

不同工艺温度对 IN718 合金激光温喷丸后残余应力和纳米硬度的影响

周建忠 韩煜航* 黄舒 盛杰 孟宪凯 章海峰 徐苏强

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 激光温喷丸工艺(WLP)结合了激光喷丸强化(LP)和动态应变时效(DSA)的双重优势。为了研究不同工艺温度对 IN718 合金 WLP 后高温表面性能稳定性的影响,选取不同温度条件下,即 LP(25 °C)和 WLP(230 °C、260 °C、290 °C、320 °C)的 IN718 合金为研究对象,通过高温保持试验和纳米压痕试验,以残余压应力、纳米硬度和弹性模量为表征指标,探讨了温度效应对 WLP 后高温表面性能稳定性的影响。结果表明,随着 WLP 工艺温度的升高,残余压应力呈递减的趋势;随着保温温度的升高,LP 和 WLP 处理后试样表面残余应力释放幅度均明显增大,但前者释放速度更快;通过载荷-位移曲线可进一步确定温度效应对 IN718 合金 WLP 后高温释放行为的影响,且 260 °C 下处理的 WLP IN718 合金表面在高温下具有更好的稳定性。

关键词 激光技术; IN718; 激光温喷丸; 残余应力; 高温释放; 纳米硬度

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0703001

Effect of Different Process Temperatures on Residual Stress and Nano-Hardness of Warm Laser Peened IN718 Superalloy

Zhou Jianzhong Han Yuhang Huang Shu Sheng Jie Meng Xiankai
Zhang Haifeng Xu Suqiang

School of Mechanical and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract Warm laser peening process (WLP) is an innovative processing technique, which combines the advantages of laser peening (LP) and dynamic strain aging (DSA). In order to study the effect of different process temperatures on the thermal surface stability of WLP IN718, the LP(25 °C) IN718 and WLP(230 °C, 260 °C, 290 °C, 320 °C) IN718 are served as the research objects. From the view points of compressive residual stress, nano-hardness and elasticity modulus, the effects of different process temperatures on the thermal surface stability of WLP IN718 are explored by thermal insulation test and nano-indentation test. The results show that the compressive residual stress presents an decreasing trend with increasing the WLP temperature. LP and WLP samples thermal relaxation amplitude increase significantly with increasing the applied temperature, and the WLP samples have a better performance. WLP (260 °C) IN718 has a best performance on thermal stability and nano-hardness, and the load-displacement curve further evidences the effect of temperature on thermal relaxation of WLP IN718 superalloy.

Key words laser technique; IN718; warm laser peening; residual stress; thermal relaxation; nano-hardness

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 160.3900; 220.4610

1 引言

IN718 合金在 -253 °C~650 °C 温度范围内具有良好的综合性能,因其具有优异的抗氧化、耐腐蚀性能、良

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51405204,51175236)、高等学校博士学科点专项科研基金联合资助课题(20123227110022)、中国博士后科学基金(2013M540417,2014T70477)、江苏省博士后科研资助计划(1401065B)、江苏大学高级人才启动基金(13JDG109)

作者简介: 周建忠(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事先进激光制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

*通信联系人。E-mail: hanyuhang52@qq.com

好的加工、焊接性能和组织稳定性,被广泛应用于航空、航天、能源、化工、机械等领域^[1],其使用量占据所有高温合金的60%。然而,由于上述设备长时间在高温、高转速、高振幅工况下服役,其零部件较易发生蠕变、疲劳断裂等故障^[2],且长期以来未能得到有效解决。随着发动机效率和转速的不断提升,未来机械热锻件使用温度将超过650℃,IN718合金的应用面临严峻挑战。如何提高IN718合金高温表面性能稳定性及机械性能,从而扩大其应用范围,成为该领域研究的焦点。

激光喷丸强化(LP)是一种先进表面强化技术,通过在合金表层诱导适度的残余压应力场,从而提高材料的耐磨、耐腐蚀及疲劳性能^[3-5]。但是,研究表明,LP诱导的残余应力在高温服役条件下会发生释放,严重降低疲劳寿命^[6]。2010年,Liao等^[7-8]提出激光温喷丸技术(WLP),其结合了LP和动态应变时效(DSA)的双重优势,通过超高致密度的纳米级析出物对位错进行钉扎,阻碍其滑移,进而出现位错繁殖,显著改善材料表面稳定性。该小组^[9]研究了WLP处理6061-T6铝合金的表面强度稳定性和微观组织,结果表明,WLP较LP可诱导纳米级析出物及高密度位错,从而产生更高的表面强度及更低的表面粗糙度;析出物对位错的钉扎效应促使高密度位错更为稳定,从而使表面具有更好的高温表面性能稳定性。同时,还从硬化效果和残余应力角度分析了激光温喷丸对于AISI4140钢疲劳性能的改善作用,由于DSA作用,经过WLP处理后,硬度和疲劳强度得到了显著提高,由于碳原子使得移动的位错受到钉扎,从而使得位错组织更加密集、稳固。随后,Tani等^[10]针对AISI1045材料进行WLP和LP工艺过程建模,试验表明,该模型可成功预测WLP和LP作用后的表面残余应力和显微硬度。刘会霞等^[11]提出了一种温度辅助激光驱动飞片微塑性成形方法,试验表明,该成形方法不仅可以提高紫铜温成形能力,而且可以适当增强冲击区域硬度。

上述研究表明,温度辅助下的WLP较传统LP工艺而言,可通过在位错周围诱导高致密的纳米级析出物,对其进行钉扎,阻碍位错滑动,从而获得更稳定的位错组织、更优的表面性能。而当前的WLP强化研究主要集中在低温合金材料上,事实上,以铁、镍、钴为基体的高温合金才是航天、航空、化工、能源等领域热端部件的关键材料,因此,研究WLP工艺下高温合金材料的性能具有更实际的应用价值。对于IN718高温合金,由于 γ'' 相的粗化与转变,650℃成为限制IN718应用范围临界温度,利用WLP提高IN718合金的表面组织稳定性,从而提高其高温使用性能的相关研究报道较少。通过理论和试验相结合,以LP(25℃)和WLP(230℃、260℃、290℃、320℃)工艺条件下的IN718合金为研究对象,通过高温保持试验和纳米压痕试验,从残余应力释放和纳米硬度的变化角度探讨了温度对IN718合金WLP后高温表面性能稳定性的影响。

2 主要研究内容

2.1 试验材料与设备

选用在高温下具有良好综合力学性能的IN718镍基高温合金为试验材料,其化学成分及其质量分数为: Ni为52.50%,Cr为19.25%,C为0.058%,Si为0.149%,Mn为0.165%,S为0.001%,P为0.011%,Al为0.44%,Cu为0.044%,Ti为1.10%,Mo为2.98%,B为0.003%,Nb+Ta为4.93%,Co为0.135%,其余为Fe。

试样尺寸35 mm×15 mm,厚度5 mm,经过240#~1000#的水砂纸打磨,采用颗粒直径0.5 mm的抛光剂在金相试样磨抛机上进行抛光处理至镜面。选用50 μm厚铝箔作为吸收层,选用PMX-200二甲基耐高温硅油作为约束层。采用Nd:YAG-GAIA激光器进行WLP处理。将铝箔吸收层紧密覆盖于试样表面,并将其装夹于工作台面,设定WLP温度对其进行加热,待试样表面温度达到预定温度后,打开增压抽运压力开关使硅油约束层均匀覆于试样表面,打开激光器,对试样进行WLP强化试验。

喷丸区域为15 mm×12 mm,激光光斑直径为3 mm,搭接率为50%,脉冲为9 ns,频率为5 Hz。由于表面残余应力随着激光功率密度的增加而增大,为了研究温度对WLP强化效果的影响,选择激光器输出最为稳定的9 J作为WLP的激光能量。试样尺寸及喷丸路径示意图如图1所示。

由于激光温喷丸强化技术结合了LP和DSA的综合效果^[6],因此确定合适的喷丸温度至关重要。钱匡武等^[12]关于动态应变时效温度的研究认为动态应变时效温度范围为(0.2 T_m ~0.5 T_m)。此外,Gopinath等^[13]对于应变率与动态应变时效温度关系进行了研究,研究表明两者之间成负相关线性关系。WLP属超高应变率范畴,最佳WLP温度区间为220℃~350℃。综合考虑,选取230℃、260℃、290℃、320℃作为WLP温度,并以LP(25℃)试样作为对比探讨温度对WLP IN718合金高温性能的影响。

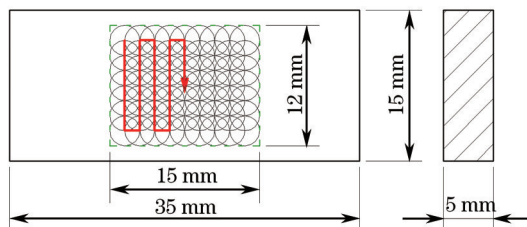


图 1 WLP 试样尺寸及喷丸路径示意图

Fig.1 Specimen size and peening scheme of WLP experiments

2.2 WLP 诱导残余应力及高温保持试验

选用 RX3-50-13 号箱式电阻炉将 LP 和 WLP 试样分别加热至 500 °C、600 °C、700 °C 后保温 3 h, 研究不同温度下保温 3 h 后的残余应力分布。残余应力测试方法采用侧倾固定 Ψ 法, 交相关法定峰, 采用 $\text{Crk}\alpha$ 辐射, (220) 晶面衍射, 衍射峰在 128° 左右, X 光管电压 22.0 kV, 管电流 6.0 mA, 应力常数 $-601 \text{ MPa}/(^{\circ})$, 倾斜角 Ψ 分别取 0°、24°、35°、45°, 扫描起始和终止角分别为 131° 和 125°, 2θ 角扫描步距 0.10°, 计数时间 0.50 s, 准直管直径 1 mm。半峰全宽值 (FWHM) 测定选用试样在 {2 2 0} 衍射峰, 布拉格角为 0°。具体试验参数设置如表 1 所示。

表 1 不同温度特定时间 (3 h) 高温保持试验参数

Table 1 Experimental parameters of high temperature exposure at different temperatures (3 h)

No.	Peening temperature /°C	Annealing temperature /°C	No.	Peening temperature /°C	Annealing temperature /°C	No.	Peening temperature /°C	Annealing temperature /°C
A1	25		B1	25		C1	25	
A2	230		B2	230		C2	230	
A3	260	500	B3	260	600	C3	260	700
A4	290		B4	290		C4	290	
A5	320		B5	320		C5	320	

2.3 WLP 纳米压痕试验

选用美国 Hysitron 公司生产的 Triboindenter 型号低载荷原位纳米力学测试仪对试样表面进行压痕试验, 进一步分析温度对 WLP IN718 合金的强化效果, 针对 LP (25 °C) IN718 和 WLP (230 °C、260 °C、290 °C、320 °C) IN718 试样在 700 °C 保温 3 h 后的表面进行纳米压痕试验。试验最大加载力为 2000 μN , 整个加载周期为 15 s, 即分别为加载 5 s, 最大压力保持 5 s, 卸载时间为 5 s。为减小实验误差, 取 3 次测试结果的平均值作为各试样测试结果。

3 结 果

3.1 试样形貌

典型 WLP (260 °C) 试样形貌如图 2 所示, 可以看到 WLP 后铝箔没有破损, 烧蚀部分激光搭接明显, 试样表面因强烈的塑性变形产生了微凹坑。

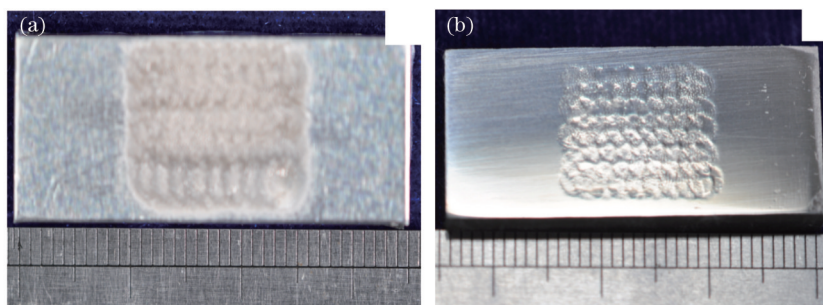


图 2 典型试样 WLP 后表面形貌。(a) 铝箔烧蚀形貌; (b) 试样表面形貌

Fig.2 Surface morphology of sample after WLP. (a) Aluminum foil; (b) specimen surface

3.2 WLP 诱导残余应力及其高温释放行为

为了观测温度对 WLP 试样高温释放行为的影响,分别对 LP 和 WLP 处理试样保温前后表层残余应力进行观测。测试时,选取 3 个点进行测试(每隔 0.75 mm 取点),然后取平均值为最终残余应力值,应力测试方向为纵向。

根据试验所得的残余应力测试报告,不同基体温度(25 °C、230 °C、260 °C、290 °C、320 °C)下 LP 和 WLP IN718 合金试样表面残余应力分布如图 3 所示。

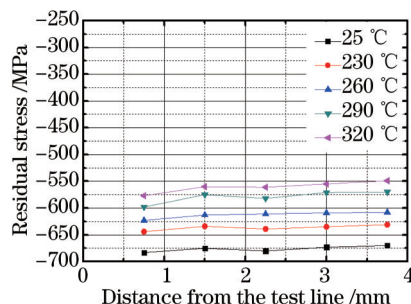


图 3 不同基体温度喷丸试样表面残余应力分布

Fig.3 Surface residual stress distribution of peening samples with different body temperatures

从图 3 可知,不同工艺温度下 LP 和 WLP 试样表面均可获得较大的残余压应力,且常温下(25 °C)激光喷丸诱导的残余压应力最大,约为-676.2 MPa。随着 WLP 温度的升高,残余压应力呈递减的趋势,WLP(320 °C)时,其诱导的残余应力均值仅为-557.4 MPa,较常温激光喷丸(-676.2 MPa)下降了 17.57%。这是因为随着基体温度上升,材料的弹性模量迅速减小,从而导致激光温喷丸诱导的残余压应力减小,这与 Ye 等^[9]在研究温度对激光喷丸诱导 6061-T6 合金塑性变形的影响时所得到的结果相一致。

不同工艺温度(25 °C、230 °C、260 °C、290 °C、320 °C) LP 和 WLP 试样经 500 °C、600 °C、700 °C 保温 3 h 的表面残余应力分布情况如图 4 所示。

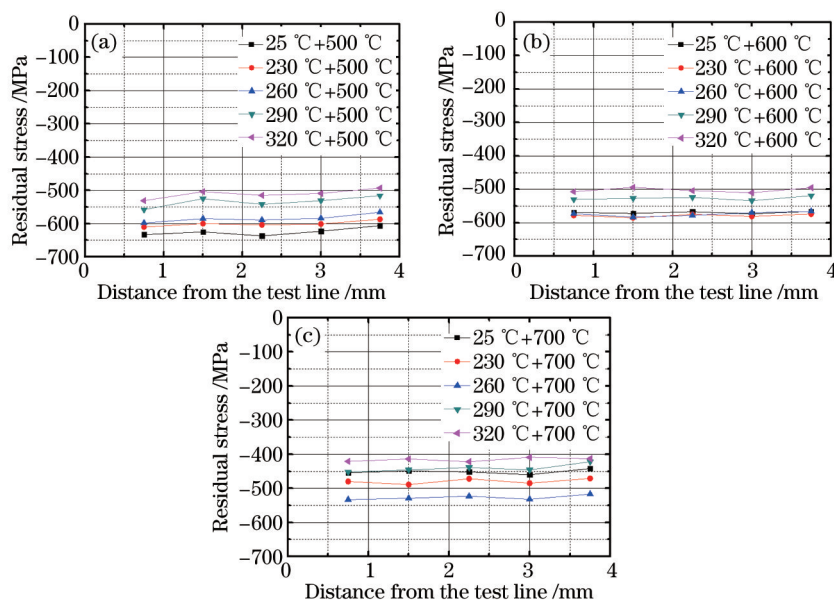


图 4 不同基体温度喷丸试样高温保持后表面残余应力分布。(a) 500 °C; (b) 600 °C; (c) 700 °C

Fig.4 Surface residual stress distribution of peening samples with different body temperatures after annealing treatment.

(a) 500 °C; (b) 600 °C; (c) 700 °C

由图 4 可知,随着保持温度的升高,各试样残余压应力释放幅度均明显增加;500 °C 保温 3 h 后,各试样残余应力下降幅度很小,释放幅度约为 40 MPa,WLP(320 °C)残余应力释放最快,释放率仅为 8.92%;600 °C 保温 3 h 后,LP(25 °C)试样的表面残余压应力明显降低,只有-569.4 MPa,比室温下降了 15.79%,WLP(230 °C)、WLP(260 °C)、WLP(290 °C)、WLP(320 °C)的残余压应力分别降至-578.6、-574、-526.8、-502 MPa,下降幅度分别为

9.11%、6.33%、9.04%、10.42%，较优于 LP(25 ℃)试样；700 ℃保温 3 h 后，LP(25 ℃)试样的表面残余应力继续大幅下降，只有 -431.4 MPa，下降幅度 33.24%，与 WLP(290 ℃)接近，然而，WLP(230 ℃)和 WLP(260 ℃)试样的表面残余应力均比 LP 试样的大，分别为 -479.4 MPa 和 526.8 MPa，且 WLP(260 ℃)试样残余应力释放幅度最小，仅为 14.03%，这么大的残余压应力在 700 ℃高温下对于抑制裂纹扩展，提高材料的疲劳寿命仍有有益的强化效果；不论何种温度条件下进行 WLP，700 ℃保温时残余压应力的释放速率较 500 ℃和 600 ℃保温时明显增加，分析认为 700 ℃服役条件下，强化相 γ'' 相属亚稳相，长期使用后逐渐粗化并转变为稳定 δ 相，导致合金强度和蠕变性能迅速改变^[2]。

WLP 较 LP 试样表面所诱导的残余应力具有更高的高温稳定性，这是由于温度的升高导致 WLP 产生了 DSA 现象，高温使位错运动阻力减弱，但此时溶质原子仍能以足够快的扩散速度赶上运动中的位错，形成足够大的溶质原子气团钉扎住位错，可动位错的减少促进了大量位错的增殖，最终使得位错密度增加，且动态回复引起的位错湮灭效应最小，位错密度在高温下也保持一个比较大的值，提高了材料的高温稳定性。

3.3 WLP 下纳米压痕测试

LP(25 ℃)和 WLP(230 ℃、260 ℃、290 ℃、320 ℃) IN718 合金试样在 700 ℃保温 3 h 后，典型纳米压痕载荷-位移加压卸载曲线如图 5 所示。结合表 2 纳米压痕测试结果可知，随着 WLP 基体温度的升高，试样表面纳米压痕接触深度不断减小，在 260 ℃时深度只有 83.96 nm，同时表面纳米硬度达到最大 8.23 GPa，较 LP(25 ℃)提高了 15.75%；WLP(260 ℃) IN718 试样表面可获得最大值为 168.55 GPa 的弹性模量，较 LP(25 ℃)提高了 21.13%。上述现象归因于高温软化效应，材料的流变应力随着基体温度的升高而不断降低，增大了加工硬化层深度；同时，WLP 试样产生了 DSA 现象，促使表面位错密度不断增加^[14]，进一步形成了大量的亚晶界、晶界等结构缺陷^[15]，导致 WLP 产生的晶粒尺寸比 LP 更小，根据 Hall-Petch 公式^[16]得

$$H_v = H_{v_0} + K_H \cdot d^{-1/2}, \quad (1)$$

式中 H_v 、 H_{v_0} 分别为被处理后试样的微观硬度以及原始基体的微观硬度值，单位为 MPa， K_H 为 Hall-Petch 常数， d 为晶粒尺寸，单位 μm 。

由(1)式可知，WLP(260 ℃)较 LP 而言可获得更大的纳米硬度，但随着 WLP 温度的继续提升，试样的平均纳米硬度有所下降，在 320 ℃时仅有 5.79 GPa，远低于 LP(25 ℃)试样，下降幅度 18.71%，其弹性模量也有相同趋势：强化效果丧失。这可能是因为 700 ℃高温条件下，合金的强化相 γ'' 发生固溶，减弱了其强化效果。

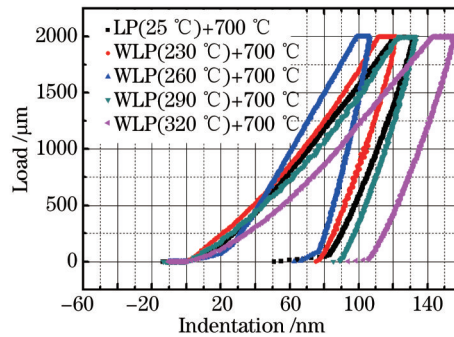


图 5 不同温度 WLP 试样高温保持后纳米压痕载荷-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curve of WLP samples with different body temperatures after annealing treatment

表 2 不同基体温度 WLP 试样高温保持后纳米压痕测试结果

Table 2 Results of indentation test of WLP samples with different body temperatures after annealing treatment

	LP(25 ℃)	WLP(230 ℃)	WLP(260 ℃)	WLP(290 ℃)	WLP(320 ℃)
Nano-hardness /GPa	7.12	7.47	8.23	6.95	5.79
Elastic modulus /GPa	139.15	142.34	168.55	127.58	110.95
Contact depth /nm	102.73	97.18	83.96	109.51	127.91

此外，纳米压痕测试在一定程度上可以表征材料的残余应力，基于纳米压痕技术的方法来测量残余应力已经引起了国内外研究学者的广泛关注^[17-19]。纳米压痕技术使材料在非常小的范围内产生变形，不会破

坏材料的结构完整性,且允许在微/纳米范围内进行残余应力的测量。

根据纳米压痕理论, Lee 等^[17]提出了一种测量残余应力的理论模型, 该理论假设残余应力和残余塑性应变在至少比压痕大几倍的深度下是等双轴的、均一的, 并假设试验过程中硬度不变, 加载曲线的斜率变化。由于压深恒定, 要求硬度不变, 材料被压入时表面形貌就会发生变化。残余应力由拉应力到压应力转换的过程中, 压痕表面形貌逐渐从凹陷变为堆积。依据压深恒定, 有无残余应力存在时加载曲线斜率的区别建立了计算残余应力的模型^[19], 其中加载曲线随应力状态的变化如图 6 所示。

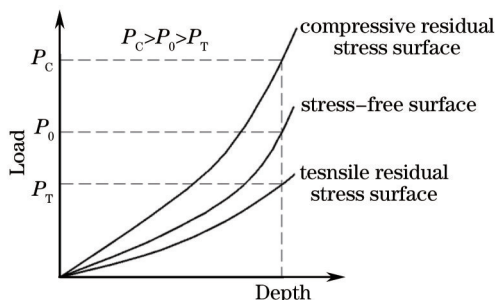


图 6 加载曲线随应力状态变化图

Fig.6 Schematics of the effect of residual stress in indented surface on load-depth loading curves

根据载荷与硬度的对应关系, 将接触面积转化为载荷的函数, 最后获得仅与载荷相关的残余应力计算公式。

对于残余拉应力:

$$\sigma^R = \frac{P_0 - P_T}{A_0}, \quad (2)$$

对于残余压应力:

$$\sigma^R = \frac{P_C - P_0}{A_0}, \quad (3)$$

式中 P_T 、 P_0 、 P_C 分别为拉应力、无应力、压应力状态下压入载荷, A_0 为无残余应力时接触面积。

图 7 为 LP(25 °C) 和 WLP(230 °C、260 °C、290 °C、320 °C) IN718 试样高温保持后纳米压痕加载曲线。由图可知, 700 °C 保温 3 h 后, 自左向右纳米压痕加载曲线依次对应 WLP(260 °C)、WLP(230 °C)、LP(25 °C)、WLP(290 °C)、WLP(320 °C) 处理试样, 这与图 4(c) 中各试样经 700 °C 高温保持后表面残余应力依次减小顺序一致。由此可见, 对于纳米压痕载荷-位移曲线, 随着残余应力的减小, 加载曲线向右偏移, 且压入深度随着压应力的减小而明显增大。这是因为压入过程中压头产生的应力方向与试样表面垂直, 当试样中存在压应力时, 压应力方向与压头下方的接触剪切应力方向相反, 从而会削弱剪切应力。残余压应力越大, 则剪切应力越小, 从而降低了压痕的塑性, 因此产生较小的压入深度。可见, 压应力对压痕过程起阻碍作用。此现象进一步说明了经 WLP(260 °C) 处理的 IN718 合金试样表面可获得最优的高温表面性能稳定性。

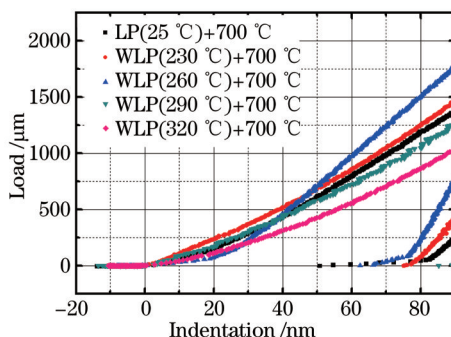


图 7 不同基体温度 WLP 试样纳米压痕加载曲线

Fig.7 Loading curve of WLP sample with different body temperatures

4 结 论

试验研究和理论分析了不同温度条件下 IN718 镍基合金激光温喷丸后的高温表面性能的稳定性的结果表明:

1) 随着基体温度的升高, WLP 诱导表面残余压应力呈递减的趋势; 在 500 °C 保温 3 h 后, 各试样的残余压应力相对较为稳定, 释放幅度约为 40 MPa, 随着保温温度的升高, 残余压应力释放量逐渐增加, 但 WLP 的残余压应力释放量远小于 LP; 不论何种温度条件下进行 WLP, 700 °C 保温时残余压应力的释放速率较 500 °C 和 600 °C 保温时明显增加, 这归结于 700 °C 服役条件下, 强化相 γ'' 相属亚稳相, 长期使用后逐渐粗化并转变为稳定 δ 相, 导致合金强度和蠕变性能迅速改变。

2) 700 °C 保温 3 h 后, WLP(260 °C) 试样残余应力为 -526.8 MPa, 较其他 WLP 工艺温度而言, 残余应力释放幅度最小, 仅为 14.03%; 且通过纳米压痕测试, 保温后 WLP(260 °C) 试样亦有较高的纳米硬度和弹性模量, 分别为 8.23 GPa 和 168.55 GPa, 这说明在高温服役条件下, 在 260 °C 下对 IN718 合金进行激光温喷丸处理具有最优的高温表面性能稳定性。

3) 通过纳米压痕加载曲线可以获得试样表面残余应力情况, 与 X 射线衍射法获得的结果一致, 即 WLP(260 °C) 处理后的 IN718 合金, 在高温服役情况下具有较高的残余压应力和硬化效果稳定性。

参 考 文 献

- Pereira J M, Lerch B A. Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel718 for jet engine fan containment applications[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 715-733.
- Loria E A. The status and prospects of alloy 718[J]. Journal of Metals, 1988, 40(7): 35-41.
- Zhou Jianzhong, Zuo Lidang, Huang Shu, *et al.*. Analysis on mechanical property of 6061-T6 aluminum alloy by laser shot peening based on strain rate[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503003.
周建忠, 左立党, 黄舒, 等. 基于应变速率的激光喷丸强化 6061-T6 铝合金力学性能分析[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503003.
- Tian Qing, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Relaxation of residual stress on Laser-Peened surface during cyclic loading[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 081403.
田清, 周建忠, 黄舒, 等. 循环载荷下激光喷丸诱导的表面残余压应力释放特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 081403.
- Zhong Jinshan, Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, *et al.*. Influence of laser shock processing on tensile properties and tribological behaviors of AISI304 stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503002.
钟金杉, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503002.
- Altenberger I, Stach E A, Liu G, *et al.*. An in situ transmission electron microscope study of the thermal stability of near-surface microstructures induced by deep rolling and laser-shock peening[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(12): 1593-1598.
- Liao Y L, Ye C, Kim B J, *et al.*. Nucleation of highly dense nanoscale precipitates based on warm laser shock peening[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(6): 063518.
- Ye C, Suslov S, Kim B J, *et al.*. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. Acta Materialia, 2011, 59(3): 1014-1025.
- Ye C, Liao Y L, Gary J, *et al.*. Warm laser shock peening driven nanostructures and their effects on fatigue performance in Al alloy 6061-T6[J]. Advance Engineering Material, 2010, 12(4): 291-297.
- Tani G, Orazi L, Fortunato A, *et al.*. Warm laser shock peening: new developments and process optimization[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 219-222.
- Liu Huixia, Zhang Qiang, Gu Chunxing, *et al.*. Experimental investigation on warm micro-forming by laser-driven flyer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703011.
刘会霞, 张强, 顾春兴, 等. 激光驱动飞片微塑性温成形实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703011.
- Qian Kuangwu, Li Xiaoqi, Xiao Lin'gang, *et al.*. Dynamic strain aging phenomenon in metals and alloys[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences), 2001, 29(6): 8-23.

- 钱匡武, 李效琦, 萧林钢, 等. 金属和合金中的动态应变时效现象[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 8-23.
- 13 Gopinath K, Gogia A K, Kamat S V, *et al.*. Dynamic strain ageing in Ni-base superalloy 720Li[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(4): 1243-1253.
- 14 Matlock D K, Richards M D, Speer J G. Surface modification to enhance fatigue performance of steel: Applications of deep rolling[C]. *Materials Science Forum*, 2010, 638: 142-147.
- 15 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin, *et al.*. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2662-2666.
- 鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新, 等. 激光单次冲击LY2铝合金微观强化机制研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2662-2666.
- 16 Harold L, Hill M R. The effects of laser peening on high-cycle fatigue in 7085-T7651 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 477(1): 208-216.
- 17 Lee Y H, Kwon D. Measurement of residual-stress effect by nanoindentation on elastically strained (100) W[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49(5): 459-465.
- 18 Xu Z H, Li X. Estimation of residual stresses from elastic recovery of nanoindentation[J]. *Philosophical Magazine*, 2006, 86(19): 2835-2846.
- 19 Wang Q, Ozaki K, Ishikawa H, *et al.*. Indentation method to measure the residual stress induced by ion implantation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2006, 242(1): 88-92.

栏目编辑: 张 雁