

时效处理对激光立体成形 17-4PH 不锈钢组织及性能的影响

王俊林 鑫 黄春平 杨海欧 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 研究了时效热处理对激光立体成形 17-4PH(0Cr17Ni4Cu4Nb)沉淀硬化不锈钢组织及力学性能的影响。光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)观测结果表明,经过时效热处理后,激光立体成形 17-4PH 不锈钢的微观组织主要由淬火马氏体、回火马氏体和第二相强化质点组成。随着时效温度的升高,构成基体的马氏体板条变得更加细小均匀,淬火马氏体向回火马氏体的转变增多,且板条间的第二相质点逐渐粗化,数量逐渐增多;晶界变得更加清晰、细长。热处理后材料的塑性比沉积态有显著的提高。480 ℃时效处理时,材料的强度、硬度达到最大值;随着时效温度的升高,材料的强度、硬度逐渐降低,塑性逐渐提高。热处理后试样的拉伸断口均呈现韧性断裂特征,并且随着时效温度的升高,纤维区和剪切唇越来越大,韧窝尺寸及深度逐渐增大。

关键词 激光技术;热处理;17-4PH 钢;激光立体成形;显微组织;力学性能

中图分类号 TN279;TG142 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.1203004

Influence of Aging Treatment on the Microstructure and Properties of 17-4PH Alloy by Laser Rapid Forming

Wang Jun Lin Xin Huang Chunping Yang Haiou Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Influence of heat treatment on microstructures and properties of 17-PH alloy by laser solid forming (LSF) process is investigated. Results of optic microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) show that main microstructure of LSF 17-4PH includes quenched martensite, tempered martensite and second precipitated phase. As aging temperature increases, martensite becomes smaller and more uniform. Rate of transformation from quenched martensite to tempered martensite is accelerated. Precipitated phases begin to coarsen, grain boundary becomes distinct. After heat-treatment, alloy plasticity is highly improved, and the strength and hardness reach maximum when aging temperature is 480 ℃. With the aging temperature increasing, strength property and hardness get worse, while plastic property gets better. Analysis on fractography shows fracture of all tensile samples results from ductile fracture. In addition, fiber area and shear lip of fracture become bigger, and size and depth of dimples increase gradually with the aging temperature increasing.

Key words laser technique; heat treatment; 17-4PH steel; laser solid forming; microstructure; mechanical property

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 140.3470; 350.3390

1 引言

17-4PH(0Cr17Ni4Cu4Nb)不锈钢因具有良好

的综合力学性能、优异的耐蚀性、振动衰减性和良好的焊接性能,被广泛应用于既要求耐弱酸、弱碱、盐

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(50971102)、中国博士后科学基金(20090461312)、西北工业大学基础研究基金(NPU-FFR-JC200808)和凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)自主研究课题(16-TZ-2007, 39-QZ-2009 和 05-BZ-2010)资助课题。

作者简介: 王俊(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光立体成形方面的研究。E-mail: 411428466@qq.com

导师简介: 黄卫东(1954—),男,教授,主要从事凝固理论和激光立体成形等方面的研究。E-mail: huang@nwpu.edu.cn (通信联系人)

腐蚀又要求高强度的部件,如汽轮机轴类零件及叶片、高压球阀及煤化工气化炉的灰浆系统等^[1,2]。此类零件都是重型机械上的重要承载部件,服役环境恶劣,易遭受磨损和腐蚀,导致零件失效。如能对报废零件进行成功修复,不仅能挽回巨大的经济和时间损失,提高资源的利用率,也符合我国可持续发展的战略需求。

激光立体成形(LSF)技术作为一种具有高能量密度、无模具、快速、近净成形等特点的先进制造技术,不但可以用于三维实体金属零件的制造,而且也可应用于零件上具有较复杂形状、一定深度缺陷或损伤的快速修复^[3]。与堆焊、电镀、热喷涂等常规修复技术相比,LSF技术具有以下优点:修复区晶粒细化,性能得到提高;具有良好的可达性和工艺灵活性;热影响区小、变形小^[4]。因此,如能将LSF技术成功应用于17-4PH不锈钢零件的成形修复,既可满足现役零件损伤后的再制造的迫切要求,还可大大降低部件的生产总成本。

17-4PH不锈钢作为一种典型的马氏体沉淀硬化不锈钢,其力学性能主要是通过热处理使马氏体发生相变及析出细小的金属间化合物和少量碳化物以产生沉淀硬化来调节实现的。王均^[2]通过350℃的长期时效实验发现,第一阶段($t < 1440$ h),细小共格的 ϵ -Cu相的弥散析出产生沉淀硬化作用而使硬度上升,在随后的保温时效(1440 h $< t < 8640$ h)过程中,马氏体分解而产生的 α' 相和早期沿晶界和束界析出的少量逆转变奥氏体以及G相和二次碳化物的沉淀硬化导致材料的硬化大于由于Cu相发生Ostwald熟化、较多逆转变奥氏体形成以及马氏体基体由于含碳量降低而使得材料的软化,不锈钢的硬度仍然处于上升阶段。最后一个阶段($t > 8640$ h),由于产生硬化因素(α' 相、G相、 $M_{23}C_6$ 等)所导致的硬化效果小于产生软化因素(逆转变奥氏体、 ϵ -Cu相的熟化、基体硬度下降等)导致的软化效果,材料的硬度

表1 实验用17-4PH不锈钢粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 17-4PH stainless steel powder (mass fraction, %)

Cr	Cu	Mn	Nb	Ni	Si	C	S	P	Fe
16.75	2.66	0.224	0.260	3.64	0.303	0.048	0.030	0.033	Balance

制备试样所选用的工艺参数为:激光功率为1.7~1.9 kW,扫描速度240 mm/min,送粉速率7.8 g/min,光斑直径2 mm,单层高度为0.4~0.5 mm,采用氩气保护,保护气体流量为2.5 L/min。激光立体成形前,用砂纸打磨基材以去除待沉积表面的氧化膜,后用丙酮清洗表面油污;

下降。H. Mirzadeh^[5]利用ANNs建立模型来研究时效温度对17-4PH硬度的影响,发现在低温阶段,随着温度的上升主要由于 ϵ -Cu的析出产生沉淀强化作用而使硬度逐渐上升,当硬度到达峰值时,随着温度的上升,沉淀相粗化、回火马氏体和逆转变奥氏体增加导致硬度降低。而LSF过程中激光沉积区被反复地快速加热和冷却,沉淀硬化相通常来不及析出^[6],马氏体回复作用不明显,回火马氏体转变较少,因此,虽然成形件组织致密,强度较高,但是塑性较低,综合力学性能较差,需要进行后续的热处理。此外,LSF虽消除了成形件的成分偏析,使得成形组织均匀、致密,但也存在较大的残余应力,故成形件组织和应力状态与传统铸件、锻件并不一致,因而在相同的热处理制度下,LSF与传统制造方法所获得的组织结构也必然不完全相同。由常规17-4PH不锈钢锻件热处理制度可知^[7~9],时效处理对17-4PH不锈钢锻件的性能具有显著影响。

本文重点研究时效处理对激光立体成形17-4PH不锈钢经固溶热处理后的组织及力学性能的影响,探索改善激光立体成形17-4PH不锈钢组织性能的途径,提高其综合力学性能,为17-4PH不锈钢激光立体成形及修复技术的工程推广应用提供指导。

2 实验材料及方法

激光立体成形实验是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的LSF-I型激光立体成形系统上完成的,该系统由激光器、五轴四联动数控工作台、惰性气氛加工室、高精度可调送粉器和四路同轴送粉喷嘴等组成。成形基材为100 mm×50 mm×10 mm 17-4PH锻件基板,熔覆沉积材料为旋转电极法制备的17-4PH粉末,粒度为-100~+200目(15~150 μ m),粉末成分如表1所示。

同时,将合金粉末在150℃左右真空条件下进行烘干处理。激光立体成形制备出的金属块体尺寸为45 mm×28 mm×26 mm。

热处理制度参考目前典型的17-4PH不锈钢形变热处理工艺^[7~9],确定为固溶时效热处理,具体的工艺参数如表2所示。

表 2 实验中激光立体成形 17-4PH 试样热处理工艺
Table 2 Heat treating routines of LSF 17-4PH samples

Sample number	Processing parameter
a	as-deposited
b	1040 °C×1 h, air colling; 480 °C×4 h, air colling
c	1040 °C×1 h, air colling; 550 °C×4 h, air colling
d	1040 °C×1 h, air colling; 580 °C×4 h, air colling
e	1040 °C×1 h, air colling; 620 °C×4 h, air colling

利用 Duramin-A300 型洛氏硬度仪对试样进行硬度测量, 加载载荷 100 g。金相试样用配比为 4 g 硫酸铜:20 mL 浓盐酸:20 mL 水的腐蚀剂进行腐蚀。采用 OLYMPUS GX71 光学显微镜 (OM) 和 TESCAN VEGAI LMH 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察金相组织。拉伸试样尺寸如图 1 所示, 在 INSTRON-3382 力学性能试验机上进行室温拉伸性能测试, 最大载荷 100 kN, 加载速率 1~2 mm/min。同样采用 TESCAN VEGAI LMH 型 SEM 观察断面形貌。

3 实验结果与讨论

3.1 显微组织

激光立体成形 17-4PH 的沉积态显微组织如图 2(a) 所示, 该合金沉积态组织主要由板条状马氏体组成, 马氏体基体上和板条间析出了一些细小颗粒。研究表明^[7,8], 17-4PH 合金组织中通常存在少

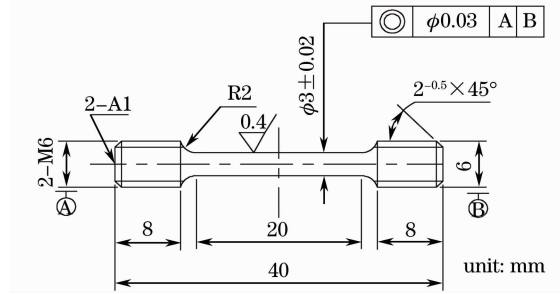


图 1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic of tensile sample

量的富铜 ϵ 相强化质点和 M_7C_3 及 NbC 型碳化物等。但由于 ϵ -Cu 相强化质点尺度通常在纳米级, 同时, 激光立体成形过程中所存在的快速加热和冷却过程使得 ϵ -Cu 相即使析出也很难长大, 也就是说, ϵ -Cu 相难于在沉积态的光学金相组织中观察到。因此, 推测沉积态马氏体基体上弥散析出的第二相强化质点为 M_7C_3 及 NbC 型碳化物等。

激光立体成形 17-4PH 的热处理态 OM 显微组织如图 2(b)~(e) 所示, 可以看到, 热处理后组织主要由黑色淬火马氏体和白色回火马氏体组成, 以不同取向呈块状团簇分布。与沉积态组织比较, 热处理后马氏体板条的尺寸更加细小, 板条上析出更多的第二相, 并呈现明显的再结晶。同时可以看出, 随着时效温度的升高, 黑色的淬火马氏体组织逐渐减少, 白色的回火马氏体组织逐渐增多。根据 17-4PH

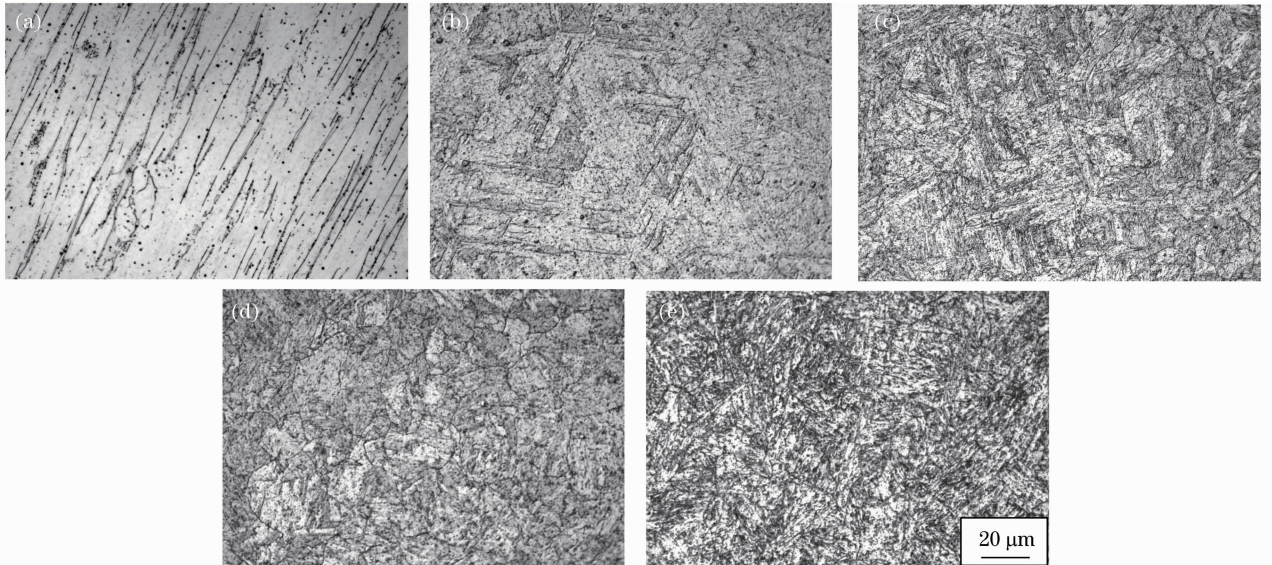


图 2 激光立体成形沉积态和不同热处理态的 OM 显微组织。(a) 沉积态; (b) 1040 °C×1 h+480 °C×4 h; (c) 1040 °C×1 h+550 °C×4 h; (d) 1040 °C×1 h+580 °C×4 h; (e) 1040 °C×1 h+620 °C×4 h

Fig. 2 OM microstructure of as-deposited and tempered LSF of 17-4PH. (a) As-deposited; (b) 1040 °C×1 h+480 °C×4 h; (c) 1040 °C×1 h+550 °C×4 h; (d) 1040 °C×1 h+580 °C×4 h; (e) 1040 °C×1 h+620 °C×4 h

钢的时效动力学规律^[9],可以断定其主要原因为随着时效温度的升高,淬火马氏体向回火马氏体的转变速率加快。

图3给出了不同热处理制度下激光立体成形17-4PH不锈钢的高倍回火组织。可以发现随着时效温度的升高,板条状马氏体组织变得更加细小均匀,晶界也更加清晰,相互连结成网状,将主要由马

氏体组成的晶粒包于其中。晶界上和晶粒内部分布着大量的白色亮点,即为沉淀析出相。随着时效温度的提高,沉淀相的析出不断增多,同时形态也逐渐由点状转变为条状。总体而言,晶界上的析出相强化了晶界,内部的颗粒在材料塑性变形过程中会阻碍位错运动,这些在一定程度上利于提高材料的强度。

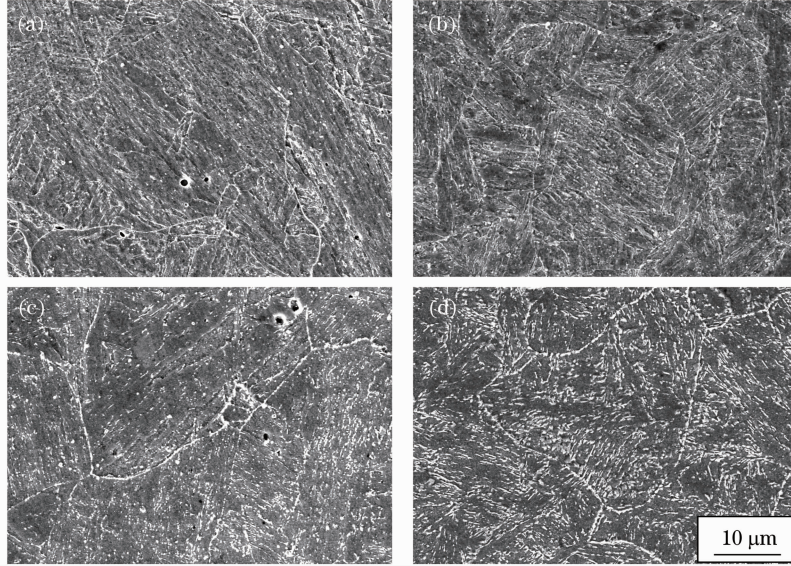


图3 不同热处理制度下的激光立体成形17-4PH的高倍回火组织。(a) 1040 °C×1 h+480 °C×4 h; (b) 1040 °C×1 h+550 °C×4 h; (c) 1040 °C×1 h+580 °C×4 h; (d) 1040 °C×1 h+620 °C×4 h

Fig. 3 Microstructure of tempered LSF of 17-4PH alloy at high magnification in different heat treatment systems. (a) 1040 °C×1 h+480 °C×4 h; (b) 1040 °C×1 h+550 °C×4 h; (c) 1040 °C×1 h+580 °C×4 h; (d) 1040 °C×1 h+620 °C×4 h

3.2 常规力学性能测试

激光立体成形17-4PH不锈钢的沉积态和热处理态的拉伸性能数据见表3。对激光立体成形17-4PH不锈钢的沉积态和热处理态的显微硬度也进行了测试,如图4所示。可以看出成形件沉积态的强度较高,塑性偏低;而经过固溶时效热处理后,材料的塑性与沉积态相比有显著的提高。480 °C时效

处理时,材料的强度、硬度达到最大值;时效温度升高后,材料处于过时效状态,与沉积态比较发现屈服强度略微降低,抗拉强度显著减少,550 °C、580 °C的硬度略高于沉积态,620 °C硬度低于沉积态。还可以看出随着时效温度的升高,材料的强度、硬度逐渐降低,塑性逐渐提高。

表3 激光立体成形17-4PH不锈钢沉积态及不同热处理态的拉伸性能与国家标准对比

Table 3 Tensile properties of as-deposited and tempered LSF of 17-4PH versus that of national standard

Heat treatment condition	σ_b /MPa		$\sigma_{0.2}$ /MPa		Ψ /%	
	GB1220-2007	Test result	GB1220-2007	Test result	GB1220-2007	Test result
As-deposited		1329		1060		37.5
1040 °C×1 h+480 °C×4 h	1310	1358	1180	1250	40	46.5
1040 °C×1 h+550 °C×4 h	1060	1139	1000	1055	45	55.6
1040 °C×1 h+580 °C×4 h	1000	1111	865	1010	45	55.5
1040 °C×1 h+620 °C×4 h	930	1045	725	990	50	54

一方面,在激光立体成形制造过程中,多层熔覆沉积的退火、回火作用下成形件沉积态组织中产生一定的弥散细小析出(见图2),导致强度升高,但是

快速加热和冷却导致沉淀相不易长大,马氏体回复作用不明显,回火马氏体转变较少,因此塑性不高。经过固溶时效热处理后,组织中出现明显的再结晶,

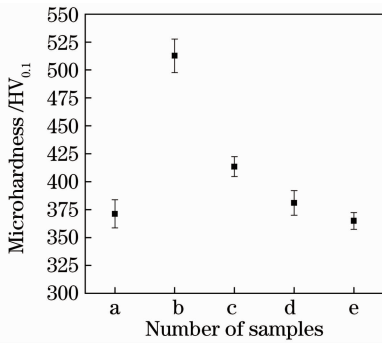


图4 激光立体成形 17-4PH 不锈钢沉积态和不同热处理态的硬度对比

Fig.4 Microhardness of as-deposited and tempered LSF of 17-4PH

马氏体也出现较为充分的回复,回火马氏体增多,因此强度和塑性有较大提高。另一方面,时效过程中,C原子从马氏体基体中析出,并使晶格畸变减少,内应力也相应减小,所以材料的塑性有了很大提高。最后,沉积态和时效回火态试样存在着不同的晶界形貌。激光沉积态由于热流作用形成外延生长的柱状晶^[10,11],而经过固溶时效热处理后晶粒变为等轴晶,比柱状晶的界面面积大,对变形有更大的阻碍作用,并且复杂的等轴晶晶界也不利于裂纹的萌生和发展,因此,热处理态的试样具有更好的塑性^[12]。

在 480 ℃时效处理过程中,过饱和的 Cu 在热力学条件满足时发生脱溶转变,在位错线和马氏体基体上析出大量与基体共格^[13]的纳米级 ϵ -Cu 相,产生了沉淀强化作用;大量过饱和的 Cr, Mn, Nb 等合金元素以合金碳化物 M_7C_3 , $M_{23}C_6$ 等形式析出,均匀细小地分布在马氏体基体上产生弥散强化或二次硬化作用^[6],两者的共同作用使试样的强度、硬度达到最大值。而随着时效温度的升高,基体与析出相的相位关系逐渐由共格向非共格过渡^[14~16],另外析出相颗粒逐渐长大,导致与位错的交互作用逐渐减弱甚至消失,弥散强化作用减弱,使其由最初的增大位错密度逐渐转变为类似基体中的夹杂,因而在受到外部应力作用时更容易萌生裂纹导致强度、硬度降低^[17]。其次,马氏体硬度和含碳量有很大关系,其硬度随含碳量的降低而降低。时效温度的升高使马氏体基体析出更多的碳化物导致含碳量下降,试样硬度也随之降低。最后,从显微组织可以看出,在固溶时效过程中出现明显的再结晶,而且随着时效温度的升高,高强度高硬度的粗大板条马氏体转变为更加细小的马氏体板条,回火马氏体和马氏体逆转变奥氏体增多,导致塑性提高。虽然细小的

板条马氏体也有助于提高强度,但是第二相长大和马氏体转变对强度的影响远远超过了细晶强化对强度的影响。因此,480 ℃时效处理时,材料的强度、硬度达到最大值;而后随着时效温度的升高,17-4PH 不锈钢的强度逐渐降低,塑性逐渐升高,机械性能比沉积态有很大提高。

为更好地对比激光立体成形 17-4PH 不锈钢的拉伸性能,表 3 中也列出了 17-4PH 不锈钢锻棒不同温度固溶时效处理后拉伸性能的国家标准。可以看到,激光立体成形 17-4PH 不锈钢沉积区热处理试样的抗拉强度、屈服强度及塑性都高于锻棒标准,主要原因是激光立体成形热处理后的组织更加致密、均匀、细小^[18]。

综合分析可知,与激光立体成形 17-4PH 不锈钢的直接沉积态相比,通过热处理可以获得更佳的使用性能。在 480 ℃时效处理时,可以获得最大的强度和硬度;在 550 ℃时效处理时,虽然强度、硬度相对于 480 ℃有所下降,但塑性、韧性有了很大幅度的提高,综合力学性能明显改善,因而可以满足既要求高强度又需要良好塑、韧性的条件。

3.3 冲击断口形貌

图 5 为热处理前后激光立体成形 17-4PH 不锈钢激光沉积态和热处理态拉伸试样断口的宏观形貌。从断口形貌看,所有宏观断口均呈现典型的韧性断裂特征,具有纤维区、放射区和剪切唇等区域。断口表面呈纤维状粗糙不平,没有结晶颗粒。但整个断面比较平滑,没有大的突起。对比热处理前后成形件的断口发现热处理后断口的纤维区和剪切唇区更大,说明其塑性更好。同时可以看出,随着时效温度的升高,拉伸试样断口中纤维区和剪切唇面积之和所占的比例越来越大,说明其塑性逐渐改善。

图 6 为断口的高倍微观形态,所有的断口皆呈蜂窝状,属于典型的韧窝-微孔聚集型断裂。这种通过孔洞核的形成、长大和相互连接的过程,属于一种高能吸收过程导致的延性断裂^[19]。其形成原因是由于 17-4PH 材料中存在以 M_7C_3 型碳化物^[5]为主的第二相粒子,在拉伸过程中的正应力的作用下有微孔形成。微孔聚集则形成微裂纹,使得应力集中加剧,进一步加剧了微孔开裂与长大以及微裂纹扩展连接。

从图 6 还可以看出,热处理前试样断口的韧窝较浅,有明显的撕裂棱特征,这说明沉积态试样塑性较差;比较热处理前后试样的断口发现热处理后断口中韧窝的数量越来越多,韧窝的尺寸、深度越来越

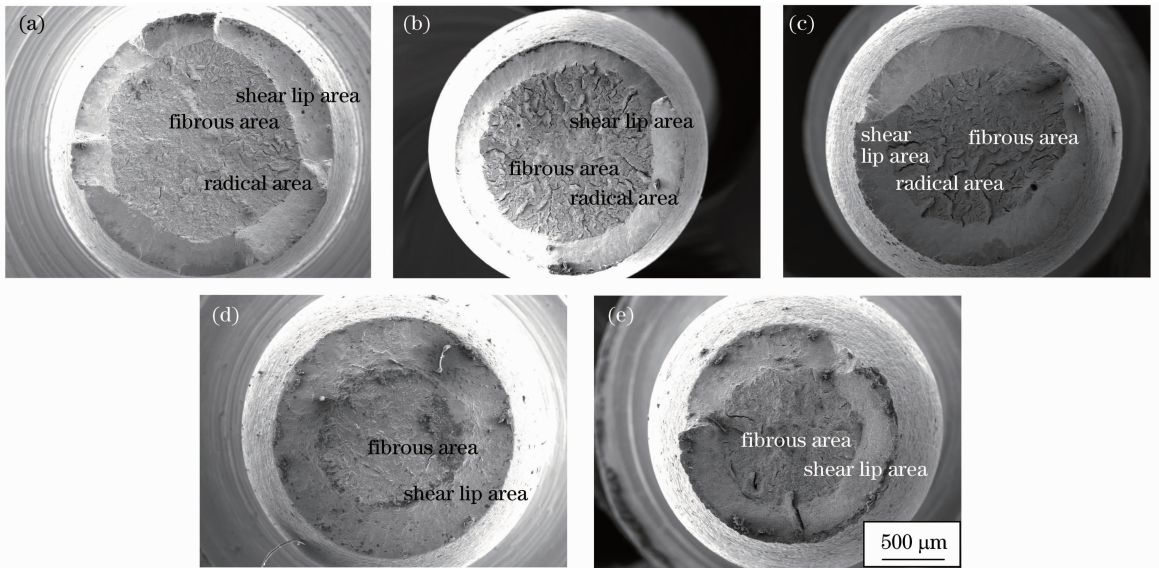


图 5 激光立体成形 17-4PH 不锈钢沉积态和不同热处理态断口的宏观形貌。(a) 沉积态; (b) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (c) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+550\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (d) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+580\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (e) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+620\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$
 Fig. 5 Macro fracture graph of as-deposited and tempered LSF of 17-4PH. (a) As-deposited; (b) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (c) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+550\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (d) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+580\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (e) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+620\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$

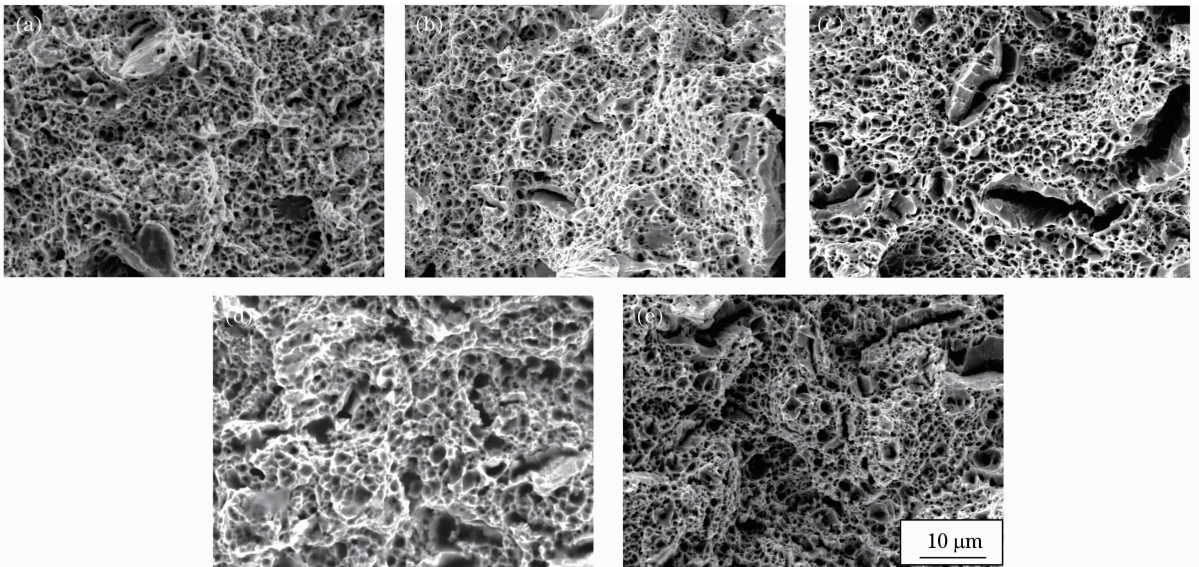


图 6 激光立体成形 17-4PH 不锈钢沉积态和不同热处理态断口的微观形貌。(a) 沉积态; (b) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (c) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+550\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (d) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+580\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (e) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+620\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$
 Fig. 6 Micro fracture graph of as-deposited and tempered LSF of 17-4PH. (a) As-deposited; (b) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (c) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+550\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (d) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+580\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$; (e) $1040\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+620\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$

大,且分布均匀。由于韧窝大小、深浅及数量取决于材料断裂时夹杂物或第二相粒子的大小、间距、数量及材料塑性和实验温度,如果夹杂物或第二相粒子多,材料的塑性较差则断口上形成的韧窝尺寸较小也较浅;反之,则韧窝尺寸较大较深。因此,与热处理前的试样断口对比发现,热处理后材料的塑性更好。随着时效温度的提高,第二相粒子数量增多、尺寸增大(见图 3),导致韧窝数量越来越多,尺寸越来越

越大,如图 6 所示。因此,通过材料常规力学性能测试结果(见表 3)的对比和断口微观形貌的分析,可知随着时效温度的升高,材料的塑性越来越好。

4 结 论

17-4PH 不锈钢激光沉积态组织主要由板条状马氏体和分布于其上和板条间少量的第二相强化质点组成;经固溶和时效热处理后,组织结构为细小的

板条状淬火马氏体和回火马氏体。与沉积态组织相比,热处理后马氏体板条的尺寸更加细小,板条上析出更多第二相,并且出现明显的再结晶。随着时效温度的升高,马氏体板条变得更加细小均匀,第二相质点逐渐粗化,晶界越来越清晰,变得更加细长。

激光立体成形 17-4PH 不锈钢沉积态的强度较高,塑性偏低;而经过固溶时效热处理后,材料的塑性比沉积态有显著的提高。480 ℃时效处理时,材料的强度、硬度达到最大值;随着时效温度的升高,材料处于过时效状态,强度、硬度逐渐降低,塑性逐渐提高。激光立体成形 17-4PH 不锈钢沉积区热处理态试样的抗拉强度、屈服强度以及塑性都高于锻件标准。

激光立体成形 17-4PH 不锈钢沉积区热处理的拉伸断口呈现韧性断裂特征,属于典型的韧窝-微孔聚集型断裂。随着时效温度的升高,拉伸试样断口纤维区和剪切唇越来越大,第二相的尺寸增大,韧窝尺寸及深度逐渐增大,材料的塑性不断增大。

参 考 文 献

- 1 Yang Xiao. The Properties and Macrostructures of 17-4PH[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007
杨 晓. 17-4PH 不锈钢性能和组织研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- 2 Wang Jun. Study on the Properties of a 17-4PH Stainless Used in a Nuclear Reactor[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007
王 均. 核反应堆用 17-4PH 不锈钢的性能研究[D]. 成都: 四川大学, 2007
- 3 Xue Lei, Chen Jing, Zhang Fengying *et al.*. Laser rapid repair of the aircraft components of titanium alloy[J]. *Rare Materials and Engineering*, 2006, **35**(11): 1817~1821
薛 蕾, 陈 静, 张凤英等. 飞机用钛合金零件的激光快速修复[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, **35**(11): 1817~1821
- 4 Sun Kuan. Research on Laser Cladding Repairing[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2000
孙 宽. 激光熔覆修复技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学硕士论文, 2000
- 5 H. Mirzadeh. Aging kinetics of 17-4PH stainless steel [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, **116**(1): 119~124
- 6 Wu Xiaoyu, Lin Xin, Lü Xiaowei *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of laser solid forming 17-4PH stainless steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203005
吴晓瑜, 林 鑫, 吕晓卫等. 激光立体成形 17-4PH 不锈钢组织性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0203005
- 7 Zou Hong, Wang Jun, Li Cong *et al.*. Study on microstructure transformation of 17-4PH stainless steel after long-term aging at 350 ℃[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2005, **26**(4): 397~401
邹 红, 王 均, 李 聪等. 17-4PH 不锈钢 350 ℃长期时效组织演化的透射电镜观察[J]. *核动力工程*, 2005, **26**(4):

397~401

- 8 Wang Jun, Zou Hong, Li Cong *et al.*. The effect of microstructural evolution on hardening behavior of type 17-4PH stainless steel in long-term aging at 350 ℃ [J]. *Materials Characterization*, 2006, **57**(4): 274~280
- 9 Chen Zhongwei, Zhang Yuzhu, Yang Linhao. Reseach and development of low carbon bainite steels[J]. *Material Review*, 2006, **20**(10): 84~86
陈忠伟, 张玉柱, 杨林浩. 低碳贝氏体钢的研究现状与发展前景[J]. *材料导报*, 2006, **20**(10): 84~86
- 10 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solidification Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2007. 126~132
黄卫东, 林 鑫, 陈 静等. 激光立体成形-高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 126~132
- 11 He Fei. Research on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Solid Repairing of In961 Alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 2008
何 飞. 激光成形修复 In961 合金组织和性能研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士论文, 2008
- 12 Liu Zhien. Fundamentals of Materials Science [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2007. 225~234
刘智恩. 材料科学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 225~234
- 13 Zang Xinshi. Microstructural study of 17-4PH steel after aging treatment[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1991, **12**(4): 23~29
臧鑫士. 17-4PH 钢时效过程中的显微组织研究[J]. *金属热处理学报*, 1991, **12**(4): 23~29
- 14 Wang Jun, Shen Baoluo, Sun Zhiping *et al.*. Aging dynamics of 17-4PH stainless steel study [J]. *Sichuan Metallurgy*, 2004, (1): 28~30
王 均, 沈保罗, 孙志平等. 17-4PH 的时效动力学研究[J]. *四川冶金*, 2004, (1): 28~30
- 15 U. K. Viswanathan, P. K. K. Nayar, R. Krishnan. Kinetics of precipitation in 17-4PH stainless steel[J]. *Materials Science and Technology*, 1989, **5**(4): 346~349
- 16 Fang Hongsheng, Liu Dongyu, Xu Pingguang *et al.*. The ways to improve strength and toughness of bainitic steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, **25**(6): 1~5
方鸿生, 刘东雨, 徐平光等. 贝氏体钢的强韧化途径[J]. *机械工程材料*, 2001, **25**(6): 1~5
- 17 Zhao Yi, Guo Yahuan, Hou Kai. Effect of heat treatment processes on mechanical properties of 17-4PH stainless steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2009, **33**(5): 5~11
赵 义, 郭亚欢, 侯 凯. 热处理工艺对 17-4PH 不锈钢力学性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2009, **33**(5): 5~11
- 18 Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. *Materials China*, 2010, **29**(6): 12~27
黄卫东, 林 鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. *中国材料进展*, 2010, **29**(6): 12~27
- 19 Cui Yuexian, Wang Changli. Metal Fracture Surfaces Analysis [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998. 34
崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 34