

基于在线观察的激光焊接凝固热裂纹敏感性研究

温 鹏¹ 荻崎贤二² 山本元道²

(¹清华大学机械工程系, 北京 100084
²广岛大学机械系统工程系, 日本 739-8527)

摘要 激光焊接过程中较快的冷却速度可能会加剧凝固热裂纹的发生。目前对于激光焊接过程中凝固热裂纹敏感性的系统研究还较少,如何准确测量焊接凝固热裂纹发生的临界应变和温度是获得热裂纹敏感性数据的关键。利用基于高速高倍在线摄像的 U 型热裂纹实验,捕捉到激光焊接过程中凝固热裂纹发生的瞬间,并通过跟踪测量热裂纹尖端附近两点的位移变化获得凝固热裂纹发生的临界应变;同时,在焊接过程中采用在线观察热电偶投入法对焊接熔池后端的温度变化进行了测量。通过改变 U 型热裂纹实验的拉伸载荷,获得不同温度下热裂纹发生时的临界应变,从而构建表征凝固热裂纹敏感性的韧性曲线。

关键词 激光技术;焊接;凝固热裂纹;在线观察;U 型热裂纹实验

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603005

Evaluation of Solidification Cracking Susceptibility during Laser Welding by *In-situ* Observation Method

Wen Peng¹ Shinozaki Kenji² Yamamoto Motomichi²

(¹Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
²Department of Mechanical System Engineering, Hiroshima University, 739-8527, Japan)

Abstract The rapid cooling during laser welding can prompt the occurrence of solidification cracking, however, few study is found on systematic research of solidification cracking during laser welding. It is the key to accurately measure the critical strain and temperature of the crack in order to know solidification cracking susceptibility. By using U-type hot cracking test with *in-situ* observation method, the occurrence of solidification cracking is captured clearly by high-speed-high-magnification camera. With the *in-situ* observation method, the local critical strain of crack is measured by tracking the displacement of two reference points near the crack; the local temperature of crack is measured by inserting the thermocouple to the trailing edge of the weld pool. Local critical strains at different temperatures are obtained under different tensile loads in U-type hot cracking test. The high temperature ductility curve is achieved accurately.

Key words laser technique; welding; solidification cracking; *in-situ* observation; U-type hot cracking test

OCIS codes 140.3390; 100.2000; 350.3390

1 引 言

凝固热裂纹是许多材料焊接过程中的常见缺陷,由于晶粒边界处残留液体金属的存在,焊缝金属在凝固温度区间内呈现极低塑性,如果此时焊缝金属所承受的拉伸应变大于其所具有的塑性,凝固热裂纹就会产生。焊缝金属在凝固温度区间的塑性常

被用来表征材料的凝固热裂纹敏感性,各种热裂纹实验采用专用夹具对焊接试件施加内部或外部的强制拘束使其发生凝固热裂纹,通过测量裂纹发生的临界拘束程度、裂纹的数量和长度等指标,定性比较不同材料在凝固温度区间的塑性大小,从而评价材料的热裂纹敏感性^[1]。然而,这些评价指标与凝固

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(51005125)资助课题。

作者简介: 温 鹏(1981—),男,工学博士,讲师,主要从事激光焊接及焊接冶金与结构等方面的研究。

E-mail: wenpeng@tsinghua.edu.cn

热裂纹的发生原理并没有直接联系,其准确性和重复性受到质疑^[2]。横向可调拘束热裂纹(Transverse vareststraint)实验从凝固金属变形能的观点出发,利用热裂纹发生的临界应变获得焊缝金属的高温韧性曲线,作为可定量提供焊缝金属在凝固温度区间塑性的方法被广泛应用^[3]。

高温韧性曲线由焊缝金属在凝固温度区间内不同温度下所发生裂纹的临界应变组成,该曲线作为凝固热裂纹发生的抵抗力,对于评价凝固热裂纹敏感性和预测凝固热裂纹发生具有重大意义^[1,2]。由于焊接过程中熔池随着热源移动,凝固前沿在时间和空间上存在持续变化,加上高温和相变,凝固热裂纹发生的高温局部应变很难测量。横向可调拘束热裂纹实验根据圆形凸台的曲率求得裂纹发生时焊件的整体应变,通过改变弯曲凸台曲率,获得不同拘束程度下裂纹发生的整体应变,从而构建了高温韧性曲线^[4]。然而,由于用整体应变代替了裂纹发生处的局部应变,所求得的高温韧性曲线的精度和适用范围存在较大问题^[2,5]。另一方面,Matsuda等^[6]利用在线观察测量(MISO)法对钨惰性气体(TIG)焊接过程中熔池凝固前沿进行了动态观察,并结合强拘束拉伸装置对凝固热裂纹发生时的临界位移进行了测量,但目前利用在线观察法对激光焊接过程中凝固热裂纹敏感性的相关研究还很少^[7]。

近年来,随着光学技术和数码技术的快速发展,高速摄像能够方便快捷地记录焊接过程中的瞬时变化,激光焊接过程在线观察和检测手段日益丰富,例如对于激光焊接过程中熔池形状^[8,9]、等离子体行为^[10,11]和熔透情况^[12,13]等进行相关研究。本文开展基于在线观察法的U型热裂纹实验,对激光焊接过程中热裂纹的发生和传播行为进行观察,并对热

裂纹发生部位的局部应变和温度进行测量,从而精确地获得了材料对应激光焊接过程的高温韧性曲线。

2 实验方法

图1为所采用的基于在线观察的激光焊接U型热裂纹实验装置图。焊接热源为IPG YLR-3000光纤激光器,最大输出功率为3 kW,激光波长为1070 nm,产生的激光通过0.2 mm芯径的加工光纤连接到安装在机械手臂上的焊接加工头,加工头偏离垂直方向10°。加工头处聚焦透镜的焦距为400 mm,聚焦光斑直径为0.44 mm。焊接过程中采用Ar气对焊缝及熔池进行保护,正面和背面保护气流量分别为50 L/min和15 L/min。焊接材料为SUS347奥氏体不锈钢和Inconel600镍基合金(JIS日本钢铁标准),材料化学成分如表1所示。焊接试件尺寸为104 mm×30 mm×3 mm(宽度×焊接方向×厚度),焊接方法为平板熔焊,焊接时激光焦点位于工件表面,所使用的激光功率为1.6 kW,焊接速度为0.4 m/min。

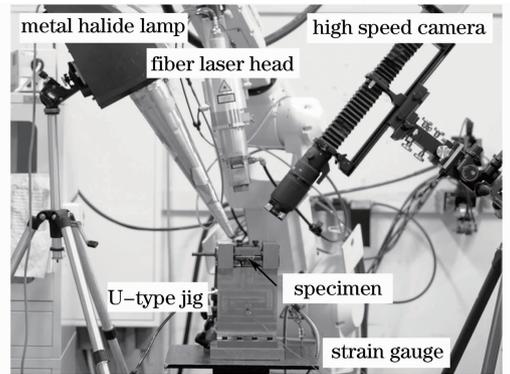


图1 带有在线观察的激光焊接U型热裂纹实验装置

Fig.1 Setup of U-type hot cracking test with *in-situ* observation during laser welding

表1 所用材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of used stainless steels (mass fraction, %)

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe	Nb
SUS47	0.05	1.51	0.58	0.031	0.001	18.01	9.93	Bal.	0.56
Inconel600	0.04	0.20	0.20	—	0.001	15.40	Bal.	8.8	—

图2为U型热裂纹实验的原理图。U型夹具由底板和两片拘束臂构成,拘束臂中央的内外两侧贴有应变片,用来实时记录拘束臂的变形量。焊接前通过外载荷对拘束臂施加一定变形,然后将实验片固定在拘束臂上端,释放外载荷后,拘束臂对实验片形成横向拉伸载荷,该拉伸载荷与拘束臂的变形量成正比,可用拘束臂的刚度系数 k 表示。实验采用具有不同刚度系数的两种U型夹具,其刚度系数

k_1 和 k_2 分别为5.79 kN/mm和2.07 kN/mm。通过对拘束臂预置不同初始变形,可对试件施加不同的拉伸载荷,在拘束状态下对试件进行激光焊接,得到不同程度的凝固热裂纹。

激光焊接过程中采用装有微距镜头[Nikon, 200 mm $f/4D$ (IF)]的高速摄像机(Photron, FASTCAM-1024)对熔池后方进行放大摄像,高亮度金属卤化物灯(Kyowa, MID-25FC)被用来提供

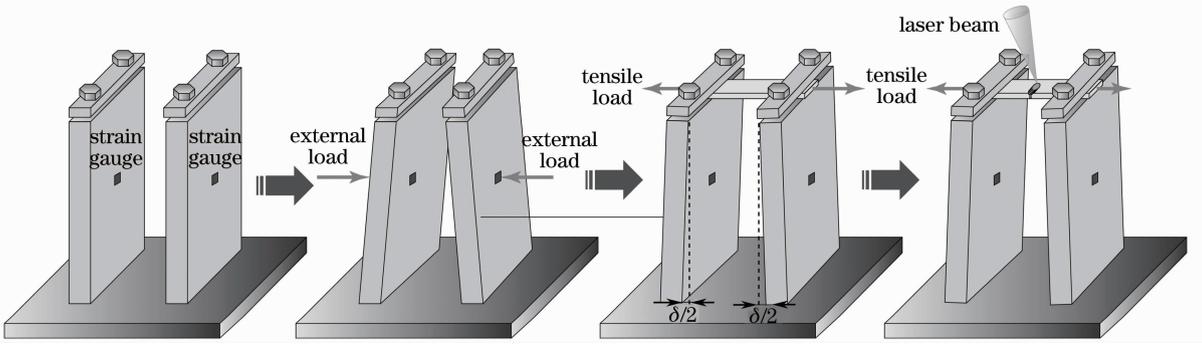


图 2 U 型热裂纹实验原理图。 $F = k \cdot \delta$, F 为初始拉伸载荷, δ 为初始变形

Fig. 2 Schematic of U-type hot cracking test. $F = k \cdot \delta$, F : initial tensile load, δ : initial deformation

主动照明,并在镜头前加装了具有遮挡激光和吸收热辐射的光学滤镜,保证可见光域的摄像。焊接过程中激光加工头和摄像机位置固定,焊接工件随机床移动。激光光斑在前,摄像镜头中心在后,摄像中心始终位于熔池后端裂纹发生区域。摄像帧速为 500 frame/s,快门时间为 1/500 s,光学放大倍数约为 7 倍。此外,为了精确测量焊接熔池后端的温度变化,焊前在焊接试件表面对热电偶投入位置进行标记,在焊接过程中,高速摄像机拍摄的熔池移动图

像通过图像采集卡同步传输到液晶显示器,如图 3 所示。当熔池后端到达标记的投入位置时,热电偶通过一个带有定位装置的长杆手动投入到熔池后端。通过在线观察的方法,可精确地将热电偶投入到预定位置,从而测量焊缝金属凝固时的温度变化。使用热电偶类型为 PtRh13-Pt(R 型热电偶),电偶丝直径为 0.25 mm。同一焊接规范下测量 3 次,最终结果取平均值。

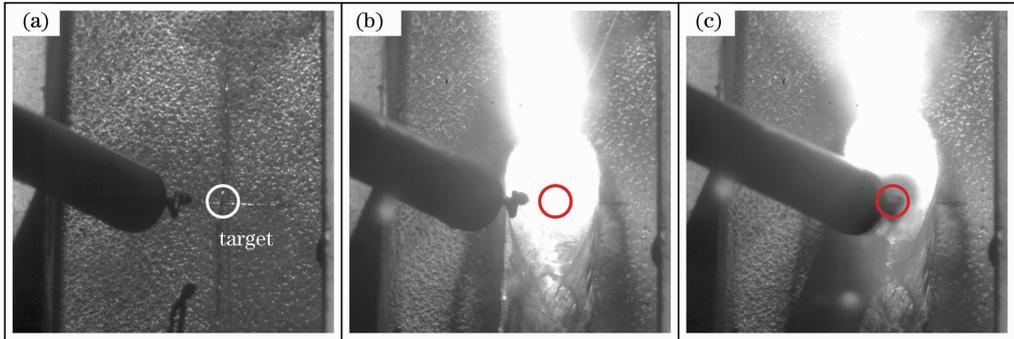


图 3 热电偶在线观察投入法测量焊接熔池后端温度变化。(a)焊前,(b)焊接后 3 s,(c)3.18s

Fig. 3 Dynamic images of thermocouple insertion (a) before and after (b) 3s, (c) 3.18 s welding

3 实验结果和讨论

3.1 凝固裂纹的观察与局部应变的测量

如图 4 所示,激光焊接熔池后端的轮廓、凝固前沿的柱状晶生长模样和凝固热裂纹的发生被摄像机清晰地记录下来。可以看到,激光熔池后端轮廓呈现泪滴状,柱状晶近乎平行地向焊缝中央生长,并在焊缝中心线处会合,这种生长模式易在会合面处形成显著的偏析弱面,对热裂纹抵抗力较弱。激光焊接较快的焊接速度和冷却速度容易形成这种模式的凝固,因此激光焊接可能会加剧凝固热裂纹的产生。此外,凝固裂纹开始发生的部位距离熔池后端有一定的距离,并非紧靠熔池后端处产生。U 型热裂纹

实验中,根据所施加拉伸载荷的不同,热裂纹发生位置到熔池后端距离为 0.2~0.6 mm。根据热裂纹发生机理,焊缝金属在凝固过程中,经历液-固态(液相占主要成分)和固-液态(固相占主要成分)两个阶段,凝固裂纹一般发生在固-液态凝固金属交织长成枝晶骨架的阶段,该阶段位于凝固后期,此时焊缝金属已主要为固相,但由于枝晶间尚存在未凝固完的液膜,焊缝金属呈现极低的塑性,容易促使凝固热裂纹的发生。紧靠熔池后端的地方,液相尚多且可在枝晶间自由流动,即使焊缝金属受到一定拉伸应变,凝固热裂纹亦难产生,因此凝固热裂纹均发生在熔池后端有一定距离之处。

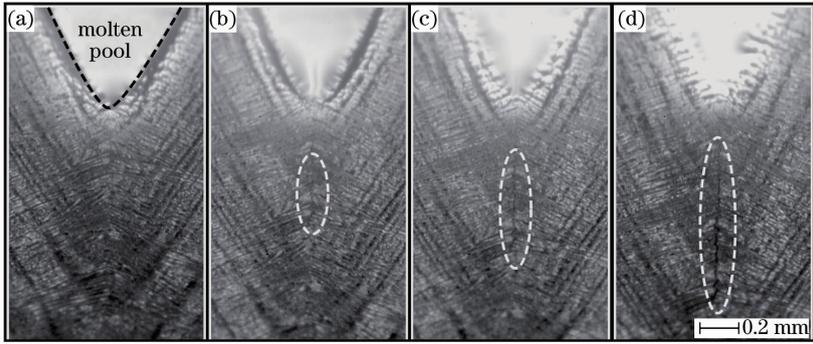


图 4 不同时刻的凝固热裂纹图像。(a)0,(b)0.08 s,(c)0.12 s,(d)0.20 s

Fig. 4 Dynamic images of solidification cracking with time. (a) 0, (b) 0.08 s, (c) 0.12 s, (d) 0.20 s

焊缝金属一旦熔化为液态,所有的应力应变都被释放,在随后的凝固过程中,伴随着凝固收缩和热收缩,焊缝金属由液相变为固相,开始承受拉伸应变,当拉伸应变高于焊缝金属塑性时,凝固热裂纹产生。如图 5 所示,熔池后端轮廓线被认为凝固开始时刻,这时焊缝金属的应变为零,取熔池后端轮廓线的两点为标记点,其初始距离记为 L_0 ,时间为 t_0 。由图像运动解析软件(Ditect, DIPP-Motion)记录

下两标记点位移的动态变化,在裂纹发生瞬间 t_1 时,两点间的距离记为 L_1 。通过比较 L_0 和 L_1 ,可求出裂纹发生的局部临界应变,即

$$\epsilon_{cr} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

与其他热裂纹实验相比,在线摄影得到的局部临界应变保证了测量精度。

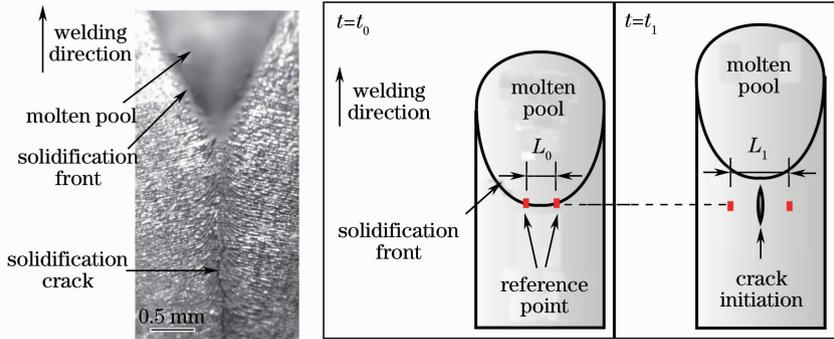


图 5 凝固热裂纹局部临界应变测量方法。(a)在线观察拍摄的图像,(b)局部应变测试方法示意图

Fig. 5 Measurement of local critical strain of solidification cracking. (a) *in-situ* observation image, (b) measurement method

局部临界应变的大小与初始距离 L_0 的选取有直接关系,由于凝固裂纹发生在枝晶之间,理想 L_0 应为枝晶间间距,通常为十到几十微米。然而,受摄像放大倍数的影响,随着 L_0 的减小,数据离散程度增加。进一步提高摄像倍数,则导致摄像视野减小,无法同时观察到熔池后端轮廓和裂纹发生瞬间。随着 L_0 的减小,图像上可作为标记点的斑点变少,不仅很难精确捕捉到标记点位移,而且裂纹发生部位可能偏出标记点范围,导致测量失败。考虑到实验的摄像放大倍数和观察条件,初始距离 L_0 约为 1 mm。此时高速摄像机可清楚捕捉到凝固热裂纹发生瞬间,且所测的标记点位移变化的离散度较小。初始距离为 1 mm 时,裂纹尖端附近的局部应变变

化如图 6 所示。在 0 s 时刻,两标记点位于熔池轮廓线,此时温度为液相线温度,应变为 0。随着时间推移,应变不断增加,当图像捕捉到裂纹发生瞬间时的应变为局部临界应变。U 型夹具 1 和夹具 2 的初始拉伸载荷分别为 9.6 kN 和 7.2 kN,凝固热裂纹发生的局部临界应变分别为 0.8% 和 1.2%,具有较大刚度系数的夹具 2 产生热裂纹的时间较夹具 1 提前。

3.2 高温韧性曲线的获得

通过热分析得出 SUS347 在近平衡状态下的液相线和固相线温度分别为 1469 °C 和 1357 °C,取其液相线为焊接过程的液相转变温度。图 7 为由热电偶投入法测得的熔池后端焊缝金属凝固过程的冷却

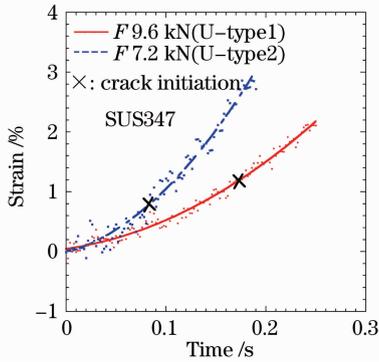


图6 裂纹尖端的局部应变随时间变化曲线

Fig. 6 Local strain development with time

曲线。由图6,7所示应变及温度随时间变化曲线,可换算得到应变随温度变化曲线,并得到裂纹发生时的温度,如图8所示。由于U型夹具2的刚度系数高于夹具1,U型夹具2的裂纹发生时间要早于夹具1,相应裂纹发生温度要高于夹具1,因此通过采用两种夹具,可以获得较宽温度范围内不同热裂纹的局部临界应变。

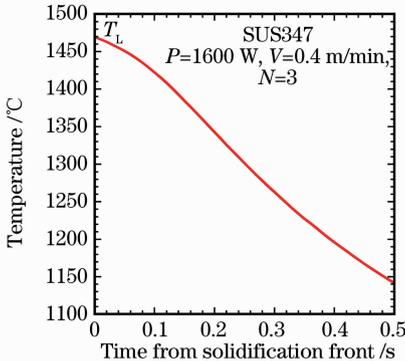


图7 焊缝金属凝固过程的冷却曲线

Fig. 7 Cooling curve of weld metal during solidification

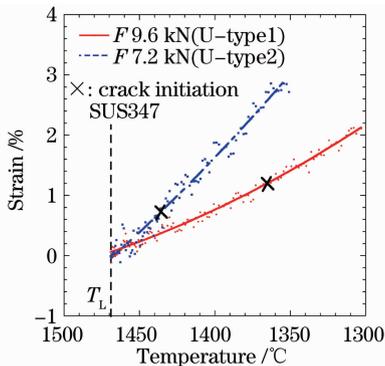


图8 裂纹尖端的局部应变随温度变化曲线

Fig. 8 Local strain development with temperature

通过改变U型夹具的初始拉伸载荷,可以获得SUS347试件在不同温度下的局部临界应变,如图9所示。与U型夹具1相比,夹具2产生的裂纹多集

中在凝固温度区间靠近高温的区域。对不同温度下的局部临界应变进行线性拟合,可得到凝固温度区间内的高温韧性曲线。图中的 T_L 和 T_S^* 分别表示由热分析获得的液相线温度1469°C和U型热裂纹实验中裂纹发生的最低温度1342°C。由于焊接过程的冷却速度远高于热分析的冷却速度,焊缝金属的实际固相线温度要低于热分析获得的固相线温度,因此焊缝金属的脆性温度区间(BTR)的下限应为液膜完全消失的实际固相线,而非热分析得到的固相线。在接近液相线温度区域,由于液体金属的填充作用,凝固热裂纹很难产生;在接近实际固相线的温度区域,由于液膜不断减少,焊缝金属已经开始恢复固体塑性,凝固热裂纹也很难产生。因此在这两个区域附近,实际热裂纹发生受到的影响很小,在图9的高温韧性曲线中用虚线表示。 $T_L \sim T_S^*$ 为U型热裂纹实验裂纹可能发生的温度区域,可以用来表征脆性温度区间的大小,一般来说材料的脆性温度区间越大,越容易发生热裂纹。采用相同的办法,获得了Inconel600试件在不同温度下的局部临界应变,并构建了相应的高温韧性曲线。

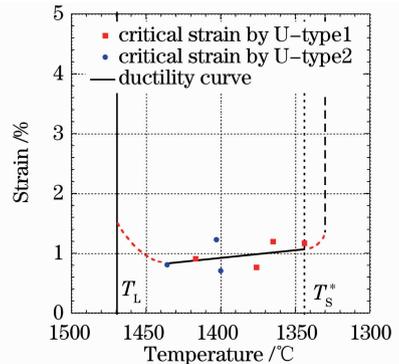


图9 SUS347高温韧性曲线获得方法

Fig. 9 Achievement of high temperature ductility curve for SUS347

3.3 高温韧性曲线和凝固热裂纹敏感性

图10为基于在线观察法获得的SUS347和Inconel600的高温韧性曲线。与SUS347的高温韧性曲线不同,Inconel600高温韧性曲线的倾角为钝角,即脆性温度区间内靠近低温段的临界应变要低于靠近高温段的临界应变。从高温韧性曲线中可得到3个指标用来评价凝固热裂纹敏感性,分别为最小临界应变 ϵ_{\min} 、脆性温度区间 $T_L \sim T_S^*$ 和临界应变随温度变化速率(CST)。由于低塑性或脆化只是开裂的条件之一,是否能产生裂纹还需看脆性温度区间内的应变发展情况,所以,用刚好产生裂纹的CST作为评价材料的凝固热裂纹敏感性的判据更

为适当。如果知道某种材料的 CST,通过与一定焊接条件下的应变变化速率进行比较,就可以预测该条件下凝固热裂纹是否发生^[14]。

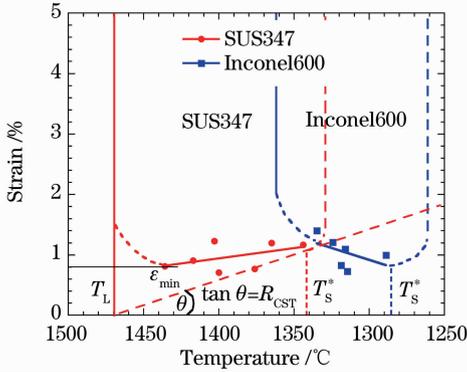


图 10 SUS347 和 Inconel600 的高温韧性曲线

Fig. 10 High temperature ductility curves of SUS347 and Inconel600

从图 10 可知, SUS347 和 Inconel600 的 ϵ_{\min} 、 $T_L \sim T_s^*$ 及 CST 分别为 0.8% 和 0.85%, 122 °C 和 80 °C 及 $0.85 \times 10^{-4}/\text{°C}$ 和 $1.05 \times 10^{-4}/\text{°C}$ 。这说明 SUS347 的热裂纹敏感性要高于 Inconel600, 即相同焊接条件下, SUS347 更容易出现凝固热裂纹。

4 结 论

开发了基于在线观察的 U 型热裂纹实验, 通过改变 U 型夹具的刚性系数和初始拉伸载荷, 获得了不同程度的凝固热裂纹, 并拍摄下了激光焊接过程的凝固热裂纹的发生过程。通过动态测量凝固热裂纹尖端的局部应变和温度, 以良好的精度获得了较大温度范围内凝固热裂纹发生时的局部临界应变。获得了 SUS347 和 Inconel600 两种材料与激光焊接对应的高温韧性曲线, 为激光焊接过程中评价凝固热裂纹敏感性及预测凝固热裂纹发生提供了新方法和重要数据。

参 考 文 献

1 S. Kou. Welding Metallurgy[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002. 263~295

2 Feng Zhili. A Methodology for Quantifying the Thermal and Mechanical Conditions for Weld Metal Solidification Cracking [D]. Columbus: Ohio State University, 1993

3 T. P. Shankar, P. S. Gill, S. L. Mananna *et al.*. Criteria for hot cracking evaluation in austenitic stainless steel welds using longitudinal vareststraint and transvareststraint tests [J]. *Sci. Technol. Weld Joining*, 2000, **5**(2): 91~97

4 T. Senda, F. Matsuda. Studies on solidification cracking susceptibility for weld metals with trans-vareststraint test[J]. *J. Jpn. Weld Soc.*, 1972, **41**(6): 709~723

5 F. Matsuda, H. Nakagawa, S. Tomita *et al.*. Investigation of weld solidification cracking by MISO technique-1[J]. *Q. J. Jpn. Weld Soc.*, 1988, **6**(3): 394~400

6 F. Matsuda, H. Nakagawa, S. Tomita *et al.*. Investigation of weld solidification cracking by MISO technique-2[J]. *Q. J. Jpn. Weld Soc.*, 1988, **6**(3): 401~405

7 P. Wen, K. Shinozaki, M. Yamamoto *et al.*. In-situ observation of solidification cracking of laser dissimilar welded joints[J]. *Q. J. Jpn. Weld Soc.*, 2009, **27**(2): 134~138

8 Meng Xuanxuan, Wang Chunming, Hu Xiyuan. High-speed photograph and the analysis of the welding pool and keyhole in fiber laser welding [J]. *Electric Weld Machine*, 2010, (11): 78~81

9 R. Fabbro. Melt pool and keyhole behavior analysis for deep penetration laser welding [J]. *J. Phys. D.*, 2010, **43**(44): 445501

10 Y. Kawahito, N. Matsumoto, M. Mizutani *et al.*. Characterization of plasma induced during high power fiber laser welding of stainless steel[J]. *Sci. Technol. Weld Joining*, 2008, **13**(8): 744~748

11 Li Guohua, Cai Yan, Wu Yixiong. Stability information in plasma image of high-power CO₂ laser welding[J]. *Opt. Laser Eng.*, 2009, **47**(9): 990~994

12 Zhang Xudong, Chen Wuzhu, Liu Chun *et al.*. Coaxial monitoring and penetration control in CO₂ laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(1): 13~16

张旭东, 陈武柱, 刘 春等. CO₂ 激光焊接的同轴检测与熔透控制[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(1): 13~16

13 Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun. Research on weld penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 131~134

段爱琴, 胡伦骥, 王亚军. 激光深熔焊焊缝的熔透性监测研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 131~134

14 Y. H. Wei, R. P. Liu. Software package for simulation and prediction of welding solidification cracks[J]. *Sci. Technol. Weld Joining*, 2003, **8**(5): 325~333