

文章编号: 1001-1455(2011)05-0504-06

高温高应变率下异种不锈钢激光焊接件的力学性能*

魏延鹏¹, 虞 钢², 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激光与先进制造工艺实验室, 北京 100080)

摘要: 利用改进的 SHTB 实验设备, 对 316L 和 304 不锈钢焊接结构的动态力学性能进行了实验。提出了一种适用于焊接结构件的新型的 SHTB 夹持装置, 并在应变率约 10^3 s^{-1} 、温度为 $25 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下获得了焊接结构件动态应力-应变曲线。研究表明: 随应变率的升高, 结构件的屈服强度和抗拉强度随应变率的增大而增大, 随温度的升高而降低, 温度对结构件塑性流动应力的影响更明显。

关键词: 固体力学; 动态力学性能; SHTB; 异种材料激光焊接; 应变率; 温度

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、冲击加载等环境中。该结构件材料在各种载荷条件下的变形特征复杂。这里结构件材料是指由 2 种异质材料与焊缝材料共同组成的一种有结构的材料。为此, 焊接结构件材料在高温冲击载荷条件下的力学性能和变形特征成了关注的焦点。如何通过调整焊接参数来获得适用于不同服役环境下的优异的焊接件材料, 在工业生产实践中有重要意义。SHTB 动态拉伸试件一般有圆柱状和扁平状 2 种。对于圆柱状试件大多采用螺纹的连接方式, FU Shun-qiang 等^[1]采用螺纹式连接研究了聚碳酸酯材料的动态力学性能。这种方式对应力波的传递产生一定的影响, 但实践证明, 在入射波幅值较大的情况下, 这种影响可以忽略。扁平状的连接方式一般有 2 种, 一种是利用高强胶将扁平状试件粘贴到波导杆的卡槽中, ZHOU Yuan-xin 等^[2]利用胶连式的连接方式对碳纤维的动态力学性能进行了测试, 这种方式虽能获得很好的应力波形, 但是粘贴工艺复杂, 实验周期长, 一发实验需准备 2~3 h; 另一种连接方式是利用螺纹和销栓的组合方式进行连接, 这种方式虽然实验效率较高, 但由于波导杆头部存在销孔和卡槽等应力集中区域, 使反射和透射应力波形受很大影响。目前, 针对异种材料激光焊接结构件材料动态力学性能的实验研究还处在初始阶段。王成^[3]利用艾式冲击实验研究了激光焊接参数对焊缝抗冲击性能的影响, 得出: 随激光能量增加, 焊缝冲击韧性先增加后下降, 激光焊接热输入为 144 J/mm 时焊缝冲击功最高为 29 J 。E. Bayraktar 等^[4-6]利用冲击拉伸实验和表面腐蚀网格法研究了焊接结构件材料的抗冲击性能、断裂机制和不均匀变形场分布特征。但用上述 2 种方法都只能得到焊接结构件材料的冲击韧性而无法得到应力应变曲线, 更不能得到在不同激光焊接参数下, 温度和应变率对结构件材料力学性能的影响规律。

本文中以 304 和 316L 不锈钢为主要研究对象, 利用高功率连续二氧化碳激光器获得焊接结构件, 它是由 2 种异质材料与焊缝组成的一种特殊构件材料。针对焊接结构特征设计适用于 SHTB 装置的卡套式连接方式, 创建一种研究焊接结构动态力学性能的实验方法。详细研究应变率和温度对结构件材料动态力学性能和塑性流动应力的影响规律, 发现不同焊接参数下的结构件材料对应变率和温度敏感性的差异, 并初步研究焊接件变形过程中由塑性功引起的不均匀温度分布。

* 收稿日期: 2010-05-28; 修回日期: 2011-02-16

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。

1 实验准备

1.1 材料选择及激光焊接

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)和 316L(00Cr17Ni14Mo2),厚度为 2 mm,304 不锈钢的弹性模量为 205 GPa,屈服极限为 246 MPa,抗拉强度为 630 MPa,延伸率为 0.67;316L 不锈钢的弹性模量为 205 GPa,屈服极限为 234 MPa,抗拉强度为 551 MPa,延伸率为 0.58。

焊接实验在 3.5 kW 扩散型二氧化碳激光器上进行。通过改变激光功率 P 、焊接速度 v_w 、离焦量 f_d 和侧吹氦气速度 v_s 等焊接参数获得了 6 组焊接板,焊接参数如表 1 所示,表中 f 为焦距, d_s 为焦斑直径。焊接后的实验样品见图 1。

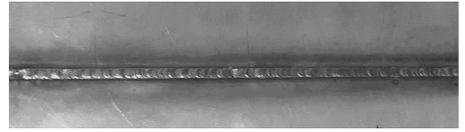


图 1 304 和 316L 焊接板

Fig. 1 Welded sheet of 304 and 316L

表 1 激光焊接参数

Table 1 Laser welding parameters

编号	P/kW	光束模式	$v_s/(\text{L}/\text{min})$	f/mm	f_d/mm	$v_w/(\text{m}/\text{min})$	$d_s/\mu\text{m}$
No. 1	3.5	TEM ₀₀	10	267	-2	3.0	136
No. 2	3.5	TEM ₀₀	15	267	-2	3.0	136
No. 3	3.5	TEM ₀₀	10	267	-3	3.0	148
No. 4	3.5	TEM ₀₀	10	267	-2	2.0	136
No. 5	3.0	TEM ₀₀	10	267	-2	2.0	136
No. 6	3.5	TEM ₀₀	10	267	-2	2.5	136

1.2 试样准备

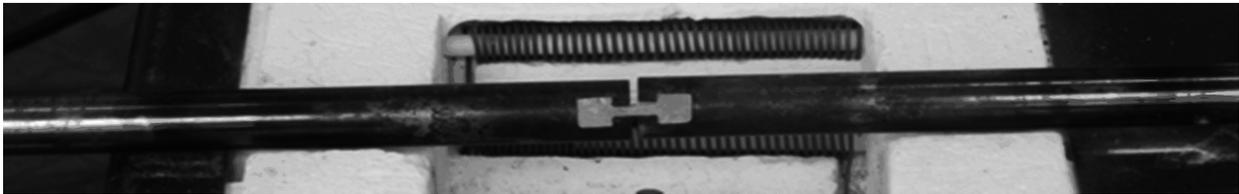
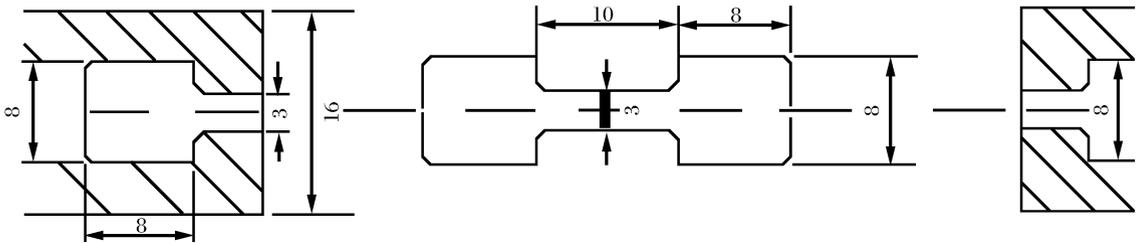


图 2 扁平状试件卡套式连接方式示意图

Fig. 2 Lock type of connection of flat specimens

受焊接件形状的限制,试件只能加工成扁平状。为了获得更好的实验数据,采用自行设计的卡套连接方式,样品厚 2 mm,如图 2 所示。加温装置采用自行设计的柔性控温箱,温度在 25~1 000 °C 可调。

图 3 显示了利用卡套式夹持方式获得的 SHTB 波形,从图中可以看出,此种连接方式对应力波形影响较小,但是也存在一定的缺点。由于波导杆上的卡套相当于减少了横截面积,使杆件前端强度降低,虽然对应力集中区域进行了倒角处理,在长时间多次加载的情况下杆件仍会变形,这要视加载幅值而定。这种现象只出现在大应力幅值多次疲劳加载的情况,不会影响本实验的结果。

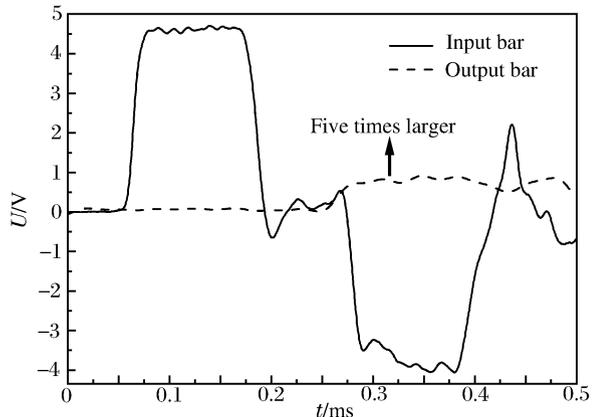


图 3 SHTB 实验采集到的典型应变波形

Fig. 3 Typical strain wave derived from SHTB test

2 实验结果与讨论

2.1 不同参数结构件材料动态强度比较

图 4 为典型的焊接结构件材料动态应力应变曲线,由于 SHTB 测试中,试件两端的应力经过几次反射后才达到平衡,使得结构件材料的应力-应变曲线中弹性段测试不准确。从图中可以看出,结构件材料在动态拉伸过程中存在明显的模量突变点,工程上将此点处应力值定义为结构件材料的屈服强度,这类屈服强度与真实值有一定差距,但可以通过对突变点应力值的比较来寻找结构件材料刚进入塑性段时的一些变化规律。对于抗拉强度,其值代表结构件材料拉伸过程中所承受的最大工程应力,是准确可靠的。

由表 2 可以看出,各种参数的焊接结构件材料的动态屈服强度 σ_y 和抗拉强度 σ_t 都随应变率的增大而增大,随温度的升高而降低;但各种参数结构件材料对于应变率和温度的敏感程度不同。No. 1 参数对应的结构件材料虽然具有较低的静态强度,但抗拉强度对应变率和温度的敏感性最强,随应变率的增大,抗拉强度急剧增大,并很快达到所有参数结构件材料的最大值 962 MPa;随着温度的提高,抗拉强度急剧下降,并达到所有参数结构件材料的最小值 342 MPa。No. 2、No. 3 和 No. 5 参数对应的结构件材料对应变率和温度的敏感性较弱,屈服强度和抗拉强度都随应变率的提高平缓上升并随温度的提高平缓下降。No. 4 参数对应的结构件材料具有最差的动态力学性能,在应变率为 $1\,500\text{ s}^{-1}$ 时,其抗拉强度低于准静态下的抗拉强度,表明此种参数的焊接件不能被使用于高应变率的环境。

综上所述,除 No. 4 参数对应的结构件材料外,所有参数对应的结构件材料均具有较好的高温动态力学性能。No. 1 参数对应的结构件材料对温度和应变率的敏感性最强,这种材料较适于高应变率加载的环境;由于其温度敏感性也较强,随温度的升高强度降低较快,限制了该材料在高温环境下的应用。

表 2 不同焊接参数参数对应的结构件材料的动态屈服强度和抗拉强度

Table 2 Dynamic yield strength and tensile strength of welded structure materials with different weld parameters

焊接参数	$\sigma_y/\text{MPa}, \sigma_t/\text{MPa}$						
	20 °C		20 °C		200 °C		500 °C
	静态	$1\,500\text{ s}^{-1}$	$1\,800\text{ s}^{-1}$	$2\,100\text{ s}^{-1}$	$1\,500\text{ s}^{-1}$	$1\,500\text{ s}^{-1}$	$1\,500\text{ s}^{-1}$
No. 1	313,617	468,614	500,710	567,962	381,526	348,435	277,342
No. 2	320,668	499,719	560,712	580,776	385,509	308,428	276,350
No. 3	309,668	570,695	550,713	613,816	421,550	379,430	306,377
No. 4	308,680	484,660	520,681	589,795	440,575	335,437	320,377
No. 5	318,655	580,690	570,704	540,726	372,521	340,431	307,370
No. 6	302,670	510,700		520,711	400,543	330,417	315,375

2.2 温度效应

温度对结构件材料塑性流动应力的影响如图 5 所示。动态变形过程中,结构件材料中的温升的产生一般来源于 2 部分,一部分为初始环境温度,也就是实验温度;另一部分来源于结构件材料发生塑性变形的塑性功转化导致的温升,按 Taylor 的假定,这一部分温升可表示为

$$\Delta T = \frac{\kappa}{\rho c_V} \int \sigma \, d\varepsilon \tag{1}$$

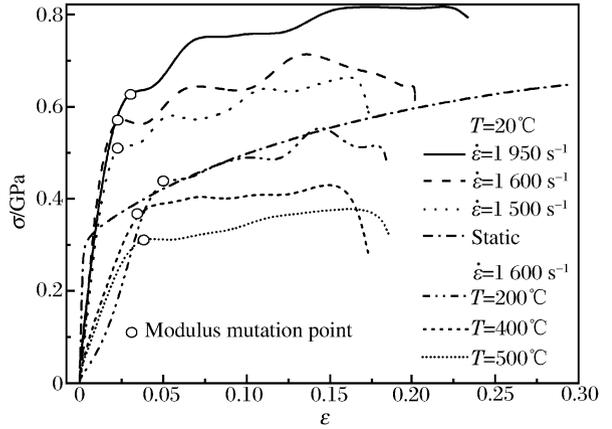


图 4 No. 1 参数对应的焊接结构件材料的工程应力-应变曲线

Fig. 4 Engineering stress-strain curves of welded structure materials with welding parameters 1

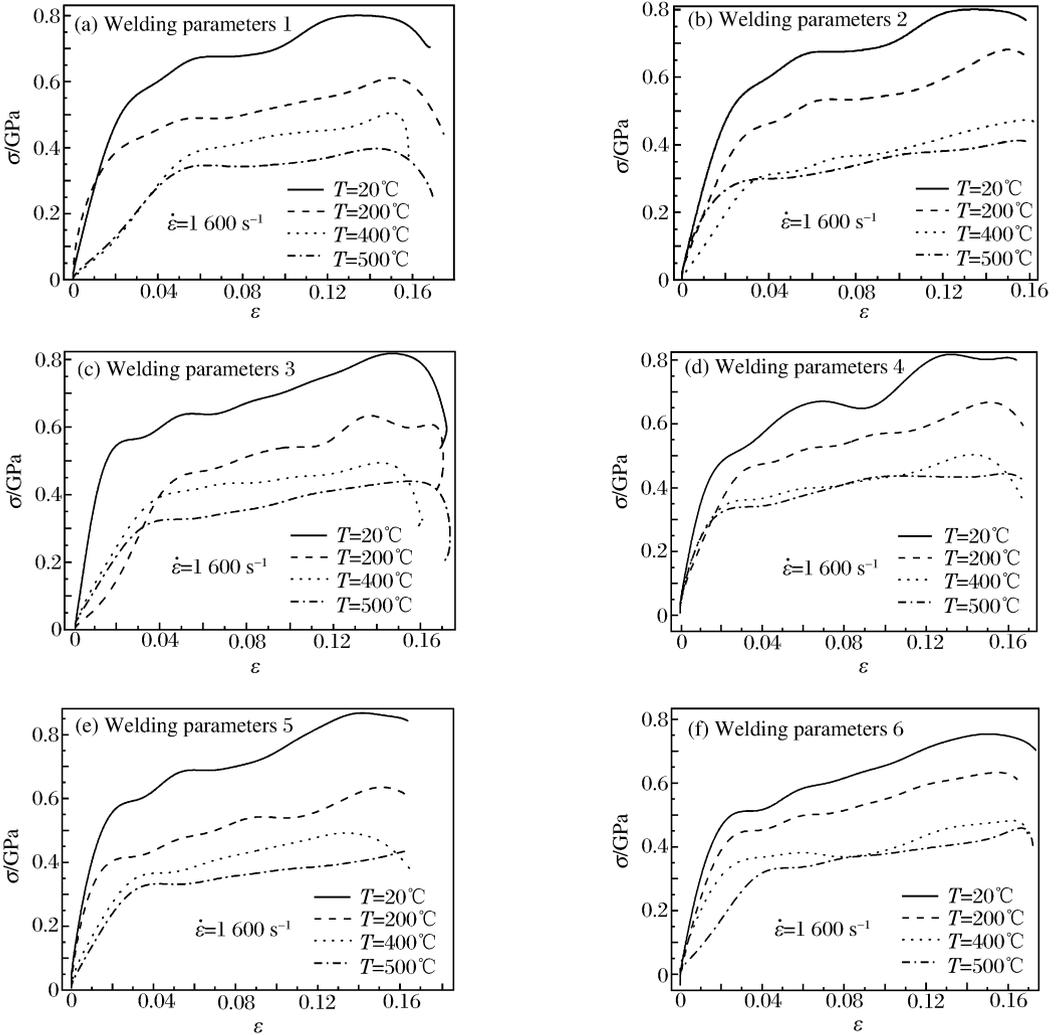


图 5 采用不同的激光参数获得的焊接结构材料的真实应力-应变曲线

Fig. 5 True stress-strain curves of welded structure materials with different welding parameters

式中： ρ 为材料密度， c_v 为材料定容热容， κ 为塑性功与热量的转化系数，一般为 0.97，在大变形的情况下可以近似取 1。估算表明，在材料非失稳区，塑性变形引起的温升和高温环境下温度相比可以忽略。

在整个结构件材料的变形过程中，温度对塑性流动应力的影响具有如下特点：(1) 相同应变率下，结构件材料变形全过程中的平均塑性流动应力随环境温度的提高而明显下降。(2) 环境温度对结构件材料流动应力的影响呈非线性变化趋势，环境温度越高，相同的温度增量对塑性流动应力的影响越小，以 No. 4 参数对应的结构件材料的应变率为 $1\ 600\ s^{-1}$ 、变形为 12% 时刻为例，温度从 25~200、200~400、400~500 °C，产生的塑性流动应力降幅分别为 199、132、26 MPa。(3) 结构件材料塑性变形产生的温升随应变率的提高而提高。这主要是因为，应变率越高，塑性功产生的热量越大，温升越明显。(4) 相同应变率和温度下，变形量越大，塑性变形温升引起的软化现象越明显，这主要是因为变形量越大的情况下，塑性功增加，并且转化系数 η 也变大，导致温升增加，流动应力下降。(5) 结构件材料中的绝对温度场不均匀。虽然具有相同的初始温度，但是由于材料不同，结构件材料中由于塑性变形产生的温升不同。如果只考虑单轴拉伸过程，结构件材料处在一维应力状态，并且结构件材料各部分所受应力相等，那么如式(1)，材料由塑性变形引起的温升只与变形量 ϵ 有关。变形量越大， ΔT 越大。由于焊缝材料的密度和定容热容相差无几，只是晶粒尺寸有所不同，焊缝材料具有硬化趋势，在相同的应力下产生的变形量小，所以焊缝处的塑性温升也较小，结构件材料的绝对温度场呈中间低两边高的趋势。

2.3 应变率效应

图 6 显示了不同焊接参数、不同应变率下结构件材料的真实应力-应变曲线。从图中可以看出,塑性流动应力随应变率的增加而增大,但采用不同的焊接参数获得的结构件材料对应变率的敏感程度不同,为了比较应变率对流动应力的影响,定义应变率敏感系数

$$\beta = \frac{\partial \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\ln(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} \quad (2)$$

式中: σ_1 和 σ_2 为应变率 $\dot{\epsilon}_1$ 和 $\dot{\epsilon}_2$ 下的流动应力。由图 6 可以看出,采用不同的焊接参数得到的结构件材料对应变率的敏感性差别很大, No. 1 和 No. 3 参数对应的结构件材料的应变率敏感系数较大,随应变率的增加,流动应力幅值有较大提升。No. 2 和 No. 5 参数对应的结构件材料敏感系数较小,随应变率的增加,流动应力幅值变化很小。

另外,从整体效果看,在整个变形过程中温度软化效应对流动应力的贡献大于应变率强化效应,尤其在结构件材料进入大变形阶段。

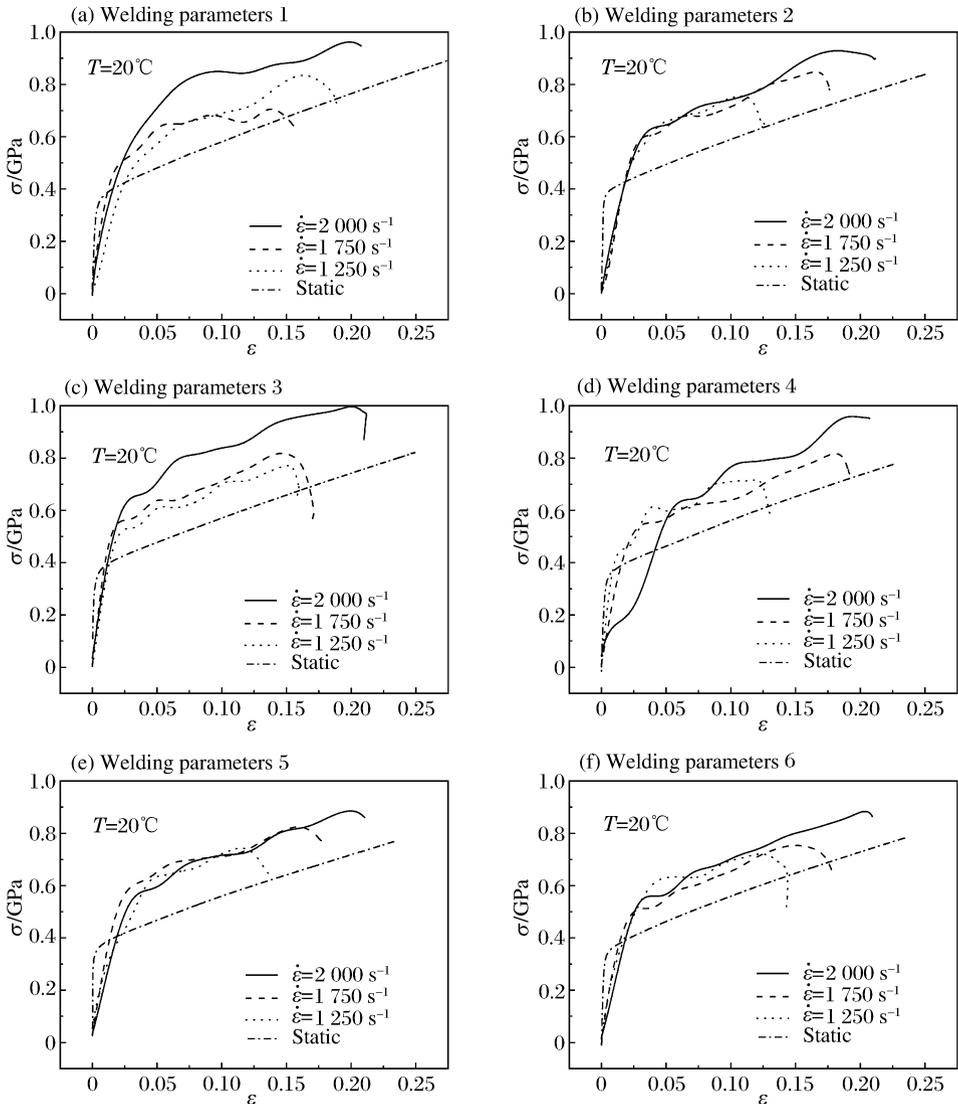


图 6 采用不同的焊接参数获得的结构件材料的真实应力-应变曲线

Fig. 6 True stress-strain curves of welded structure materials with different welding parameters

3 结 论

利用 SHTB 装置,对 304 和 316L 异种不锈钢激光焊接结构在不同温度下的动态力学性能进行了实验研究。实验研究表明:焊接结构件材料的动态力学性能主要受应变、应变率和温度的影响:动态屈服强度和抗拉强度随应变率的提高而增大,随温度的提高而降低;温度对结构件材料流动应力的影响呈非线性变化趋势;随应变的增加,流动应力增加,呈硬化趋势;在整个变形过程中,温度软化效应对流动应力的贡献大于应变率强化效应,尤其在结构件材料进入大变形阶段。

参考文献:

- [1] FU Shun-qiang, WANG Yang, WANG Yu. Tension testing of polycarbonate at high strain rates[J]. *Polymer Testing*, 2009,28(7):724-729.
- [2] ZHOU Yuan-xin, WANG Yang, XIA Yuan-ming, et al. Tensile behavior of carbon fiber bundles at different strain rates[J]. *Materials Letters*, 2010,64(3):246-248.
- [3] 王成. 400 MPa 级超级钢激光焊接及其焊接性研究[D]. 北京:清华大学,2002.
- [4] Bayraktar E, Kaplan D, Buirette C, et al. Application of impact tensile testing to welded thin sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004,145(1):27-39.
- [5] Bayraktar E, Kaplan D, Grumbach M, et al. Application of impact tensile testing to spot welded sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004,153/154:80-86.
- [6] Bayraktar E, Kaplan D, Schmiel F, et al. State of art of impact tensile test (ITT): Its historical development as a simulated crash test of industrial materials and presentation of new "ductile/brittle" transition diagrams[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008,204(1/2/3):313-326.

Mechanical properties of laser-welded dissimilar stainless steels structure at elevated temperature and high strain rates*

WEI Yan-peng¹, YU Gang², DUAN Zhu-ping¹

- (1. *The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*
2. *Key Lab of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

Abstract: Static and dynamic mechanical properties of AISI304 and AISI316L dissimilar stainless steel laser welded joints were experimentally studied by MTS and an improved SHTB device. A new SHTB clamping method for the welded structure was established. The dynamic strain-stress curves were obtained at the strain rate around 10^3 s^{-1} and temperature 25-500 °C. Results show that yield strength and tensile strength of the welded structure increase with the increase of strain rate and decrease with the increase of temperature. Temperature has more significant effect on the plastic flow stress than strain rate.

Key words: solid mechanics; dynamic mechanics properties; SHTB; laser-welded dissimilar material; strain rate; temperature

* Received 28 May 2010; Revised 16 February 2011

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

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