

温度辅助的激光冲击技术研究进展

苏纯^{1,2}, 周建忠¹, 孟宪凯¹, 杨祥伟¹, 杨炼²

(1.江苏大学, 江苏 镇江 212013; 2.常州工学院, 江苏 常州 213002)

摘要: 温度辅助的激光冲击技术是在激光冲击技术上发展而来的结合热力耦合效应的高能率加工和表面处理技术。在介绍温度辅助的激光冲击技术原理和特点的基础上, 分析了激光冲击波的压力模型及时空分布特性、温热及高应变率下材料的本构模型, 重点介绍了利用温度辅助的激光冲击效应的两项技术——温度辅助激光微成形和激光温喷丸强化。温度辅助激光微成形技术作为一种新颖的高能率微细加工技术, 其在温热条件下利用脉冲激光诱导的冲击波压力使金属箔板塑性成形微结构件, 可使激光冲击微拉深件的塑性变形均匀性得到显著改善, 成形高度较室温下得到进一步提升。激光温喷丸强化技术作为新材料表面处理工艺, 结合了热力耦合效应在应力强化和组织强化方面的诸多优势, 能够获得比常温激光冲击强化技术更稳定的残余压应力分布, 有效提高材料的耐热腐蚀性和疲劳性能。综述了温度辅助激光微成形和激光温喷丸强化技术的研究现状, 指出了当前在温度辅助的激光冲击技术研究中存在的主要问题, 并对今后的研究做了展望。

关键词: 激光技术; 激光冲击; 热力耦合; 激光微成形; 激光温喷丸

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)10-0121-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.019

Research Progress of Temperature-Assisted Laser Shock Technology

SU Chun^{1,2}, ZHOU Jian-zhong¹, MENG Xian-kai¹, YANG Xiang-wei¹, YANG Lian²

(1.Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2.Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

ABSTRACT: The temperature-assisted laser shock technology developed from the laser shock technology is a high-energy processing and surface treatment technology, which combines thermal mechanical coupling effects. Based on the introduction of working principle and features of the temperature-assisted laser shock technology, the pressure model and time-space distribution characters of laser shock wave and constitutive model of materials under tepidity and high strain rate were analyzed. Two techniques utilizing the temperature-assisted laser shock effects: temperature-assisted micro scale laser shock forming and warm laser peening were mainly introduced. The temperature-assisted micro scale laser shock forming technique was a novel mi-

收稿日期: 2016-03-29; 修订日期: 2016-05-21

Received: 2016-03-29; Revised: 2016-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405204); 江苏省自然科学基金项目(BK20141166); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_1014); 校级创新创业训练项目(J150182)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51405204), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20141166), the Jiangsu Province Ordinary University Graduate Research Innovation Projects(KYLX_1014) and School Innovation and Entrepreneurship Training Projects(J150182)

作者简介: 苏纯(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进激光制造技术。

Biography: SU Chun(1972—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: advanced laser manufacturing technology.

cro-processing technique of high energy rate. Under warm conditions, it could make micro structure of metal foil sheet plastic-formed by means of shock-wave pressure induced by the pulse laser and remarkably improve plastic deformation uniformity of micro deep-drawn parts. The forming height was further improved compared with that at room temperature. As a new surface treatment technology for the materials, the warm laser peening technology combining the advantages of thermal mechanical coupling effect in stress strengthening and structure strengthening could obtain the residual compressive stress distribution more stable than that of laser shock processing technology obtained at room temperature. In such case, the thermal corrosion resistance and fatigue properties of materials could be also improved effectively. After summarizing the research status about the temperature-assisted micro scale laser shock forming technology and the warm laser peening technology, the problems existing in current research of the temperature-assisted laser shock processing are pointed out. Finally, expectations of future studies on the technology are brought forward.

KEY WORDS: laser technology; laser shock; thermal mechanical coupling; micro scale laser shock forming; warm laser peening

随着光声/光力学科的发展,激光和材料相互作用产生的热、力效应已被用于金属材料的微成形与表面强化。激光冲击 (Laser Shock Processing, LSP) 技术,采用短脉冲激光器发出的冲击波辐照材料表面,由于冲击波的力效应使材料表面发生塑性变形和密集位错,从而产生组织强化和应力强化双效应^[1-5]。热力耦合效应是一种提高金属材料微观组织稳定性的有效方法,在一定的应变速率和温度范围内,金属材料会产生动态应变时效 (Dynamic Aging, DA),通过金属和合金中移动着的溶质原子和运动中的位错发生交互作用而产生高密度位错及位错钉扎,部分胞状位错在应变作用下反复结晶,产生晶粒或亚晶粒,从而形成超细晶结构。高密度位错及位错钉扎、晶粒细化等强化效应可以显著改善材料微观组织的循环稳定性及热稳定性,并能减少高温和循环载荷下残余压应力的松弛行为^[6-10]。

温度辅助的激光冲击技术将激光冲击技术和热力耦合效应有机结合,在温热环境下实现激光冲击处理。近年来相关学者针对这项新技术开展了研究,并取得了一定的成就与进展。B.Eichenhuller^[11]探究了高温下钛合金的激光微成形行为,研究结果表明提高成形温度能够在一定程度上提高钛合金的成形能力和成形精度。Emil Egerer, R. Neugebauer^[12-13]研究了高温激光微成形下的工艺特征和材料流动行为,分析结果表明在一定温度下的微成形,材料流动趋于均匀化并且可以降低各向异性效应,从而改善了成形结果。Cheng 等^[14]采用有限元计算方法研究了激光冲击脆性材料的位错动力学行为,表明 600 °C 时激光冲击在硅晶中产生了高

密度位错,并对激光冲击诱导硅晶中的位错结构和应力/应变分布进行了预测。Liao 等^[15-16]开展了激光温喷丸技术研究,对 6061 铝合金在加热温度 160 °C 下进行激光冲击实验,研究了材料中的微观组织及高密度位错行为,表明由于纳米颗粒析出引起的位错钉扎效应,高温下激光冲击产生的残余压应力释放将大大降低。高温激光冲击后疲劳寿命改善的原因不仅包括高密度位错和高幅残余压应力,而且在升温 and 循环载荷下残余应力和表面强度的高稳定性确保了疲劳性能增益的可靠性。在 250 °C 条件下对 AISI4140 钢的激光冲击强化效果分析表明,高温激光冲击过程中的动态应变时效和动态析出的综合效应通过钉扎位错滑移,稳定了位错结构,导致疲劳性能和热稳定性优于常温激光冲击^[17-18]。

本文综述了温度辅助的激光冲击技术的机理,重点介绍了利用温度辅助的激光冲击效应的两项技术——温度辅助激光微成形和激光温喷丸强化,讨论温度辅助激光微成形和激光温喷丸强化的效果及其相关性能。探讨了目前温度辅助的激光冲击技术研究中的问题和解决方法,进而展望了这项技术今后的热点研究方向。

1 温度辅助的激光冲击技术理论

1.1 激光冲击波的产生机理

当高强激光束辐照于金属材料表面时,首先金属材料由于吸收激光能量,其基体温度迅速上升而出现熔融与气化现象,接着材料表面因高热状态下汽化产生的蒸汽温度不断提高,最终蒸汽发生电离

并形成一种温度极高、密度较大的气团——等离子体,在宏观条件下可以利用热传导基本理论并借助运用固体与液体、气体与液体界面条件来更好地阐述这个连续的形成机制。等离子体常被称为物质的第四态,是一种非凝聚态,一般由带电粒子和中性离子组成,在电磁力和其他长程力的作用下,其粒子的运动和行一般以集体效应为主^[19-21],于是它的存在形式与固体、液体、气体属于同一物质层次。

在激光辐照下,上述产生的等离子体云团仍然要吸收脉冲激光提供的能量,其温度将连续快速达到超高温水平,同时保持相应的运动速度沿靶面向外的方向快速膨胀,另外该高热气团能够通过热量传递与热量辐射效应使得靶材前面的冷空气产生快速加热而发生电离现象,从而最终使得形成激光诱导的吸收波(Laser-Supported Absorption Wave, LSAW)。当激光辐照强度小于一定数值时,等离子体区域的压力与邻近区域的压力大小非常接近,此时激光诱导吸收波将以亚音速水平在靶材基体表面区域传播,从而形成激光诱导燃烧波(Laser-Supported Combustion Wave, LSCW);当激光辐照强度大于一定数值时,等离子体发生爆炸并以超音速沿着激光辐照相反的方向离开材料表面,从而形成激光诱导爆轰波(Laser-Supported Detonation Wave, LSDW)^[22-23]。

激光诱导爆轰波的主要特点是电离度水平较高,密度较大,对激光的吸收特性较好,所以其对激光具有较严重的屏蔽作用,从而大大影响激光与靶材的耦合效率,同时该情况下的冲击波总与高温区相连,所以冲击波阵面即为爆轰波。然而,电离化程度相对较弱并且温度比较低的燃烧波并没有明显的冲击波阵面,其对激光与靶材的耦合作用也有一定的影响。相关学者通过大量的研究得出,激光诱导爆轰波传播时,等离子体具有高温、高压特点,且向外膨胀的速度极大,通常达到 10^4 m/s 量级,对周围空气形成快速压缩,形成超高压冲击波,这种通过激光与靶材材料的相互作用过程中形成的等离子体,并对周围气体实施瞬时压缩而形成的冲击波称为激光诱导等离子体冲击波^[24]。

1.2 激光冲击波的压力模型及时空分布特性

Richard M. More 在研究激光与不同物质的相互作用和涉及的相关激光参数下,通过理论推导得到了激光诱导冲击波峰值压力计算公式^[25],其适

用于没有约束的情况下激光冲击波压力的理论计算模型,虽然考虑的影响因素比较多,但是没有考虑约束层的作用。所以,R. Fabbro 等人开展了具有约束层形式下的激光诱导冲击波压力计算模型,其根据能量守恒原则,推导获得约束模式下激光诱导冲击波峰值压力计算公式如下^[26]:

$$P_{\max} = 0.01 \times \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{\frac{1}{2}} \times Z^{\frac{1}{2}} \times I_0^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: P_{\max} 为冲击波峰值压力(GPa); α 为常数,通常取值为 0.1; Z 为折合声阻抗($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); I_0 为激光功率密度(GW/cm^2)。其中折合声阻抗计算公式为:

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

式中: Z_1 为约束层的声阻抗; Z_2 为工件的声阻抗。

R. Fabbro 提出的冲击波峰值压力计算模型公式(1)是基于以下几个方面的简化:1)假设脉冲激光的能量在整个激光光斑辐照区域内具有一致的分布特性,并且对靶材基体表面的加热也是均匀的;2)假设工件和约束层都具有各向同性特征,即它们具有恒定的热物理系数;3)假设激光辐照效应产生的等离子体为理想气体,激光辐照下等离子体的膨胀是一维的。尽管公式(1)并没有将激光波长、激光脉宽和不同材料对激光的吸收率等因素考虑在内,但该峰值压力计算模型与实验值符合程度较好,所以目前其应用最广泛。

美国学者 Yao 通过对 Fabbro 模型进行完善与修正,通过数学推导得到了激光冲击波压力沿光斑直径方向变化的计算模型公式为^[27]:

$$P_{(r,t)} = P_{(t)} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \quad (3)$$

式中: r 为沿光斑直径方向距离光斑中心的距离; r_0 为脉冲激光光斑半径。由式(3)可知,光斑中心处的激光冲击波压力最大,沿着光斑直径方向,距离光斑中心越远,冲击波压力值越小。

由式(1)可知,激光诱导的冲击波峰值压力 P_{\max} 与激光功率密度 I_0 的二分之一次方成正比,同时脉冲激光的功率密度随时间呈准高斯分布,所以激光冲击波压力随时间的变化关系与激光功率密度类似。图 1 为 Peyre 等人研究得到的激光冲击波压力随时间的变化关系示意图^[28],其中 τ 为脉冲激光脉宽。

从上面的讨论可知,激光冲击波的压力随空间的变化关系由式(3)给出,图2为激光冲击波随空间位置的变化关系示意图,图1和图2联合即为激光冲击波的时空分布。

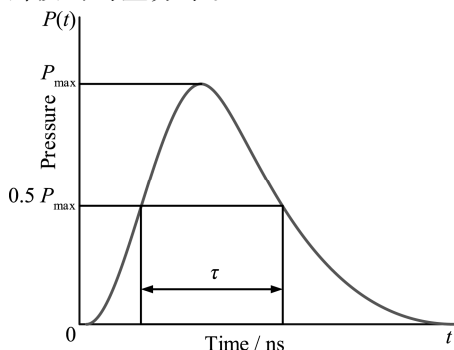


图1 激光冲击波压力随时间的分布^[19]

Fig.1 Temporal distribution of the shock wave pressure^[19]

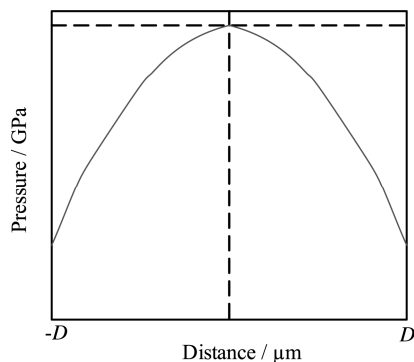


图2 激光冲击波压力随空间的分布

Fig.2 Spatial distribution of the shock wave pressure

1.3 温热及高应变率下材料的本构模型

用以描述材料总的力学行为的数学关系式通常被称为材料的本构方程,材料的本构模型由一个或一组方程组成,这组方程将流动应力与应变、应变的变化率、温度、材料的热力学状态以及材料的相应结构参数联系起来。在温热高应变率的作用下,材料的力学性能受到惯性作用及应变率和温度等因素的影响,发生塑性变形,其力学行为呈现出明显的应变率相关性。很多学者开展了大量的相关实验探究,并且依据实验获得的材料参数进行拟合而形成了形态各异的本构模型。典型的如 D. J Steinberg^[29-30]等研究表明加载压力小于 10 GPa 时,应变率效应才比较显著,并在此基础上提出了 Steinberg 模型。以及 Zerilli 和 Armstrong^[31]共同提出的 Z-A 材料本构方程, Follansbee 和 Kocks^[32]共同提出的材料力学阈值应力本构方程即 MTS 模型,这些模型都将材料的微观结构特征考虑到模型

的建立中。

Johnson 和 Cook^[33]提出了一个材料本构关系式,其综合考虑了材料产生较大变形,并且在高应变率以及高温情况下的材料力学行为,即 Johnson-Cook 本构方程(J-C 模型),其表达式如下:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}))(1 - (\frac{T - T_0}{T_m - T_0})^m) \quad (4)$$

式中: σ 为材料的动态屈服强度; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率,通常取 $0.1 \sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; T 为试样的温度; T_0 为室温; T_m 为材料的熔点; A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料参数。

由式(4)可知,方程式等号右边第一项表示应变强化作用,第二项表示瞬时应变率的影响,第三项为温度对屈服应力的热软化作用。Johnson-cook 本构方程式被广泛应用于实验及模拟中,由不同温度下的应力应变曲线可知,金属材料在变形过程中,随着温度的提高材料的流动应力变小,进而改善了材料在塑性变形中的加工硬化行为。

2 温度辅助激光微成形

2.1 温度辅助激光微成形工艺

温度辅助激光微成形的基本原理如图3所示,该成形工艺装置主要包括脉冲激光器、上压板、约束层、吸收层、试样靶材、微凹模和加热装置等。首先利用加热板对微凹模及靶材进行加热,待温控装置显示达到设定的加工温度时,脉冲激光器发出激光束作用于覆盖在超薄板材表面上的能量吸收层,吸收层材料汽化电离形成等离子体冲击波作用于金属靶材,同时保护靶材表面不受到热损伤,约束层用于提高冲击波的压力和作用时间。靶材在强冲击波压力作用下产生屈服,最终实现温热条件下激光冲击微塑性成形。

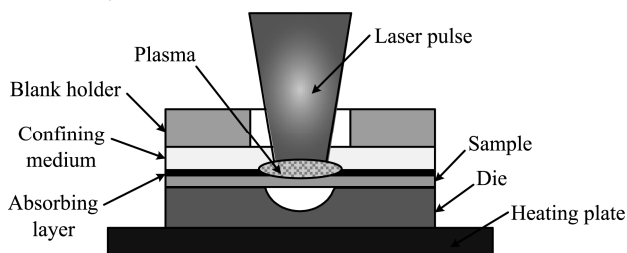


图3 温度辅助的激光冲击微成形原理

Fig.3 The schematic diagram of temperature-assisted micro-scale laser shock forming

2.2 研究现状

当前对于激光冲击微塑性成形工艺的研究中，大都仅探讨工件靶材在恒定预热温度下激光冲击微成形件的微观组织及力学性能变化,Dai 等^[34—35]就不同温度下激光冲击微成形件的成形性能作了定量研究，研究结果较具代表性。实验中所采用的加工温度分别为 25、100、130、160、190 ℃，对铜箔材的激光冲击微成形性能开展了比较研究，采用 VHX-1000 超景深三维显微镜对成形试样进行局部细微测量，在得到成形工件三维形貌的基础上测量了工件的成形高度。为了使实验结果具有可比性，其他工艺参数设为固定值，将不同温度下成形件的成形效果进行对比分析。

图 4 为在脉冲激光能量为 2000 mJ、微凹模孔径为 1 mm 时，不同温度下微拉深成形件的三维形貌测试结果。分析表明常温（25 ℃）下成形件的形貌质量较差，出现偏心现象，没有获得良好的激光微拉深成形效果；而在温热条件（190 ℃）下，激光微拉深成形件成形为球冠状，形貌中心与微模具中心的中中性较好，成形质量较高。室温下成形工件产生上述成形缺陷的主要原因是微尺度效应的存在，工件成形过程中受到材料各向异性和材料流动不均匀性的影响，从而导致成形件塑性变形不均匀，成形质量较差。

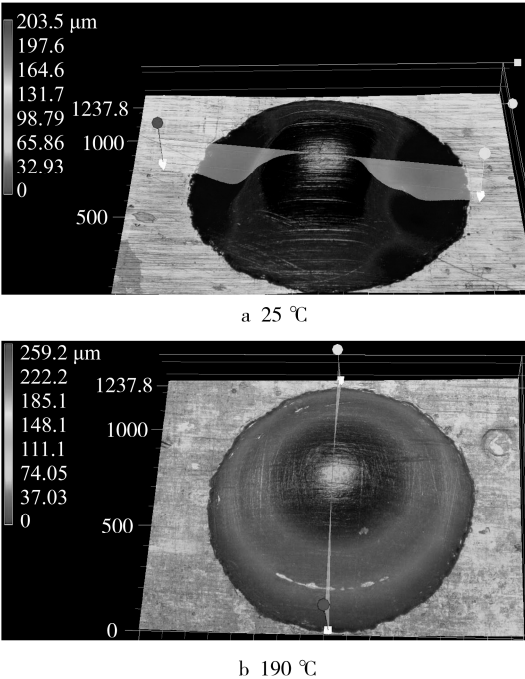


图 4 不同温度下成形工件的三维形貌
Fig.4 The 3D microtopography of formed workpiece at different temperatures

图 5 为微拉深件的成形高度随不同温度的变化关系。在所探究的成形温度下，成形件的成形高度较室温下得到进一步提升，由图 5 可知，130 ℃ 时微拉深件的成形高度达最大值，为 208.8 μm，与室温下成形高度 139.4 μm 相比提高了 50%。但是，当进一步提高成形温度时，开始出现再结晶现象，成形件的成形高度出现小幅减小的趋势。

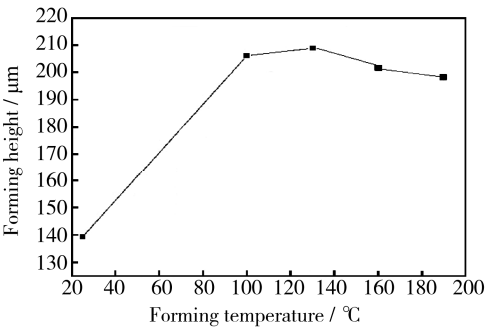


图 5 不同温度下成形工件的成形高度
Fig.5 The forming height of formed workpiece at different temperatures

3 激光温喷丸强化

3.1 激光温喷丸强化工艺

普渡大学 YE Chang 等^[15—17,36—40]提出了激光温喷丸新工艺，其原理如图 6 所示。在常温激光冲击的基础上增加了温度效应，用加热板将试样加热到一定的动态应变时效温度，然后对试样进行不同温度的激光冲击实验，激光诱导的高压、高应变率冲击波作用在受热试样上，发生了热-力耦合综合效应，不仅产生比常温激光冲击更稳定的位错结构，而且在晶界处发生纳米析出，从而获得更佳的表面强化效果。

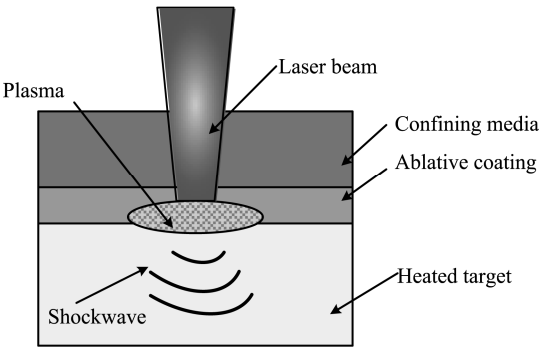


图 6 激光温喷丸原理示意^[15]
Fig.6 The schematic diagram of warm laser peening^[15]

3.2 研究现状

江苏大学 Zhou 等^[41—50]近年来对激光温喷丸强化技术进行了深入研究,研究发现,IN718 镍基合金激光温喷丸后的显微硬度和半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)值随工作温度的提高也有明显增加,而残余应力随工作温度的提高有所减小。处理后的试样在不同高温保持后残余应力、显微硬度和 FWHM 值测试结果显示,700 ℃保持 3 h 后常温激光冲击的试样表面残余应力几乎完全释放,而激光温喷丸的试样表面残余应力释放较慢,表明在 220~260 ℃温度范围内激光温喷丸 IN718 合金后的试样表面性能在高温下有更好的稳定性。对 260 ℃温喷丸(Warm Laser Peening, WLP)试样和未处理试样在 700 ℃的混合盐溶液(75%Na₂SO₄+25%NaCl)中的热腐蚀实验结果显示,25 h 后,前者几乎没有腐蚀失重,而后者腐蚀失重严重,对腐蚀表面的 XRD 和 SEM 分析发现,WLP 试样表面有一层致密的 Cr₂O₃ 氧化膜,而未喷丸表面的氧化膜疏松粗糙,局部有剥落现象。分析认为激光温喷丸后试样表面晶粒显著细化,晶界处产生大量细小析出,抑制了氧离子和硫离子的侵入,提高了氧化膜的稳定性^[43]。针对 Ti6Al4V 钛合金材料的激光温喷丸和常温激光冲击对比实验发现,喷丸温度对于激光温喷丸诱导的残余压应力的稳定性具有显著影响,随着喷丸温度的增加,残余压应力释放率逐渐降低,常温激光冲击诱导的残余压应力的释放率最高,而 300 ℃时激光温喷丸诱导的残余压应力的释放率最低,仅为 6.3%,说明 300 ℃时激光温喷丸诱导的残余压应力的稳定性最好,此时应力释放率比常温激光冲击降低了约 61%,同时残余压应力影响深度是常温激光冲击的近 1.4 倍^[41]。

4 结语

温度辅助的激光冲击技术应用于微成形可以降低材料各向异性效应,使材料流动趋于均匀化,从而提高成形精度;应用于材料表面强化时,由于动态应变时效和动态析出的综合效应可以提高强化效果的高温稳定性。因此,这项技术必将具有广阔的市场前景。目前温度辅助的激光冲击技术适用的理论及模型相对较少,需要逐步建立和完善新的

理论模型。后续需要对温度辅助的激光微成形工艺和激光温喷丸工艺进行系统研究,优化工艺过程和关键参数,建立明确的质量评估标准,从而实现对温度辅助的激光冲击技术相关工艺的优化控制。

参考文献

- [1] KING A, STEUWER A, WOODWARD C, et al. Effects of Fatigue and Fretting on Residual Stresses Introduced by Laser Shock Peening[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435-436: 12—18.
- [2] SPANRAD S, TONG J. Characterization of Foreign Object Damage (FOD) and Early Fatigue Crack Growth in Laser Shock Peened Ti-6Al-4V Aerofoil Specimens[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 2128—2136.
- [3] MONTROSS C S, WEI Tao, YE Lin, et al. Laser Shock Processing and Its Effects on Microstructure and Properties of Metal Alloys: A Review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 1021—1036.
- [4] HU Yong-xiang, GONG Chun-ming, YAO Zhen-qiang, et al. Investigation on the Non-Homogeneity of Residual Stress Field Induced by Laser Shock Peening[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 3503—3508.
- [5] HU Yong-xiang, YAO Zhen-qiang. Overlapping Rate Effect on Laser Shock Processing of 1045 Steel by Small Spots with Nd:YAG Pulsed Laser[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 1517—1525.
- [6] 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.
QIAN Kuang-wu, LI Xiao-qi, XIAO lin-gang, et al. Dynamic Strain Aging Phenomenon in Metals and Alloys[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2001, 29(6): 8—23.
- [7] 郭扬波, 唐志平, 程经毅. 一种基于位错机制的动态应变时效模型[J]. 固体力学学报, 2002, 23(3): 249—256.
GUO Yang-bo, TANG Zhi-ping, CHENG Jing-yi. A Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Model for Dynamic Strain Aging[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2002, 23(3): 249—256.
- [8] LIANG Ri-qiang, KHAN A S. A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Models for BCC and FCC Metals over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures[J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15: 963—980.
- [9] AUSTIN R A, MCDOWELL D L. A Dislocation-Based Constitutive Model for Viscoplastic Deformation of FCC metals at Very High Strain Rates[J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27: 1—24.
- [10] CUI C Y, GU Y F, YUAN Y, et al. Dynamic Strain Aging in a New Ni-Co Base Superalloy[J]. Scripta Materialia,

- 2011, 64: 502—505.
- [11] EICHENHULLER B, ENGEL U. Microforming of Titanium-Forming Behaviour at Elevated Temperature[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2008, 222: 77—82.
- [12] EGERER E, ENGEL U. Process Characterization and Material Flow in Microforming at Elevated Temperature [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2004, 6(1): 1—7.
- [13] NEUGEBAUER R, ALTAN T, GEIGER M, et al. Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures[J]. *CIRP Annals-manufacturing Technology*, 2006, 55(2): 793—816.
- [14] CHENG G J, SHEHADEH M A. Multiscale Dislocation Dynamics Analyses of Laser Shock Peening in Silicon Single Crystals[J]. *International Journal of Plasticity*, 2006, 22: 2171—2194.
- [15] 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.
- [16] YE Chang, LIAO Yi-liang, CHENG G J. Warm Laser Shock Peening Driven Nanostructures and Their Effects on Fatigue Performance in Aluminum Alloy 6160[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(4): 291—297.
- [17] YE Chang, CHENG G J. 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.
- [18] TANI G, ORAZI L, FORTUNATO A, et al. Warm Laser Shock Peening: New Developments and Process Optimization[J]. *CIRP Annals-manufacturing Technology*, 2011, 60: 219—222.
- [19] 李定. 等离子体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- LI Ding. *Plasma Physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [20] HULL R, OSGOOD R M, PARISI J J, et al. The Theory of Laser Materials Processing[M]. Dordrecht: Springer, 2008.
- [21] STEEN W M, MAZUMDER J. *Laser Material Processing* [M]. London: Springer, 2010.
- [22] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- SUN Cheng-wei. *Laser Irradiation Effect*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [23] HULL R, JAGADISH C, OSGOOD R M, et al. *Physics of Laser Materials Processing*[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [24] 周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- ZHOU Nan, QIAO Deng-jiang. *Materials Dynamics under Pulse Beam Radiation*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [25] MORE R M. Laser-Driven Shockwave Experiments at Extreme High Pressures[J]. *NASA STI/Recon Technical Report*, 1979, 80: 23649.
- [26] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical Study of Laser-Produced Plasma in Confined Geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775—784.
- [27] ZHANG W, YAO Y L, NOYAN I C. Microscale Laser Shock Peening of Thin Films, Part 1: Experiment, Modeling and Simulation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(1): 10—17.
- [28] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser Shock Processing of Aluminium Alloys Application to High Cycle Fatigue Behavior[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 210 (1): 102—113.
- [29] STRINBERG D G, COCHRAN S G, GUINAN M W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High-Strain Rate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1498—1504.
- [30] 彭建祥. Johnson-Cook 本构模型和 Steinberg 本构模型 的比较研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2006.
- PENG Jian-xiang. *Comparative Study of Johnson-Cook and Steinberg Constitutive Model*[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006.
- [31] ZERILLI F, ARMSTRONG R. Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816—1825.
- [32] FOLLANSBEE P S, KOCKS U F. A Constitutive Description of the Deformation of Copper Based on the Use of the Mechanical Threshold Stress as an Internal State Variable[J]. *Acta Metallurgica*, 1988, 36(1): 81—93.
- [33] JOHNSON G R, COOK W K. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures[C]// In Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. Hague: [L. n.], 1983: 541—547.
- [34] 戴磊, 周建忠, 黄舒, 等. 温度辅助的金属箔板激光冲击微成形性能[J]. *光学学报*, 2014, 34(S2): s214005.
- DAI Lei, ZHOU Jian-zhong, HUNAG Su, et al. The Formability of Metal Foil by Temperature-Assisted Microscale Laser Shock Forming[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(S2): s214005.
- [35] FAN Y J, ZHOU J Z, HUANG S, et al. Study on 2-D Shock Wave Pressure Model in Micro Scale Shock Peening[J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2013, 33:111—118.
- [36] YE Chang, LIAO Yi-liang, SUSLOV S. Ultrahigh Dense and Gradient Nano-Precipitates Generated by Warm Laser Shock Peening for Combination of High Strength and Ductility[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 609: 195—203.
- [37] LIN Dong, SUSLOV S, YE Chang, et al. Laser Assisted Embedding of Nanoparticles into Metallic Materials[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258: 2289—2296.
- [38] LIAO Yi-liang, SUSLOV S, YE Chang, et al. The Mechanisms of Thermal Engineered Laser Shock Peening for Enhanced Fatigue Performance[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60: 4997—5009.

- [39] YE C, GARY J C. Effects of Temperature on Laser Shock Induced Plastic Deformation: The Case of Cooper[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132: 061009-1-8.
- [40] WICK A, SCHULZE V, VOHRINGER O. Effects of Warm Peening on Fatigue Life and Relaxation Behavior of Residual Stresses in AISI 4140 Steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 293: 191—197.
- [41] ZHOU J Z, MENG X K, HUANG S, et al. Effects of Warm Laser Peening at Elevated Temperature on the Low-cycle Fatigue Behavior of Ti6Al4V Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 643: 86—95.
- [42] 周建忠, 朱炜立, 孟宪凯, 等. 激光温喷丸 TC4 钛合金的阻尼特性研究[J]. 应用激光, 2015, 35(1): 35—39.
- ZHOU Jian-zhong, ZHU Wei-li, MENG Xian-kai, et al. Study on the Damping Properties of TC4 Titanium Alloy Subjected to Warm Laser Peening[J]. Applied Laser, 2015, 35(1): 35—39.
- [43] 季杏露, 周建忠, 黄舒, 等. 温度及功率密度对镍基合金 IN718 激光温喷丸影响的数值模拟与实验研究[J]. 应用激光, 2013, 33(2): 139—143.
- JI Xing-lu, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, et al. Numerical Simulation and Experimental Research of the Influence of Warm Laser Peening on IN718 Alloy with Temperature and Power Density[J]. Applied Laser, 2013, 33(2): 139—143.
- [44] 孟宪凯, 周建忠, 黄舒, 等. 激光温喷丸诱发单晶铜位错扩展的分子动力学模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702003.
- MENG Xian-kai, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, et al. Molecular Dynamics Simulation of Dislocation Development in Monocrystalline Copper Induced by Warm Laser Peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0702003.
- [45] 周建忠, 韩煜航, 黄舒, 等. 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[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0703001.
- ZHOU Jian-zhong, HAN Yu-hang, HUANG Shu, et al. Effect of Different Process Temperatures on Residual Stress and Nano-Hardness of Warm Laser Peened IN718 Superalloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0703001.
- [46] FENG Xu, ZHOU Jian-zhong, MEI Yu-fen, et al. Improving Tribological Performance of Gray Cast Iron by Laser Peening in Dynamic Strain Aging Temperature Regime[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(5): 904—910.
- [47] 冯旭, 周建忠, 王建军. 激光喷丸灰铸铁表面摩擦性能的改善研究[J]. 应用激光, 2015, 35(5): 521—524.
- FENG Xu, ZHOU Jian-zhong, WANG Jian-jun. Research on Improving Friction Performance of Grey Cast Iron by Laser Peening [J]. Applied Laser, 2015, 35(5): 521—524.
- [48] 冯旭, 周建忠, 王建军. 温度辅助的激光微造型灰铸铁表面摩擦学性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 44(22): 132—137.
- FENG Xu, ZHOU Jian-zhong, WANG Jian-jun. Research on Surface Tribology Performance of Gray Cast Iron by Laser Texturing under Temperature Assistance[J]. Hot Working Technology, 2014, 44(22): 132—137.
- [49] 孟宪凯, 黄舒, 安中伟, 等. 激光温喷丸过程中冲击波压力的有限元分析[J]. 光学学报, 2013, 33(S1): s106001-1-5.
- MENG Xia-kai, HUANG Su, AN Zhong-wei, et al. Finite Element Analysis of Shock Wave Pressure Induced by Warm Laser Peening[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(S1): s106001-1-5.
- [50] 孟宪凯, 周建忠, 黄舒, 等. 高周疲劳条件下激光温喷丸 TC4 钛合金的残余应力释放规律及疲劳特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(5): 1185—1190.
- MENG Xian-kai, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, et al. Residual Stress Relaxation and Fatigue Properties of TC4 Titanium alloy Induced by Warm Laser Peening under High-Cycle Fatigue[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1185—1190.