

文章编号: 1001-1455(2011)05-0455-08

异种不锈钢激光焊缝材料的动态本构关系*

魏延鹏¹, 吴先前², 虞钢³, 段祝平¹

- (1. 中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室, 北京 100080;
2. 中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100080;
3. 中国科学院力学研究所激光与先进制造工艺实验室, 北京 100080)

摘要: 利用等应变测试法获取了 304 及 316L 激光焊接焊缝材料的准静态应力应变曲线, 发现焊缝材料具有明显的细晶硬化趋势。利用 SHTB 技术对 304、316L 及焊接构件材料高温动态力学性能进行了研究。根据动态实验数据对不锈钢 304 及 316L 母材应变率及温度相关的 Johnson-Cook 本构方程参数进行了拟合。利用 LS-DYNA 建立了 SHTB 动态拉伸实验数值模型, 发现了在应力波加载初始阶段由于结构效应及材料阻抗不匹配引起的应力不平衡现象。通过动态实验与数值模拟相结合的方法确定了焊缝材料的应变率相关本构参数。

关键词: 固体力学; Johnson-Cook 本构方程; SHTB; 焊缝材料

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 130 · 15 **文献标志码:** A

随着异种材料激光焊接技术在工业生产尤其是汽车工业中的广泛应用, 焊接件常常被应用在高温、冲击加载等复杂服役环境中, 结构件材料在各种载荷条件下的变形特征很复杂。通常, 对于焊接母材的力学性能是已知的, 但焊缝材料的力学性能较难获取。目前针对异种激光焊缝材料动态力学性能的实验研究主要采用分离式方法, Z. Xu 等^[1] 利用微加工手段将焊缝材料从结构中取出并加工成圆柱形试件, 利用 SHPB 技术对焊缝材料的高温动态力学性能进行的实验研究, 基于 Johnson-Cook 模型对实验数据进行了拟合, 确定了模型中的本构参数。这项工作对焊缝材料本构研究有很大的启示作用, 但不足之处在于没能考虑焊缝材料由于从结构件中分离造成的内部的细观残余应力分布状态改变以及线切割对焊缝材料组织结构产生的影响。王成等^[2] 利用艾式冲击实验装置研究了激光焊接参数对焊缝抗冲击性能的影响, 得出随着激光能量增加, 焊缝承受冲击功先增加然后又下降的规律。但这种方法只能得到冲击功而无法得到焊缝材料的应力应变曲线, 更不能研究应变率效应对结构件力学性能的影响规律。把 2 种母材及焊缝组成的材料称为激光焊接构件材料, 简称为焊接构件, 完整的研究异种激光焊接构件的动、静态力学性能对该类材料的工程实际应用有重要的意义。魏延鹏等^[3] 利用静态拉伸与 SHTB 技术对不同激光参数不锈钢焊接构件的动静态力学性能进行了详细的研究。

本文中在上述工作的基础上制备新样品, 利用等应变实验法开展对焊缝材料静态应力应变关系的研究, 同时利用 LS-DYNA 建立一种数值方法获得与 SHTB 相匹配的应力加载脉冲来探讨焊接构件在高应变率加载环境下的力学特性, 并分析焊接构件中应力波传播特性包括初始阶段构件内应力不平衡效应。在不分离母材与焊缝材料的条件下, 确定焊接构件中焊缝材料的 Johnson-Cook 动态本构参数。

1 实验准备

采用 2 种组分和力学性能都有差异且焊接性能较好的不锈钢薄板进行激光焊接, 牌号分别为 304 (0Cr18Ni9) 及 316L (00Cr17Ni14Mo2), 厚度为 2 mm, 常规力学性能见文献^[3]。

采用 3.5 kW 扩散型二氧化碳激光器进行了激光焊接。为了获得焊缝材料的准静态力学性能, 利

* 收稿日期: 2010-05-28; 修回日期: 2010-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10832011)

作者简介: 魏延鹏(1982—), 男, 博士, 助理研究员。

用线切割在焊接板上截取如图 1 所示的拉伸试样, 为了避免线切割对结构件的影响, 将结构件表面与侧面进行打磨处理, 焊缝位于拉伸试样中心并与拉伸方向平行, 并在 MTS810 伺服液压材料试验机上进行准静态拉伸实验, 拉伸速度为 2 mm/min, 实验环境温度为 25 °C。采用 SHTB 装置对上述试样进行动态拉伸实验, 样品尺寸及装配见文献[3]。为了确保数据可靠性, 对同种样品进行了 2 次实验。

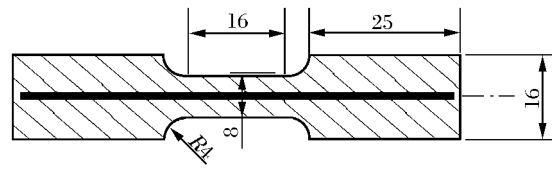


图 1 拉伸实验试样

Fig. 1 Sample for tensile test

2 实验结果与讨论

对于不锈钢 304、316L 和焊缝材料的本构关系, 可以采用如下形式的本构方程来描述

$$\sigma = f(\epsilon)g(\dot{\epsilon})h(T) \quad (1)$$

式中: $f(\epsilon)$ 为应变敏感项, $g(\dot{\epsilon})$ 和 $h(T)$ 分别为应变率敏感项和温度敏感项, 在常温准静态下 $g(\dot{\epsilon})$ 和 $h(T)$ 可近似等于 1。这样, 可由准静态应力应变曲线进行拟合。

2.1 焊缝材料静态应力应变关系

焊接结构由 304、316L 和焊缝材料 3 种材料组成, 利用等应变测试法获取焊缝材料静态应力应变关系, 焊接构件拉伸示意图如图 2 所示。作如下假设: (1) 焊接结构由两侧母材和焊缝材料组成, 3 种材料均属于均匀各向同性材料; (2) 在拉伸过程中各垂直于拉伸方向的横截面均保持垂直并不发生平面外变形, 也即 3 种材料轴向应变相等(变形协调假设); (3) 在轴向拉伸条件下, 剪应力和正应力相比很小, 可以忽略不计, 即母材与焊缝材料都处在一维应力加载条件下。

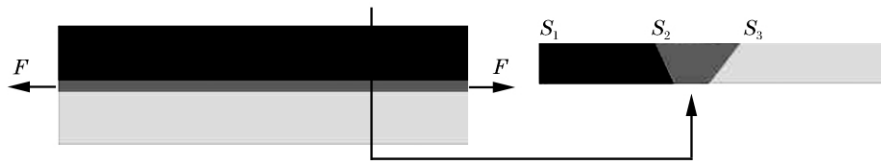


图 2 焊接构件拉伸示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of tensile welded structure materials

可选取 304、316L 和焊缝材料的应力应变关系分别为

$$\sigma_1 = f_1(\epsilon_1), \quad \sigma_2 = f_2(\epsilon_2), \quad \sigma_3 = f_3(\epsilon_3) \quad (2)$$

式中: σ 和 ϵ 分别为轴向应力和轴向应变。

拉伸过程中, 拉伸载荷由 3 种材料变形应力共同贡献, 有如下关系

$$F = \sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2 + \sigma_3 S_3 = f_1(\epsilon_1) S_1 + f_2(\epsilon_2) S_2 + f_3(\epsilon_3) S_3 \quad (3)$$

式中: F 是作用于样品端面的总力, S_1 、 S_2 和 S_3 分别为 3 种材料在试样实验段所占的横截面积, 则焊缝材料应力可表示为

$$\sigma_3 = \frac{F - f_1(\epsilon_1) S_1 - f_2(\epsilon_2) S_2}{S_3} \quad (4)$$

根据变形协调假设, 有

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \bar{\epsilon} \quad (5)$$

为试样整体工程应变, 由引伸计读出。则式(4)变为

$$\sigma_3 = \frac{F - f_1(\bar{\epsilon}) S_1 - f_2(\bar{\epsilon}) S_2}{S_3} \quad (6)$$

S_1 、 S_2 和 S_3 通过对焊缝剖面的精细测量可以获得, 任意应变 $\bar{\epsilon}$ 所对应的拉伸力 F 可通过 MTS 获得的 $F-\bar{\epsilon}$ 曲线确定, 从而得到任意应变 $\bar{\epsilon}$ 所对应的 σ_3 。通过上述等应变测试法计算, 得出焊缝材料的

应力应变曲线,如图 3 所示。

从曲线中可以看到,焊缝材料主要经历了弹性段、应变强化段、应变弱化段和颈缩等 4 个阶段。焊缝材料与母材的力学性能差异很大。焊缝材料的屈服强度高达 500 MPa,比母材(280 MPa)有了很大的提高,抗拉强度提高到了 800 MPa 左右;但焊缝材料延伸率(35%~50%)与母材延伸率(60%~70%)相比,显著下降,这体现了焊缝材料细晶硬化趋势^[4]。上述方法和原理同样可以适用于 SHTB 高温高应变率条件下的实验计算^[5],以便获得焊缝材料高温高应变率动态本构关系。本文中首先利用上述方法获得焊缝材料的准静态应力应变曲线,为焊缝材料本构参数拟合提供依据。值得指出的是,在结构件超过 40%应变后,结构件由于三维效应使得变形协调假设的适用性有所限制,应变弱化段的数据只能起到比较的作用,在后面的数值模型中,对于焊缝材料的静态本构参数只取到 40%应变范围。

2.2 有限元计算

2.2.1 计算模型

本文采用 ANSYS LS-DYNA (12.0 版本)建立了结构件的动态变形 3D 数值模型。对于入射杆和透射杆采用 4 node 固体单元,结构件采用 8 node 固体单元,如图 4 所示,结构件由 304、316L 和焊缝 3 部分组成,各部分之间采用共节点连接,试件与杆件之间的接触定义为刚性接触。

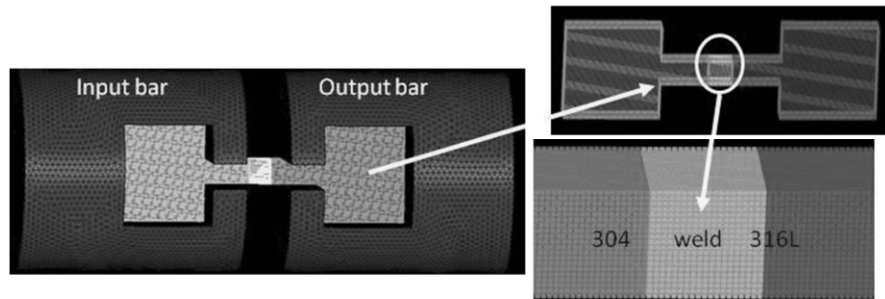


图 4 LS-DYNA 对焊接构件的几何建模

Fig. 4 Geometric modeling for welded structure materials in LS-DYNA

2.2.2 本构模型

对于入射杆和透射杆而言,入射脉冲的强度一般不会大于入射杆的弹性极限,否则会导致杆件塑性变形,所以在数值模型中对于入射杆和透射杆采用线弹性模型,数据由表 1 给出。

表 1 数值模型参数

Table 1 Parameter of simulation model

材料	E/GPa	G/GPa	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	μ	A	B	C	n	m	T_m/K	T_r/K	备注
Bar	210		7.83	0.33								Elastic
304	210	79	7.83	0.33	278	1 300	0.80	0.072	0.81	1 800	298	J-C
316L	210	79	7.83	0.33	280	1 250	0.76	0.070	0.82	1 800	298	J-C
Welded	210	79	7.83	0.33	420	1 400	0.61	0.068	0.83	1 800	298	J-C

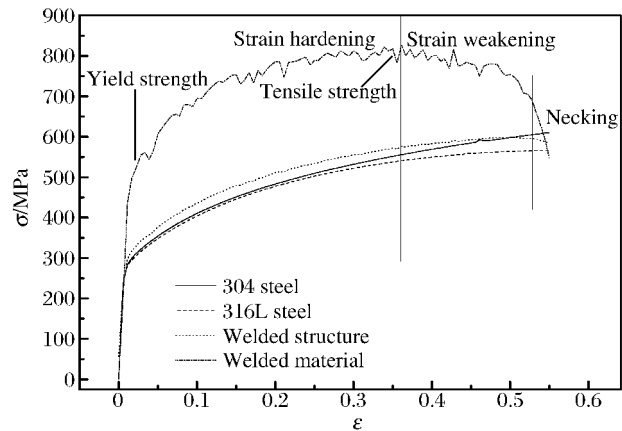


图 3 焊缝材料应力应变关系

Fig. 3 Engineering strain-stress curves of welding materials

对 304、316L 和焊缝材料采用 Johnson-Cook 本构模型^[6-11]

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^m] \quad (7)$$

式中： $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 是量纲一应变率， $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ； $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ 是同源温度， T_r 为室温 (298 K)， T_m 为材料的熔化温度。Johnson-Cook 模型参数 A 、 B 、 n 、 C 、 m ，一般从实验数据拟合获得。

为了获得母材本构参数，对 304 和 316L 等 2 种材料分别进行了准静态和高温动态实验，实验数据如图 5 所示。采用分步法对母材本构参数进行拟合，首先拟合 Johnson-Cook 方程首项。在常温准静态加载条件下，可认为 $\dot{\epsilon} = 1$ ， $T = T_r$ ，则式 (7) 变为

$$\sigma = A + B\epsilon^n \quad (8)$$

根据母材的常温准静态应力应变曲线对式 (8) 进行拟合，得到 A 、 B 和 n 。对于 Johnson-Cook 方程应变率相关项，采用常温下不同应变率动态应力应变曲线进行拟合，这时取 $T = T_r$ ，则式 (7) 变为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (9)$$

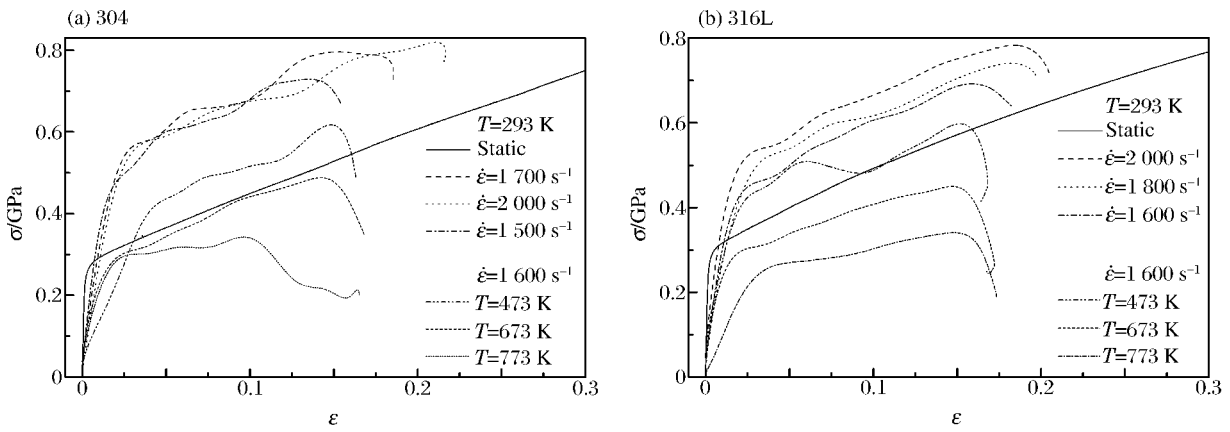


图 5 母材高温动态应力应变曲线

Fig. 5 True stress-strain curves of base materials at high temperature and high strain rate

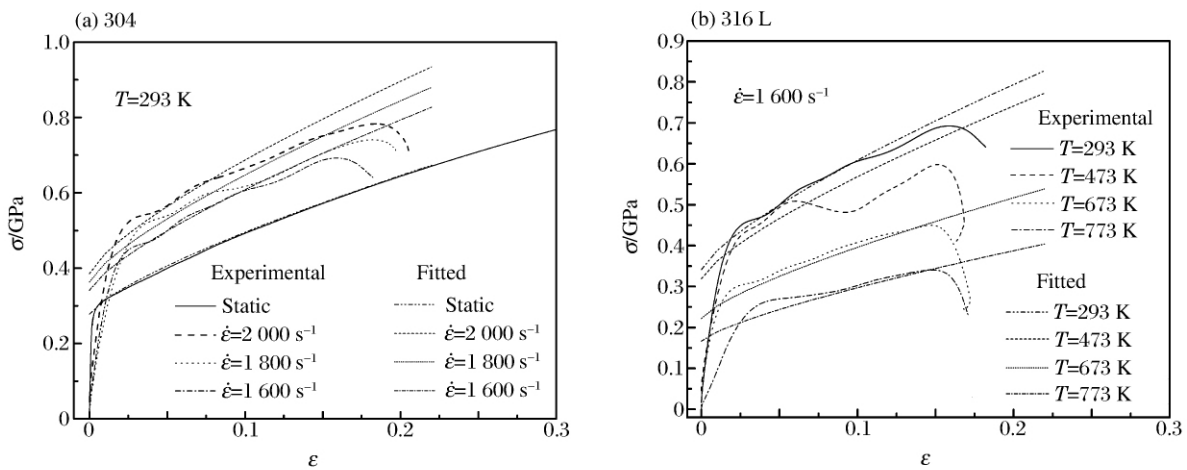


图 6 母材 Johnson-Cook 模型参数拟合

Fig. 6 Fitted parameters for the Johnson-Cook model of base materials

最后拟合 Johnson-Cook 方程温度相关项,根据应变率 $1\ 600\ s^{-1}$ 下 $293\sim 773\ K$ 的高温动态应力应变曲线进行拟合。拟合曲线和参数见图 6 和表 1。

对于焊缝材料的本构参数,采用上述方法获得应变相关 A 、 B 和 n 等 3 个参数,如图 7 所示。对于参数 C 、 m ,选取与母材相当的参数值进行计算,然后通过数值与实验结果进行比较进行调整。

2.2.3 载荷条件

在 SHTB 实验中,子弹与入射杆碰撞结束后,在一维应力假设下会在入射杆中形成并传播应力幅值为 $\sigma = \rho cV/2$,脉宽 $\lambda = 2l/c$ 的应力脉冲,其中 ρ 为入射杆密度, c 为杆的弹性波速, l 为子弹长度, V 为子弹速度。如果建立整个 SHTB 装置数值模型,计算量很大,由于本文中主要关心试件区域的三维应力和变形特征,为了简化模型,采用直接施加质点速度的方法代替撞击加载见图 8。

对端面 A 和 B 施加无反射边界条件,在端面 A 的全部节点上施加自定义速度曲线 $v(t)$,同时在单元上施加压力脉冲 $\sigma(t)$,幅值分别为 $v=V/2$, $\sigma=\rho cv(t)$ 。通过调整参数,可以得到与实验结果(透射波)相同的应力加载条件,对于研究焊接构件的材料力学属性是有效的。结果表明:模型不但节省了计算时间,而且计算结果与透射波实验数据和试件变形特征吻合较好,见图 9。

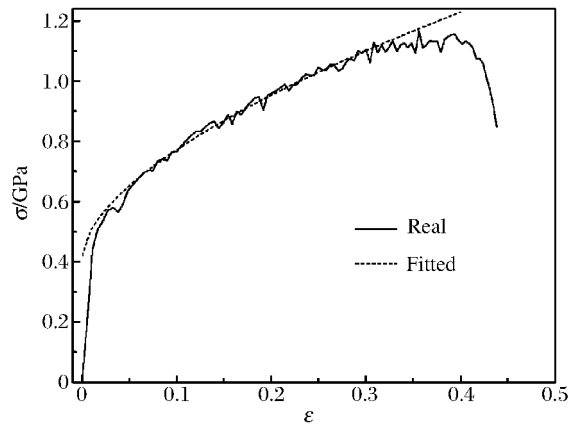


图 7 焊缝材料静态本构参数拟合
Fig. 7 Fitted static constitutive parameters of welded materials

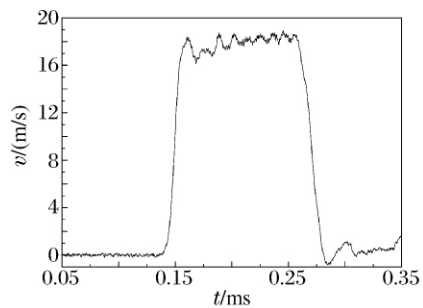
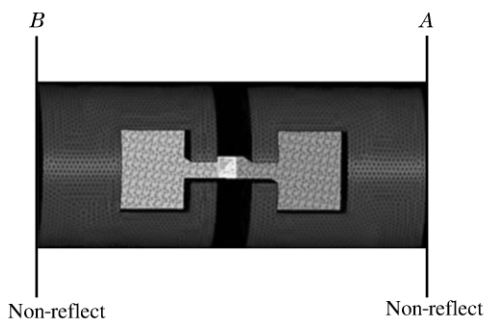


图 8 数值模型中边界和载荷条件

Fig. 8 Boundary and load conditions of simulation model

2.2.4 计算结果分析与讨论

分析计算结果发现,整个结构件应力波加载拉伸可以分为如下 4 个阶段。

(1) 弹性应力波传播段。这一阶段应力波头还未到达试件区域,而是在弹性入射杆中传播,这一阶段维持 $2\sim 3\ \mu s$,空间分布如图 10(a)所示。

(2) 应力波到达结构件区域,这时应力波将在试件端面发生反射和透射,反射波和透射波分别传入入射杆和透射杆。同时结构件在应力波的加载作用下迅速发生变形,并很快进入塑性流动阶段。这时,虽然焊缝材料与母材具有相同的弹性波阻抗(材料参数中设定),但进入塑性段后,由于焊缝材料与母



图 9 焊接构件实验与数值模拟的比较
Fig. 9 Experimental and simulated results of welded structure materials

材的塑性波阻抗有差异,这样就使得应力波会在母材与焊缝材料分界面上发生反射和透射,从而使结构中应力场分布不均匀,该阶段维持 $10\sim 15\ \mu\text{s}$,如图 10(b)所示。

(3) 结构件中应力波在试件端面和材料界面上发生若干次反射和透射后,应力分布趋于均匀,结构件进入稳定的塑性流动阶段,这一阶段的塑性变形特性是本文中的主要研究对象,该阶段维持 $130\sim 140\ \mu\text{s}$,如图 10(c)所示。

(4) 结构件在强度较弱的 316L 一侧出现颈缩现象。如图 10(d)所示,结构件出现大范围的不均匀变形,材料分界面处产生较大的剪应力。这些剪应力不会成为结构件破坏的主导因素,结构件破坏仍会发生在强度较弱的 316L 侧^[3]。

在数值模拟中按照如下方式定义结构件的平均应力和应变。定义节点变量 $\varphi_{x,t}$, φ 为任意力学参量, x 为节点编号, t 为时间序号。选取如图 11(a)中 2 个节点的 Z 方向位移分量 $Z_{74\ 436,t}$ 和 $Z_{223\ 646,t}$, 则结构件任意时刻平均真实应变为

$$\varepsilon(t) = \frac{Z_{74\ 436,t} - Z_{223\ 646,t}}{Z_{74\ 436,t-1} - Z_{223\ 646,t-1}} \quad (10)$$

任意时刻构件内的平均应变率近似为

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{Z_{74\ 436,t} - Z_{223\ 646,t}}{Z_{74\ 436,t-1} - Z_{223\ 646,t-1}} \frac{1}{\Delta t} \quad (11)$$

式中: Δt 为计算时间步长。

对于结构件平均真实应力的计算,采用的方法与实验一致,选取如图 11(b)面 S 作为应力值计算选取面, S 面上的 z 方向平均应力可取

$$\sigma(t) = \frac{\sum_S \sigma_{z,t} S}{S} \quad (12)$$

式中: $\sigma_{z,t}$ 为任意时刻面 S 上单元 z 方向的受力,图 12 为计算结果与实验结果的比较。

比较数值结果和实验数据^[3]可以看出,结构件塑性应力在变形初期阶段波动较大,这是由实验夹头的几何形状造成的。应力波在传播过程中存在多个反射面,应力波的多次反射造成变形初期应力波动较大,这会在很大程度上影响结构件变形初期真实应力的确定。由于利用模型没有模拟出由于塑性温升引起的材料软化效应,导致在大变形阶段结构件塑性应力值偏高。结构件的塑性流动段与实验数据吻合较好。模拟结果较真实地反映了结构件的应变率效应,也反映焊缝材料的本构参数选取较适当。

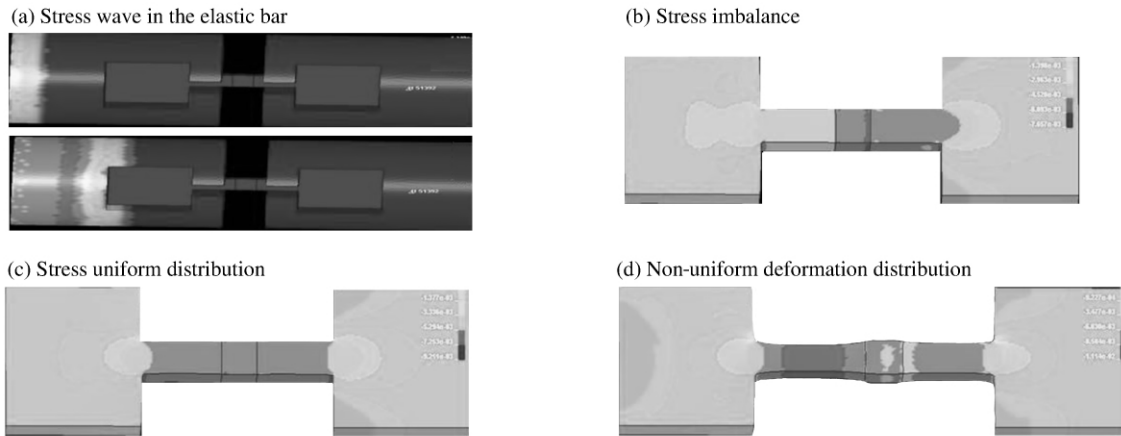


图 10 拉伸过程的 4 个阶段

Fig. 10 Simulation of four tensile stages

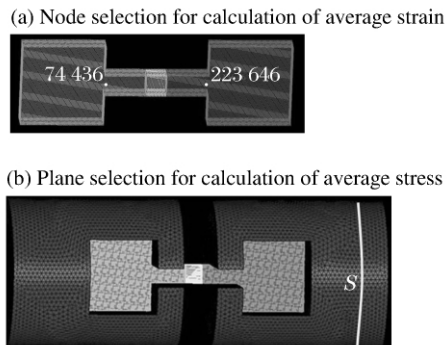


图 11 平均真实应变和平均真实应力计算方法
Fig. 11 Calculation for average true strain and stress

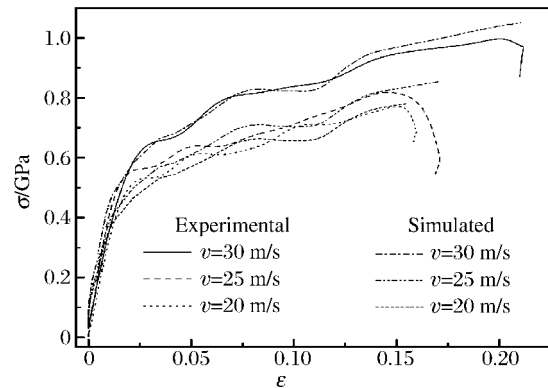


图 12 实验与数值模拟的结构件真实应力应变曲线
Fig. 12 Experimental and simulated true stress-strain curves
of welded structure materials

3 结 论

通过 LS-DYNA 数值模拟结果与 SHTB 透射波实验曲线的比较, 建立一种在小样品范围内考虑三维波动效应的焊缝材料本构关系研究方法, 该方法可以用来模拟 SHTB 的高应变率加载条件, 研究了焊接构件在高应变率加载条件下的变形特征, 获得了焊缝材料的应变率敏感参数。主要结论如下:

(1) 利用等应变测试法, 得到了焊缝材料准静态应力应变关系。实验结果表明, 焊缝材料屈服强度及抗拉强度比母材有显著提高, 但延伸率显著下降, 这体现出焊缝材料细晶硬化趋势。

(2) 通过 LS-DYNA 数值模拟与 SHTB 实验相结合的方法, 得到了 304、316L 及焊缝材料的 Johnson-Cook 本构模型参数。

(3) 通过数值模拟得到的试样塑性流动段与实验数据吻合较好, 较真实地反映了应变率效应对焊缝材料动态力学性能的影响。

(4) 虽然用数值模拟方法研究了焊接构件实验段内的三维应力、应变波动效应, 但仍存在一些问题, 如数值计算精度的改进、接触边界条件的选取以及忽略绝热温升效应所造成的误差, 尤其是样品颈缩以后的变形失稳模拟, 这都是值得今后进一步开展的研究工作。

参考文献:

- [1] Xu Z, Li Y. Dynamic behaviors of 0Cr18Ni10Ti stainless steel welded joints at elevated temperatures and high strain rates[J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(2):121-130.
- [2] 王成. 400MPa 级超级钢激光焊接及其焊接性研究[D]. 北京:清华大学, 2002.
- [3] 魏延鹏, 虞钢, 段祝平. 高温高应变率下异种不锈钢激光焊接件的力学性能[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(5):504-509. WEI Yan-peng, YU Gang, DUAN Zhu-ping. Mechanical properties of laser-welded dissimilar stainless steels structure at elevated temperature and high strain rates[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(5):504-509.
- [4] Berretta J R, de Rossi W, das Neves M D M, et al. Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9):960-966.
- [5] 魏延鹏. 304 及 316L 激光焊接件动态力学性能的实验研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2010.
- [6] 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*. The Hague, Netherlands, 1983:541-545.
- [7] DiLellio J A, Olmstead W E. Numerical solution of shear localization in Johnson-Cook materials[J]. *Mechanics of Materials*, 2003, 35(3/4/5/6):571-580.
- [8] Milani A S, Dabboussi W, Nemes J A. An improved multi-objective identification of Johnson-Cook material parameters[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2):294-302.

- [9] Rule W K, Jones S E. A revised form for the Johnson-Cook strength model[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998,21(8):609-624.
- [10] Samantaray D, Mandal S, Bhaduri A K. A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behavior in modified 9Cr-1Mo steel[J]. *Computational Materials Science*, 2009,47(2):568-576.
- [11] Umbrello D, M'Saoubi R, Outeiro J C. The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007,47(3):462-470.

Constitutive equations for dissimilar stainless steels laser-welded materials*

WEI Yan-peng¹, WU Xian-qian², YU Gang³, DUAN Zhu-ping¹

(1. *The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

3. *Key Lab of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

Abstract: The stress-strain curves of the 304 and 316L stainless steels laser-welded materials were obtained by using the equal strain test method. And obvious hardening behaviors due to the tiny crystal of the welded materials were noticed. The dynamic mechanical properties of the 304, 316L and welded structure materials were experimentally investigated by SHTB at elevated temperature. Constitutive parameters for the 304 and 316L stainless steels were fitted according to dynamic experimental data. The numerical simulation for the welded structure materials in SHTB test was carried out by LS-DYNA and it was found that stress in the structure materials was non-equilibrium at the early loading stage due to material impedance difference. The strain rate-related parameters in Johnson-Cook constitutive equations for the welded materials were obtained by combining numerical calculation and experimental data.

Key words: solid mechanics; Johnson-Cook constitutive equation; SHTB; welded materials

* Received 28 May 2010; Revised 20 December 2010

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10832011)

Corresponding author: WEI Yan-peng, weiyangep@imech.ac.cn

(责任编辑 张凌云)