

激光与光电子学进展

激光选区熔化 316L 不锈钢动态力学性能研究

雷经发^{1,2}, 葛永胜¹, 刘涛^{1,2*}, 柏威¹

¹安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;

²工程机械智能制造安徽省教育厅重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 为研究激光选区熔化(SLM)316L 不锈钢在冲击载荷下的动态力学性能,使用 SLM 技术制备 316L 不锈钢试样。采用万能实验机和分离式霍普金森压杆(SHPB)实验装置对其进行准静态及动态压缩力学性能测试,同时将测试结果与传统 316L 不锈钢作对比,并通过微观形貌观测分析材料的显微结构与力学性能之间的内在联系。建立 Johnson-Cook(J-C)本构模型进行 SLM 316L 不锈钢动态力学行为的预测与表征。实验结果表明,SLM 316L 不锈钢试样在力学测试中表现出典型的弹塑性特征和显著的应变率强化效应。与传统 316L 相比,SLM 316L 组织内存在微米尺寸的胞状结构,因此在动态强化阶段具有较高的硬化模量。然而由于塑性变形产生的残余应力,冷轧 316L 试样具有较高的屈服强度。通过实验数据对原始 J-C 模型进行修正,可以精确描述 SLM 316L 试样的动态力学行为。

关键词 激光光学; 激光选区熔化 316L 不锈钢; 分离式霍普金森压杆; 微观组织; 本构模型

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2314009

Research on Dynamic Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Processed Using Selective Laser Melting

Lei Jingfa^{1,2}, Ge Yongsheng¹, Liu Tao^{1,2*}, Bai Wei¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Anhui Education Department Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract In this paper, 316L stainless steel samples were formed using the selective laser melting (SLM) technology to analyze the dynamic mechanical properties of the SLM 316L stainless steel under impact load. The quasistatic and dynamic compressive mechanical properties of the sample were tested using a universal experimental machine and a split Hopkinson pressure bar (SHPB) experimental device. Meanwhile, the test results of the SLM 316L samples were compared with that of the 316L stainless steel formed via traditional methods. The internal relationship between the microstructure and mechanical properties of the material was analyzed through the micromorphological observation. Finally, the Johnson-Cook (J-C) constitutive model was established to predict and characterize the dynamic mechanical behavior of SLM 316L stainless steel. The experimental results show that the SLM 316L stainless steels show typical elastic - plastic characteristics and significant strain rate hardening effects in mechanical experiments. Moreover, compared with traditional 316L, SLM 316L has a higher hardening modulus at the dynamic strengthening stage because of the cellular structure with micron size. The yield strength of the cold-rolled 316L sample is higher because of the residual stress caused by plastic deformation. By modifying the basic J-C model using the experimental data, the dynamic mechanical behavior of SLM 316L can be described more accurately.

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-07-11; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 合肥市自然科学基金资助项目(2021019)、安徽高校优秀青年人才支持计划项目(gxyqZD2019057)、安徽高校优秀拔尖人才培养资助项目(gxbjZD2020078)

通信作者: *liutao19841015@163.com

Key words laser optics; selective laser melting 316L stainless steel; split Hopkinson pressure bar; microstructure; constitutive model

OCIS codes 140.3380; 220.4610; 160.3900

1 引言

激光选区熔化(SLM)是最具发展潜力的金属增材制造(AM)技术之一^[1]。该技术通过计算机对三维模型进行二维切片,使用高能激光束对扫描路径上的金属粉末进行选择性熔化,再层层叠加形成实体^[2-3],在金属零件的制造领域得到广泛应用。316L不锈钢具有优良的力学性能,常使用于汽车制造、航空航天等领域,被应用于车身支架、飞机起落架等承压结构中^[4-6]。然而SLM技术成形的316L不锈钢在冲击载荷下的动态力学性能与传统不锈钢存在较大差异,因此研究SLM 316L材料的动态力学性能对保障该材料产品的服役安全和实现该技术的推广应用具有重要意义。

近年来,国内外研究人员对SLM不锈钢材料的微观组织及其力学性能开展了广泛研究。余晨帆等^[7]对SLM 316L不锈钢的拉伸性能及断裂机制进行了研究,并探究了拉伸变形过程中微观组织的演化规律,发现其拉伸性能明显优于传统方法制备的316L不锈钢。尹燕等^[8]分析了SLM 316L不锈钢试样的组织特征,测试了其准静态拉伸力学性能,发现SLM试样的抗拉强度与传统工艺制备的相比有较大提高。Ni等^[9]对SLM 316L不锈钢的拉伸性能进行了测试,并研究了微观组织的各向异性,发现SLM 316L比锻造316L不锈钢具有更高的强度,但延伸率降低。此外,关于优化Johnson-Cook(J-C)模型实现弹塑性材料动态力学行为的预测与表征也是研究的重点。叶建华等^[10]综合考虑应变硬化效

应、应变速率强化效应和热软化效应的影响,提出一种修正的J-C本构模型,该模型可准确地描述TA12钛合金的高温流变行为。Zhou等^[11]分析了分离式霍普金森压杆(SHPB)实验获得的应力-应变曲线,并基于位错堆积理论修改 Ti_6Al_4V 的J-C模型。邓云飞等^[12]修正J-C本构模型,得到Modified Johnson-Cook(MJC)模型,该模型能够有效地描述6061-T651铝合金材料在大应变、高应变率和高温下的应力流动行为和变形行为。

上述文献对SLM 316L不锈钢的研究主要集中在准静态力学性能方面,对高应变率下动态压缩力学性能的研究较少,并且缺少相关的本构模型研究。因此,本文采用SLM方法制备316L不锈钢试样,进行了高应变率动态压缩力学性能测试,并与传统316L不锈钢作对比。从微观结构出发,分析SLM 316L不锈钢试样与传统316L不锈钢的动态力学性能差异。最后,结合实验数据对原始J-C模型进行修正,验证该修正模型对描述SLM 316L不锈钢动态力学行为的适用性。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料的制备

使用安徽拓宝增材制造科技有限公司提供的气雾化球形316L不锈钢粉末,其微观形貌如图1(a)所示,化学成分见表1。对该金属粉末进行粒度分析,结果如图1(b)所示,粒径分布符合正态分布规律, $D_v(10)$ 和 $D_v(90)$ 表示置信区间在90%时粒径的上、下限值, $D_v(50)$ 表示粒径中位数。其中

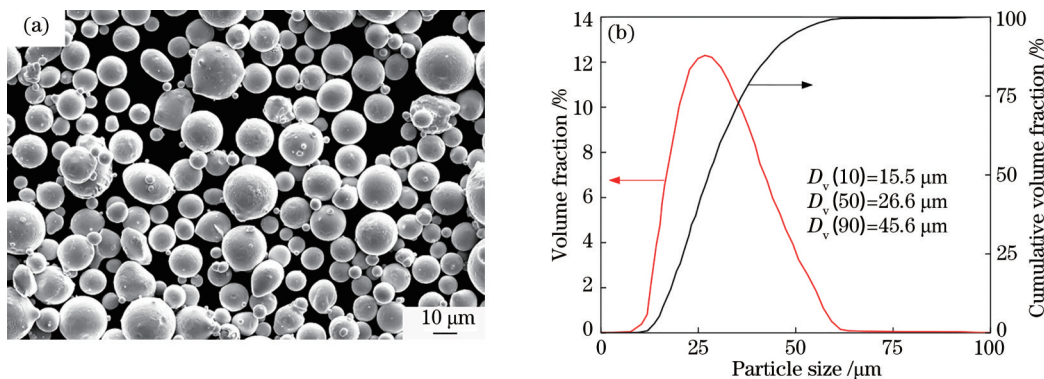


图1 SLM 316L 不锈钢粉末。(a)微观形貌;(b)粒度分布

Fig. 1 SLM 316L stainless steel powders. (a) Morphologies; (b) particle size distribution

表 1 316L 不锈钢粉末的化学成分

Table 1 Chemical components of 316L stainless powder

Composition	C	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cr	Fe
Mass fraction / %	≤0.03	≤1.00	≤0.035	≤0.03	≤2.00	2.00-3.00	12.2	16.00-18.00	Bal.

$D_v(10) = 15.5 \mu\text{m}$, $D_v(50) = 26.6 \mu\text{m}$, $D_v(90) = 45.6 \mu\text{m}$, 并测得粉末的平均粒径大约为 $30.6 \mu\text{m}$ 。综上所述, 气雾化 316L 不锈钢金属粉末的质量较好, 可用于制备 316L 不锈钢试样。

采用该公司自主研发的 TB-SLM100 装置作为激光成形装置, 该装置配备波长为 1064 nm 的单模光纤激光器 (IPG500W), 以直径为 $70 \mu\text{m}$ 的圆形模式输出光。制备试样前设计出所需零件的三维实体模型, 通过设备的专用软件对该三维模型进行二维分层切片, 以获得各层截面的轮廓数据, 控制高能激光束按设定路径选择性熔化各层的金属粉末, 以此方法层层堆叠出所需的三维零件实体^[13-14]。此外, 制备前还需对雾化粉末进行充分干燥, 并且在成形室中通入保护气体, 防止金属粉末在高温熔融时与空气发生氧化。其成形过程如图 2 所示。

设定工艺参数: 激光功率为 180 W, 扫描速度为 950 mm/s, 扫描间距为 0.1 mm, 铺粉厚度为 0.03 mm。采用 Z 形扫描策略成形尺寸为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 和

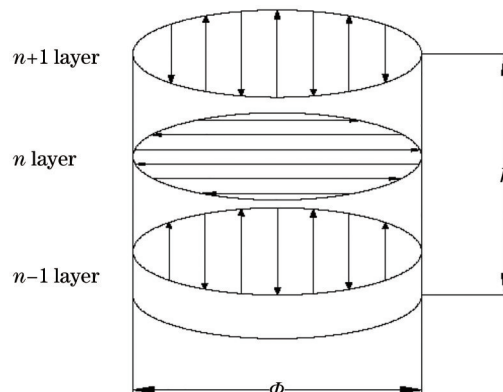


图 2 SLM 316L 不锈钢的成形过程

Fig. 2 Forming process of SLM 316L stainless steel

$\Phi 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的圆柱形测试样件, 分别用于准静态及动态压缩力学性能测试, 实物如图 3(a) 所示。传统不锈钢的制备以热轧钢为原材料, 经酸洗去除氧化皮后进行多道冷轧塑形, 获得直径 $\Phi 12 \text{ mm}$ 和 $\Phi 4 \text{ mm}$ 的光圆棒, 再通过线切割得到尺寸为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 和 $\Phi 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的冷轧 316L 试样, 实物如图 3(b) 所示。

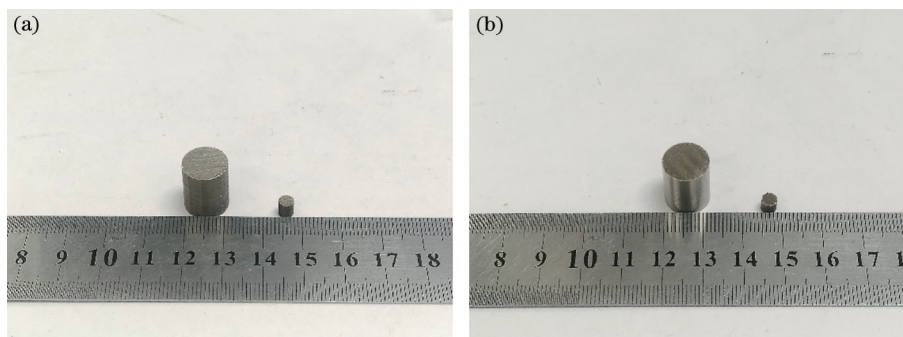


图 3 316L 不锈钢实物图。(a) SLM 316L; (b) 冷轧 316L

Fig. 3 Physical drawing of 316L stainless steel. (a) SLM 316L; (b) cold-rolled 316L

2.2 实验方法

为分析材料在准静态压缩过程中的力学特性, 利用 MTS landmark 370.5 万能实验机对尺寸为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱形不锈钢试样进行准静态压缩实验。实验前在试样端面涂抹润滑脂, 以减小压缩过程中试样端面与加载平台之间的端面摩擦。根据试样高度设置压头的加载速度为 0.015 mm/s , 控制应变率为 0.001 s^{-1} , 实现准静态加载。实验过程中利用引伸计记录结果, 并结合试验机软件计算得到测试试样的应力-应变曲线。

为研究材料的动力学性能及其应变率强化效应, 采用 SHPB 实验装置进行动态压缩力学性能测试。该实验装置主要由撞击杆、入射杆、透射杆组成, 采用应变片采集入射杆与透射杆上的应变信号。超动态应变仪和数据采集系统将应变信号转换为电压信号。实验装置如图 4 所示。

实验前对尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的不锈钢试样两端面进行打磨并涂抹润滑脂, 保证测试试样的两端面有较好的表面粗糙度和平行度, 以减小加载过程中端面摩擦的影响。实验过程中通过调节气压

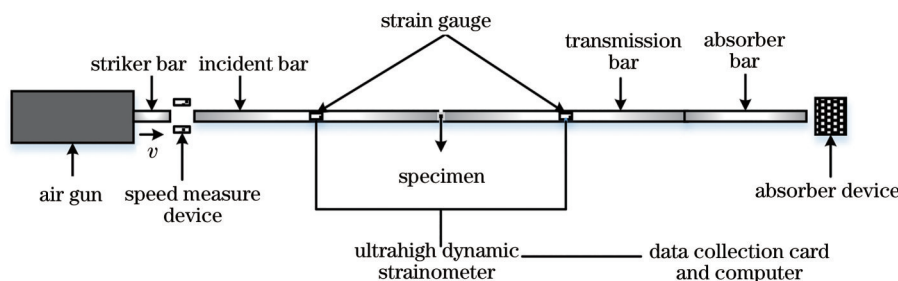


图 4 SHPB 实验装置

Fig. 4 SHPB experimental device

改变撞击杆速度,实现高应变率加载。撞击过程中会产生一维瞬时脉冲入射波 σ_i 、反射波 σ_r 和透射波 σ_t , 分别在入射杆和透射杆产生弹性应变 ϵ_i, ϵ_r 和 ϵ_t , 得到材料的应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$, 表达式分别为

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}(t) = \frac{c_0}{L_0} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \\ \epsilon(t) = \frac{c_0}{L_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt, \\ \sigma(t) = \frac{A}{2A_0} E (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_0 、 E 、 A 分别为压杆的弹性波速、弹性模量和横截面积; A_0 和 L_0 为试样的原始横截面积和原始长度。

使用蔡司 40MAT 倒置光学显微镜和蔡司 EVO180 扫描电镜对试样的截面和端面的微观形貌进行观测与表征,分析材料的显微结构与其力学性能之间的内在联系。因此需要对试样的观测面进行金相制备。采用砂纸逐级打磨样品至表面平整且划痕一致,随后经机械抛光获得镜面。使用静

置 24 h 的新配王水 (3 mL HNO_3 + 1 mL HCL) 溶液腐蚀,观察表面 10 s,以进行显微组织的观测和表征。

3 实验结果与分析

3.1 准静态、动态应力-应变曲线及力学性能分析

图 5 为 SLM 316L 和传统 316L 不锈钢试样在准静态及动态压缩实验中所获得的应力-应变曲线。由图 5(a) 可知,试样在准静态压缩过程可见明显的弹性阶段和强化阶段,却没有出现明显的屈服阶段。材料在发生应变初期,应力值随应变的增加呈线性增长趋势,此阶段即为弹性阶段。弹性阶段结束进入弹塑性变形阶段,此时材料的应力值增长趋势变缓,却未能观察到明显的屈服平台。当塑性应变继续增加进入强化阶段,此时材料的流动应力值随塑性应变的增加而稳定的升高,材料表现出显著的应变硬化现象。从图 5(b) 动态力学曲线中不仅可以观察到弹性阶段和强化阶段,还可以观察到明显的屈服阶段,并且随着应变率的升高,屈服平台处出现了上、下屈服点。

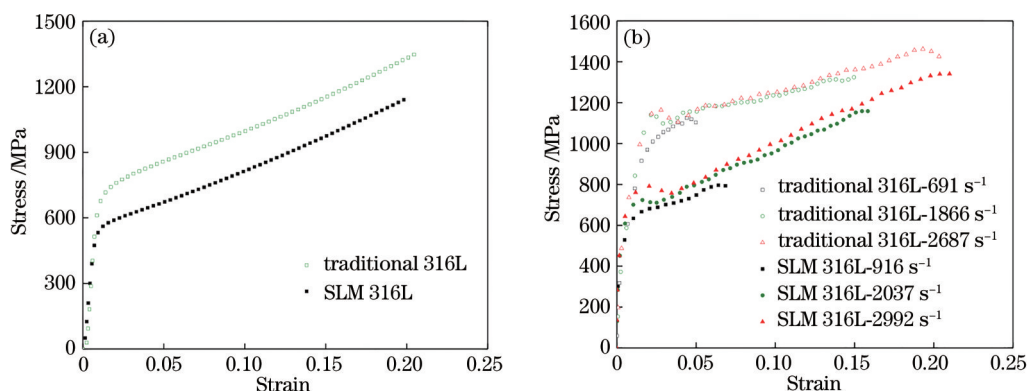


图 5 应力-应变曲线。(a) 准静态; (b) 动态

Fig. 5 Stress-strain curves. (a) Quasi-static state; (b) dynamic state

为分析材料的力学性能,比较 SLM 316L 不锈钢和传统 316L 不锈钢的力学曲线,可知无论在准静

态还是动态压缩实验中,传统 316L 不锈钢均表现出高于 SLM 316L 不锈钢的屈服强度。但是在动态力

学曲线中传统 316L 在塑性强化阶段的曲线斜率即硬化模量却明显低于 SLM 316L 不锈钢,说明 SLM 316L 不锈钢抵抗动态塑性变形的能力要优于传统 316L 不锈钢。此外为分析材料的应变率强化特性,提取试样在不同加载应变率下的屈服强度值,如图 6 所示。可以看出材料的动态屈服应力随应变率的升高呈明显的增长趋势,并且当加载应变率从 0.001 s^{-1} 增加到 10^3 s^{-1} 数量级时,SLM 316L 不锈钢的屈服强度从 561 MPa 增加到 769 MPa,传统 316L 不锈钢的屈服强度从 841 MPa 增加到 1135 MPa,这表明材料对应变率十分敏感。

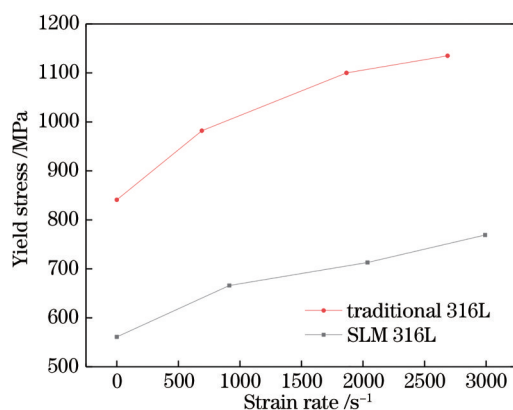


图 6 不同应变率下材料的屈服强度

Fig. 6 Yield strength of materials at different strain rates

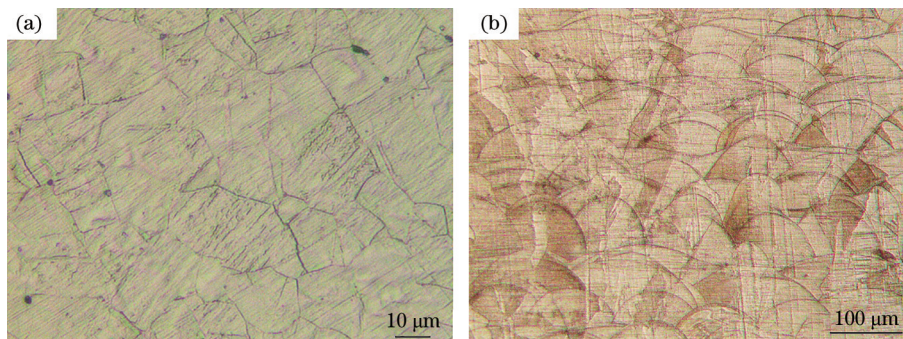


图 7 试样纵截面微观形貌。(a)传统 316L 不锈钢;(b) SLM 316L 不锈钢

Fig. 7 Micro morphology of sample longitudinal section. (a) Traditional 316L stainless steel; (b) SLM 316L stainless steel

图 8 为传统 316L 不锈钢和 SLM 316L 不锈钢试样横截面的微观组织形貌。在图 8(a)中,观测到传统 316L 不锈钢的微观形貌仍是尺寸为 $10\sim 30 \mu\text{m}$ 的等轴晶组织,同其纵截面的微观形貌图 7(a)基本相同,表现出组织的各向同性。而在图 8(b)中,观测到 SLM 316L 不锈钢横截面的许多胞状结构,并且该胞状结构以蜂窝状紧密排列。在同一观测微观区域内胞晶形态存在差异,这是由于 SLM 组织内的晶体组织沿温度梯度呈现出外延生

为进一步揭示材料的屈服强度与应变率之间的关系,对实验数据进行 Pearson 相关性检验,计算得到 SLM 316L 不锈钢的应变率与屈服强度值之间的相关系数 $r=0.976$,传统 316L 不锈钢的相关系数 $r=0.964$,数值均接近于 1。说明材料的屈服强度与应变率之间存在极大的正相关性,即表现出显著的应变率强化特性。

3.2 微观组织观测

为从微观层面揭示 SLM 316L 不锈钢的动态力学性能与传统 316L 不锈钢的差异,对试样进行抛光、腐蚀,在光学显微镜和扫描电镜下观测微观组织形貌。图 7 为传统 316L 不锈钢和 SLM 316L 不锈钢的纵截面微观形貌。从图 7(a)传统 316L 不锈钢的纵截面可以观测到大小不一的等轴晶组织,其尺寸为 $10\sim 30 \mu\text{m}$ 。而图 7(b)中 SLM 316L 不锈钢的纵截面形貌则表现为明显的片层状堆叠结构,整体上熔合线如鱼鳞状分布,熔池的叠加特征非常明显,其形成原因与激光的高斯模式有关,在光斑中心激光强度最高,光斑边缘激光强度较低^[15-16];粉未经光斑照射后熔化的深度不同,从而熔池截面呈弧形,经层层累加最终形成此种堆叠特征。并且有关文献指出 SLM 成形试样的此种层状堆叠结构表明其内部层与层之间具有明显的冶金结合特征^[17]。

长的特性,形成沿温度梯度生长的细小柱状晶组织,并且非均匀温场使其生长取向各异,根据观测截面的不同,柱状晶的形态存在差异^[18-21]。此外该种胞晶的横截面尺寸普遍在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右。相关文献指出这种严密排列的胞状晶粒结构的组织内部具有巨大的位错密度,材料在发生压缩变形时,晶粒沿晶界方向的位错滑移能力会受到阻碍,这种现象称为细晶强化^[22]。

结合材料的力学性能分析可知,在 SLM 316L

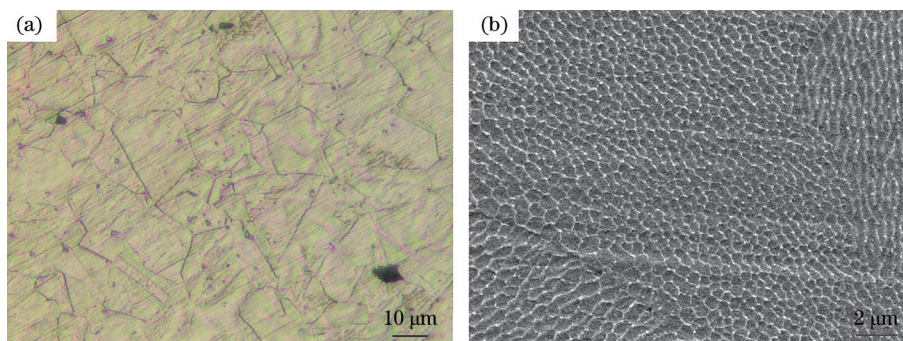


图 8 试样横截面微观形貌。(a)传统 316L 不锈钢;(b) SLM 316L 不锈钢

Fig. 8 Micro morphology of sample cross section. (a) Traditional 316L stainless steel; (b) SLM 316L stainless steel

不锈钢组织中存在层间熔池的片层状堆叠结构和微米尺度的蜂窝状结构,该种微观组织与传统制备的 316L 不锈钢存在差异,势必会导致塑性变形机制以及力学性能的不同。分析认为材料在发生应变到达屈服时,由于采用冷轧方式,成形的传统 316L 不锈钢经冷塑变形会在组织间产生较大的残余应力,导致屈服强度大幅提高,因此传统冷轧试样的屈服强度高于 SLM 试样。然而进入强化阶段,SLM 试样的细晶强化作用在动态流变过程中起到主导因素,由于 SLM 试样内柱状晶结构的微观尺寸远小于传统 316L 不锈钢,其组织间的位错密度大大提高,晶粒间抗位错滑移能力增强,材料的塑性流动能力减弱,导致 SLM 试样在强化段的硬化模量高于传统 316L 不锈钢。

3.3 本构模型及其动态力学行为表征

建立本构模型对 SLM 316L 不锈钢的动态力学行为进行预测和表征。Johnson-Cook(J-C)本构模型具有形式简单、材料系数易于拟合等优点,能够很好地反映材料在大应变、高应变速率、高温条件

下的力学性能^[23],被普遍应用于工程实践中。其一般式可以描述为

$$\sigma = (a + b\epsilon^n)(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}), \quad (2)$$

式中: σ 是等效应力; ϵ 是等效应变;无量纲应变率 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 为当前应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率;无量纲温度 $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, T 、 T_r 、 T_m 为材料的当前温度、参考温度、熔点温度; a 、 b 、 n 分别为材料屈服强度、硬化系数、硬化指数; c 为应变率敏感系数。

本实验在参考温度下进行($T^*=0$),因此(2)式可简化为

$$\sigma = (a + b\epsilon^n)(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*). \quad (3)$$

对 a 、 b 、 n 进行参数标定。在参考应变率下($\dot{\epsilon}^*=1$),(3)式可以表达为

$$\sigma = (a + b\epsilon^n). \quad (4)$$

根据准静态压缩实验获得的力学曲线,得到 σ 与 ϵ 的关系,使用(4)式对该曲线进行拟合,如图 9(a)所示,得到参数 $a=554.05$, $b=3919.72$, $n=1.17$ 。

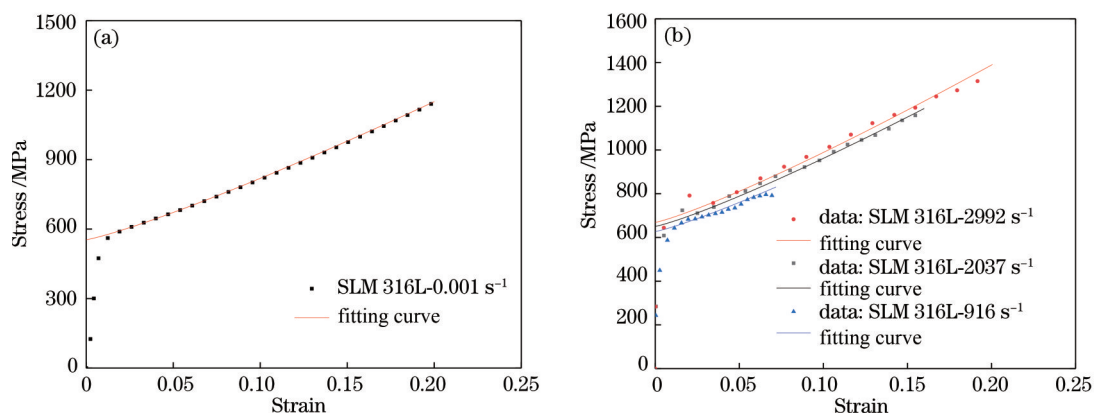


图 9 参数标定。(a)准静态拟合曲线;(b)动态拟合曲线

Fig. 9 Parameter calibration. (a) Quasi-static fitting curve; (b) dynamic fitting curve

对参数 c 进行标定。根据在动态压缩实验中获得的材料力学曲线,得到高应变率下 σ 与 ϵ 的关系,用(3)式对动态曲线进行拟合,如图 9(b)所示,得到参数 $c(914 \text{ s}^{-1})=0.0096$, $c(2037 \text{ s}^{-1})=0.012$, $c(2992 \text{ s}^{-1})=0.014$ 。由于原始 J-C 本构模型中参数 c 为常数,因此取其平均值,得 $c=0.0118$ 。

根据拟合得到的本构参数,可以确定原始 J-C 模型为

$$\sigma = (554.05 + 3919.72\epsilon^{1.17})(1 + 0.0118 \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (5)$$

使用此本构模型来预测 SLM 316L 不锈钢高应变率下的动态力学曲线,同时与实验所得数据进行比较,结果如图 10 所示。

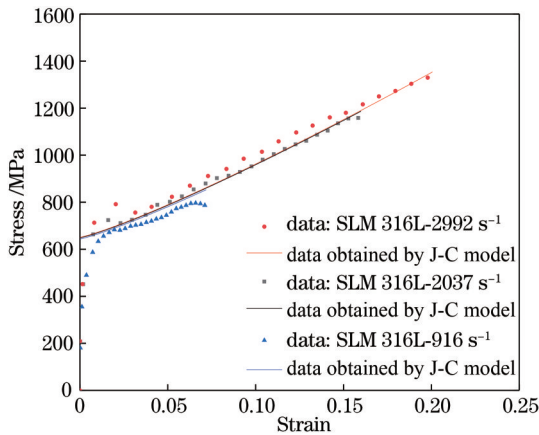


图 10 原始 J-C 模型的预测结果与实验数据的对比
Fig. 10 Comparison between the prediction results using the basic J-C model and experimental data

通过比较模型预测曲线与动态力学实验曲线可以发现,原始 J-C 模型的预测结果与实验结果的吻合度较差,说明本构中的应变率敏感系数不能准确反映材料的应变率增强效应^[24-25]。因此根据实验所得数据对原始模型进行修正,拟通过模型修正减小与实验数据之间的误差。由于材料的应变率敏感系数随应变率的升高会发生改变,因此材料的应变率强化效应用 c 的平均值来衡量。显然不能直接作为材料常数,观察发现材料的敏感系数与应变率呈线性增长的趋势,故采用线性拟合的方式得到 c 与 $\dot{\epsilon}$ 的关系,如图 11 所示。

通过拟合得到关系式 $c=0.00767+2.11 \times 10^{-6} \times \dot{\epsilon}$,以此式对原始本构模型中的应变率敏感系数进行修正,得到修正的 J-C 模型为

$$\sigma = (554.05 + 3919.72\epsilon^{1.17}) \times [1 + (0.00767 + 2.11 \times 10^{-6} \times \dot{\epsilon}) \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (6)$$

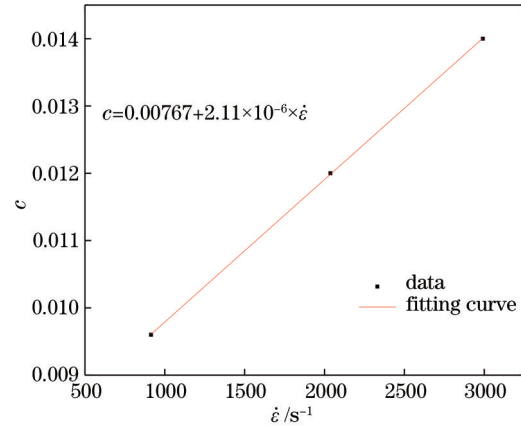


图 11 c 与 $\dot{\epsilon}$ 的拟合关系
Fig. 11 Fitting relationship between c and $\dot{\epsilon}$

使用此修正模型重新预测 SLM 316L 不锈钢的动态力学曲线,同时与实验数据作对比,结果如图 12 所示。

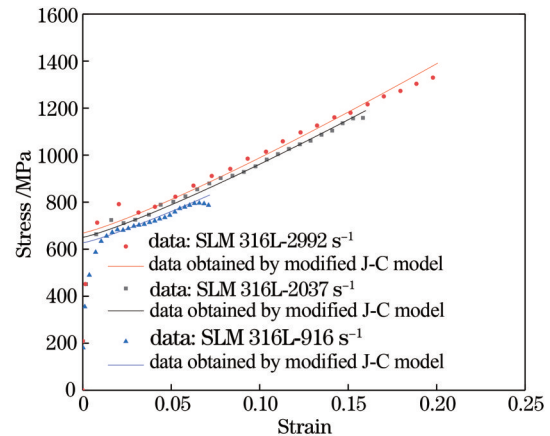


图 12 采用修正 J-C 模型的预测结果与实验数据的对比
Fig. 12 Comparison between the prediction results using modified J-C model and experimental data

从图 12 中可以明显地发现修正模型的预测结果与实验结果吻合度较好。为量化分析修正模型对预测 SLM 316L 不锈钢动态力学实验数据的有效性,引入相关系数 R 、均方根误差 (RMSE) 和平均相对误差绝对值 (AARE) 作为量化指标,来衡量本构预测值与实验数据之间的误差。其中相关系数 R 表示预测值和实验值之间线性关系的强度,然而较高的 R 值不一定表示更好的拟合关系。通过计算 RMSE 和 AARE 值来比较误差,当 RMSE 和 AARE 值越小,代表方程的可预测性越好。原始 J-C 模型及其修正模型的动态流变应力预测值与实验数据之间的关系如图 13 所示。

计算得出,原始模型和修正模型的 R 值均在

0.99 以上,说明两种模型均能很好地描述 SLM 316L 不锈钢流动应力的线性趋势。考虑到 RMSE 和 AARE 的误差分析,发现修正模型的预测值与实验数据的误差更小,因此修正 J-C 模型预测

SLM 316L 不锈钢的流动应力时更为准确可靠。这充分说明该修正模型对描述 SLM 316L 不锈钢在大应变、高应变率动态力学行为具有较好的适用性。

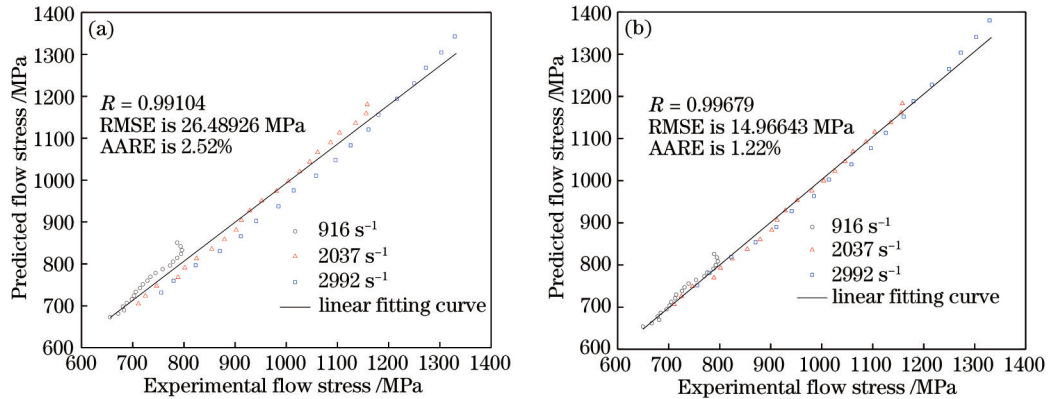


图 13 流动应力实验值与预测值的相关性。(a)原始 J-C 模型;(b)修正 J-C 模型

Fig. 13 Correlation between the experimental and predicted flow stress values. (a) Original J-C model; (b) modified J-C model

4 结 论

为研究 SLM 316L 不锈钢的动态力学性能,对 SLM 316L 不锈钢和传统 316L 不锈钢进行了静、动态力学性能测试,从微观层面出发,分析不同方法成形试样的动态力学性能差异,并建立 J-C 本构模型来预测和表征 SLM 316L 不锈钢的动态力学行为。在静、动态压缩力学实验中,传统方法制备的 316L 不锈钢和 SLM 316L 不锈钢均表现出典型的弹塑性特征,从力学曲线中可见明显的弹性、屈服和强化阶段,并且在高应变率加载条件下,两种材料均表现出显著的应变率强化现象。微观分析发现,材料的微观组织会导致其力学性能及塑性变形机制的不同,由于冷塑变形,冷轧 316L 不锈钢组织内具有较强的残余应力,其屈服强度高于 SLM 试样;SLM 316L 试样组织间的细小柱状晶间存在较大的位错密度,细晶强化作用导致其硬化模量高于传统 316L 不锈钢。修正后的 J-C 模型可以很好地适用于 SLM 316L 不锈钢动态力学行为的预测与表征。

综合本研究,材料的微观组织是 SLM 316L 不锈钢力学性能区别于传统 316L 不锈钢的内在因素。为满足 SLM 316L 不锈钢及其制件在大变形、高应变率工作环境中的服役安全要求,明确其动态力学性能及本构模型对实现 SLM 316L 不锈钢金属构件的推广应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Casati R, Lemke J, Vedani M. Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(8): 738-744.
- [2] Yang Y Q, Chen J, Song C H, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011401.
杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011401.
- [3] Sander J, Hufenbach J, Bleckmann M, et al. Selective laser melting of ultra-high-strength TRIP steel: processing, microstructure, and properties[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(9): 4944-4956.
- [4] Zhao J L, Zhai Z F, Sun D, et al. Antibacterial durability and biocompatibility of antibacterial-passivated 316L stainless steel in simulated physiological environment[J]. Materials Science and Engineering: C, 2019, 100: 396-410.
- [5] Saeidi K, Neikter M, Olsen J, et al. 316L stainless steel designed to withstand intermediate temperature [J]. Materials & Design, 2017, 135: 1-8.
- [6] Zhang Y, Wu L M, Guo X Y, et al. Additive manufacturing of metallic materials: a review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(1): 1-13.

- [7] Yu C F, Zhao C C, Zhang Z F, et al. Tensile properties of selective laser melted 316L stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(5): 683-692.
余晨帆, 赵聪聪, 张哲峰, 等. 选区激光熔化 316L 不锈钢的拉伸性能[J]. *金属学报*, 2020, 56(5): 683-692.
- [8] Yin Y, Liu P Y, Lu C, et al. Microstructure and tensile properties of selective laser melting forming 316L stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(8): 77-81, 132-133.
尹燕, 刘鹏宇, 路超, 等. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢微观组织及拉伸性能分析[J]. *焊接学报*, 2018, 39(8): 77-81, 132-133.
- [9] Ni X Q, Kong D C, Wen Y, et al. Anisotropy in mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2019, 26(3): 319-328.
- [10] Ye J H, Chen M H, Wang N, et al. Flow behavior of TA12 titanium alloy based on modified JC model at high temperature[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(4): 733-741.
叶建华, 陈明和, 王宁, 等. 基于修正 JC 模型的 TA12 钛合金高温流变行为[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(4): 733-741.
- [11] Zhou T F, Wu J J, Liang Z Q, et al. A novel constitutive model for Ti-6Al-4V alloy based on dislocation pile-up theory[J]. *Materials Science and Technology*, 2017, 33(11): 1379-1387.
- [12] Deng Y F, Zhang Y, Wu H P, et al. Dynamic mechanical properties and modification of J-C constitutive model of 6061-T651 aluminum alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 74-81.
邓云飞, 张永, 吴华鹏, 等. 6061-T651 铝合金动态力学性能及 J-C 本构模型的修正[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 74-81.
- [13] Dou E H, Xiao M L, Ke L D, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective-laser-melted TC11 titanium alloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602117.
窦恩惠, 肖美立, 柯林达, 等. 热处理对激光选区熔化成形 TC11 钛合金组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602117.
- [14] Yang C, Dong Z H, Chi C T, et al. Microstructure and mechanical properties of 24CrNiMo alloy steel formed by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0502008.
杨晨, 董志宏, 迟长泰, 等. 选区激光熔化成形 24CrNiMo 合金钢的组织结构与力学性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0502008.
- [15] Zan L, Chen J, Lin X, et al. Research on microstructures of deposited TC21 titanium alloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(4): 612-616.
管林, 陈静, 林鑫, 等. 激光快速成形 TC21 钛合金沉积态组织研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(4): 612-616.
- [16] Beal V E, Erasenthiran P, Hopkinson N, et al. The effect of scanning strategy on laser fusion of functionally graded H13/Cu materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 30(9/10): 844-852.
- [17] Marchese G, Colera X G, Calignano F, et al. Characterization and comparison of Inconel 625 processed by selective laser melting and laser metal deposition[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(3): 1600635.
- [18] Zong X W, Gao Q, Zhou H Z, et al. Effects of bulk laser energy density on anisotropy of selective laser sintered 316L stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502003.
宗学文, 高倩, 周宏志, 等. 体激光能量密度对选区激光熔化 316L 不锈钢各向异性的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502003.
- [19] Pan A Q, Zhang H, Wang Z M. Process parameters and microstructure of Ni-based single crystal superalloy processed by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102007.
潘爱琼, 张辉, 王泽敏. 镍基单晶高温合金选区激光熔化成形工艺及组织[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102007.
- [20] Kong D C, Dong C F, Wei S L, et al. About metastable cellular structure in additively manufactured austenitic stainless steels[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101804.
- [21] He K T, Zhou L, Yang L C. Microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel in the selective laser melting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 091404.
贺可太, 周柳, 杨乐昌. 选区激光熔化中 316L 不锈钢的组织与力学性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 091404.
- [22] Qin W B, Li J S, Liu Y Y, et al. Effects of grain size on tensile property and fracture morphology of

- 316L stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2019, 254: 116-119.
- [23] Gao X, Wu H B, Tang D, et al. Six different mathematical models to predict the hot deformation behavior of C71500 cupronickel alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(12): 4129-4141. 高鑫, 武会宾, 唐狄, 等. 不同本构方程对 C71500 白铜合金热压缩的拟合分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(12): 4129-4141.
- [24] Zhou L, Wang Z H, Wen H M. On the accuracy of the Johnson-Cook constitutive model for metals[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(4): 3-16. 周琳, 王子豪, 文鹤鸣. 简论金属材料 JC 本构模型的精确性(英文)[J]. *高压物理学报*, 2019, 33(4): 3-16.
- [25] Wei G, Zhang W, Deng Y F. Identification and validation of constitutive parameters of 45 Steel based on J-C model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(5): 173-178. 魏刚, 张伟, 邓云飞. 基于 J-C 模型的 45 钢本构参数识别及验证[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(5): 173-178.