

纳秒脉冲激光诱导冲击波作用下 TC17 钛合金高应变率本构模型参数辨识

游 熙 聂祥樊 何卫锋 李东霖

空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038

摘要 基于 Johnson-Cook(J-C)本构模型,提出了基于有限元模型和修正 Levenberg-Marquard(L-M)算法的参数辨识方法。对 TC17 材料进行不同参数、不同工艺的激光冲击,得到了高应变率条件下的残余应力场分布;利用霍普金森压杆得到了中应变率条件下 TC17 材料的动态响应曲线;将上述两个测试结果作为辨识目标。引入低应变率条件下材料的响应曲线作为约束条件,辨识得到了 TC17 钛合金高应变率条件下的 J-C 本构模型参数。实验和计算结果对比验证表明,辨识得到的参数能比较准确地描述 TC17 钛合金材料高应变率条件下的动态响应规律,并预测激光冲击条件下材料的残余应力场分布。

关键词 激光器; 本构模型; 纳秒脉冲激光; TC17 钛合金; 高应变率; 参数辨识

中图分类号 V261.93; TG135

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0802003

Parameter Identification of Constitutive Model at High Strain Rate for TC17 Titanium Alloy Under Shock Wave Induced by Nanosecond Pulsed Lasers

You Xi Nie Xiangfan He Weifeng Li Donglin

Key Laboratory of Science and Technology on Plasma Dynamics, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China

Abstract On the basis of the Johnson-Cook (J-C) constitutive model, one parameter identification method based on the finite element model and the modified Levenberg-Marquard (L-M) algorithm is proposed. When TC17 materials are under laser shocking with different parameters and processes, the residual stress field distribution at high strain rate is obtained and the dynamic response curve at intermediate strain rate is obtained by the Hopkinson pressure bar. The above two test results are taken as the targets of identification. The response curve at low strain rate is introduced as a constraint condition and the J-C constitutive model parameters at high strain rate are identified. The comparison between the experimental and calculated results indicates that the parameters obtained by identification can be used to accurately describe the dynamic response law of TC17 titanium alloys at high strain rate and to predict the residual stress field distribution of materials under laser shocking.

Key words lasers; constitutive model; nanosecond pulse laser; TC17 titanium alloy; high strain rate; parameter identification

OCIS codes 140.3590; 140.3390

1 引 言

TC17 钛合金是一种新型航空发动机材料,具有强度高、断裂韧度好、淬透性高等特点,广泛应用于发动机的风扇和压气机盘等构件,在航空制造领域具有十分重要的应用价值^[1]。然而,振动疲劳、外物冲击等严苛的服役环境对 TC17 钛合金零部件的性能提出了更高的要求。

收稿日期: 2016-03-08; **收到修改稿日期:** 2016-04-07

基金项目: 国家 973 计划(2015CB057400)、国家自然科学基金(51505496,51305456)

作者简介: 游 熙(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: 296212034@qq.com

导师简介: 何卫锋(1977—),男,博士,教授,主要从事航空零部件激光冲击强化方面的研究。

E-mail: hehe_coco@163.com(通信联系人)

激光冲击强化(LSP)是一种新型表面强化技术,利用纳秒脉冲激光诱导冲击波的力效应使材料表层产生塑性变形,同时微观组织结构发生改变,并残留较大压应力,从而显著提高金属材料抗疲劳、耐磨损和防应力腐蚀等性能^[2-5]。因此,LSP技术在提高航空发动机钛合金零部件抗疲劳性能、抗外物损伤能力等方面具有非常广阔的应用前景。残余应力是考核强化效果的重要指标之一^[6]。有限元(FE)法已成为LSP应用研究的重要手段,可预测强化后材料的残余应力场分布,为LSP的机理研究和工艺优化提供理论指导。材料本构模型是有限元法的重要基础和前提,但关于TC17钛合金本构模型的参数研究尚不完善。

本构模型是指材料受力作用时反映出来的应力-应变关系,不同载荷条件下的材料会表现出不同的动力学响应。目前,学者们根据实验结果和工程经验提出了各种本构模型,如Elastic-Perfectly-Plastic(E-P-P)模型^[7]、Power-Law(P-L)模型^[8]、Johnson-Cook(J-C)模型^[9]、Zerilli-Armstrong(Z-A)模型^[10]等。J-C本构模型是常用来反映材料动态力学行为的本构模型,在LSP、高速冲击等高应变率力学行为的数值模拟中广泛应用。Wang等^[11-12]采用Ti-6Al-4V(6%、4%分别指对应组分所占的质量分数,下同)钛合金的J-C本构模型及失效模型,分别进行了平板试样的外物损伤和LSP后的类叶片试件外物损伤(FOD)数值模拟,仿真结果可准确预测损伤形貌和残余应力分布。Peyre等^[13]采用J-C本构模型进行了12Cr钢、316L不锈钢等材料在不同激光参数条件下的冲击强化数值模拟。在J-C本构模型的参数获取上,分离式霍普金森压杆(SHPB)是常用的实验装置。Seo等^[14-15]利用SHPB分别测试了Ti-6Al-4V钛合金和GH4169高温合金在高温环境下的应力-应变关系,并拟合得到了两种材料基于温度的J-C本构修正模型参数。杨树宝等^[16]利用材料试验机 and SHPB测试了置氢TC4钛合金在不同应变率下的动态力学性能,并拟合得到了置氢TC4钛合金的J-C本构模型参数。胡绪腾等^[17]通过准静态拉伸和SHPB实验对TC4钛合金的J-C、Z-A和Bammann三种本构模型参数进行了最小二乘估计。

由于LSP的脉冲激光作用时间极短,仅为20~30 ns,现有实验手段无法直接对材料动态响应进行测试。在激光诱导冲击波作用下,材料塑性变形发生在冲击波上升时的波阵面上,冲击波的上升时间和冲击区体积的缩减决定了应变率的大小^[18]。纳秒激光诱导冲击波能量高,持续时间短,可使材料应变率达 10^6 s^{-1} 。然而,现有本构模型参数的获取方法均是在SHPB等应变率小于 10^4 s^{-1} 的实验条件下进行的,这些实验方法无法准确描述LSP下材料的高应变率动态力学性能,并且需要对数据进行简化、平滑和离散化处理,这会引入一定的参数误差。

本文以TC17钛合金为研究对象,针对现有获取参数的方法不适用高应变率条件且在LSP过程中存在动态响应测试困难的问题,提出基于修正Levenberg-Marquard(L-M)算法和有限元模型的参数辨识方法,开展激光冲击和SHPB实验,获取TC17在高、中应变率条件下的残余应力分布和动态响应并将其作为辨识目标。其中,利用修正L-M算法对参数进行迭代调整可使数值模拟与实验测试吻合,从而实现TC17钛合金J-C本构模型参数辨识。研究过程中发现,引入TC17低应变率条件下的动态响应作为约束条件,可有效提高辨识速度和辨识参数精度。最后结合数值模拟对辨识参数的准确性进行了实验验证。

2 基于修正L-M算法和有限元模型的参数辨识方法

2.1 J-C本构模型

J-C本构模型是一种能够反映材料在高应变率和高温条件下力学性能的理想刚塑性强化模型,综合考虑了应变、应变率和温度等因素,其计算式为

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

式中 σ_y 为流变应力, A 为材料屈服强度, B 为加工硬化模量, ϵ 为塑性应变, n 为硬化系数, C 为反映材料应变率硬化效应的参数,无量纲塑性应变率 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$,无量纲温度 $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$, T_0 为室温, T_m 为材料熔点, m 为材料温度软化效应系数, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率。

在LSP过程中,激光对材料的冲击作用引起的塑性变形量小,材料变形时的温升效应较弱,考虑到约束层和保护层对激光热作用的影响,将LSP过程视为冷塑性变形过程^[19], (1)式可简化为

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)], \quad (2)$$

式中 A 、 B 、 C 和 n 均为需要辨识的参数, $\dot{\epsilon}$ 由实验条件决定, $\dot{\epsilon}_0$ 通常取为常值。

2.2 基于有限元模型的参数辨识方法

图 1 所示为 J-C 本构模型的参数辨识流程图。将实验获取的材料在高、中应变率下的残余应力分布及动态响应作为辨识目标曲线,通过对 J-C 本构模型参数赋予初值来进行 ABAQUS 有限元模拟,编写 Fortran 脚本程序以提取激光冲击后残余应力分布的仿真结果并将其作为待辨识曲线。根据修正 L-M 算法,将上述辨识目标曲线和待辨识曲线进行差值计算:当差值达到约定范围时,程序终止;否则在实验与数值模拟结果之间自动进行优化插值,由 Fortran 程序对模型参数进行调整并重新模拟提取结果。通过迭代使辨识目标曲线和待辨识曲线间差值达到最小,输出模型参数,实现 TC17 钛合金 J-C 本构模型参数的辨识计算。

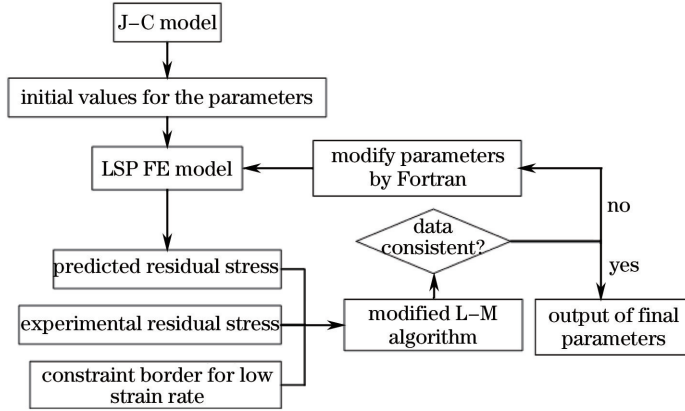


图 1 J-C 本构模型参数辨识流程图

Fig. 1 Flow chart of parameter identification of J-C constitutive model

与通过实验获得 J-C 本构模型参数的方法相比,此处采用的辨识方法主要有三个优点:1) 引入 LSP 有限元模型,将可准确测定的残余应力作为辨识接口,合理地规避了材料高应变率动态响应无法测量或测量不准确的问题;2) 以高应变率下材料的动态响应为主体,采用修正 L-M 算法增大实验残余应力分布的权重,以低应变率动态响应为约束条件,防止了因约束条件过少而出现参数过拟合的情况,保证了辨识后的参数对材料高应变率动态响应描述的准确性;3) 将实验数据整体输入,不进行简化、离散化处理,保证了目标曲线的精确性。

2.3 修正 L-M 算法

采用的修正 L-M 算法^[20]是反向优化方法的一种,其辨识目标函数为

$$L(\mathbf{P}) = \sum_{n=1}^N L_n(\mathbf{P}), \quad (3)$$

式中 N 为同时优化的目标曲线数目,此处包含三目标曲线和三约束曲线。 $L_n(\mathbf{P})$ 为应力的实验与计算结果之间的差值,计算式为

$$L_n(\mathbf{P}) = \frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^{M_n} \left[\mathbf{D}_n \left| \frac{Z(\mathbf{P}, t_i) - Z^*(t_i)}{Z^*(t_i)} \right|^2 \right], \quad (4)$$

式中 \mathbf{P} 为模型参数向量; M_n 为第 n 条目标曲线的实验数据点个数; \mathbf{D}_n 为第 n 条目标曲线的权重矩阵; $Z^*(t_i)$ 为预先得到的残余应力分布曲线、SHPB 动态响应曲线和低应变率动态响应曲线; $Z(\mathbf{P}, t_i)$ 为第 t_i 次迭代时对应的模拟结果。通过不断迭代并对比实验值和模拟值的差异,调整模型参数,使 $L_n(\mathbf{P})$ 达到最小,此时 \mathbf{P} 即为辨识得到的本构模型参数。

3 实验及测试结果

3.1 纳秒脉冲激光冲击实验与测试

TC17 钛合金的化学成分^[1]见表 1。通过激光冲击作用使 TC17 钛合金发生高应变率动态塑性变形。采用 30 mm×30 mm×10 mm 的长方体试样,对待冲击表面进行研磨和抛光处理,保证冲击表面的平整性。

表 1 TC17 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of TC17 titanium alloy

Element	Mass fraction /%	Element	Mass fraction /%	Element	Mass fraction /%
Al	4.5~5.5	Cr	3.5~4.5	N	1.6~2.4
Sn	1.6~2.4	Ti	Bal.	H	3.5~4.5
Zr	1.6~2.4	Fe	4.5~5.5	O	3.5~4.5
Mo	3.5~4.5	C	1.6~2.4		

在激光冲击过程中,只有当激光诱导冲击波压力超过金属材料的 Hugoniot 弹性极限时,材料才会发生塑性变形^[21]。在一维应变冲击压缩条件下,材料的 Hugoniot 弹性极限表示为

$$\sigma_{\text{HEL}} = \left(\frac{K}{2G} + \frac{2}{3} \right) Y, \quad (5)$$

式中 σ_{HEL} 为金属材料的 Hugoniot 弹性极限, K 为体积模量, G 为剪切模量, Y 为材料的 Tresca 屈服应力。通过计算可得,TC17 钛合金的动态弹性极限为 2.90 GPa。依据 Ballard 等^[22]获得的表层塑性应变与冲击波压力的关系可知,激光诱导冲击波峰值压力在材料 Hugoniot 弹性极限的 1~2 倍之间时,获得的塑性应变为最佳。

选择两组参数组合进行 TC17 钛合金激光冲击实验:1) 激光波长为 1064 nm,能量为 6 J,脉宽为 20 ns,光斑直径为 3 mm,功率密度为 4.24 GW/cm²,诱导冲击波峰值压力为 5.02 GPa;2) 激光波长为 1064 nm,能量为 20 J,脉宽为 20 ns,光斑直径为 6 mm,功率密度为 3.54 GW/cm²,诱导冲击波峰值压力为 4.59 GPa。

激光冲击实验采用两种方案。方案一是采用单点冲击方式和参数组合 1),获取三组数据来绘制激光冲击残余应力场分布曲线,将其作为参数辨识目标;方案二是采用 50% 搭接率路径冲击工艺和参数组合 2),对辨识后的本构模型参数进行准确性验证,方案二示意图如图 2 所示。

试样经激光冲击处理后,利用 X 射线应力测试仪对试样表面和截面进行残余应力测试。具体测试参数:管电压为 35 kV,管电流为 30 mA,Cu 靶 K α 辐射,准直径为 1 mm,衍射晶面为 Ti(213)。对于不同的冲击方式,测试方案有所不同。图 3(a)所示为单点冲击表面测试方案,根据实际测试结果发现在 X、Y 轴两个方向上的残余应力一致性较好,故只测试 X 轴方向的应力。从表面沿径向每隔 1 mm 测试一次,共测试 4 个点,获取辨识目标 Line 1;在光斑中心 1 mm 的深度上每隔 0.1 mm 测试一次,获取辨识目标 Line 2。图 3(b)所示为路径冲击表面测试方案,共测试三个试样。在冲击区域的对称轴上沿 X 轴每隔 1 mm 测试一次,共测试 7 个点;深度上的测试方法与单点测试相同。

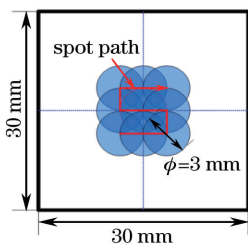


图 2 LSP 实验方案二示意图

Fig. 2 Schematic diagram of scheme two for LSP

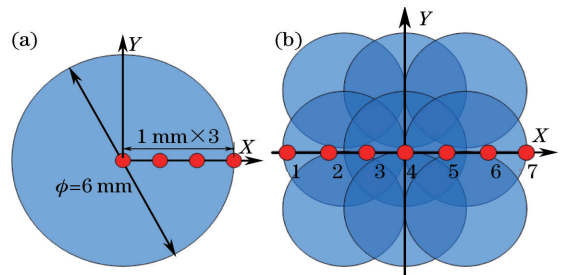


图 3 残余应力测试方案示意图。(a)方案一;(b)方案二

Fig. 3 Schematic diagram of schemes for testing residual stress. (a) Scheme one; (b) scheme two

3.2 中应变率动态响应

对于中应变率的材料测试,普遍采用霍普金森压杆装置,实验的应变率范围为 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ^[23]。实验试样采用直径为 5 mm,高为 4.2 mm 的圆柱体,共 5 个,对其端面进行打磨处理以保证端面的平面度、平行度和垂直度。

图 4 所示为实验过程中电阻应变片测试系统采集的电压信号,可以看出 5 次撞击实验的冲击波形图一致性较好,说明实验数据可靠。通过对电压信号数据进行处理,得到 TC17 钛合金的应力-塑性应变曲线,如图 5 所示,选取试样 4(应变率为 2882 s^{-1})的结果作为辨识目标曲线 Line 3。

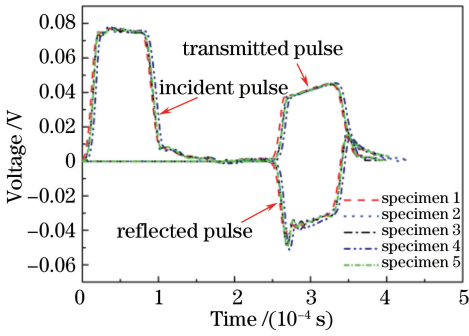


图 4 冲击波的采集信号

Fig. 4 Signal acquisition of shock wave

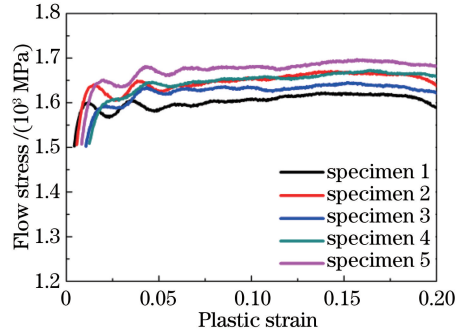


图 5 中应变率下的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves at intermediate strain rate

4 激光冲击有限元模型

目前,在 TC17 钛合金 J-C 本构模型参数的准确测定方面尚无相关报道,因此采用同属钛合金材料的 TC4 本构模型参数^[24]进行数值模拟,将其作为参数辨识的初值条件,即 $A = 1098 \text{ MPa}$, $B = 1092 \text{ MPa}$, $C = 0.014$, $n = 0.93$. TC17 钛合金有限元模型输入参数为:密度 $\rho = 4.68 \text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E = 113000 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.33$. 针对两个冲击方案的不同特点,在有限元建模时采取不同处理. 对于单点冲击,建立 1/4 实体对称模型,如图 6 所示,其中 R 为光斑半径.

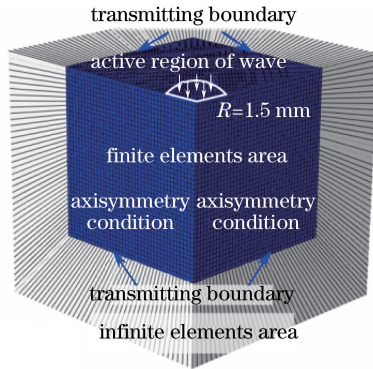


图 6 激光单点冲击有限元模型

Fig. 6 Finite element model of laser single-point shocking

划分单元时,将模型中部设定为有限元单元(C3D8R),用于应力波传播和塑性变形过程的数值模拟;四周和底部设定为无限元单元(CIN3D8),用于计算应力波的透射. 对于路径冲击,由于涉及到光斑搭接,建立与试样尺寸相同的完整实体模型,除冲击表面外,其他表面均设定为无限元单元. 由于有限元模型参数的设置会影响残余应力分布,根据已有研究^[25]将动态求解时间设定为 4000 ns ,单元尺寸设定为 0.1 mm ,体粘性参数设定为 1.2.

5 参数辨识结果及验证

5.1 参数辨识结果

为提高辨识效率,通过准静态拉伸实验获取 TC17 在 $0.0001, 0.001, 0.01 \text{ s}^{-1}$ 应变率条件下的动态响应曲线 Line 4、Line 5 和 Line 6,将其作为辨识约束条件.

通过(4)式设置曲线 Line 1~6 的权重分别为 0.3, 0.3, 0.2, 0.04, 0.04 和 0.12. 为了得到 TC17 在高应变率条件下的 J-C 本构模型参数,将激光冲击后的残余应力设置较大权重;而作为约束条件的低应变率动态响应,对辨识结果影响较小,故其权重设置也较小. 经辨识后得到的 TC17 钛合金 J-C 本构模型参数:

$A = 1231 \text{ MPa}, B = 356.1751 \text{ MPa}, C = 0.0197, n = 0.2623$ 。

图 7 所示为参数辨识后的实验和计算结果拟合图,其中 experiment 和 simulation 分别表示不同应变率下的实验值和计算值。从图 7 可见,低应变率动态响应对曲线走势起到了较好的约束作用;在 SHPB 和激光冲击条件下实验与仿真结果的拟合程度随目标曲线权重的增加而增大,说明参数是以材料在高应变率条件下的残余应力分布为辨识主体的,达到了设计目标。单点冲击有限元模型的残余应力预测值与实测值十分接近,辨识后的参数具备准确描述材料高应变率动态响应的能力,说明基于 L-M 算法和有限元模型的参数辨识方法是有效的。

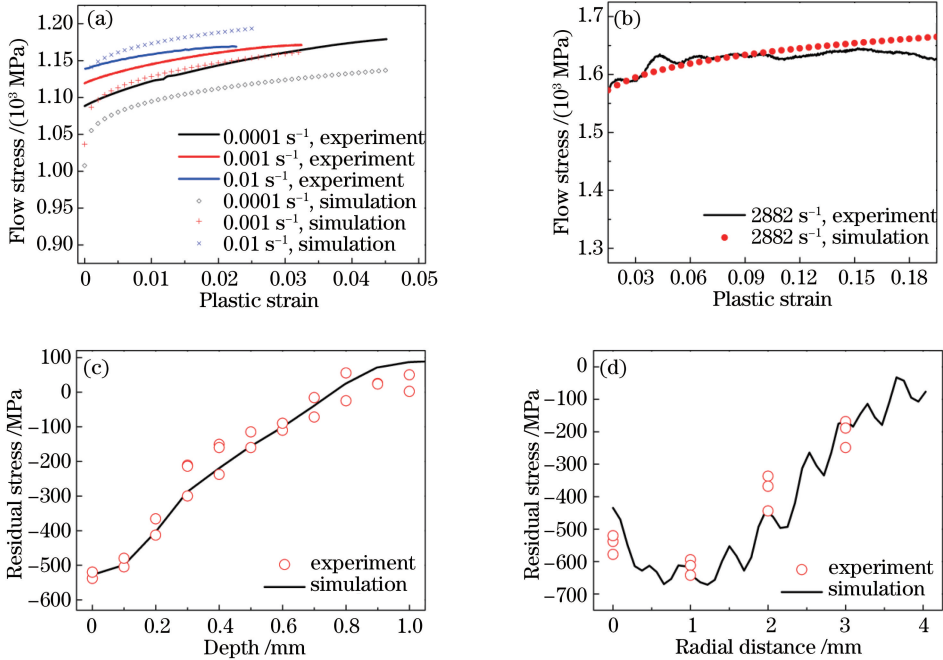


图 7 参数辨识后的曲线拟合图。(a) 流变应力的低应变率边界拟合图; (b) 流变应力的 SHPB 拟合图; (c) 深度残余应力拟合图; (d) 表面残余应力拟合图

Fig. 7 Fitting charts after parameter identification. (a) Boundary-fitting chart of flow stress at low strain rate; (b) SHPB-fitting chart of flow stress; (c) fitting chart of residual stress at depth; (d) fitting chart of residual stress on surface

5.2 辨识参数准确性验证

利用辨识结果对路径冲击方案中的残余应力场进行预测,并与实测结果进行对比。图 8 所示为 TC17 钛合金在路径冲击条件下的残余应力模拟值和实验值的分布曲线。由图可见,通过数值模拟得到的残余应力预测结果与实测值吻合良好。由图 8(b)可知,在激光搭接作用条件下,辨识后的参数对 TC17 在高应变率条件下的力学性能同样具有较好的描述能力,该参数有利于强化工艺的数值仿真优化,可指导实验和工程应用。

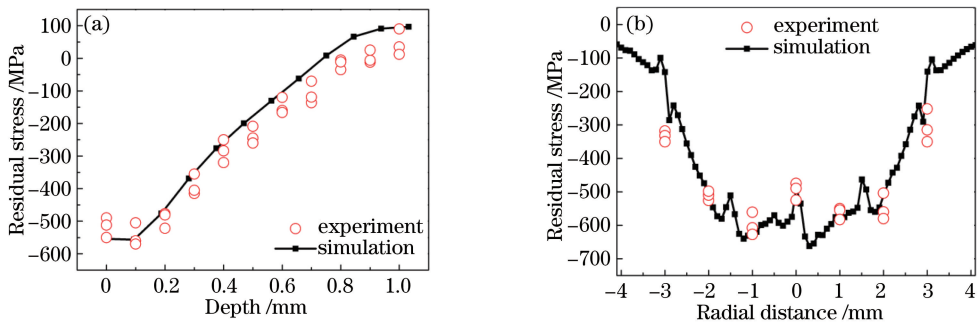


图 8 辨识后模型参数准确性验证。(a) 深度方向残余应力分布; (b) 冲击表面残余应力分布

Fig. 8 Accuracy validation of model parameters after identification. (a) Residual stress distribution at depth; (b) residual stress distribution on surface

6 结 论

利用基于有限元模型和修正 L-M 算法的参数辨识方法,有效解决了在激光冲击条件下材料动态响应无法获取和存在拟合误差的问题,获得了 TC17 钛合金在纳秒脉冲激光诱导冲击波作用下的 J-C 本构模型参数。该参数可用于 TC17 钛合金在激光冲击等条件下的数值模拟,预测 LSP 处理后材料的残余应力分布及变形,评估强化效果等,为 LSP 工艺的优化和应用提供了理论参考。

致谢 感谢西安交通大学臧顺来副教授团队的帮助。

参 考 文 献

- 1 颜鸣皋. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 179-180.
- 2 Chai Yan, Ren Jun, He Weifeng, *et al.* Effect of laser shock processing on the fatigue property of K4030 alloy blade[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 011405.
柴 艳, 任 军, 何卫锋, 等. 激光冲击强化对 K4030 合金叶片疲劳性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 011405.
- 3 Jiao Yang, He Weifeng, Luo Sihai, *et al.* Study of micro-scale laser shock processing without coating improving the high cycle fatigue performance of K24 simulated blades[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1003002.
焦 阳, 何卫锋, 罗思海, 等. 无保护层激光冲击提高 K24 合金高周疲劳性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1003002.
- 4 Luo Sihai, He Weifeng, Zhou Liucheng, *et al.* Effects of laser shock processing on high temperature fatigue properties and fracture morphologies of K403 nickel-based alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0903001.
罗思海, 何卫锋, 周留成, 等. 激光冲击对 K403 镍基合金高温疲劳性能和断口形貌的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0903001.
- 5 Qiao Hongchao. Effect of laser peening on mechanical properties of 6082 aluminum alloy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 061404.
乔红超. 激光冲击强化对 6082 铝合金机械性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 061404.
- 6 Luo Mi, Luo Kaiyu, Wang Qingwei, *et al.* Numerical simulation of laser shock peening on residual stress field of 7075-T6 aluminum alloy welding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0414003.
罗 密, 罗开玉, 王庆伟, 等. 激光冲击 7075-T6 铝合金焊缝的残余应力场数值模拟[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0414003.
- 7 Liu Xuhong, Huang Xicheng, Chen Yuze, *et al.* A review on constitutive models for plastic deformation of metal materials under dynamic loading[J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(3): 361-374.
刘旭红, 黄西成, 陈裕泽, 等. 强动载荷下金属材料塑性变形本构模型评述[J]. *力学进展*, 2007, 37(3): 361-374.
- 8 Jiang F, Li J F, Sun J, *et al.* Al7050-T7451 turning simulation based on the modified power-law material model[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 48(9): 871-880.
- 9 Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, 1983, 21: 541-547.
- 10 Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816-1825.
- 11 Wang X M, Shi J. Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 60(10): 67-75.
- 12 Lin B, Lupton C, Spanrad S, *et al.* Fatigue crack growth in laser-shock-peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens due to foreign object damage[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 59(3): 23-33.
- 13 Peyre P, Chaieb I, Braham C. FEM calculation of residual stress induced by laser shock processing in stainless steels[J]. *Modeling & Simulation in Materials Science & Engineering*, 2007, 15(3): 205-221.
- 14 Seo S W, Min O, Yang H. Constitutive equation for Ti-6Al-4V at high temperatures measured using the SHPB technique [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(6): 735-754.
- 15 Wang Tao, Chen Guoding, Ju Jiangtao. Experimental study of constitutive relationship of superalloy GH4169 under high strain rates[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(4): 946-953.
王 涛, 陈国定, 巨江涛. GH4169 高温合金高应变率本构关系试验研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(4): 946-953.

- 16 Yang Shubao, Xu Jiuhua, Wei Weihua, *et al.* Impact of hydrogenation on flow behavior of titanium alloy TC4[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 1093-1098.
杨树宝, 徐九华, 危卫华, 等. 置氢处理对 TC4 钛合金流变行为的影响[J]. *航空学报*, 2010, 31(5): 1093-1098.
- 17 Hu Xuteng, Song Yingdong. Contrastive analysis of three dynamic constitutive models for TC4 titanium alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(1): 32-36.
胡绪腾, 宋迎东. TC4 钛合金三种动态本构模型的对比分析[J]. *兵器材料科学与工程*, 2013, 36(1): 32-36.
- 18 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 82-89.
- 19 Ding K, Ye L. Laser shock peening performance and process simulation[M]. New York: Woodhead, 2006: 50-52.
- 20 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 383-391.
- 21 罗伯特·阿尔伯特·格拉汉姆. 固体的冲击波压缩[M]. 贺红亮, 译. 北京: 科学出版社, 2010.
- 22 Ballard P, Fournier J, Fabbro R, *et al.* Residual stresses induced by laser-shocks[J]. *Le Journal de Physique IV*, 1991, 1(C3): 487-494.
- 23 Meyers M A. Dynamic behavior of materials[M]. Zhang Qingming, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 212-216.
迈耶斯. 材料的动力学行为[M]. 张庆明, 译. 北京: 国防工业出版社, 2006: 212-216.
- 24 Kay G. Failure modeling of titanium-61-4V and 2024-T3 aluminum with the Johnson-Cook material model[R]. United States: UCRL, 2002.
- 25 Nie Xiangfan, Zang Shunlai, He Weifeng, *et al.* Sensitivity analysis and restraining method of “residual stress hole” induced by laser shock peening[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(7): 2107-2112.
聂祥樊, 臧顺来, 何卫锋, 等. 激光冲击“残余应力洞”的参数敏感性分析及其抑制方法[J]. *高电压技术*, 2014, 40(7): 2107-2112.