

异厚板激光拼焊接头动态拉伸性能数值 仿真方法研究

郑帮智^{1,2}, 田晓琳^{1,2}, 王泽龙^{1,2}, 唐新新^{1,2}

(1. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300; 2. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:研究了异厚板 HC340LA 和 HC260LA 低合金高强钢激光拼焊工艺, 对焊接接头进行了 X 射线探伤、静态拉伸、金相组织和显微硬度检测与分析。结果表明, 异厚低合金高强钢通过激光拼焊工艺可以得到成形良好的焊缝, 焊缝组织以柱状马氏体为主。焊缝经探伤无明显可见气孔、夹渣等缺陷, 拉伸试样断裂位置位于薄板母材一侧上, 且焊缝融合区硬度明显高于母材。针对激光拼焊接头进行了动态拉伸试验和数值仿真分析, 研究了共节点模型与试验的差异性、区域效应和厚度效应对应力应变的影响规律。研究表明, 采用共节点数值模型进行动态拉伸仿真, 其应变值远大于试验测得的应变值。焊缝相关联的母材区域可直接调控应力应变的分布情况, 可通过区域效应调控应变的大小, 厚度效应调控应力的大小。

关键词:异厚板; 激光拼焊; 动态拉伸; 数值模拟

中图分类号: TF76, TG456.7

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)05-0062-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.05.010

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Research on numerical simulation method for dynamic tensile performance of laser tailor-welded joints of different thickness

Zheng Bangzhi^{1,2}, Tian Xiaolin^{1,2}, Wang Zelong^{1,2}, Tang Xinxin^{1,2}

(1. Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The laser tailored welding process of HC340LA and HC260LA low-alloy high-strength steels with different thicknesses was studied, and the welded joints were tested and analyzed by X-ray flaw detection, static tensile, metallographic structure and microhardness. The results show that the low-alloy high-strength steel with different thickness can get well-formed welds through the laser tailor welding process, and the weld structure is mainly columnar martensite. After flaw detection, the welds showed no obvious defects such as pores and slag inclusions. The fracture position of the tensile specimen was on the side of the base material of the thin blank, and the hardness of the weld fusion zone was significantly higher than that of the base material. For laser tailor-welded joints, dynamic tensile test and numerical simulation analysis are carried out, and the difference between common node model and test, regional effect and thickness effect on stress and strain are studied. The research shows that the strain values of the dynamic tensile simulation using the common node numerical model are much higher than those measured in the experiment. The area of the base metal associated with the weld can directly af-

收稿日期: 2021-01-06

作者简介: 郑帮智 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 材料动态性能测试与仿真, E-mail: zbz315@126.com。

fect the distribution of stress and strain, the strain can be regulated by the regional effect, and the stress can be regulated by the thickness effect.

Key words: different thickness blanks, laser tailor welding, dynamic tensile, numerical simulation

0 引言

激光拼焊技术由于其材料利用率高、轻量化优势等特点,广泛应用于汽车、家电、建筑路桥等行业。随着我国对节能减排的迫切需要,汽车行业不断采用新工艺完善对汽车的轻量化设计,激光拼焊技术在汽车车身轻量化设计方面得到广泛应用。异厚板拼焊技术主要为了满足汽车不同部位强度需要,可避免不必要的材料浪费。

国内外许多研究人员已对多种规格的同厚板以及异厚板进行了大量的研究工作。陈洁、韦春华、张帆等^[1-3]对不同厚度的 DP、IF 等汽车常用钢板进行了焊接接头组织以及静态拉伸力学性能研究,得出了异厚板焊接接头组织分布以及拉伸应力应变分布情况;王春燕等^[4]基于混合算法对激光拼焊板焊缝处的力学性能进行了试验研究,明确了焊缝处材料的应力应变关系;董丹阳、刘奋等^[5-6]对 DP 双相钢在不同应变速率下的拉伸变形行为进行了研究分析,研究表明应变速率对焊接接头的变形行为有较大影响。在上述研究分析中,主要偏重于机理理论研究,对实际应用方面的研究相对较少,特别是对于激光拼焊接头动态拉伸性能的数值仿真方法研究几乎没有。在有限元建模过程中,通常将焊缝采用共节点的方式进行刚性连接,但实际研究表明,焊接接头处的动态拉伸变形行为与采用共节点方式存在较大差异。

笔者通过试验与仿真相结合,将异厚板激光拼焊接头动态拉伸曲线应用于数值仿真建模过程中,以达到实际应用的效果。

1 试验

激光拼焊试验所用的两种母材均为低合金高强度钢,牌号分别为 HC260LA,厚度 1.8 mm,以及 HC340LA,厚度 1.2 mm。此类钢在低碳钢中通过单一或复合添加钒、钛和铌等微合金元素,产生碳、氮化物粒子析出强化,同时通过细晶强化作用,以获得较高的强度。这类钢屈强比较高,主要用于制造刚度要求较高、耐碰撞性较好的结构件,如汽车座椅、横梁等。

焊接接头动态拉伸试验是将激光拼焊合格后的板材按试验标准^[7]进行试样设计和加工,采用动态拉伸试验机和数字影像式应变测试系统测试各应变速率下拼焊接头的拉伸性能。

1.1 激光拼焊试验与检验

激光拼焊设备包括激光器和作动装置,激光器采用 Fronius IPG6000W 光纤激光器,作动装置采用 ABB 六轴机器人。焊接时,选用氩气作为保护气体,气体流量为 25 L/min。选取不同激光功率、离焦量、焊接速度等参数进行激光拼焊试验。通过焊接接头表面形貌和截面组织对比分析,获得焊缝成形均匀的焊接工艺参数:激光功率为 2.5 kW,焊接速度为 50 mm/s,离焦量为 10 mm。

为了保证后续动态拉伸性能的可靠性,需要对焊后的拼焊接头进行性能检测。利用 GECCO2505 便携式 X 射线探伤仪检测拼焊焊缝可能存在的气孔、夹渣等缺陷;利用 INSTRON 电子万能试验机测试焊接接头的静态拉伸强度;利用 Qness 全自动高精度显微硬度仪测定拼焊接头的硬度分布情况;利用 PRECISE 研究级正置式显微镜观察焊接接头金相组织。

HC260LA+HC340LA 激光拼焊接头的 X 射线探伤结果如图 1(a)所示,可见,激光拼焊接头处无气孔、未焊透、夹渣等可见缺陷,焊接质量良好。

焊接接头的静态拉伸试验主要是为了验证焊缝的可靠性,通常焊缝相对母材有强化作用,在拉伸过程中断裂点不发生在焊缝处。如图 1(b)所示,HC260LA+HC340LA 激光拼焊接头拉伸试验结果,其断裂位置均在母材一侧,焊接接头牢固可靠。

激光拼焊的焊接接头经淬火强化后,其硬度(HV1)普遍高于母材,从图 1(c)可知,HC340LA 母材硬度为 180,高于 HC260LA 的母材硬度 140,焊缝融合区的硬度分布在 262~290,且靠近母材 HC340LA 一侧的融合区硬度大于靠近 HC260LA 的一侧。

焊接接头各区域的显微金相组织如图 1(d)~(g)所示。图 1d 为焊接接头的 50 倍金相组织,左侧为母材 HC260LA,右侧为母材 HC340LA,结合图 1(e)(对应图 1d 的 A 区)、图 1(f)(对应图 1d 的 B 区)可以看出,拼焊焊缝各区域之间有着较为明显的界

线。在熔合区,焊缝组织为典型的板条马氏体组成的柱状晶,柱状晶的生长方向对应温度梯度最大的方向,在熔合线的晶粒上形核结晶并向焊缝中心生

长,最后在焊缝中部位置完成结晶并形成竖直方向的界线。熔合区焊缝组织为典型的柱状晶间的板条马氏体,如图1g(对应图1d的C区)所示。

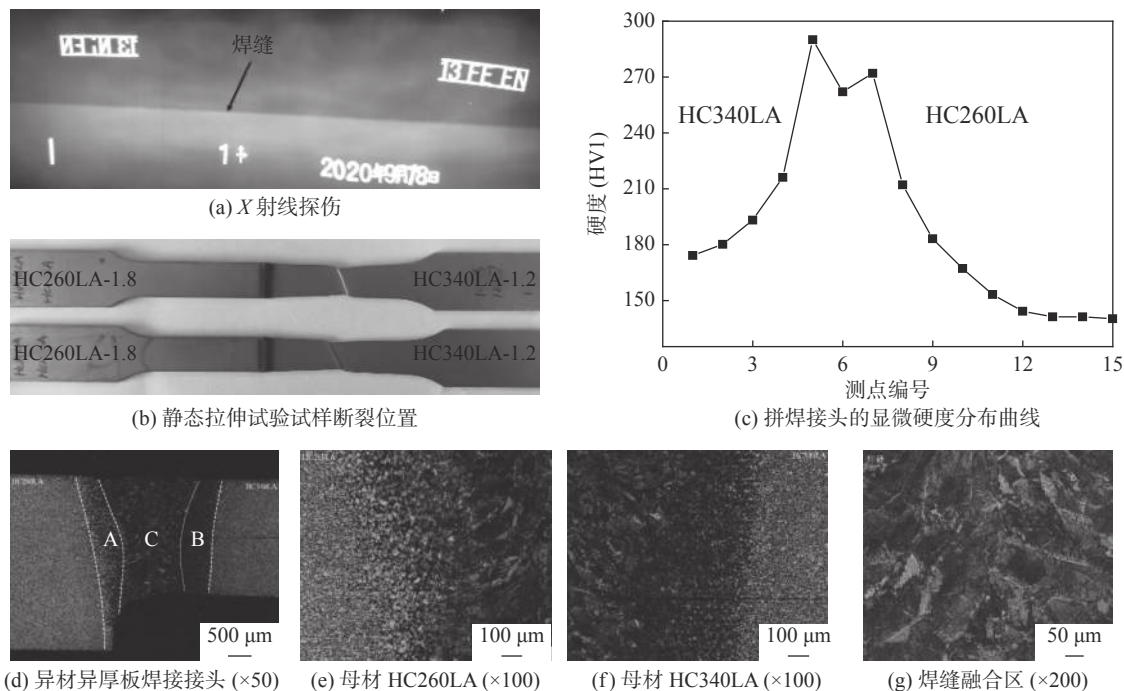


图1 焊接接头的探伤、拉伸、硬度分布和显微组织

Fig. 1 (a) X-ray inspection, (b) tensile, (c) microhardness distribution and (d-g) microstructures of the welded joint

1.2 动态拉伸试验

动态拉伸试验采用 Zwick/Roll HTM5020 型动态拉伸试验机, DIC(数字图像相关)全场应变测量系统采用德国 GOM 公司的 GOM Correlate Professional 2018。动态拉伸试验在室温下进行(室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)进行, 试样尺寸规格按标准^[7]所述进行设计加工, 焊缝位于试样平行段中间位置, 动态拉伸试验采用的应变速率分别为 10^{-1} 、 10^0 、 10^1 、 10^2 、 10^3 s^{-1} 。

由于 HC260LA+HC340LA 为异材异厚板激光拼焊, 拉伸时其焊接接头处的应力应变分布将会呈非均匀分布。常规的接触式引伸计只能测量标距段内的平均应变, 而对于异厚板其无法适用。在试样平行段内取标距 10 mm (焊缝居中), 采用 GOM 全场应变测量系统进行应变测量, 可以清楚地了解试样拉伸过程中的变形情况, 试验结果如图2、3所示。

从各拉伸速率下的工程应变分布云图(图3)可以看出, 以焊缝区域为界, 变形主要集中在母材 HC340LA 一侧, 而在母材 HC260LA 一侧变形相对较小。

应力分布和标距段横截面积相关, 对于等厚板, 横截面积相同, 可以轻易获取应力分布情况。而对

于焊接接头为异厚板连接, 其横截面积无法确定的情况, 可采用近似替代法进行预估, 即在最大板厚与最小板厚之间选取一个板厚值(用 T 表示)进行应力计算。通过数值仿真方法进行多次试算, 可以得到合适的替代板厚。



图2 动态拉伸数值模型

Fig. 2 Numerical models for dynamic tensile test

2 数值仿真

数值仿真模型固定端采用完全约束的方式进行固定, 拉伸端沿-X方向进行拉伸, 拉伸加载速度曲线可根据试验数据输入。为便于不同厚度的试样进行仿真, 模型中的试样采用壳单元。平行段为主要变形区域, 为得到更为精准的仿真结果, 该区域网格需要进行细化。仿真模型中试样的焊缝采用共节点方式进行连接, 无需单独建模。

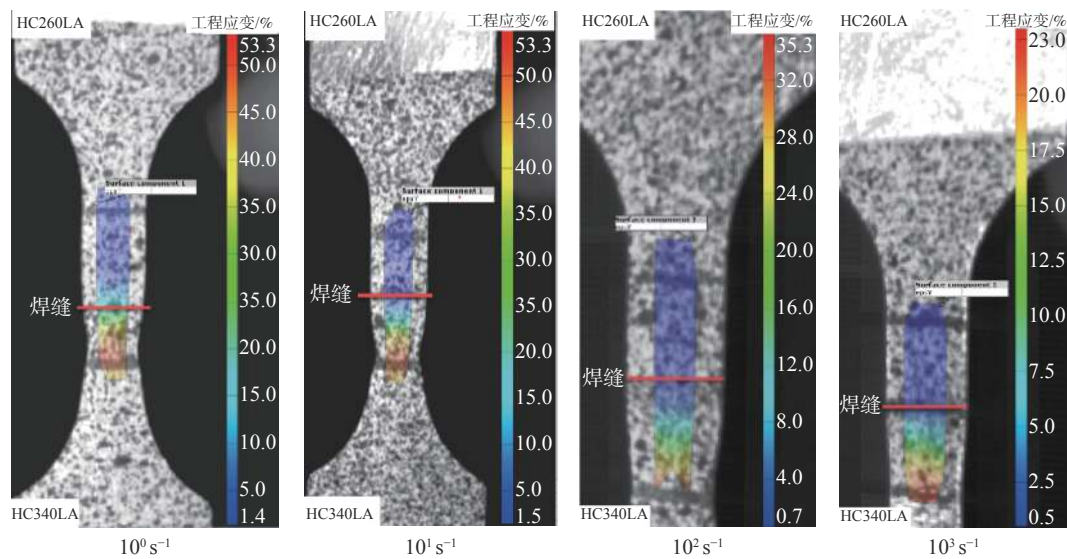


图 3 试验测试的应变分布

Fig. 3 Experimental strain distribution

2.1 材料定义

对于 HC340LA+HC260LA 焊接接头, 替代板厚取两个母材板厚平均值, 即为 $T=1.5$ mm。将模型中的试样划分为三个区域, 分别进行材料定义, 如图 4 所示。M1 和 M3 分别为 HC260LA 和 HC340LA 母材定义区域, M2 为替代板厚的材料定义区域。

数值仿真模型中试样 M1 ~ M3 三个区域的材料参数由动态拉伸试验测得并经材料本构^[8]拟合

外推得到, 材料各应变速率下的拉伸曲线如图 5 所示。

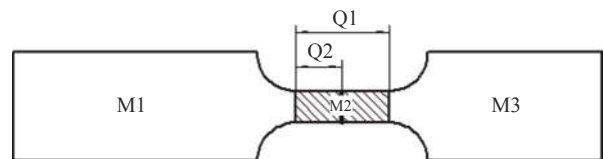


图 4 模型中试样的区域划分

Fig. 4 Partition of the sample in numerical simulation model

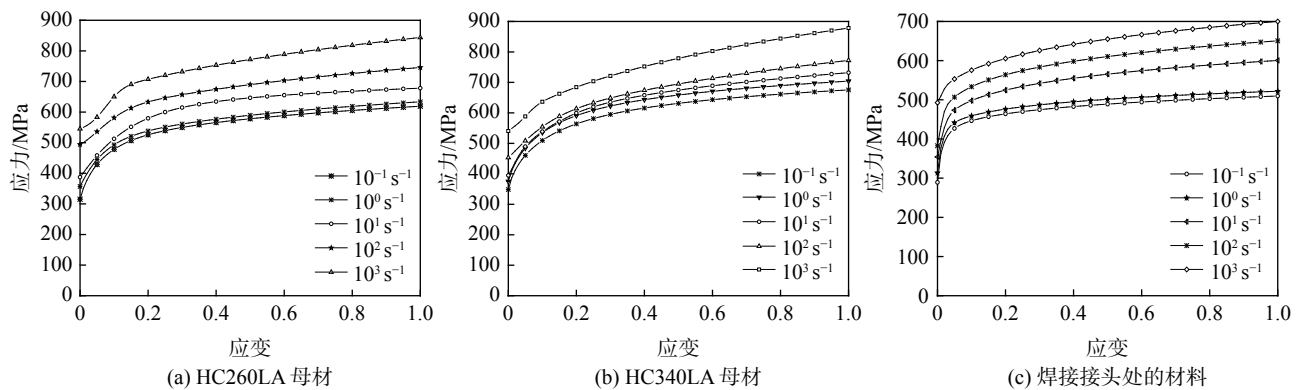


图 5 试样的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of the sample

2.2 共节点模型分析

激光拼焊接头在数值仿真中通常处理为共节点刚性连接, 下面以常用的共节点方式进行数值仿真建模分析。数值模型中以焊缝为界, 分别定义左右两侧母材(HC340LA 和 HC260LA)的材料即可, 不考虑中间替代板厚区域。选取 10^0 、 10^2 s^{-1} 一高一低

两个速率进行共节点模型仿真分析, 分析结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 采用共节点建模方式进行数值仿真分析, 其结果与试验结果存在较大差异。不管对于低应变速率 10^0 s^{-1} , 还是高应变速率 10^2 s^{-1} , 共节点仿真模型的应变范围大于实际试验应变范围。

由于共节点模型过于理想化,变形主要集中在薄板 HC340LA 一侧平行段中部,与试验相比,其变形位

置更靠近焊接接头位置,因此在标距段内测得的应变更大。

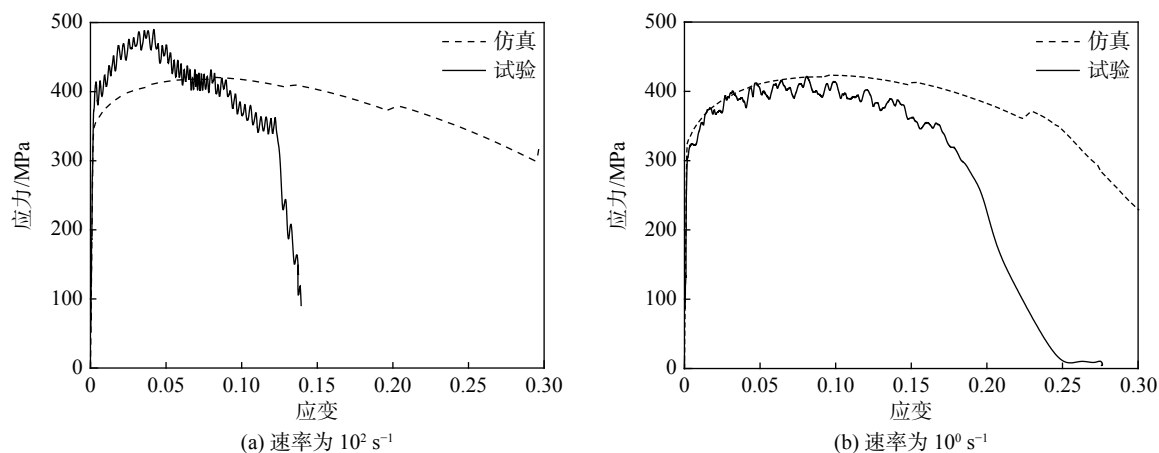


图6 共节点模型的应力应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of the common node model

在一些需要特别关注焊缝处的变形情况的应用中(如拼焊板冲压、拉伸成形等),数值仿真模型不能简单采用共节点方式连接。为了使试验结果和与数值仿真结果能保持一致,需要考虑焊缝影响区域对应力和应变的影响效应。经研究发现,焊缝影响区域存在区域效应和厚度效应。

2.3 区域效应

区域效应是指焊缝相关的母材连接区域内,区域大小对应变的影响效应。同样选取 10^0 、 10^2 s^{-1}

两个速率进行区域效应对比分析。将数值模型划分为 M1 ~ M3 三个区域,区域效应主要发生在 M2 区域内。为了进一步说明区域效应对应变的影响,将 M2 区域以 Q1 和 Q2 进行再次划分, M2 区域分别以区域 1、区域 2、区域 3 进行代替, M2 取不同区域下对应变的影响的仿真计算结果,如图 7 所示。

区域 1: Q1=7, Q2=5;

区域 2: Q1=8, Q2=5;

区域 3: Q1=6, Q2=3。

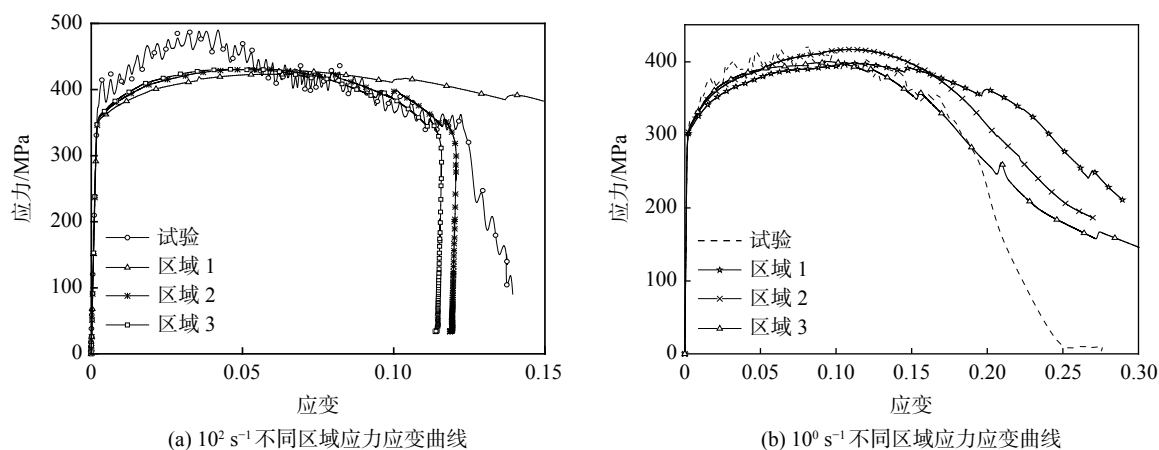


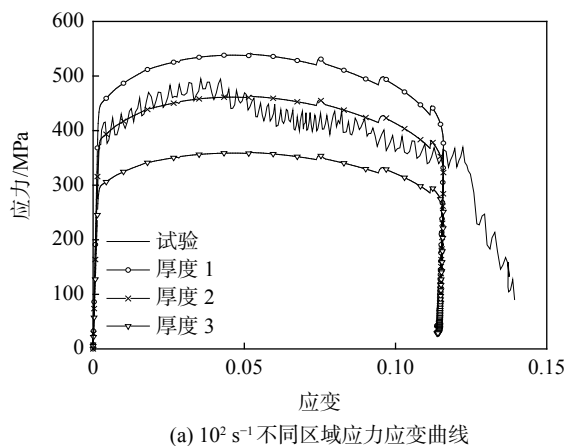
图7 区域效应对应变的影响
Fig. 7 The effect of the area size on the strain

在数值仿真模型中, M2 分别选取不同区域进行材料定义,其计算结果提取的应力应变曲线如图 7 所示。当焊缝影响区 M2 选取区域 1 和区域 2 进行分析时,可以看出, M2 区域随着母材 HC340LA 一侧所占比重的减少,应变大小也相应减

小;对比区域 2 和区域 3 的结果,可发现 HC260LA 一侧区域所占比重对整体应变大小的影响较小。对比高、低应变速率在各区域的应力应变曲线后发现,当 M2 选取区域 3 时,仿真曲线与试验曲线较为接近。

2.4 厚度效应

厚度效应是指选定的焊缝相关的母材连接区域内,替代厚度 T 取值的大小变化对应力的影响效应。将上述区域3选取不同替代厚度进行分析,如图8



所示。

厚度 1: $T=1.8$;

厚度 2: $T=1.5$;

厚度 3: $T=1.2$ 。

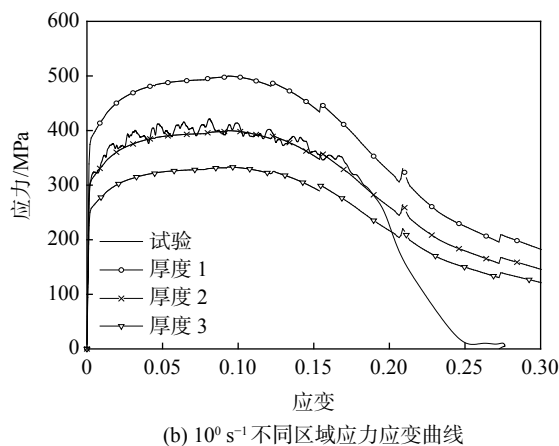


图8 厚度效应对应力的影响

Fig. 8 The effect of the thickness on the stress

从图8可知,当选取厚度2, $T=1.5$ 时,对于速率 10^0 s^{-1} 和 10^2 s^{-1} 下的应力应变曲线,试验应力水平与仿真较为一致;当选取厚度1和厚度3时,试验曲线和仿真曲线差异较大。通常情况下,试验输入和仿真结果输出之间是一一对应关系,但对于冲压、拉伸成形等需要考虑焊缝的变形时,则需要相应调整。上述对于焊接接头数值仿真模型的处理方法只是一种近似方法,用以代替常规的共节点处理方法。

3 应用

为了说明上述数值仿真方法的可行性,采用Zwick/Roll成形试验机进行激光焊接接头成形试验,测试其应变分布情况,并与数值仿真结果进行对比分析。

图9所示为异材异厚激光拼焊板(HC260LA-1.8+HC340LA-1.2)成形结果,可以看出变形较大(开裂)一侧发生在薄板(HC340LA)母材上,且开裂方向沿轧制方向。

数值仿真采用ABAQUS/Explicit显示求解器进行计算,并提取其等效塑性应变云图。试验应变云图采用GOM全场应变测量系统进行提取。

图10为各模型提取的塑性应变对比云图,从云图分布情况可以明确拼焊接头处材料的变形情况。图10(b)为焊缝区域单独定义模型,其应变云图分布情况与图10(a)所示试验实测得到的应变云图较

为相似,且应变数值相近(仿真焊缝模型最大应变数值为0.366,试验提取得到的最大应变为0.315)。而图10(c)为共节点数值仿真模型提取的应变分布云图,可以看到其最大应变(最大应变数值为0.706)远大于试验值,与实际相差较大。因此,认为采用焊缝区域单独定义的数值仿真模型更符合实际。

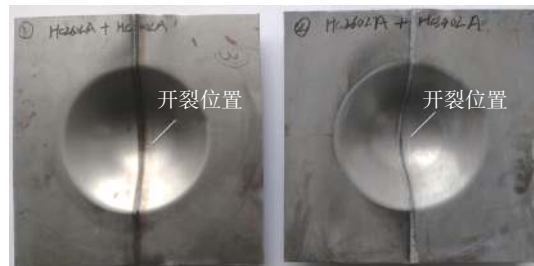


图9 激光拼焊板成形试验

Fig. 9 The forming test of laser tailor-welded blanks

4 结论

1) HC340LA+HC260LA 采用激光拼焊工艺进行焊接,其焊缝处无气孔、夹渣等缺陷。焊缝处拉伸强度高,拉伸断裂位置在母材上。焊缝融合区为马氏体组织,经淬火强化后硬度明显高于母材。

2) 对比分析试验和共节点模型仿真结果,共节点模型应变区域大小相对较大,与试验所得应变差异较大。

3) 焊缝相关的母材连接区大小直接影响应变的大小,在该区域内应变值随着强度较弱一侧的母材

所占比重的减少而减小,而强度较高一侧的母材占比的大小对应变的影响较小。

4)焊缝相关的母材连接区域内替代板厚的选取直接影响应力的大小,应力水平的大小与试验输入

存在一一对应关系。

5)通过成形试验与仿真对比,焊缝模型塑性应变水平与试验一致性较高,可用于异厚激光拼焊板成形的数值仿真模拟。

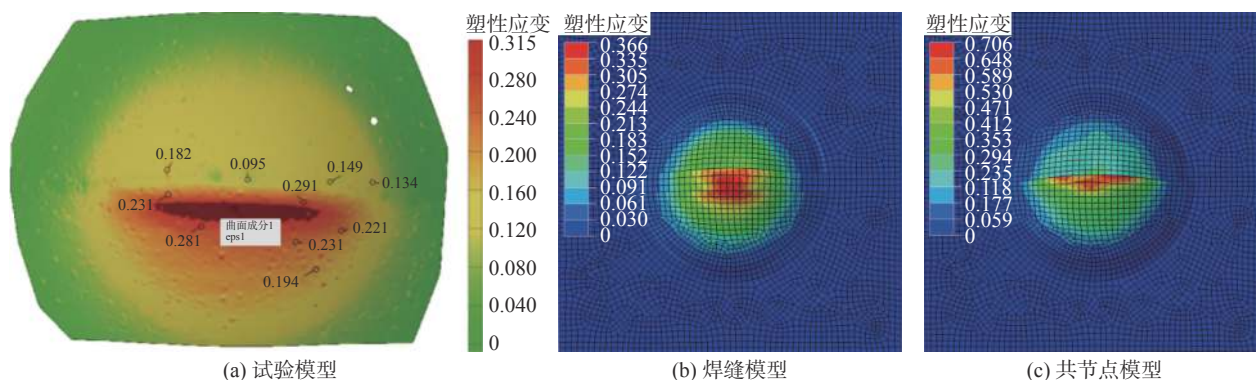


图 10 塑性应变云图的对比

Fig. 10 Comparison of the plastic strain cloud diagrams of various models

参考文献

- [1] Chen Jie, Chen Wei, Xue Lei, *et al.* Experimental research on tensile test of B170P1 multi-gauge high strength steel laser tailor-welded blanks[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2009, 34(5): 33–36.
(陈洁, 陈伟, 薛雷, 等. B170P1差厚高强度钢激光拼焊板拉伸试验研究[J]. *锻压技术*, 2009, 34(5): 33–36.)
- [2] Wei Chunhua, Wu Fengshun, Tao Wu, *et al.* Joint microstructure performance and laser tailor welded blanks of DP600 and IF steels with dissimilar thickness[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2014, 42(7): 128–132.
(韦春华, 吴丰顺, 陶武, 等. 不等厚DP600与IF钢激光拼焊工艺和接头组织性能[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(7): 128–132.)
- [3] Zhang Fan, Li Fang, Hua Xueming, *et al.* Research of microstructure and mechanical properties of laser tailor-welded blank of cold rolled multi-phase steel and HSLA[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 157–163.
(张帆, 李芳, 华学明, 等. 冷轧复相钢与低合金高强度钢差厚板激光拼焊的焊缝组织与力学性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 157–163.)
- [4] Wang Chunyan, Han Yingchun. Tensile testing on the mechanical properties of weld metal in dissimilar gage tailor-welded blanks[C]//Tianjin: China Society of Automotive Engineering, 2008: 4.
(王春燕, 韩英淳. 不等厚激光拼焊板焊缝处力学性能的试验研究[C]//2008中国汽车工程学会年会. 天津: 中国汽车工程学会, 2008: 4.)
- [5] Dong Danyang, Liu Yang, Wang Lei, *et al.* Effect of strain rate on dynamic deformation behavior of laser welded DP780 steel joints[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(12): 1493–1500.
(董丹阳, 刘杨, 王磊, 等. 应变速率对DP780钢激光焊接接头动态变形行为的影响[J]. *金属学报*, 2013, 49(12): 1493–1500.)
- [6] Liu Fen. Research on mechanical properties and dynamic deformation behavior for laser welding joints of dual-phase steels[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
(刘奋. 双相钢激光拼焊接头力学性能及动态变形行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.)
- [7] GB/T30069.2—2016, Metallic materials-tensile testing at high strain rates - part 2: Servo-hydraulic and other test systems[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
(GB/T30069.2—2016. 金属材料-高应变速率拉伸试验-第2部分: 液压伺服型与其他类型试验系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.)
- [8] Li Fan, Huang Jiaqi, Sun Qilin, *et al.* Research on dynamic mechanical properties of HC340LA and its simulation application in collision condition[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44(1): 176–181.
(李凡, 黄家奇, 孙启林, 等. HC340LA动态力学性能研究及在碰撞工况中的仿真应用[J]. *锻压技术*, 2019, 44(1): 176–181.)