描量热(DSC)曲线,分析合适的固溶处理温度;然后,采用  $950, 1020 \text{ }^\circ\text{C}$  保温  $12 \text{ h}$  的两种方式分别进行成形件的时效处理;固溶、时效处理皆采用随炉升温 and 空冷。

采用恒-FM800 硬度计测试沉积态及热处理态成形件的硬度,并测试室温和  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  的静拉伸力学性能。金相试样经抛光后进行腐蚀,腐蚀剂为  $50 \text{ mL HCl}$ 、 $50 \text{ mL}$  乙醇和  $5 \text{ g CuCl}_2$  混合液,使用 LEICA DM4000 金相显微镜(OM)、MELIN Compact 扫描电子显微镜进行背散射电子图像(BSE)表面形貌观察,使用能谱仪(EDS)进行元素分布分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 沉积态显微组织

沉积态 DZ40M 成形件及其 OM 形貌如图 1 所示。可以看出,成形件表面没有明显的裂纹或孔洞缺陷,且金相组织内无明显缺陷。从图 1(b)可以看出,成形件组织主要由沿沉积方向生长的树枝晶组

成。这是因为激光沉积过程中熔池具有较大的温度梯度,因此,界面前沿无形核过程,树枝晶直接外延生长而获得具有定向生长特性的组织<sup>[14]</sup>。由图 1(c)可知,成形件的一次枝晶间距为  $40 \sim 66 \mu\text{m}$ ,而传统定向凝固方法得到的 DZ40M 合金的一次枝晶间距为  $250 \sim 380 \mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>,激光增材制造技术制备的成形件的枝晶组织明显细化。

沉积态 DZ40M 成形件的 BSE 图像如图 2 所示。可以发现,在晶界处和枝晶间有连续分布的灰色骨架状区域及分散分布的白色亮点,且晶界处和枝晶间的灰色区域大部分由共晶组织组成。沉积态 DZ40M 成形件 EDS 测试结果见表 2。由表 2 可知,共晶组织中深色区域主要为 Co 元素,浅色区主要为富集 Cr 元素,因此,共晶组织是由  $\gamma$  基体和富 Cr 的初生碳化物  $M_7C_3$  交替排列形成的,共晶中或周边少量的深灰色颗粒状组织是 Cr 元素含量更大的初生碳化物  $M_{23}C_6$ ;远离共晶组织或者在共晶组织附近的白色亮点是富 Zr、Ta、Ti 等元素,此处的碳化物可能是 MC<sup>[1-2,15]</sup>。这种共晶和块状 MC 组织与传统定向凝固方法得到的呈骨架状的初生碳化物  $M_7C_3$  和汉字草书体的初生碳化物 MC 存在较大区别<sup>[15]</sup>。

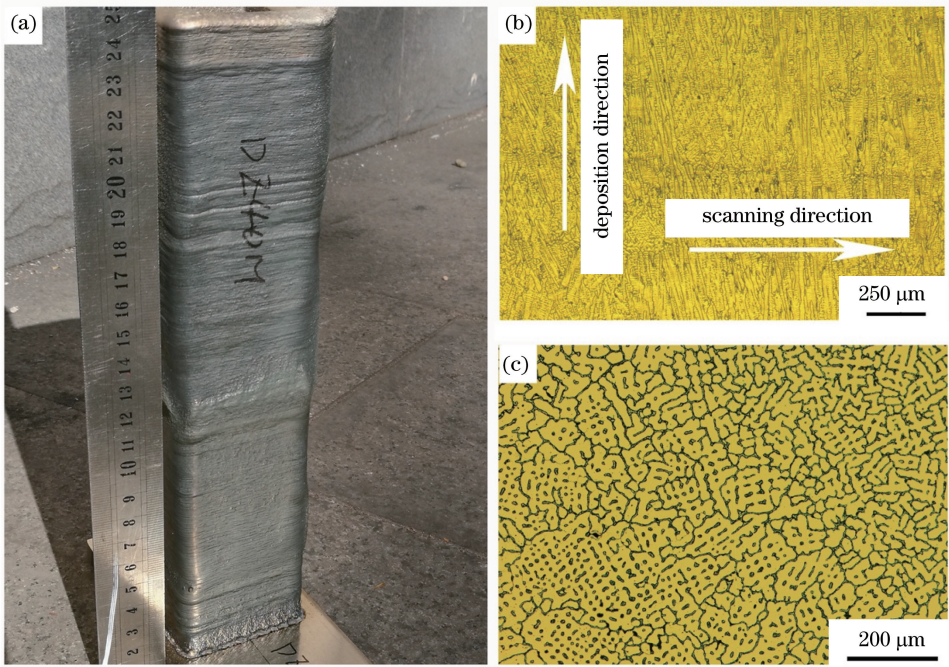


图 1 沉积态 DZ40M 成形件。(a)外形;(b)垂直于扫描方向显微组织;(c)垂直于沉积方向显微组织  
Fig. 1 Deposition state DZ40M. (a) Sample; (b) microstructure perpendicular to scanning direction; (c) microstructure perpendicular to deposition direction

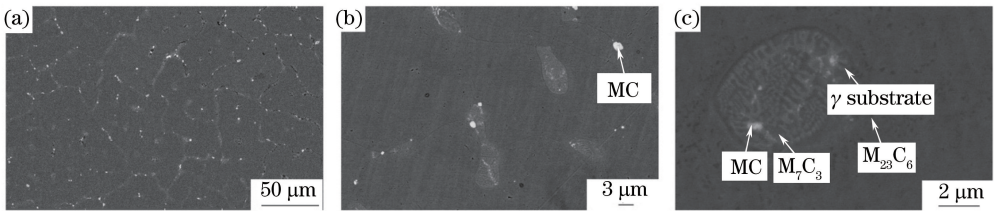


图 2 沉积态 DZ40M 成形件的 BSE 图像。(a) 1840 倍;(b) 2160 倍;(c) 7430 倍  
Fig. 2 BSE images of deposition state DZ40M. (a) 1840 times; (b) 2160 times; (c) 7430 times

表 2 沉积态 DZ40M 成形件 EDS 测试结果(原子数分数,%)

Table 2 Results of EDS for deposition state DZ40M (atom fraction, %)

Speculated substances	C	Ti	Cr	Co	Ni	Zr	Ta	W
$M_{23}C_6$	48.04	0.18	26.63	18.94	3.08	0.19	0	2.7
$M_7C_3$	53.13	2.33	10.86	20.73	3.67	5.14	1.14	2.47
MC	55.98	4.01	19.71	9.66	1.59	2.96	2.25	3.85

同时,在晶界处和晶内分散着一些亮白色富集高熔点元素 W、Ta、Ti 等的初生碳化物 MC,这种碳化物从液相中直接析出,可逐渐迁移到枝晶间和晶界区域,元素富集使得在共晶组织中也有少量 MC 碳化物析出。MC 对合金强化具有十分重要的作用,一方面,晶内均匀析出的细小颗粒状 MC 能够起到沉淀强化的作用;另一方面,以颗粒状在晶界处呈现不连续链状析出的 MC 能够强化晶界,消除合金的缺口敏感性。在共晶组织周围,弥散分布的颗粒状碳化物  $M_{23}C_6$  也具有弥散强化的效果,可进一步强化合金<sup>[2,15]</sup>。

### 3.2 热处理组织

#### 3.2.1 固溶对组织的影响

不同固溶处理条件下 DZ40M 成形件的组织形貌如图 3 所示。可以看出,1240 °C 和 1260 °C 固溶处理的成形件中都存在树枝晶组织,说明成形件固溶不够充分。1280 °C 固溶处理的成形件的金相组织均匀,晶粒尺寸增大,初生碳化物大部分固溶进入基体弥散分布,该温度的固溶处理效果最理想。沉积态 DZ40M 成形件的 DSC 曲线如图 4 所示。可以看出,第一个吸热峰温度为 1277 ~ 1289 °C,对应初生碳化物的熔化温度范围;第二个

吸热峰温度为 1404~1429 °C,接近 DZ40M 合金的熔化温度。结合图 3~4 可知,1280 °C 保温 4 h

为最佳固溶处理方案,后续实验采用该固溶处理方法进行。

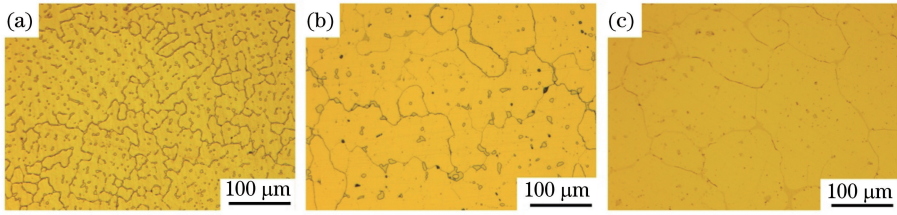


图 3 不同固溶处理条件下 DZ40M 成形件的组织形貌。(a) 1240 °C;(b) 1260 °C;(c) 1280 °C

Fig. 3 Microstructure of DZ40M samples under different solid-solution conditions. (a) 1240 °C; (b) 1260 °C; (c) 1280 °C

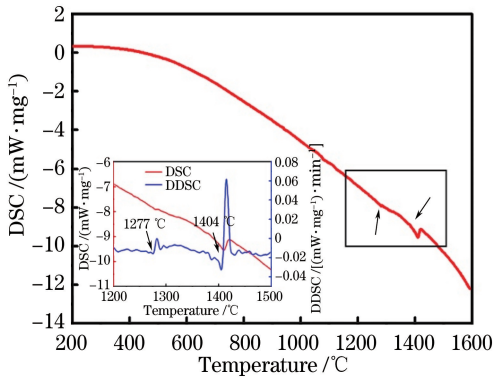


图 4 沉积态 DZ40M 试样 DSC 曲线

Fig. 4 DSC curve of deposition state DZ40M

不同固溶处理条件下 DZ40M 成形件的 BSE 图像如图 5 所示。可以看出,1240 °C 固溶处理的成形件中有最多的白色亮斑;而经过 1280 °C 固溶处理的成形件的晶界处有新的组织析出,如图 5(d)所示。不同固溶处理条件下 DZ40M 成形件 EDS 测试

结果见表 3。在固溶处理过程中,成形件中始终保留有富集 W、Ta、Zr、Ti 等元素的碳化物 MC,呈现为分散的块状白色斑点;1280 °C 固溶处理后,成形件中有新共晶组织析出,共晶组织内部呈现为深灰色(A 区域)、浅灰色(B 区域)和亮白色(C 区域),对其进行成分分析表明,颜色由深到浅表现为 Cr 元素含量逐渐减小,W 元素含量逐渐增大,且都不含 Ta、Zr 元素。由此推测,共晶组织中 A、B、C 区域分别为碳化物  $M_{23}C_6$ 、 $M_3C_2$ (或  $M_7C_3$ )及  $M_6C$ <sup>[1-2,15]</sup>。

根据推测,固溶处理过程中, $\gamma$  基体和  $M_7C_3$  的共晶组织首先固溶消失。当固溶温度达到 1280 °C 时,熔点较高的初生碳化物 MC 也发生固溶,分解为  $Cr_{23}C_6$  和  $M_6C$  等碳化物;晶界处作为固溶扩散的快速通道,优先发生元素的重新排布,Cr 元素首先偏聚,重新析出深色片状二次碳化物  $M_{23}C_6$  并逐渐聚集增大,导致其周边 Cr 元素含量减小,其余高熔点元素富集,从而在  $M_{23}C_6$  周围析出富集 Cr、W、

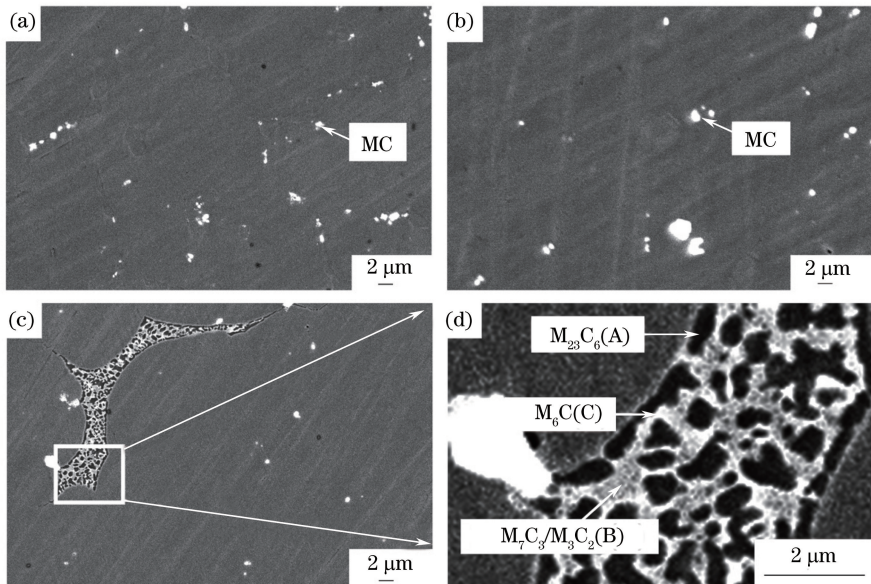


图 5 不同固溶处理条件下 DZ40M 成形件 BSE 图像。(a) 1240 °C;(b) 1260 °C;(c)(d) 1280 °C

Fig. 5 BSE images of DZ40M samples under different solid-solution conditions. (a) 1240 °C; (b) 1260 °C; (c)(d) 1280 °C

Ni、Ta 等元素的白色二次碳化物  $M_6C$ ，形成固溶态下  $Cr_{23}C_6$  和  $M_6C$  的共晶组织，并析出少量  $M_3C_2$ 、

$M_7C_3$  碳化物。同时，仍然有少量初生碳化物形成块状 MC 在二次碳化物周围析出。

表 3 不同固溶处理条件下 DZ40M 成形件 EDS 测试(原子数分数, %)

Table 3 Results of EDS for DZ40M samples under different solid-solution conditions (atom fraction, %)

Solid-solution temperature / °C	Speculated substances	C	Ti	Cr	Co	Ni	Zr	Ta	W
1240	MC	73.96	10.43	2.43	1.99	0.4	2.6	6.33	1.84
1260	MC	57.03	10.15	3.72	5.35	0.89	11.46	9.25	2.15
	$M_{23}C_6$	46.57	0.3	34.92	13.18	1.76	0	0	3.23
1280	$M_7C_3/M_3C_2$	36.41	0.32	22.61	31.66	5.15	0	0	3.86
	$M_6C$	42.5	0	19.46	27.14	3.76	0	0	7.13
	MC	66.43	12.51	1.89	1.73	0	5.89	7.45	4.11

### 3.2.2 时效对组织的影响

不同热处理条件下 DZ40M 成形件的 BSE 图像如图 6 所示。可以看出，成形件热处理后，固溶处理过程中析出的共晶组织仍然存在，但是形态、尺寸和分布上存在一些差异。首先，时效处理成形件组织的晶界明显增大，经 1020 °C 时效处理成形件的晶界增大更明显。其次，经过时效处理后成形件共晶组织的分布分散，共晶组织中的碳化物  $M_{23}C_6$  增大，碳化物  $M_6C$  减小；这一现象在 1020 °C 固溶处理的成形件上表现得更明显。

观察图 6(b)~(c)和图 6(e)~(f)可知，成形件共晶组织中出现的少量浅灰色  $M_3C_2$ 、 $M_7C_3$  因转化为更为稳定的组织而缩小甚至消失； $M_6C$  逐渐转变为  $Cr_{23}C_6$ ，因此，共晶组织中深灰色  $Cr_{23}C_6$  逐渐增大，白色  $M_6C$  减小。分散的、远离共晶组织或在共晶组织周围的块状白色区域 MC 因偏聚较多高熔点元素而变化不显著。时效条件下，成形件中未观察到传统定向凝固方法制备的合金中时效状态下的针状组织<sup>[16-17]</sup>，这可能与材料沉积时热循环过程导致元素分布和定向凝固方法存在差异有关。

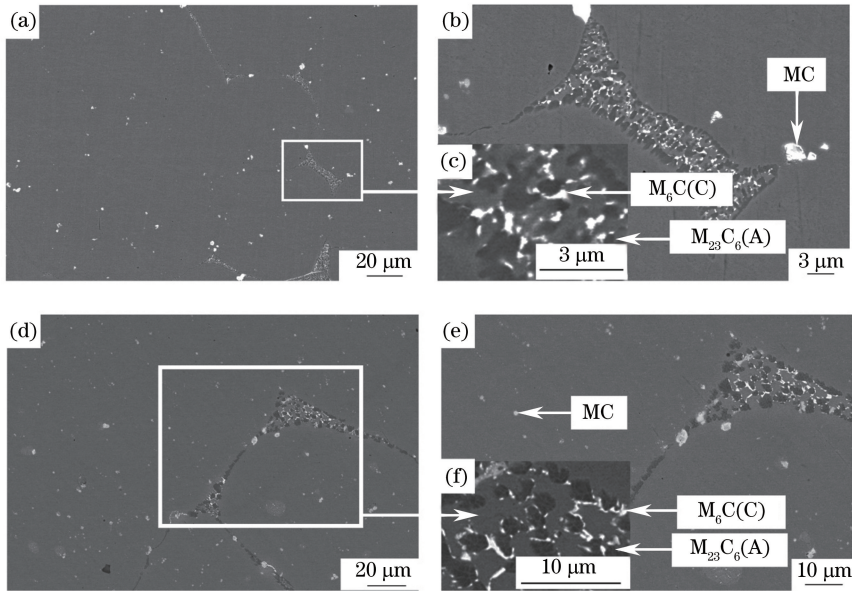


图 6 不同热处理条件下 DZ40M 成形件的 BSE 图像。(a)~(c) 950 °C；(d)~(f) 1020 °C

Fig. 6 BSE images of DZ40M samples under different aging conditions. (a)~(c) 950 °C；(d)~(f) 1020 °C

### 3.3 室温及高温力学性能

不同条件下 DZ40M 成形件的静拉伸力学性能见表 4。可以看出，激光增材制造技术得到的 DZ40M 成形件在室温和高温条件下的抗拉强度明显大于传统定向凝固方法的，并且室温条件下成形件断后伸长率达到 24.8%，而传统定向凝固方法的

伸长率为 40%<sup>[17]</sup>，非定向凝固方法得到的 X40 合金伸长率仅有 8%<sup>[16]</sup>；900 °C 条件下，成形件的伸长率达到 71.5%，接近于传统定向凝固方法的。激光增材制造成形件的室温抗拉强度比传统定向凝固方法的增大了 15.2%，900 °C 条件下的抗拉强度增大了 13.1%。因此，在成形件抗拉强度增大的基础上，

表 4 不同条件下 DZ40M 成形件的静拉伸力学性能

Table 4 Static tensile properties of DZ40M samples under different conditions

State	Tensile temperature / °C	Ultimate tensile strength / MPa	Elongation / %
Laser deposition	Room-temperature	893±26	24.8±7.7
	900	345±6	71.5±5.5
1280 °C/4 h+950 °C/12 h	Room-temperature	1030±15	12.5±0.5
	900	343±8	60.5±6.5
1280 °C/4 h+1020 °C/12 h	Room-temperature	1003±34	24.5±1.3
	900	298±8	56.0±12.0
As cast	Room-temperature [17]	775	40
	900 [18]	305	95

塑性略有减小,整体抗拉强度和塑性的结果与制造过程中高能激光束使合金快速熔化和快速凝固得到的组织有直接关系。

首先,激光增材制造技术得到的成形件组织细化明显且较均匀,从而使材料的强度和塑性得到提升。除此之外,在室温条件下,拉伸强度主要取决于晶界的强化作用,初生碳化物连接而成的晶界起到骨架增强作用,有效阻止位错滑移;同时,不连续存在的初生碳化物 MC 和共晶组织能够有效消除缺口敏感性,使材料塑性上升,并且分布更为细小、均匀、分散的共晶组织有利于其强化作用,从而提升合金的综合性能。

经过热处理后成形件的室温抗拉强度有较大程度提升,两种热处理状态下成形件的抗拉强度均大于 1000 MPa,并且经过 1280 °C 保温 4 h 固溶处理和 1020 °C 保温 12 h 时效处理的成形件,较好地保留了沉积态的塑性。热处理在没有严重损坏材料塑性的基础上,提高了材料的抗拉强度。

对比两种不同时效温度下热处理成形件的组织发现,两者组织形貌上没有显著差异,但是力学性能存在区别,尤其是室温条件下的材料塑性。结合图 6(b)、(e)可知,1020 °C 下时效处理的成形件晶界处共晶组织更疏松分散,  $M_{23}C_6$  增大更明显,  $M_6C$  区域明显减小;950 °C 时效处理成形件晶界共晶组织边缘处存在较为连续的  $M_{23}C_6$  边界,而 1020 °C 时效处理的呈现不连续链状。室温条件下,材料晶界处二次碳化物在起到强化作用的同时,较为疏松的分布方式及不连续链状分布的边界能够显著减小材料的缺口敏感性,阻碍裂纹扩展,提升材料塑性<sup>[1-2,19-20]</sup>。两种因素的共同作用导致材料在 1020 °C 时效温度下的成形件在提高室温拉伸强度的同时,较好地保留了其室温塑性。

同时,材料高温拉伸强度较传统定向凝固方法提升,尤其是沉积态试样。在最佳固溶处理条件下,

950 °C 保温 12 h 时效处理成形件高温拉伸强度与沉积态的相近,而 1020 °C 保温 12 h 时效处理成形件高温拉伸强度减小。950 °C 保温 12 h 时效处理成形件碳化物  $M_{23}C_6$  析出更为均匀,沉淀强化作用使其高温条件下拉伸强度提高,而 1020 °C 保温 12 h 时效处理成形件的二次碳化物分布不均匀,这一现象可能与高温条件下疏松分布的晶界处又是拉伸薄弱环节,易在晶界处发生断裂有关,从而导致其高温拉伸强度减小。

## 4 结 论

采用激光增材制造技术制备了钴基高温合金 DZ40M,研究了沉积态 DZ40M 的微观组织,对比分析了不同热处理制度下 DZ40M 的微观组织及力学性能特征,得到以下结论。1)激光增材制造制备的 DZ40M 成形件枝晶组织得到细化,并存在  $\gamma$  基体和初生碳化物  $M_7C_3$  共晶以及块状 MC 组织;2)1280 °C 是激光增材制造 DZ40M 成形件的最佳固溶处理温度,成形件经过 1280 °C 保温 4 h 固溶处理可析出  $Cr_{23}C_6$  和  $M_6C$  组成的共晶;3)沉积态 DZ40M 成形件的室温和高温拉伸强度都大于传统定向凝固的,且塑性与传统定向凝固方法的相当;4)1280 °C 保温 4 h 固溶处理和 1020 °C 保温 12 h 时效处理是激光增材制造 DZ40M 成形件的最佳热处理制度。

## 参 考 文 献

- [1] Sims C T. A contemporary view of cobalt-base alloys [J]. JOM, 1969, 21(12): 27-42.
- [2] Guo J T. Materials science and engineering for superalloys[M]. Beijing: Science Press, 2008. 郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] Jiang W H, Guan H R, Hu Z Q. Study on heat treatment of DZ40M directionally solidified cobalt

- base superalloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2001, 21(1): 1-5.
- 姜文辉, 管恒荣, 胡壮麒. 定向凝固钴基高温合金 DZ40M 的热处理研究[J]. *航空材料学报*, 2001, 21(1): 1-5.
- [4] Zhang S, Zhang C H, Sun T L, *et al.* Study on microstructure and corrosion resistance of laser cladding Co-based alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(9): 860-864.
- 张松, 张春华, 孙泰礼, 等. 激光熔覆钴基合金组织及其抗腐蚀性能[J]. *中国激光*, 2001, 28(9): 860-864.
- [5] Wang S F, Li S S, Sha J B. Microstructure and mechanical properties of Co-Al-W-Ta-Nb alloys at room- and high-temperatures [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(5): 1003-1008.
- 王少飞, 李树索, 沙江波. 钴基合金 Co-Al-W-Ta-Nb 的显微组织与高低温力学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(5): 1003-1008.
- [6] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components [J]. *Scientia Sinica*, 2015, 45(9): 1111-1126.
- 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. *中国科学*, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [7] Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [8] Liu X X, Cheng X, Wang H M, *et al.* Influence of processing conditions on formation of stray grains in DD5 single-crystal superalloys by laser melting multi-traced deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0602009.
- 刘小欣, 程序, 王华明, 等. 不同工艺条件对激光熔覆多道沉积 DD5 单晶高温合金杂晶的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0602009.
- [9] Yang Y Q, Tian N L. Laser cladding of high temperature alloys and their application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, 22(8): 632-636.
- 杨永强, 田乃良. 激光熔覆高温合金及其应用[J]. *中国激光*, 1995, 22(8): 632-636.
- [10] Zhao W W, Lin X, Liu F C, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming Inconel 718 superalloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3220-3225.
- 赵卫卫, 林鑫, 刘奋成, 等. 热处理对激光立体成形 Inconel 718 高温合金组织和力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3220-3225.
- [11] Zhou F, Hou Q Y. Microstructure and wear resistance of plasma arc cladding  $Y_2O_3$ /cobalt-based alloy coating [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(2): 294-298.
- 周芳, 侯清宇. 等离子电弧熔覆  $Y_2O_3$ /钴基合金的组织结构及耐磨性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(2): 294-298.
- [12] Si S H, Xu K, Liu Y L, *et al.* Microstructure and performance of laser cladding Co+Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite coating [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(4): 45-48.
- 斯松华, 徐锬, 刘月龙, 等. 激光熔覆 Co+Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合涂层的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2006, 27(4): 45-48.
- [13] Liu Q B, Zhu W D, Chen J. Microstructure and wear resistance of Co-based alloy coating on high temperature alloy by laser surface cladding [J]. *Journal of Guizhou University of Technology*, 2000, 29(2): 49-53.
- 刘其斌, 朱维东, 陈江. 高温合金激光表面熔覆钴基合金涂层组织与耐磨性能[J]. *贵州工业大学学报*, 2000, 29(2): 49-53.
- [14] Tan H. Temperature measurement and research on microstructure controlling in laser rapid forming process [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- 谭华. 激光快速成形过程温度测量及组织控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [15] Yao X D, Zhang J H, Zhang Z Y, *et al.* Morphology and distribution of carbides in directionally solidified cobalt base superalloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1995, 31(12): 543-548.
- 姚向东, 张静华, 张志亚, 等. 定向凝固钴基高温合金中碳化物形态和分布[J]. *金属学报*, 1995, 31(12): 543-548.
- [16] Jiang W H, Yao X D, Guan H R, *et al.* Microstructures and properties of DZ40M Co-base superalloy after long-term aging at 950 °C [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, 34(12): 1289-1294.
- 姜文辉, 姚向东, 管恒荣, 等. DZ40M 钴基高温合金 950 °C 长期时效后的组织与性能[J]. *金属学报*, 1998, 34(12): 1289-1294.
- [17] Jiang W H, Guan H R, Hu Z Q. Effects of heat treatment on microstructures and mechanical properties of a directionally solidified cobalt-base superalloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 271(1/2): 101-108.
- [18] Committee on Practical Engineering Materials. *Practical engineering materials manual. Volume 2, wrought superalloy and casting superalloy [M].*

- Beijing: China Standards Press, 2002.
- 《工程材料实用手册》委员会. 工程材料实用手册. 第2卷, 变形高温合金 铸造高温合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [19] Jiang W H, Yao X D, Guan H R, *et al.* High temperature low cycle fatigue of DZ40M cobalt-base superalloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, 34(4): 378-383.
- 姜文辉, 姚向东, 管恒荣, 等. DZ40M 合金高温低周疲劳性能及其断口分析[J]. *金属学报*, 1998, 34(4): 378-383.
- [20] Yuan C, Guo J T, Wang T L, *et al.* Effect of revert proportion on microstructure and property of a cast cobalt-base superalloy K640S[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 36(9): 961-965.
- 袁超, 郭建亭, 王铁利, 等. 返回料添加比例对铸造钴基高温合金 K640S 组织与性能的影响[J]. *金属学报*, 2000, 36(9): 961-965.