

TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究

陆莹 赵吉宾 乔红超

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110176)

摘要 主要研究航空常用材料 TiAl 合金激光冲击强化效果,当激光诱导产生的冲击波大于 TiAl 合金的动态屈服强度时,材料表面发生塑性变形,并引入大量的位错等晶体缺陷,从而达到表面强化的目的。通过调整激光冲击的次数和激光的能量等因素,得到不同工艺参数下 TiAl 合金的显微硬度和表面粗糙度。对其微观结构进行透射电镜观察,并与未进行冲击的试样进行对比分析,可以看出激光冲击强化可以有效地提高受冲击表面的位错密度,当位错运动受阻形成位错线的塞积,导致位错缠结;位错受到晶界的阻碍在晶界堆积,形成位错墙,位错缠结最终导致亚晶界的形成,为后期晶粒细化做准备,通过分析激光冲击强化机制,揭示了位错密度是材料表面力学性能提高的本质。

关键词 激光光学; TiAl 合金; 激光冲击强化; 组织性能

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003013

Investigation of Technical and Strengthening Mechanism Research of TiAl Alloy by Laser Shock Peening

Lu Ying Zhao Jibin Qiao Hongchao

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110176, China)

Abstract We have studied the effect of TiAl alloy shocked by the laser shock processing (LSP). When the high amplitude shock waves introduced by high energy laser exceed its dynamic yield strength, the mechanical deformation will occur in the shocked material, which will achieve the aim of surface strengthening. By changing the energy of laser and peening times, we get the results of surface roughness and micro-hardness of the work-piece. The results show that with the improvement of peening times and laser energy, the surface roughness and micro-hardness are increased. The microscopic mechanism of peened materials is also investigated in this paper. Compared with unpeened ones, it can be seen that the laser shock peening can effectively improve surface of the dislocation density. When an obstruction impedes dislocation lines (DLs) motion, which will form dislocation tangles (DTs). Accumulation of dislocations is hampered by grain boundary, and forms dislocation walls (DDWs). The transformation of DTs and DDWs into sub-grain boundaries can prepare for grain refinement. The analysis of the mechanism is introduced by laser shock processing, which reveals that dislocation density is the essence of material surface mechanical properties.

Key words laser optics; TiAl alloy; laser shock processing; structure property

OCIS codes 140.3460; 140.3538

1 引言

激光冲击强化作为一种新型的材料表面改性技术,已经被广泛的应用于航空航天材料的表面强化,由于这种冲击波压力高达数个兆帕,其峰值应力远远大于材料的动态屈服强度,从而使材料产生密集、均匀和稳定的位错结构^[1-3],同时冲击波贮藏的弹

性变形能大于材料所需的屈服、塑性变形能,使材料表面发生屈服和冷塑性变形,并在成形区域产生有益的残余压应力,并伴随有辐射、固化、分子取向及可能的相变结晶过程^[4-5]。残余压应力层能有效地消除工件因机械加工、热处理、焊接、激光切割、电镀或硬化涂层等加工形成的有害拉应力^[6]。经过激光

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-05-13

作者简介: 陆莹(1987—),女,硕士,研究实习员,主要从事激光冲击强化及表面改性工艺方面的研究。

E-mail: luying@sia.cn

冲击强化处理的金属材料表面发生晶粒细化,产生有利的表面残余应力,可抑制疲劳裂纹萌生和扩展^[7],并提高抗应力腐蚀的能力,对材料的综合力学性能有一定程度的提高^[8-9]。

与传统的喷丸、冷挤压等工艺相比较,激光冲击强化可有效地提高残余应力层的深度(提高一个数量级,可达毫米量级),激光诱导的冲击波应变率比机械冲压高 1 万倍,并且能够实现对不规则工件表面进行强化,更好的保证了表面粗糙度和尺寸精度,同时引入的残余压应力能够抑制疲劳裂纹的萌生与扩展。在实施加工方面,激光冲击强化设备具有非接触、无热影响区、可控性强以及强化效果显著等突出优点。

目前国内外许多国家都在研究激光冲击强化技术,但只有美国实现了工业应用。该项技术的发展对飞机的安全性、可靠性和维修性有着非常重要的作用,而美国对此技术严格封锁。因此我国实现自主开发激光冲击强化设备并实现大范围的工艺研究,具有极其重要的现实意义。

TiAl 基金属是一种密度低、弹性模量高、抗蠕变性能好的新型航空材料,以其综合性能指标优于传统高温合金,韧性又高于普通的陶瓷材料等特点,在航空航天材料中展现出令人瞩目的发展前景,成为新一代高温材料的代表之一,被当作高推重比先进军用飞机发动机及涡轮叶片的首选材料^[10]。NASA 报告指出,到 2020 年钛铝基金属及其复合材料的用量在航空、航天发动机中将占有 20% 左右的份额^[11]。目前激光冲击强化主要应用于航空航天发动机的表面强化,对作为航空发动机的重要材料之一的钛铝合金进行激光冲击强化性能的研究意义重大。

本文利用激光冲击强化技术对 TiAl 这种新型的高温合金进行表面改性,提高合金的表面力学性能,同时对其进行透射电镜(TEM)的观察,分析在激光冲击强化过程中,TiAl 合金的位错产生和运动过程,分析得出 TiAl 合金激光冲击强化机制。

2 试验材料及方法

采用一种新型 TiAl 合金,试样的基体组织由基相 Al 和固溶密排六方的 α -Ti 相组成,试样为 2 mm 的锻态板材,用线切割加工成 260 mm×300 mm 大小,表面用 100# 到 1000# SiC 砂纸逐级打磨,然后用三氧化二铬水溶液(Cr₂O₃)进行抛光直至表面无划痕,用无水乙醇清洗吹干,在其表面黏贴一层黑色

胶带(牺牲层)。试验采用的是由北京镭宝生产的 Extra 系列脉冲纳秒 Nd:YAG 激光器,波长为 1064 nm,脉冲宽度为 14 ns,能量范围 2~7 J,光斑直径为 2 mm,则峰值功率密度计算如表 1 所示,脉冲频率为 2 Hz,冲击过程光斑的搭接率约为 30%。

表 1 不同能量下的功率密度

Table 1 Power density with different energies

Parameter	Value		
Laser energy /J	2	4	6
Power density /(J/m ² ·ns)	0.0455	0.091	0.1365

影响激光冲击强化效果的主要工艺参数主要包括激光脉宽 τ ,激光能量 E ,光斑直径 d ,功率密度 I ,其中本质的影响是峰值功率密度,其相互之间的关系满足:

$$I_0 = \frac{4E}{\pi d^2 \tau} \quad (1)$$

为了增强对激光能量的吸收,使其更好地转变为等离子体冲击波,并且保护试样表面不被高能激光束灼伤,采用黑胶带作为激光冲击强化的牺牲层;同时为了防止冲击波向内扩散,延长冲击波的作用时间,在黑胶带外侧喷水形成水层,作为冲击的约束层,水流厚度约为 2 mm,激光冲击的工艺参数如表 2 所示。

表 2 激光冲击的工艺参数

Table 2 Process parameters of laser shock processing

Process	Laser energy	Times
Parameter	3J, 6J, 9J	1,2,4

激光冲击处理后,去掉表面胶带,然后用乙醇清洗表面。冲击后黑胶带及试样表面形貌照片如图 1 所示。

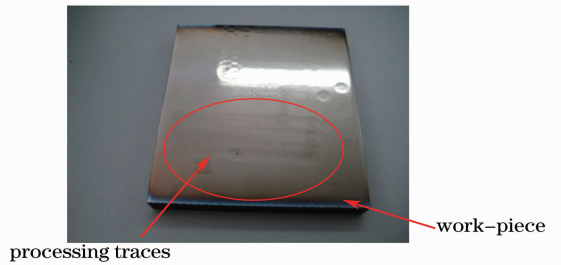


图 1 冲击后试样照片

Fig. 1 Sample photos of peened specimen

用 HV-1000 型显微硬度测试仪测量试样冲击区域的表面硬度与横截面硬度的大小及分布情况,加载重量为 200 g,保荷时间为 15 s,每个区域测量 3 次,取算数平均值。

3 试验结果与讨论

3.1 激光冲击强化工艺对 TiAl 合金的表面显微硬度分析

根据表 1 工艺制定方案,对 TiAl 合金进行表面冲击强化后,对其表面硬度进行测量,得到的如下试验结果,如表 3 所示,对测试结果绘制曲线,如图 2

表 3 不同工艺参数下的显微硬度

Table 3 Microhardness of different process parameters

		1	2	3	4	5	Average	Amplification
2 J	Unpeened	291.3	296.6	294.3	298.6	290.1	292.4	0.0%
	Once	301.6	309.4	306.3	302.8	301.2	302	3.3%
	Twice	322.3	325.8	318.4	316.3	320.2	321.3	9.9%
	Fourth	343.5	347.4	348.1	340.8	332.7	344.7	17.9%
4 J	Once	356.7	355.6	355.9	356.4	355.3	356.1	21.8%
	Twice	365.4	363.9	365.7	366.2	367.3	365.7	25.1%
	Fourth	361.3	372.7	369.8	369.2	373.2	371.5	24.5%
5 J	Once	370.6	369.4	368.2	371.6	370.6	370.2	26.5%
	Twice	380.2	377.5	375.9	381.4	377.8	379.3	29.7%
	Fourth	385.7	390.1	383.5	384.2	387.3	382.0	30.8%

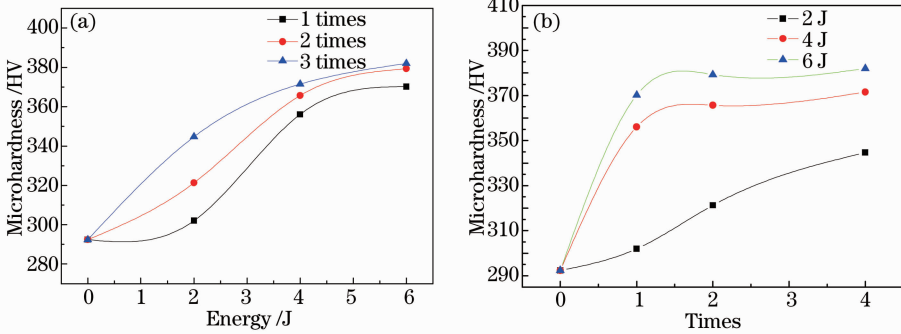


图 2 不同工艺参数下的显微硬度变化规律。(a) 激光能量对显微硬度的影响;(b) 冲击次数对显微硬度的影响
Fig. 2 Micro-hardness change with different process parameters. (a) Influence of laser energy on micro-hardness;
(b) influence of shock times on micro-hardness

同时研究了激光冲击强化冲击次数对显微硬度的影响,可以看出,冲击次数的增加可以明显提高材料表面的显微硬度,比如,能量为 6 J 的激光冲击一次后得到的显微硬度为 356.1 HV,当冲击两次后显微硬度提高到了 365.7 HV,提高了 2.7%;当冲击达到 4 次后显微硬度升高达 371.5 HV,提高了 4.3%。但是相比于能量对显微硬度的影响,冲击次数的影响较小,且趋于平缓,与之前相关报道结果相似,即冲击次数的提高有利于提高冲击效果,但是当冲击次数达到一定量时,其冲击效果便不会有所增加,因此并非冲击次数越多,冲击效果越明显。比较图(a)与(b)可知,激光能量对显微硬度的影响比冲击次数对显微硬度的影响要明显,因此提高激光能量比增加冲击次数的强化会更有效果。

所示,从图中可以看出,经激光冲击强化得到的试样,其表面的显微硬度均比未测量的试样大,并且随着能量的升高,显微硬度逐渐增大,单次冲击能量达到 6 J 时,显微硬度可以从 292.4 HV 提高到 370.2 HV,最多可以提高 26.5%,说明 TiAl 合金强化后显微硬度得到显著的提高。

3.2 激光冲击强化能量对 TiAl 合金的表面粗糙度的影响

下面对不同激光冲击能量得到的 TiAl 合金的表面粗糙度进行测试,任选三个不同的区域,对其分别对测量得到的表面粗糙度 Ra (轮廓算术平均偏差:在取样长度 L 内轮廓偏距绝对值的算术平均值)进行统计,结果如表 4 所示。

据表所示,激光引导的冲击波在光滑的材料表面发生强化作用时,材料的表面粗糙度会有不同程度的提高,且提高的幅度较大。一般认为可使被加工工件表面粗糙度 Ra 值轻松达到 0.2 以下(光洁度提高 3 级以上),表面可以认为是光滑的,即 Ra 小于 0.2 用肉眼就很难分辨出表面粗糙程度。根据表 4 可知,当激光冲击能量为 2 J 时,用肉眼无法看

到表面有任何损伤。但是当能量提高到 4 J 以上时,表面粗糙度大于 0.2,可以观察到表面有明显的

激光冲击强化引入的光斑(如图 1 所示)。

表 4 表面粗糙度随能量的变化

Table 4 Surface roughness along with the change of energy

	1	2	3	Average	Amplification
Unpeened	0.038	0.050	0.042	0.043	0.0%
2 J	0.188	0.104	0.143	0.145	237.2%
4 J	0.257	0.274	0.255	0.263	510.1%
6 J	0.369	0.360	0.374	0.368	756.5%

材料的表面粗糙度会对材料的性能有一定的影响,因此采用激光冲击强化得到金属表面,一般要对其进行简单的后续加工(如机械抛光等)。与一般的喷丸工艺相比,残余压应力层不易被处理掉(激光冲击强化引入的残余压应力层较深约 1 mm,喷丸得到的残余应力层仅为 0.1~0.2 mm,抛光后可能会消失),对处理后的金属表面进行简单的抛光,既不影响材料表面性能,同时不会影响强化效果,因此,激光冲击强化的效果要比传统喷丸工艺优越很多,对表面粗糙度要求较高的零部件,适合采用激光冲击强化工艺进行表面强化。但是也有部分环境需要增大材料的表面粗糙度,比如某些轴承如果加入润滑油,表面粗糙度较大的轴承可以将润滑油储存在表面的缝隙中,这样既不影响轴承的作用效果,同时和有效地提高润滑油的使用周期。

3.3 激光冲击强化后 TiAl 合金的微观形貌的分析

对激光冲击后的 TiAl 合金进行透射组织观察,主要分析在强化过程中位错的运动和聚集,对位错

密度进行定性分析,进而分析激光冲击强化位错强化机制。图 3 所示为未冲击试样表面的位错组织明场像,如图 4 所示为激光冲击后表面(距表面的距离小于 1 mm 处)的位错组织形貌的明场像照片。

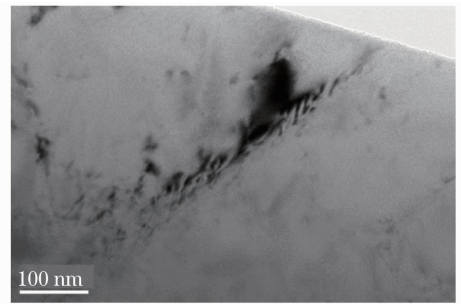


图 3 未冲击试样位错组织明场像

Fig. 3 Bright field image of specimen dislocation organization unpeened

未进行激光冲击的试样中仅存在少量的位错,未见任何形式的变形组织,如割接、位错墙、孪晶等,说明原始试样中位错密度较小,对应材料表面的硬度较小。

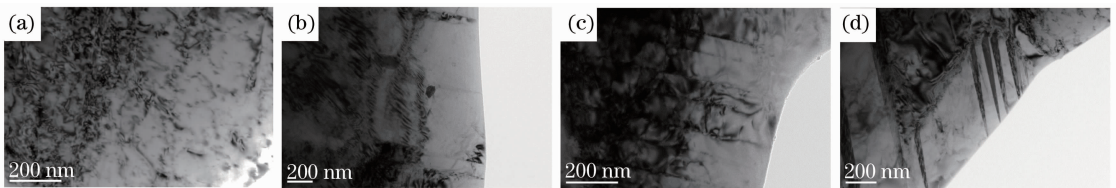


图 4 激光冲击强化后位错变化明场像。(a) 位错缠结; (b) 位错墙; (c), (d) 孪晶

Fig. 4 Bright field image of specimen dislocation organization peened. (a) Dislocations tangles; (b) dislocations walls; (c), (d) twin crystal

如图 4(a)所示,经过激光冲击后的试样表面产生了大量的位错线,位错线在冲击波的作用下运动,晶粒内部布满大量的位错,形成位错缠结(DTs),大量的位错堆积交互形成网状结构,此时位错密度明显提高,如图 4(a)所示。当位错运动受阻形成位错的塞积,形成位错亚结构,位错运动受到晶界的阻碍在晶界堆积,不仅形成位错缠结,同时还形成了沿着某一方向排列的位错堆积,继而成为位错墙(DWs),如图 4(b)所示。

在冲击波的高速应力作用下,晶粒内部不仅形成了位错,同时产生了大量的变形孪晶(MTs),变形孪晶多种位相交叉,由于透射电镜衬度的影响,从明场像的照片中只能清楚地看到沿某一方向的变形^[12],而其他方向的则隐约可见,此时孪晶两侧的取向发生偏转,形成一定的取向差,冲击后变形孪晶的密度明显增加,如图 4(c), (d)所示。

3.4 激光冲击强化机制

微观组织的变化是宏观力学性能变化的本质,

通过上述透射电镜的观察和分析,可以分析得出 TiAl 合金激光冲击强化的本质,激光冲击强化导致沿滑移面的位错运动,当位错运动受阻造成位错的缠结和位错墙等,致使冲击后的材料表面位错密度明显提高,出现高密度的位错缠结。在材料表面便以塑性变形的形式将变性能储存,并形成残余压应力,这种残余压应力在疲劳载荷中起着负平均应力的作用,有效地抑制了疲劳裂纹的萌生^[13]。位错密度的提高可使材料的屈服强度提高,导致材料需要更大的应力才能继续变形,阻碍了位错的运动,从而增加了裂纹萌生的阻力^[14]。这必然会导致各项力学性能指标有所提高,如表面硬度、抗拉强度的提高以及抗疲劳寿命的延长,这些力学性能的本质都对材料施加应力,在应力的作用下材料发生不同形式的变形,都可以统称为施加流变应力,流变应力与位错密度的关系^[15]满足:

$$\sigma_f = \sigma_0 + aGb\rho^{1/2}, \quad (2)$$

式中 σ_0 为材料固有屈服强度, a 、 G 、 b 均为常数,均属于材料的本质属性,因此,材料实际载荷变形需要的流变应力仅与材料的位错密度有关,即材料的位错密度提高,变形所需克服的流变应力越大,材料的力学性能就更为优越。而激光冲击强化的本质就是通过激光诱导的冲击波对材料表面施加应力,引入位错,并导致位错的运动、缠结和孪晶变形等晶体缺陷,最终导致材料的位错密度大幅升高,因此材料的力学性能便有了较大程度的提高^[16]。

激光冲击强化过程本质就是激光诱导冲击波在材料表面施加应力,根据(2)式可知,施加应力会明显提高金属的位错密度,致使材料表面位错密度的增加和晶粒尺寸的减小,所以表面硬度呈现出随着冲击次数的增加而增加的趋势,加工硬化程度加深。但是,位错密度的增加导致需要更大的外加应力才能使其进一步发生塑性变形,因此如果激光的工艺参数不变,即产生的冲击波压应力为定值,则激光冲击波对材料表面的作用效果就会有所降低。综上所述,增加冲击次数仅能在一定程度上提高材料表面的屈服强度,但是效果甚微,因此曲线趋于平缓。有文献报道^[17],冲击次数增加到一定程度,表面显微硬度会有所减低,针对该问题会展开进一步研究。

TiAl 合金晶体结构主要为四方晶系,滑移系较少,在通常情况下以位错滑移为主,并伴随部分的孪生变形。冷塑性变形的过程中,激光诱导冲击波使晶格发生畸变导致位错的产生和沿滑移面的移动,当位错运动受阻形成位错的塞积,形成位错亚结构,

位错受到晶界的阻碍在晶界堆积,形成位错缠结和位错墙。由于激光冲击形成的等离子体冲击波是朝着金属内部扩散分布,且激光光斑的相互搭接,导致冲击波朝多方向的滑移和交滑移相互交割缠结,在晶粒内形成具有胞状结构的位错胞^[16],随着变型程度的增大,位错在位错缠结和位错墙处不断堆积,同时在应力的作用下晶界处聚集的能量较高,在晶界处积累的能量大于形成亚晶界所需的能量,导致形成亚晶界,相比于原始晶界,亚晶界的晶界角要小很多。由于位错湮灭和重组、晶粒转动、晶界的滑动等导致亚晶界取向差逐渐变大,转变为大角晶界,最终实现了晶粒细化,这就是所谓的“位错分割机制”^[14,16]。

在此基础上对晶粒细化过程会进行进一步研究,并对其形成过程和强化机制进行更深入的分析。

4 结 论

通过对 TiAl 合金进行激光冲击强化,并对表面硬度、表面粗糙度以及微观结构的演变进行统计和分析,建立了宏观力学性能与微观组织变化之间的关系,并进一步解释了激光冲击强化的本质。

1) 经激光冲击强化得到的试样,其表面的显微硬度明显增大,并且随着能量的升高,显微硬度逐渐增大,最多可以提高 26.5%,说明 TiAl 合金强化后显微硬度得到显著的提高。冲击次数的增加可以明显地提高材料表面的显微硬度,但是相比于能量变化对显微硬度的影响,冲击次数的影响较小。

2) 激光冲击后材料的表面粗糙度会有不同程度的提高,且提高的幅度较大。同时,随着激光能量的提高,表面粗糙度有明显的上升,根据不同的服役条件,要对工件进行后续处理,而激光冲击强化得到的残余应力较深,后期加工不会影响强化效果。

3) 经过激光冲击后的试样表面产生了大量的位错线,位错线在冲击波的作用下运动,晶粒内部布满大量的位错,当位错运动受阻形成位错的塞积、位错缠结和位错墙,位错密度明显提高。在冲击波的高速应力作用下,晶粒内部不仅形成了位错,同时产生了大量的变形孪晶,冲击后变形孪晶的数量明显增加,进一步提高位错密度。

4) 探讨了激光冲击强化的本质,引入位错,并导致位错的运动和缠结并形成孪晶等晶体缺陷,材料的位错密度大幅升高,致使材料的力学性能有较大程度的提高。

参 考 文 献

- 1 X H Wu. Review of alloy and process development of TiAl alloys [J]. *Intermetallics*, 2006, 14(10): 1114—1122.
- 2 Qiao Hongchao, Zhao Jibin, Lu Ying. Develop and analysis of nanosecond pluse width Nd:YAG laser for laser peening[J]. *Chinese J Laser*, 2013, 40(8): 0802001.
乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 纳秒脉宽 Nd:YAG 激光冲击强化激光器的研制及分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0802001.
- 3 Luo Xinmin, Yuan Chunzhi, Zhang Jingwen, *et al.*. Laser shocking and its effects on microstructure and properties of metallic materials[J]. *Heat Treatment*, 2012, 27(1): 17—23.
罗新民, 苑春智, 张静文, 等. 激光冲击及其对金属材料组织和性能的影响[J]. *热处理*, 2012, 27(1): 17—23.
- 4 W Y Zhao, Y Z Liu, L Liu, *et al.*. Surface recrystallization of a gamma-TiAl alloy induced by shot peening and subsequent annealing treatments[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 270: 690—696.
- 5 Zhou Jiangzhong, Xu Zengchuang, Huang Shu, *et al.*. Effect of different stress ratios on fatigue crack growth in laser shot peened 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Chinses J Lasers*, 2011, 38(9): 0903006.
周建忠, 徐增闯, 黄舒, 等. 基于不同应力比下激光喷丸强化 6061-T6 铝合金的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0903006.
- 6 Jing Yongjuan, Wang Xinying, Zhang Ji. Effect of shot peening treatment on tensile properties of TiAl alloys[J]. *Chinese J Rare Metal*, 2009, 33(5): 750—753.
静永娟, 王欣英, 张继. 喷丸处理对 TiAl 合金拉伸性能的影响[J]. *稀有金属*, 2009, 33(5): 750—753.
- 7 Zhu Wei, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Study on the numerical simulation and statistical optimization of micro-scale laser shock peening[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): 103005.
朱伟, 周建忠, 黄舒, 等. 微尺度激光喷丸纯铜数值模拟和统计优化分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): 103005.
- 8 Zhang Lingfeng, Xiong Yi, Zhang Yi, *et al.*. Microstructure of high manganese stell by laser shock processing[J]. *Chinese J Laser*, 2011, 38(6): 0603025.
张凌峰, 熊毅, 张毅, 等. 高温锰钢在激光冲击强化作用下的微观特征[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603025.
- 9 D Lin, M Y Zhang, C Ye, *et al.*. Larger scale, highly densenanoholes on surfaces by underwater laser assisted hydrogen etching near nanocrystalline boundary [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(10): 4254—4259.
- 10 H Amar, V Vignal, H Krawiec, *et al.*. Influence of the microstructure and laser shock processing (LSP) on the corrosion behaviour of the AA2050-T8 aluminium alloy [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(10): 3215—3221.
- 11 K Y Luo, J Z Lu, L F Zhang, *et al.*. The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(5): 2599—2603.
- 12 S Couturier, T de Resseguier, M Hallouin, *et al.*. Shock profile induced by short laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(12): 9338—9342.
- 13 J P Chu, J M Rigsbee, G Banaś, *et al.*. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 260(1-2): 260—268.
- 14 Y K Zhang, J Z Lu, X D Ren, *et al.*. The effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2009, 30(5): 1697—1703.
- 15 K Y Luo, J Z Lu, Y K Zhang, *et al.*. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(13-14): 4783—4788.
- 16 T Thorslund, F J Kahlen, A Kar. Temperatures, pressures and stresses during laser shock processing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, 39(1): 51—71.
- 17 Charles S Montross, Tao Wei, Lin Ye, *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloy; a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(10): 1021—1036.

栏目编辑:韩峰