DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.005

热等静压冷速对 SLM 成形 K536 合金力学性能的影响

吴晓锋[1],赵晓明[2],赵　伟[2],谢国印[1]

(1. 中国航发西安航空发动机有限公司 技术中心,陕西 西安 710021; 2. 西安铂力特增材技术股份有限公司,陕西 西安 710000)

摘　要:采用激光选区熔化工艺制备 K536 航空发动机零件,研究了不同冷速的热等静压 HIP 工艺对制件组织及力学性能的影响。结果表明,激光选区熔化 K536 高温合金制件经 HIP 处理后,制件内部产生完全再结晶,金相组织为奥氏体基体及晶内和晶界碳化物,合金强度降低、塑性上升,数据分散性下降;随 HIP 冷速的增大,组织中晶界碳化物减少,晶内出现少量颗粒状碳化物,有效提升了合金在 815 ℃的高温屈服强度。

关键词:激光选区熔化(SLM);热等静压(HIP);完全再结晶;高温屈服强度

中图分类号: TG132.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)02-0115-06

Effect of Hot Isostatic Pressing Processing Cooling Rate on Mechanical Properties of SLM Formed K536 Superalloy

WU Xiaofeng[1], ZHAO Xiaoming[2], ZHAO Wei[2], XIE Guoyin[1]

(1. Technology Center, AECC Xi'an Aero-engine Ltd., Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Bright Laser Technologies Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The effect of hot isostatic pressure (HIP) process with different cooling rates on the microstructure and mechanical properties of K536 aero-engine parts was studied. The results show that after HIP treatment, the laser selective melting of K536 superalloy produces complete recrystallization, and the microstructure is austenitic matrix, intracrystalline and grain boundary carbide, the strength of the alloy decreases, the plasticity increases, and the data dispersion decreases. With the increase of HIP cooling rate, grain boundary carbides in the microstructure decreased, and a small amount of granular carbides appeared in the crystal, which effectively increased the yield strength of the alloy at high temperature of 815 ℃.

Key words: selective laser melting (slm); hot isostatic pressing (hip); fully recrystallization; elevated temperature yield strength

K536 是主要用于 Cr、Mo 固溶强化的一种含铁量较高的镍基高温合金,具有良好的抗氧化和耐腐蚀性能,在 900 ℃以下具有中等的持久性能和蠕变强度,冷热加工成形性和焊接性能良好。适用于制造航空发动机的燃烧室部件及其他高温部件,在 900 ℃以下长期使用,短时工作温度可达 1 080 ℃[1]。随着航空产业的不断发展,核心部件设计要求的逐步提升,零件内部出现了较多的复杂内流道及薄壁结构,传统铸锻焊工艺已无法满足设计制造要求。

激光选区熔化工艺(SLM)是一种以激光作为热源[2],在受控的氩气气氛下,逐层融化金属粉末,最终实现金属零件无模具、高致密度、近净成形的快速制造技术[3]。相比于传统的铸锻焊技术,激光选区熔化技术具有成形效率高、表面质量优,可制备复杂结构零件[4],已在航空航天、医疗、汽车等高附加值领域得到广泛应用[5]。由于激光选区熔化成形工艺特点,具有快速熔化、快速凝固的特点,其组织特点与传统工艺相比存在其特殊性。

激光选区熔化工艺作为一种全新的加工制造方法,其应用在航空航天领域的零件长时间处于高温环境下,有的零件在处于高温环境的同时承受一定载荷,因此,SLM 成形的高温合金制件其拉伸和持久性能即为其材料级验收的重要考核指标。为彻底了解 SLM 成形 K536 高温合金制件的力学性能,本文使用不同热等静压(HIP)工艺对 SLM 成形的

收稿日期:2019-11-13

作者简介:吴晓锋(1973-),陕西西安人,高工.主要从事新工艺及铸造研究方面的工作.电话:13679227737,E-mail:zhaowei-07@163.com

通讯作者:赵　伟(1989-),陕西西安人,硕士,中级工程师.主要从事金属材料增材制造工艺方面的工作.电话:13572849256,E-mail:zhaowei-07@163.com

K536 高温合金制件进行处理，观察其金相组织特征，测试室温拉伸性能和高温拉伸性能，并分析其失效破坏机制。为 SLM 成形 K536 高温合金零件的进一步推广应用提供数据支持。

1 试验材料与方法

本试验采用 K536 高温合金粉末原材料，粉末化学分见表 1，粉末金相及 SEM 形貌见图 1。试验使用西安铂力特增材技术股份有限公司自主研发的 BLT-S310 型激光选区熔化设备进行试样打印，设备如图 2 所示；热等静压工艺使用 Quintus QIH 48 型设备进行如图 3 所示；金相检测使用 Leica DFC 450 型设备，拉伸试验使用 Instron 3382 型设备。试验中所用室温拉伸及高温拉伸性能检测试样均为 GB/T228 中所规定的标准 ϕ5 mm 拉伸试样。

表1 SLM成形用K536粉末化学成分 *w*(%)
Tab.1 Chemical composition of K536 powder for SLM forming

C	Al	V	Fe	P	S	Ti	Mn
0.087	0.015	<0.01	18.59	<0.005	<0.002 0	<0.01	0.018
Mo	Si	B	Cu	Cr	Co	W	Hf
9.02	0.16	<0.01	<0.01	21.15	1.69	0.64	<0.01

本文中规定激光选区熔化成形 K536 合金性能试样的取向定义如图 4。Z 轴方向为激光选区熔化成形沉积方向，沿着 Z 轴方向取样为竖方向(规定为 S 向)，沿着 X、Y 平面取样为横方向(规定为 H 向)。

SLM 成形 K536 制件通过热等静压(HIP)工艺处理，在高温、高压状态下进行长时处理，不但可以消除制件内部微小冶金缺陷，同时可以改善制件内部组织。根据 K536 材料为固溶强化型材料特点，制定两种热等静压工艺，参数见表 2。

表2 试验所用HIP工艺参数
Tab.2 HIP process parameters for experiment

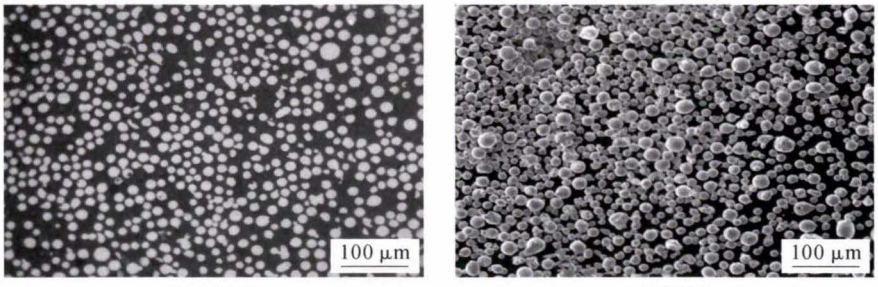
工艺编号	工艺参数
1#	1 180 ℃，160 MPa，3 h，炉冷
2#	1 180 ℃，160 MPa，3 h，快冷

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织分析

SLM 成形 K536 未经热处理前，即沉积态，其金相组织如图 5 所示。横向呈现出激光扫描路径，交叉扫描；竖向呈现出鱼鳞状熔池，同时存在沿堆积方向外延生长的柱状晶，晶内亚结构为细小枝晶，枝晶间存在少量析出相。

SLM 成形 K536 沉积态制件分别经过炉冷、快冷不同热等静压工艺处理后，其金相组织分别如图 6、图 7。从图中看出，经过热等静压后的制件金相组织横竖向均已完全再结晶；沉积态细小亚结构形貌已完全消失；但在横向仍留存有沉积态时的激光扫描路径，晶粒沿扫描方向分布。两种 HIP 处理后其相同之处在于，基体组织均为奥氏体组织，晶内、晶界存在部分碳化物；不同之处在于其碳化物的数量、形态及分布不同。炉冷金相碳化物主要以晶界碳化物薄膜的形式存在，同时在晶内存在少量析出相；快



(a)OM (b)SEM

图 1 SLM 成形用 K536 粉末照片
Fig.1 Morphological of K536 powder for SLM forming

图 2 BLT S310 型 SLM 成形设备
Fig.2 BLT S310 SLM forming equipment

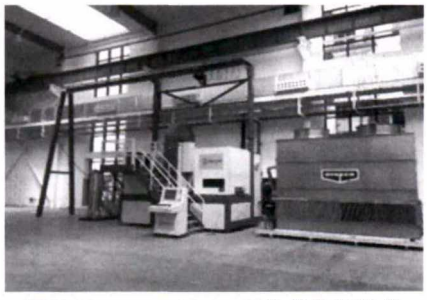


图 3 Quintus QIH 48 型热等静压设备
Fig.3 Quintus QIH48 Hot Isostatic Pressing equipment

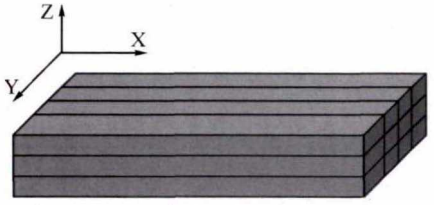
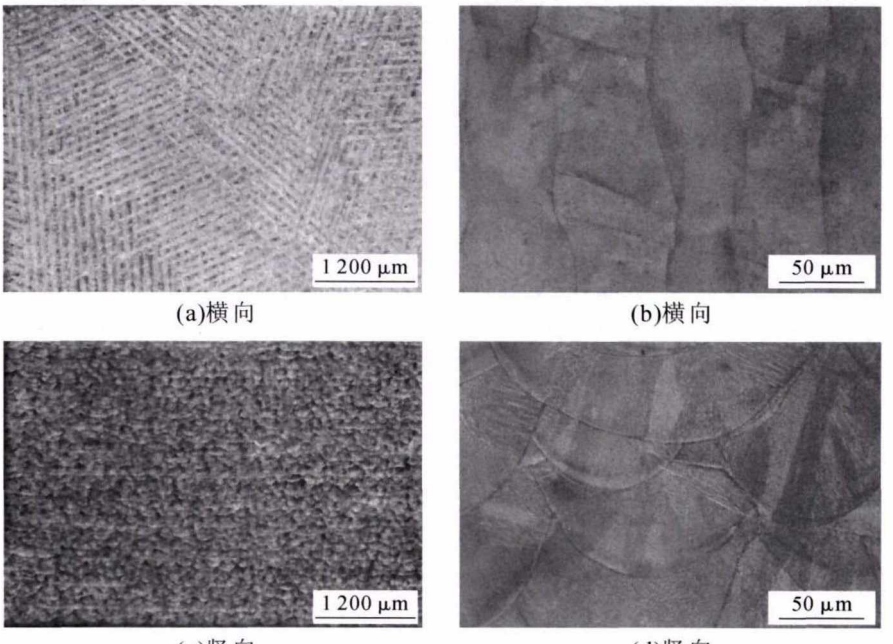


图 4 激光选区熔化成形 K536 高温合金取向示意图
Fig.4 Schematic diagram of K536 superalloy formed by SLM

冷金相晶内较为干净，仅在晶界存在碳化物。不同 HIP 所得金相组织中碳化物的形貌或导致制件性能存在差异。

2.2 室温拉伸性能分析

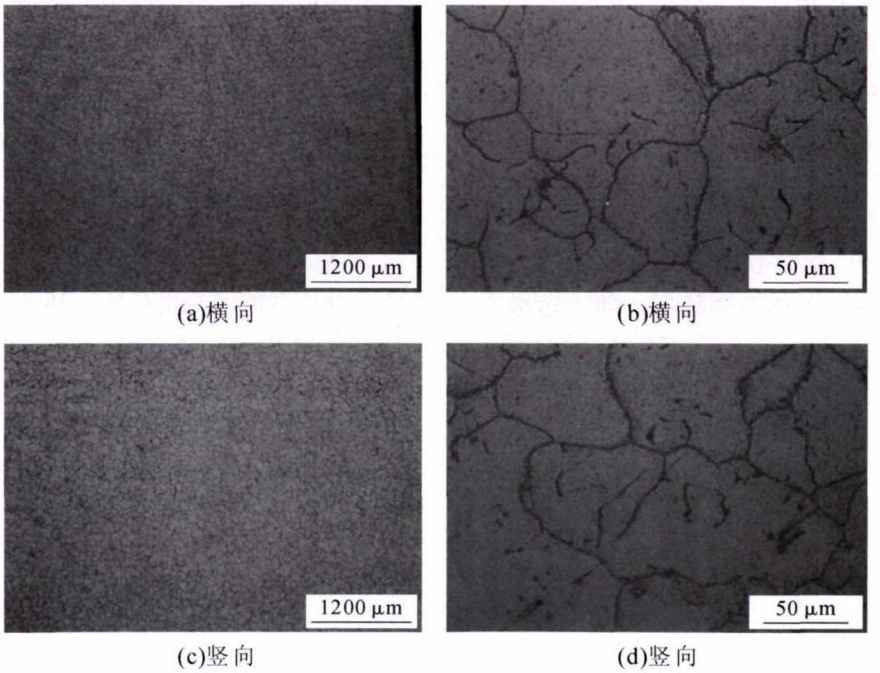
将沉积态及不同热等静压工艺处理后的 SLM 成形 K536 试样依据 GB/T 228.1 进行室温拉伸性能进行检测，将检测结果进行计算处理获得强度容差，绘制折线图，如图 8 所示。对比不同工艺处理后的制件性能，经 HIP 处理后的 K536 制件室温力学性能强度降低，塑性上升，同时数据分散性降低。对比相同 HIP 工艺不同冷速下的性能数据，随冷速增大，试样抗拉强度无明显变化，屈服强度及伸长率略有上升。



(a)横向　(b)横向

(c)竖向　(d)竖向

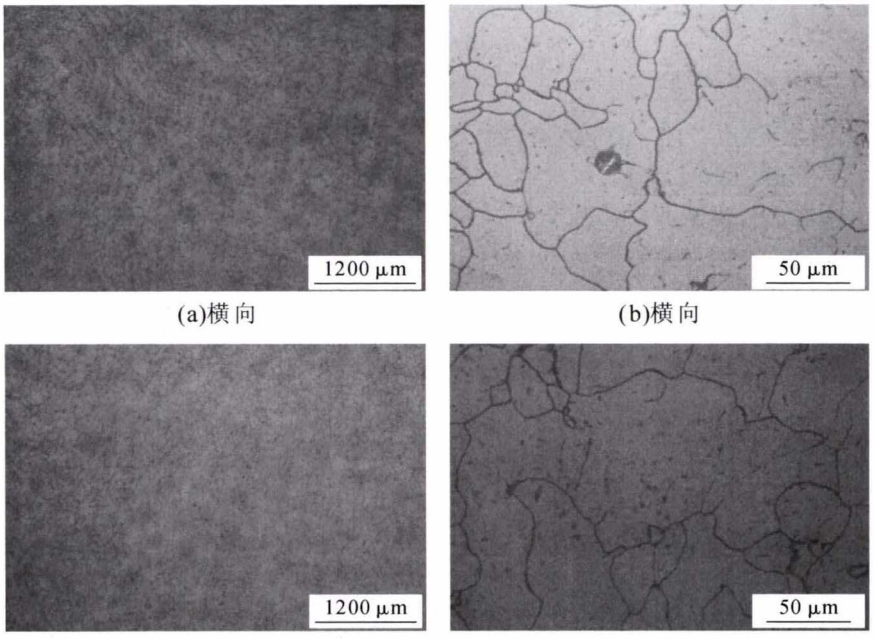
图 5 沉积态金相组织照片
Fig.5 Schematic diagram of K536 superalloy formed by SLM



(a)横向　(b)横向

(c)竖向　(d)竖向

图 6 炉冷工艺对应制件金相组织照片
Fig.6 Metallographic for furnace cooling

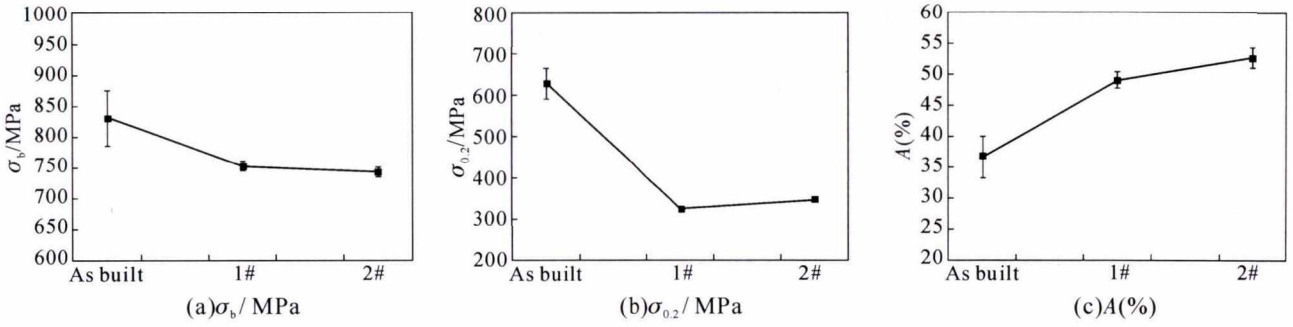


(a)横向 (b)横向

(c)竖向 (d)竖向

图 7 快冷工艺对应制件金相组织照片

Fig.7 Metallographic for rapid cooling



(a)σ_b/ MPa (b)$\sigma_{0.2}$/ MPa (c)A(%)

图 8 SLM 成形 K536 合金室温拉伸数据折线容差图

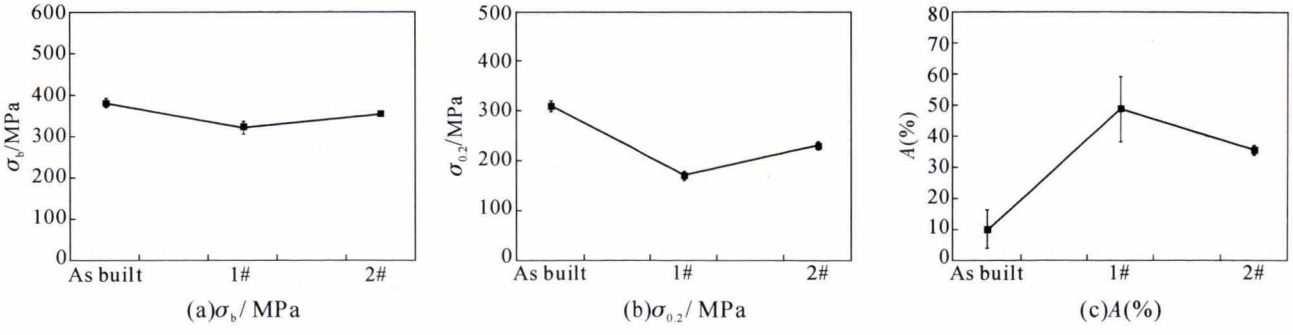
Fig.8 Tolerance diagram of room temperature tensile data of K536 superalloy formed by SLM

2.3 高温拉伸性能分析

将沉积态试样及不同热等静压工艺处理后的 SLM 成形 K536 试样依据 GB/T 228.2 进行 815 ℃高温拉伸性能进行检测，将数据计算容差后，绘制折线图，如图 9 所示。对比不同工艺处理后的制件性能，经 HIP 处理后的 K536 制件 815 ℃高温拉伸强度降低，塑性上升，同时数据分散性降低。对比相同 HIP 工艺不同冷速下的性能数据，随冷速增大，试样强度增加，屈服强度大幅增长，伸长率略有下降，同时数据分散性大幅降低。

2.4 断口分析

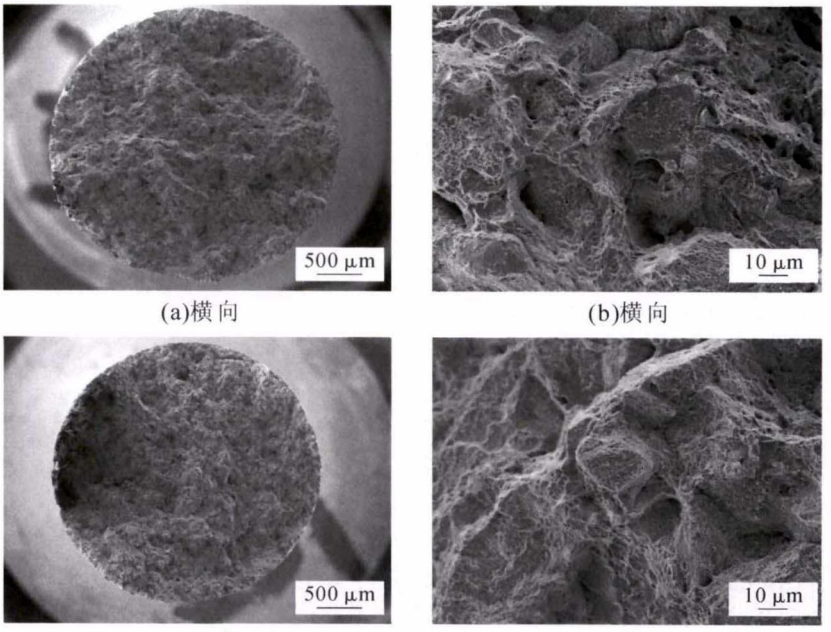
根据 2.2、2.3 节性能检测数据，仅对不同冷速 HIP 处理后的 815 ℃高温拉伸残样进行断口 SEM 分析。结果如图 10、图 11 所示。两种 HIP 对应的断口 SEM 结果中均未发现气孔、裂纹及未熔合等缺陷。低倍下可以看出炉冷、快冷残样断面均比较平



(a)σ_b/ MPa (b)$\sigma_{0.2}$/ MPa (c)A(%)

图 9 SLM 成形 K536 合金 815 ℃拉伸数据折线容差图

Fig.9 Tolerance diagram of 815 ℃ high temperature tensile data of K536 superalloy formed by SLM

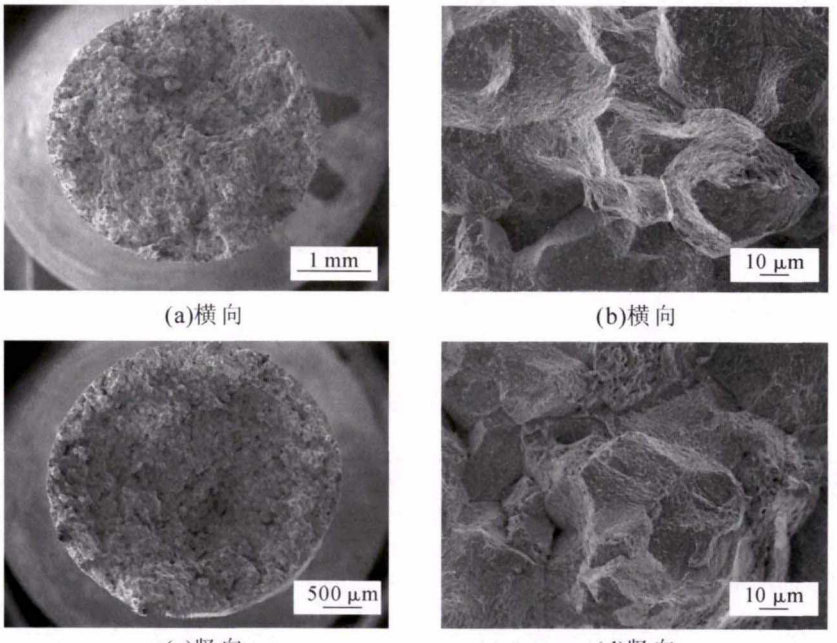


(a)横向　(b)横向

(c)竖向　(d)竖向

图 10 炉冷对应 815 ℃高温拉伸试样断口 SEM 照片

Fig.10 SEM images of tensile fracture at 815℃for furnace cooling



(a)横向　(b)横向

(c)竖向　(d)竖向

图 11 快冷对应 815 ℃高温拉伸试样断口 SEM 照片

Fig.11 SEM images of tensile fracture at 815 ℃for rapid cooling

整，如图 10(a)(c)、图 11(a)(c)所示。在高倍下，对于炉冷试样断口如图 10(b)(d)所示，断口形貌以穿晶断裂为主、部分沿晶断裂特征为辅的混合断裂特征，可见明显韧窝存在；如图 11(b)(d)所示为快冷试样，断口呈现出冰糖状沿晶断裂特征，未见穿晶断裂形貌，同时沿晶界可以看出明显的颗粒状碳化物存在。

冷速不同断口形貌各异，表明随热等静压后冷速增加，试样塑性降低；在金相组织分析中，炉冷金相组织较快冷金相组织存在更多的晶内晶界析出物，即有更多的合金元素从合金基体中析出，结合 K536 高温合金为固溶型高温合金的特点，过多的合金元素析出将会导致制件强度降低，使得炉冷试样强度低于快冷试样。

3 结论

(1)SLM 成形 K536 高温合金制件经 HIP 处理后，制件内部产生完全再结晶，金相组织为奥氏体基体及晶内晶界碳化物。

(2)HIP 冷速越大，制件金相组织中晶界碳化物

越少,同时晶内出现少量颗粒状碳化物。

(3)经 HIP 处理后,SLM 成形 K536 合金强度降低、塑性上升,数据分散性下降。

(4)HIP 冷速的增大可有效提升 SLM 成形 K536 合金 815 ℃高温强度。

参考文献:

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社,2002.

[2] EOS Electro Optical Systems (2010). Available at: http://www.eos.info.

[3] 赵晓明,齐元昊,于全成,等. AlSi10Mg 铝合金 3D 打印组织与性能研究[J]. 铸造技术,2016(11):2402-2404.

[4] 杨永强,陈杰,宋长辉,等. 白玉超.金属零件激光选区熔化技术的现状与进展[J]. 中国激光,2018(1):1401.

[5] 董鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术,2014(1):1-5.

河北省冀州市华北铸钉铸造工具总厂

冀州市华北铸钉铸造工具总厂座落于河北省冀州市城南白庄工业区，紧靠全国大动脉京九、石梅铁路，交通十分便利。我厂是生产铸顶（泥芯撑)、羊毛掸笔、硬扫笔、圆水笔的专业厂家。建厂36多年来,技术设备先进，产品销往全国各地,深受用户欢迎。本厂始终承诺：诚信至上，守信誉,质高价低，实行三包，交货及时，代办发运，可供图订做。热情欢迎国内外来人来电选购。

四同

同类产品比质量　同等质量比价格
同样价格比服务　同等服务比速度

两免

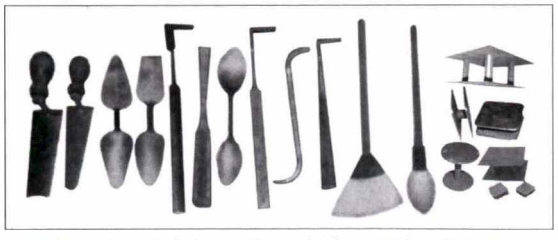
免费为客户提供产品技术咨询
免费为客户提供初期试用产品

一、常用修造工具规格（材质为不锈钢或弹簧钢）

/mm

名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格
刮刀	2#	160×45	秋叶	1#	180×30	三角光子	2#	50×30	东北压钩	1#	270×50
尖刮刀	3#	140×35	单头钢批	2#	240×22	蛋圆光子	1#	75×50	圆型钩	2#	200×30
提钩	2#	350×15	单头钢批	3#	210×20	压钩	1#	270×50	长把压钩	1#	220×30
提钩	4#	300×10	法兰钩	1#	270×14	压钩	2#	240×45	柳叶钩	1#	240×40
钢批钩	1#	280×16	榔头铲	1#	240×24	单齐压钩	2#	240×45	单开提钩	2#	320×12

二、掸笔、硬扫笔：20～120 mm 10个品种； 圆水笔：12～17 mm 3个品种；
三、铸顶（芯撑）有圆、方、长方形，单、双、多柱、异形铸顶等各种铸铁、铸钢用铸顶材质为A3或A3F，表面镀锌、镀锡等；
四、过滤网、木型工具、皮风箱、铸尺、百叶轮、角磨片、树脂油、固化剂、粘结剂、木型锤等。



图中从左至右依次为：1.刮刀 2.尖刮刀 3.压勺 4.单齐压勺 5.提钩 6.单头钢批 7.秋叶 8.单开提钩 9.法兰钩 10.钢批钩 11.掸笔、扫笔 12.圆水笔 13.铸顶

诚征各地代理商

厂址：河北省冀州市城南白庄工业区（053200） 联系人：白英韩 13831863803 白其水 13582484193（中国农行金穗卡，户名：白英韩 卡号：955998213033249031O)
电话/传真：0318-8682135 网址：www.hbzhz.com E-mail:hbbyh@hbzhz.com 银行汇款：冀州市华北铸钉铸造工具总厂 开户行：市中行 帐号：100148643069

经销处
哈尔滨市铸材门市部 13831863803　包头市铸材经销处 13633184318
杭州市中亚铸材有限公司 13932860882　贵阳市忠信铸材公司 13831888322
长沙市铸材办事处 13831823340　西宁市铸材办事处 13931810511
上海市铸材办事处 13932894585　南宁市铸材办事处 0771-8994686

本单位为一般纳税人，增值发票税率17%。