

激光沉积修复 GH738 高温合金的组织与拉伸性能

卞宏友¹, 翟泉星¹, 李 英², 杨 光¹, 王 伟¹, 王 维¹

¹沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136;

²中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司焊接研究所, 辽宁 沈阳 110043

摘要 对 GH738 镍基高温合金贯通槽式损伤试样进行激光沉积修复, 分析了修复试样的显微组织及室温拉伸性能。结果表明: 激光沉积修复区组织为典型的外延生长柱状枝晶, 枝晶垂直于基体, 并趋向激光沉积高度方向贯穿多个沉积层连续生长, 修复区中心的枝晶取向出现了较大偏转; 修复区内未发现 γ' 相, 且碳化物含量较少, 枝晶干上主要为富含 Cr、Co 的颗粒状 $M_{23}C_6$ 型碳化物, 枝晶间存在少量尺寸相对较大的立方体 MC 型碳化物, 其 Ti、Mo 含量较高。相比于基体, 热影响区中 γ' 相的尺寸明显增大, 部分尺寸超过了 200 nm, 平均间距明显增大; 热影响区内的碳化物含量减少, 且部分碳化物发生分解。激光沉积修复试样的室温抗拉强度为锻件的 78.2%, 断后伸长率为锻件的 69.2%。

关键词 激光技术; 激光沉积修复; GH738 高温合金; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号 TH164

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1002003

Microstructure and Tensile Properties of Laser Deposition Repair GH738 Superalloy

Bian Hongyou¹, Zhai Quanxing¹, Li Ying², Yang Guang¹, Wang Wei¹, Wang Wei¹

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China;

²Welding Research Institute, Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Aero Engine Corporation of China, Shenyang, Liaoning 110043, China

Abstract The GH738 nickel-based superalloy through-groove sample is repaired by laser deposition, and the microstructure and room temperature tensile properties of the repaired sample are analyzed. The results show that the microstructure of repair zone presents typical characteristics of columnar dendrite with epitaxial growth, and the dendrites are perpendicular to the substrate and tend to grow along the deposition height direction through multiple layers. The dendritic orientation in the center of the repair area shows a large deflection. No γ' phase is found in the repair area, the content of carbide in the area is less, the $M_{23}C_6$ type carbides rich in Cr and Co mainly exist in the dendrite stem, and a few cubic MC carbides with relatively larger size and higher contents of Ti and Mo exist among the dendrites. Compared to the substrate, the size of γ' phase in the heat affected zone obviously increases, the size of partial γ' phase exceeds 200 nm and the average distance between them increases obviously. The content of carbide in the heat affected zone reduces, and partial carbides decompose. The room temperature tensile strength and elongation of the laser deposition repair sample is 78.2% and 69.2% of those of the forging, respectively.

Key words laser technique; laser deposition repair; GH738 superalloy; microstructure; tensile property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850; 160.3900

收稿日期: 2017-05-23; 收到修改稿日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(51375316)、航空科学基金(2014ZE54028)、辽宁省自然科学基金(20170540690)

作者简介: 卞宏友(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光沉积成形、修复技术方面的研究。

E-mail: bianhongyou@sau.edu.cn

1 引 言

GH738 合金(美国牌号 Waspaloy)属于 γ' 相沉淀强化型高温合金,该合金在 760~870 °C 具有较高的屈服强度和较好的抗疲劳性能,组织和性能比较稳定,广泛应用于航空、航天、化工等领域,适用于制造航空发动机的涡轮盘、封严圈等零部件^[1]。GH738 合金零部件在恶劣环境下服役时易出现疲劳裂纹、磨损等失效方式。如果直接更换新的零部件,会导致生产成本较高;若将失效的零部件进行快速修复,不仅会大大缩短维修周期,而且能大幅降低生产成本^[2]。

激光沉积修复技术以损伤零件为基体,采用逐层熔化堆积的方式对损伤部位进行三维成形修复^[3],该技术的热输入小,能实现近净成形修复,且工件的应力变形小,在高温合金等零部件的快速、高质修复方面具有显著优势。

国内外学者针对 IN718、GH738、K418、GH4169 等合金的激光沉积修复技术进行了大量研究^[4-8],结果表明,修复区的显微组织和力学性能与基体的显著不同。本文以 GH738 合金贯通槽损伤试样为对象进行激光沉积修复实验,着重研究了修复区不同区域的显微组织及其对室温拉伸性能的影响,期望能为激光修复工艺参数的优化以及后续的热处理工艺提供指导依据。

2 实验设备与条件

实验用激光沉积修复设备主要包括 6 kW 光纤激光器、臂式三轴平移运动系统、集成冷却系统和保护气系统的同轴熔覆头、双桶送粉器,以及配有气体循环净化系统的氩气保护箱,水中氧的质量分数控制在 50×10^{-6} 以下,保护气体与载粉气体均使用高纯氩气。基板材料为经过标准热处理(1080 °C × 4 h,空冷 + 840 °C × 24 h,空冷 + 760 °C × 16 h,空冷)的 GH738 锻件板材,沉积粉末材料为 GH738 合金球形粉末,粉末粒径为 53~150 μm 。GH738 粉末的化学成分如表 1 所示。

表 1 GH738 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH738 alloy powders

Element	C	P	Co	Al	Fe	Mn	S	Mo
Mass fraction /%	0.06	0.015	13.00	1.40	2.00	0.01	0.015	4.50
Element	B	Cu	Si	Cr	Ti	Zr	Ni	
Mass fraction /%	0.005	0.10	0.15	20.00	23.00	0.10	Base	

对于 GH738 合金类零件的贯穿裂纹损伤,可将损伤部位规则化为贯通槽,试样待修复槽的长度 L 为 30 mm,厚度 H 为 3.2 mm,上沿宽 W 为 14 mm,坡角 θ 为 30°,如图 1 所示。实验前对粉末进行干燥烘干处理,用砂纸打磨待修复基板,然后用丙酮将其表面清洗干净。沉积修复实验参数为:光斑直径 3 mm,激光功率 1000 W,扫描速度 4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,送粉速度 7 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$,层高 0.5 mm。采用 OLYMPUS-GX51 型光学显微镜观察金相样品的显微组织;采用扫描电镜(SEM)观察微观组织特征,并用扫描电镜附带的能谱仪(EDS)对物相的成分进行分析。

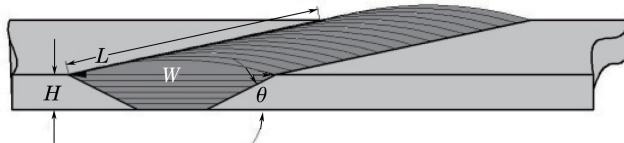


图 1 贯通槽示意图

Fig. 1 Schematic of through-groove

3 实验结果与讨论

3.1 激光沉积修复 GH738 合金的组织特征

图 2 所示为修复区的显微组织。由图 2 可知:基体为均匀的等轴晶组织,晶粒尺寸约为 42.6 μm ;热影响区的宽度约为 200 μm ,相对于基体,热影响区的晶粒明显长大。激光沉积修复是一个逐层堆积的过程,在

图 2(a)中可以看到沉积层之间的层带结构,修复区的组织呈典型的外延生长柱状枝晶,柱状枝晶垂直于基体,并趋向激光沉积高度方向贯穿多个沉积层连续生长。由图 2(c)可见,修复区边缘的枝晶具有较高的取向一致性,未发现明显的大角度偏转。由图 2(d)可见,在修复区中心,枝晶取向开始出现较大偏转。

激光沉积修复过程中的热输入会导致基体上产生热影响区,并使得热影响区的组织发生再结晶、偏析,甚至重熔等行为,最终导致热影响区的晶粒尺寸明显大于基体的晶粒尺寸^[9]。激光沉积修复过程中影响枝晶生长方向的主要因素是热流方向。在修复区边缘,大部分热量通过基体散失,使得基体的温度梯度极大,热流方向由修复区垂直指向基体,因此修复区边缘处枝晶的取向一致性较高,枝晶取向与热流方向相反。在修复区中心,一方面,随着修复的进行,冷却速率逐渐降低;另一方面,熔池不再直接通过基体散热,而是通过已修复区散热,因此热流方向不再只是沿沉积高度的方向。此时,下一层的枝晶将会以上一层的枝晶为形核质点延续生长,而上一层作为非均匀的形核基底,会出现枝晶取向不一致的现象。

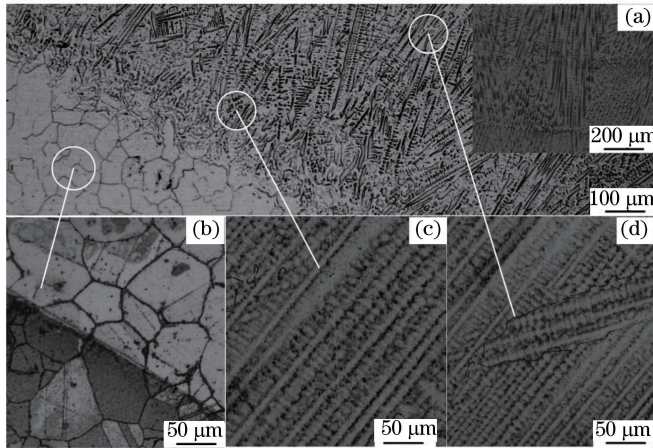


图 2 修复区的显微组织。(a)修复区界面;(b)热影响区;(c)修复区边缘;(d)修复区中心
Fig. 2 Microstructures of repair zone. (a) Repair zone interface; (b) heat affected zone;
(c) edge of repair zone; (d) center of repair zone

3.2 γ' 相的含量及分布

γ' 相是 GH738 合金中最主要的强化相,其含量、尺寸等对合金的性能具有显著影响。在扫描电镜下未观察到修复区中存在 γ' 相,这是由于激光沉积修复过程中的冷却速率极高, γ' 相形成元素过饱和地固溶于基体中,导致 γ' 相来不及析出长大。由图 3 可以看出:基体中 γ' 相的平均尺寸为 50 nm,大小比较均匀,弥散分布于基体中;相对于基体,热影响区中的 γ' 相明显长大,平均尺寸为 110 nm,且部分 γ' 相明显粗化,尺寸达到 230 nm, γ' 相数量明显减少,平均间距显著增大。这是由于在激光沉积修复循环加热过程中,热影响区中尺寸较小的 γ' 相发生分解、回溶,同时释放出大量 γ' 相形成元素,而溶质原子又促进尺寸较大的 γ' 相不断增大^[10]。

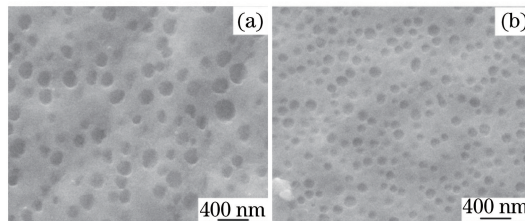


图 3 (a)热影响区和(b)基体中 γ' 相的形貌

Fig. 3 Morphology of γ' phase in (a) heat affected zone and (b) substrate

3.3 碳化物的含量及分布

图 4(a)为修复件的横截面形貌,从左向右依次为修复区、热影响区(HAZ)和基体。在修复区中,枝晶间与枝晶干均出现了少量碳化物,但它们的形态与组成成分不同。枝晶干上存在细小的亮白色颗粒状和短棒状碳化物,如图 4(b)中位置 1 所示。利用 EDS 分析这些析出物的化学成分,结果如表 2 所示。由表 2 可见,

此类碳化物中的 Cr、Co 含量较高,为 $M_{23}C_6$ 型碳化物。枝晶间存在少量的尺寸相对较大的立方体碳化物,如图 4(b)中的位置 2 所示,此类碳化物中的 Ti、Mo 含量较高,为 MC 型碳化物^[11]。相对于基体而言,热影响区中的碳化物尺寸明显减小,如图 4(c)所示,由 EDS 结果可知沿热影响区晶界析出的细小的颗粒为 $M_{23}C_6$ 型碳化物,其平均尺寸约为 150 nm。由图 4(d)可见,基体内存在着尺寸较大、呈颗粒状的碳化物,这些碳化物主要分布在晶界上。

Cr、Co 为负偏析元素,在凝固过程中大量地偏析于枝晶干上,而 Ti 和 Mo 为正偏析元素,凝固过程中大量地偏析于枝晶间。可见,枝晶间与枝晶干的碳化物成分不同,因此碳化物的类型也不同。激光沉积修复过程中的凝固速率极高,碳化物形成元素来不及析出;加之枝晶间距很小,凝固过程中碳化物的生长空间非常小,因而最终修复区内的碳化物尺寸较小。枝晶间出现了尺寸相对较大的呈立方状的碳化物,它们可能是在激光沉积修复过程中熔池中存在的少量中程有序原子团簇^[12]在快速凝固时偏聚在枝晶间形成的。在激光沉积修复过程中,热影响区温度升高,大颗粒的 MC 型碳化物在高温下不稳定,它会通过分解反应形成尺寸较小的 $M_{23}C_6$ 型碳化物和 γ' 相^[13]。

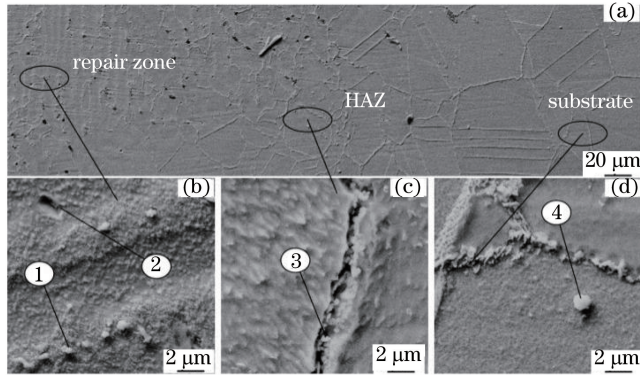


图 4 修复件横截面的 (a) SEM 形貌及 (b) 修复区、(c) 热影响区、(d) 基体中碳化物的形貌

Fig. 4 (a) SEM morphology of cross section of repaired sample and carbide images in (b) repair zone, (c) heat affected zone and (d) substrate

表 2 图 4 不同位置处的 EDS 谱分析结果(质量分数,%)

Table 2 EDS analysis of different positions in Fig. 4 (mass fraction, %)

Position	C	Al	Ti	Cr	Ni	Mo	Co
1	15.78	0.24	39.23	23.82	6.59	12.16	2.19
2	18.08	0.05	65.75	1.45	1.85	8.49	4.32
3	13.97	0.38	3.56	1.12	52.92	6.09	21.96
4	38.73	0.15	1.59	13.31	31.72	4.32	8.11

3.4 室温拉伸性能

GH738 高温合金锻件的抗拉强度为 1276 MPa,屈服强度为 780 MPa,断后伸长率为 26%。表 3 为激光沉积修复 GH738 高温合金室温拉伸性能的测试结果。为减小随机误差,在相同的工艺参数下修复 3 个试样,然后对这 3 个试样进行室温拉伸实验。由表 3 可知:沉积态修复试样的抗拉强度 σ_b 为 998.2~1020.2 MPa,屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为 663.6~681.9 MPa,均明显低于锻件的强度。以抗拉强度最小的 3# 试样为例,其抗拉强度为锻件的 78.2%,断后伸长率为锻件的 69.2%。

表 3 激光沉积修复 GH738 高温合金的室温拉伸性能

Table 3 Room temperature tensile properties of GH738 superalloy repaired by laser deposition

Sample number	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	Elongation /%
1#	1008.7	672.8	19.0
2#	1020.2	681.9	18.1
3#	998.2	663.6	18.0

γ' 相的强化效果与其尺寸密切相关。当 γ' 相尺寸较小时,位错以切过 γ' 相的方式通过 γ' 相;随着 γ' 相尺寸增大,位错切过 γ' 相的阻力增加;当 γ' 相达到临界尺寸时,位错通过 γ' 相的方式由切割变为绕过,且位错绕过 γ' 相的阻力随 γ' 相尺寸的增大而减小。因此,存在最佳的 γ' 相尺寸使强化效果达到最佳^[14]。可以认为经标准热处理的锻件基体中的 γ' 相尺寸为最佳尺寸,由于在修复区未发现 γ' 相,因此修复区的性能相对于基体会有所降低。对比图3(a)与图3(b)可以看出,相对于基体,热影响区中强化相的平均尺寸明显增大,它们之间的平均间距也显著增加,这会导致位错绕过 γ' 相的阻力减小,从而降低热影响区的拉伸性能。另外,对比图4(b)~(d)可以看出,修复区内及基体、热影响区的晶界处均存在碳化物,分布在晶界上的碳化物可以起到强化晶界的作用^[15],但由于修复区中碳化物的数量相对较少,强化效果不明显,这也是导致激光沉积修复试样拉伸性能低于锻件拉伸性能的原因。

图5为激光沉积修复GH738高温合金的室温拉伸断口形貌,断口位于修复区。由图5(a)可以看出,断口的宏观形貌较为平整,表面呈暗灰色,无金属光泽,纤维区所占比例较小。由图5(b)可以看出,断口上存在大量小而浅的等轴韧窝,表现为典型的韧性断裂。

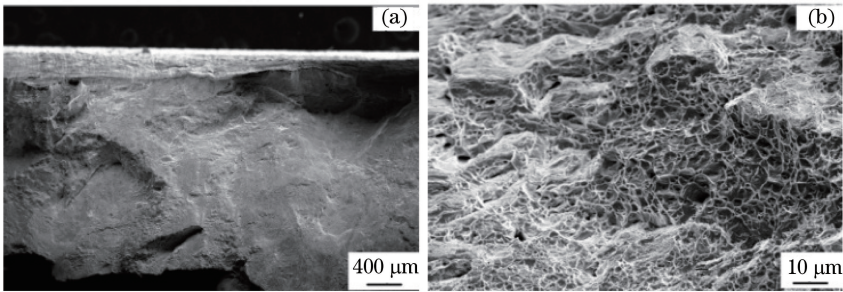


图5 激光沉积修复GH738高温合金的室温拉伸断口形貌。(a)宏观形貌;(b)微观形貌

Fig. 5 Room temperature tensile fracture morphology of GH738 superalloy repaired by laser deposition.

(a) macrograph; (b) microscopic morphology

4 结 论

激光沉积修复GH738合金修复区的组织为典型的外延生长柱状枝晶,柱状枝晶垂直于基体,并趋向激光沉积高度方向贯穿多个沉积层连续生长,修复区中心处的枝晶取向出现了较大偏转。修复区内未发现 γ' 相。相对于基体而言,修复区存在少量的颗粒状碳化物,这会导致修复区的拉伸性能有所降低。热影响区中 γ' 相的平均尺寸为110 nm,部分 γ' 相明显粗化,这会降低热影响区的拉伸性能;热影响区沿晶界析出了细小的颗粒状 $M_{23}C_6$ 型碳化物,其尺寸明显小于基体内碳化物的尺寸。室温拉伸断口位于修复区,为典型的韧性断裂。激光沉积修复GH738合金的室温抗拉强度为锻件的78.2%,断后伸长率为锻件的69.2%。

参 考 文 献

- [1] 董建新. 高温合金GH4738及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 1-2.
- [2] Shi Yang, Chen Zhijun, Zhang Qunli, *et al.* Cracking behavior of Inconel 738 alloy on Ni-base superalloy surface by laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(3): 72-75.
时阳, 陈智君, 张群莉, 等. 镍基高温合金表面激光熔覆Inconel 738合金层的开裂行为[J]. 金属热处理, 2011, 36(3): 72-75.
- [3] Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing, *et al.* Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. Foundry Technology, 2008, 29(3): 391-393.
薛蕾, 黄卫东, 陈静, 等. 激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J]. 铸造技术, 2008, 29(3): 391-393.
- [4] Petrat T, Graf B, Gumenyuk A, *et al.* Laser metal deposition as repair technology for a gas turbine burner made of Inconel 718[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 761-768.
- [5] Razavi R S. Laser beam welding of Waspaloy: characterization and corrosion behavior evaluation[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 82: 113-120.
- [6] Lu Penghui, Liu Jianrui, Xue Lei, *et al.* Microstructure and cracking behavior of K418 superalloy by laser forming

- repairing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(2): 315-319.
- 卢朋辉, 刘建睿, 薛蕾, 等. 激光成形修复 K418 高温合金的显微组织与开裂行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(2): 315-319.
- [7] Bian Hongyou, Dong Wenqi, Wang Shijie, *et al.* Experimental study on laser deposition repair of surface damage of GH4169 thin-walled components[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1002002.
- 卞宏友, 董文启, 王世杰, 等. GH4169 薄壁零件表面损伤的激光沉积修复试验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1002002.
- [8] Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua, *et al.* Research on persistent fracture mechanism of laser forming repaired GH4169 superalloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0403005.
- 明宪良, 陈静, 谭华, 等. 激光修复 GH4169 高温合金的持久断裂机制研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0403005.
- [9] Zhao Jianfeng, Cheng Cheng, Xie Deqiao, *et al.* High-temperature tensile property of GH4169 nickel-based superalloys by laser repair[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(8): 0802012.
- 赵剑峰, 成诚, 谢得巧, 等. 激光修复 GH4169 镍基高温合金的高温拉伸性能[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0802012.
- [10] Yao Zhihao, Dong Jianxin, Chen Xu, *et al.* Gamma prime phase evolution during long-time exposure for GH738 superalloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(1): 31-37.
- 姚志浩, 董建新, 陈旭, 等. GH738 高温合金长期时效过程中 γ' 相演变规律[J]. *材料热处理学报*, 2013, 34(1): 31-37.
- [11] Hussein N I S, Segal J, McCartney D G, *et al.* Microstructure formation in Waspaloy multilayer builds following direct metal deposition with laser and wire[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 497(1/2): 260-269.
- [12] Yin Fengshi, Sun Xiaofeng, Hou Guichen, *et al.* Effect of melt overheating treatment on the solidification segregation of M963 cast Ni-base superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(6): 659-661.
- 殷凤仕, 孙晓峰, 侯贵臣, 等. 熔体过热处理对 M963 合金凝固偏析的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(6): 659-661.
- [13] Wu Baoping, Li Linhan, Wu Jiantao, *et al.* Effect of solution temperature on microstructure of as-cast waspaloy alloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(s1): 146-153.
- 吴保平, 李林翰, 吴剑涛, 等. 固溶温度对铸造 waspaloy 合金组织的影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(s1): 146-153.
- [14] Zhao Xiaoming, Chen Jing, He Fei, *et al.* Study on the age-hardening mechanism of Rene'88DT superalloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(12): 2208-2211.
- 赵晓明, 陈静, 何飞, 等. 激光快速成形 Rene'88DT 高温合金的时效强化研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(12): 2208-2211.
- [15] Yang Jinxia, Wei Wei, Liu Lu, *et al.* Primary carbide and its strengthening roles in K465 and K492 superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(4): 975-978.
- 杨金侠, 魏薇, 刘路, 等. 镍基高温合金中的初生碳化物及其强化作用[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(4): 975-978.