

## 随焊同步热场下硼钢/Q235 钢激光拼焊接头的塑性梯度协调行为

周广涛<sup>1,2\*</sup>, 李华晨<sup>1</sup>, 刘方<sup>1</sup>, 崔贺鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 华侨大学机电及自动化学院福建省特种能源制造重点实验室, 福建 厦门 361021;

<sup>2</sup> 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 针对异种材料激光拼焊接头焊后存在明显的塑性差异问题,提出了一种随焊同步热场方法。通过同步热场与激光焊接热源的耦合,调控焊缝及热影响区金属的冷却速度,对熔池的结晶凝固行为和相变过程进行热力学干预,缩小各区域塑性梯度的阶跃值,使拼焊板各区域的塑性性能趋于连续一致。以高强硼钢/Q235 钢激光拼焊板为对象,分别对常规和随焊同步热场条件下的整体拼焊接头及焊缝两侧各微区域进行了高温拉伸试验,研究了温度为 300~600 °C 时随焊同步热场对激光拼焊接头塑性行为的影响。结果表明,随焊同步热场条件下焊缝及两侧组织绝大部分为铁素体和珠光体,马氏体明显减少,整体拼焊接头的塑性较高;且随焊热场温度越高,整体接头的延伸率就越高。随着随焊热场温度的升高,焊缝及热影响区与母材各界面处的塑性应变差异逐渐变小,接头各区域的变形也更协调,在 600 °C 随焊热场条件下得到的焊接接头各区域塑性梯度最小。

**关键词** 激光技术; 随焊同步热场; 激光拼焊; 焊接接头; 热拉伸; 塑性行为

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0602109

### 1 引言

异种材料激光拼焊板综合了两种材料的优良性能,能满足结构的特殊使用性能需求。在汽车结构中异种材料激光拼焊板不仅能满足汽车轻量化的要求,还可以满足各区强度的合理需求<sup>[1-5]</sup>,因此逐渐替代了高强整板。如车身结构要求 B 柱上、下两段材料强度低,在碰撞时能吸收碰撞能量;要求中段材料强度高,在碰撞时不发生较大变形,从而维持车身结构。激光拼焊接头界面端部被连接材料力学性能的差异,会在焊缝区、热影响区及母材界面处发生应力奇异性等力学失配效应,形成塑性梯度。异种材料激光拼焊板在工业生产中会经过热冲压成形过程<sup>[6-7]</sup>,力学性能的奇异性对激光拼焊板后续的热冲压成形十分不利,在外载荷作用下,会导致变形不均匀、各区域界面处断裂失效等现象。激光拼焊接头整体及各区域塑性行为的初始状态会严重影响热冲

压成形性,因此,降低拼焊接头的塑性梯度、改善拼焊板的初始塑性行为具有重要意义。

目前,国内外学者均研究了拼焊板塑性参数对热冲压工艺的影响。Song 等<sup>[8-9]</sup>研究了拼焊板焊缝金属的延伸率、硬化指数等塑性指标对拼焊板冲压性能的影响。唐炳涛等<sup>[10]</sup>使用热模拟机对焊接接头加热后用不同的速度冷却,结果表明,焊接接头力学性能均匀良好,有利于热冲压成形。余伟等<sup>[11]</sup>为了改善高强度钢的塑性,研究了冷却工艺对高强度钢力学性能的影响,获得了较好的效果。崔栋等<sup>[12]</sup>研究了硼钢拼焊完成热处理前后焊接接头的力学性能分布,结果表明,热处理后硼钢的强度有大幅度提高,但整体塑性有明显下降。胡志力等<sup>[13]</sup>研究了热成形淬火工艺对拼焊板成形性和力学性能的影响,结果表明,热成形淬火工艺可以明显改善接头变形的不均匀性和伸长率并提高拼焊板的成形性和力学性能。Morawiec 等<sup>[14-15]</sup>使用双光束激光焊制作激

收稿日期: 2020-07-17; 修回日期: 2020-08-20; 录用日期: 2020-09-04

基金项目: 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题(AWJ-16-M11)、华侨大学研究生科研创新基金

\* E-mail: zhouguangtao@hqu.edu.cn

光拼焊板,可以有效降低焊缝区域材料的硬度,提高拼焊板力学性能的协调性及冲压性。目前,解决冲压成形接头不良及断裂失效等问题的研究仍集中在优化冲压工艺参数、改变处理工艺等方面,没有从激光拼焊板焊后初始状态接头各区域的塑性协调性分析激光拼焊接头的塑性梯度对热冲压成形性的影响。

针对激光拼焊接头焊后存在的塑性不协调、应力奇异性等问题,本文提出了一种新的随焊同步热场方法。通过同步热场与激光焊接热源的耦合调控焊缝及热影响区的冷却速度,对熔池的结晶凝固行为和相变过程进行热力学干预,缩小各区域塑性梯度的阶跃值,使拼焊板各区域的热变形塑性趋于连续一致。以硼钢/Q235 钢激光拼焊板为对象,对常规条件和随焊同步热场条件下的激光拼焊接头及各独立区域进行高温热拉伸变形试验,研究了随焊同步热场法对焊接接头塑性行为的影响。该研究对提高激光拼焊板的热冲压成形性有重要的理论意义和应用价值。

## 2 随焊同步热场原理

随焊同步热场模型如图 1 所示,其工作原理是在焊接过程中沿拼焊板厚度方向施加特定温度的辅助热场,在此基础上施加激光热源,两者同步作用进行焊接,对熔池的结晶凝固行为和相变过程进行热力学干预,并调控焊缝及热影响区的冷却速度,从而缩小焊接接头各区域的塑性分布差异,使拼焊板各

区域的热变形塑性趋于连续一致。其中,随焊表示辅助热场在整个过程与激光热源随同施加。硼钢/Q235 钢拼焊板在焊接夹具上装配后,通过置于夹具平台内的电阻产生的电阻热形成一个预置温度场,该温度场根据焊接工艺在 300~600 °C 范围内可调,电阻热通过热传导直接施加给拼焊板,达到所需预置温度后,施加激光热源进行焊接。在激光热源移动过程中预置温度场始终作用于拼焊板,焊接完成后终止热场产热,使拼焊板随同初始热场交互冷却至室温。

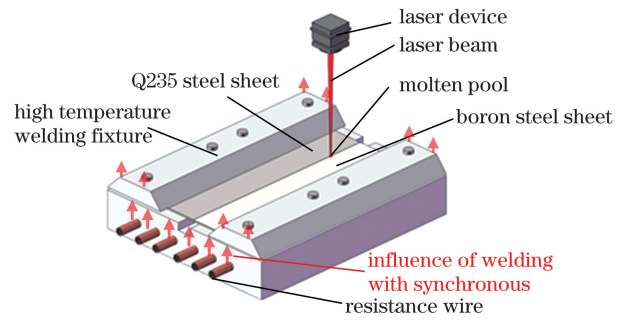


图 1 随焊同步热场原理

Fig. 1 Principle of the welding with synchronous thermal field

## 3 试验方法及材料

### 3.1 试验材料

试验选用高强硼钢 B1500HS 以及 Q235 钢分别作为激光拼焊板硬区及软区材料,尺寸均为 110 mm×25 mm×1.6 mm,无镀层,材料中各元素的质量分数如表 1 所示。

表 1 材料中元素的质量分数

Table 1 Mass fraction of elements in materials

unit: %

| Element    | C    | Mn   | Si   | Cr   | Mo   | B     | P      | S     | Fe    |
|------------|------|------|------|------|------|-------|--------|-------|-------|
| B1500HS    | 0.23 | 1.35 | 0.25 | 0.19 | 0.04 | 0.003 | 0.015  | 0.006 | other |
| Q235 steel | 0.18 | 0.54 | 0.26 | -    | -    | -     | ≤0.045 | ≤0.05 | other |

### 3.2 取样位置及尺寸

热拉伸试样分为焊接接头整体热拉伸试样及各区域的热拉伸试样,如图 2 所示。其中,HAZ 为热影响区域,整体热拉伸试样为焊缝区及热影响区的部分区域,各区域热拉伸试样包括硼钢母材区、硼钢热影响区、焊缝区、Q235 钢热影响区以及 Q235 钢母材区,且距离焊缝中心负方向为硼钢侧,正方向为 Q235 钢侧。各热拉伸试样的尺寸如图 3 和表 2 所示,其中, $R$  为拉伸试样过渡圆角的半径, $L_0$  为原始标距, $L_c$  为平行长度, $L$  为试样的总长度, $b_1$ 、 $b_2$  分

别为接头各区域及整体接头拉伸试样的原始宽度, $d$  为试样的总体宽度。

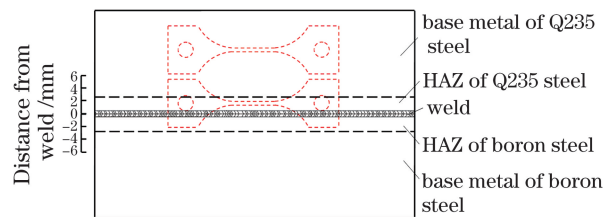


图 2 热拉伸试样的取样位置

Fig. 2 Sampling position of the hot stretch specimen

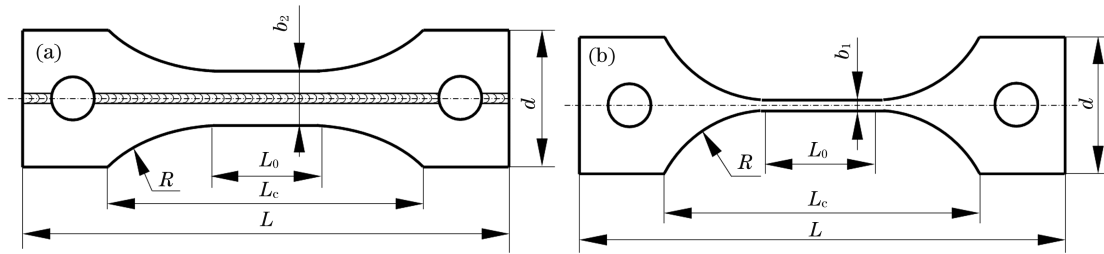


图 3 热拉伸试样的尺寸。(a)整体接头;(b)接头各区域

Fig. 3 Dimensions of the hot stretch specimen. (a) Integral joint; (b) each area of joint

表 2 热拉伸试样的尺寸

Table 2 Dimensions of the hot stretch specimen

unit: mm

| Symbol | $R$ | $L_0$ | $L_c$ | $L$ | $d$ | $b_1$ | $b_2$ |
|--------|-----|-------|-------|-----|-----|-------|-------|
| Value  | 25  | 24    | 70    | 110 | 31  | 2     | 12    |

### 3.3 试验方法

焊接采取激光拼焊方式,条件为常规条件以及 300,450,600 °C 随焊同步热场,硼钢/Q235 钢激光拼焊板热冲压的温度为 700~900 °C。为了研究拼焊接头不同温度下的塑性行为,将不同条件下得到的整体接头及各区域在 700,750,800,850,900 °C 下进行高温热拉伸试验。采用日本岛津 AG-Plus250KN 电子万能拉伸试验机辅以吉林三度公司生产的高温加热炉及专用高温拉伸夹具进行热拉伸试验,高温拉伸试验的拉伸速度为 4 mm/min。

## 4 试验结果

### 4.1 硼钢/Q235 钢常规激光焊接

常规条件下激光焊接试验获得的硼钢/Q235 钢激光焊接接头如图 4 所示,最佳工艺参数如表 3 所示。



图 4 常规条件下硼钢/Q235 钢激光焊缝的表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of the boron steel /Q235 steel laser weld seam under the conventional condition

表 3 常规条件下硼钢/Q235 钢的激光拼焊最佳工艺参数  
Table 3 Optimum technological parameters of the boron steel /Q235 steel under conventional condition

| Welding condition                                  | Value |
|--|-------|
| Average power /W                                   | 350   |
| Peak power /kW                                     | 2.8   |
| Welding speed /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 2     |
| Heat input /( $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$ )    | 140   |
| Pulse width /ms                                    | 10    |
| Laser frequency /Hz                                | 10    |

### 4.2 硼钢/Q235 钢常规激光拼焊接头的屈服强度阶跃分布

由于两种拼焊材料存在较大的性能差异,室温下拼焊接头焊缝两侧不同区域的屈服强度呈梯度分布,为了研究硼钢/Q235 钢常规激光拼焊接头各区域在高温下的屈服强度分布,对常规条件下图 3(b)中的试样在 700,750,800,850,900 °C 下进行高温热拉伸试验,取样位置如图 2 所示,以焊缝截面为原点,硼钢侧为负轴,Q235 钢侧为正轴,得到各区域的屈服强度分布如图 5 所示。

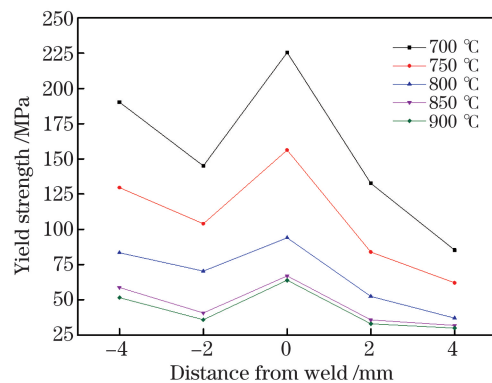


图 5 常规焊接接头不同温度下各区域屈服强度分布

Fig. 5 Yield strength distribution of the conventional welded joints at different temperatures

图 5 中距离焊缝中心 -4 mm 处为硼钢母材区,-2 mm 处为硼钢热影响区,2 mm 处为 Q235 钢热影响区,4 mm 处为 Q235 钢母材区。可以看出,常规条件下焊接接头各区域屈服强度差异较大,呈阶跃分布。硼钢侧热影响区屈服强度低于硼钢母材,Q235 钢侧热影响区屈服强度高于 Q235 钢母材,焊缝区域的屈服强度最高,塑性最差,各区域的塑性会产生梯度差异。在 700 °C 拉伸温度下,焊缝

区域屈服强度比硼钢热影响区及硼钢母材分别高 92.87, 140.54 MPa, 在 900 °C 拉伸温度下, 焊缝区域屈服强度比 Q235 钢热影响区及硼钢母材分别高 30.85, 33.76 MPa。随着温度的升高, 屈服强度均有所降低, 但仍存在塑性梯度, 影响接头整体及各区域的塑性协调。因此, 对于同步热场条件下的硼钢/Q235 钢激光焊接接头, 需要研究其接头整体及接头各区域的塑性行为。

### 4.3 随焊同步热场条件下硼钢/Q235 钢激光焊接

在 300, 450, 600 °C 随焊同步热场条件下分别获得硼钢/Q235 钢激光焊接接头, 图 6 为 450 °C 高温条件下, 热输入为 95 J/mm 时硼钢与 Q235 钢拼焊

焊缝的表面形貌图, 各热场条件的最佳参数如表 4 所示, 按照图 2 中的位置对接头整体及各区域进行取样。

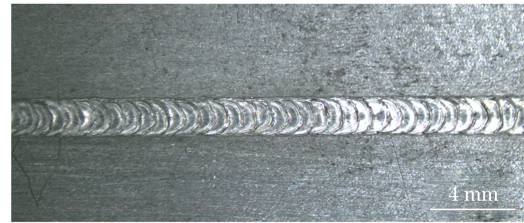


图 6 450 °C 热场条件下硼钢/Q235 钢激光焊缝表面形貌  
Fig. 6 Surface morphology of the boron steel / Q235 steel laser weld seam under 450 °C thermal field condition

表 4 随焊同步热场条件下硼钢/Q235 钢激光拼焊的最佳工艺参数

Table 4 Optimum technological parameters of boron steel / Q235 steel laser welding under welding with synchronous thermal field condition

| Temperature of thermal field / °C | Average power / W | Peak power / kW | Welding speed / (mm · s <sup>-1</sup> ) | Heat input / (J · mm <sup>-1</sup> ) | Pulse width / ms | Laser frequency / Hz |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|---|--------------------------------------|------------------|----------------------|
| 300                               | 338               | 2.7             | 2.3                                     | 117                                  | 10               | 10                   |
| 450                               | 310               | 2.5             | 2.6                                     | 95                                   | 10               | 10                   |
| 600                               | 300               | 2.4             | 3.3                                     | 73                                   | 10               | 10                   |

### 4.4 随焊同步热场条件下硼钢/Q235 钢接头整体塑性分析

对各随焊同步热场下的拼焊接头整体热拉伸试样分别在 700, 750, 800, 850, 900 °C 下进行热拉伸试验, 并与室温下的拉伸实验进行对比, 结果如表 5 所示。可以发现, 在相同高温下, 同步热场温度越高, 焊接接头的整体抗拉强度越低。在 800 °C 的热拉伸温度下, 300, 450, 600 °C 同步热场比常规条件的抗拉强度分别降低了 20.43%、29.72%、35.95%。原因是同步热场温度越高, 焊缝区域的冷却速度越慢, 焊缝组织的强度越低, 与母材力学性能的差异就越小。对于相同热场下得到的焊接接头, 变形温度越高, 抗拉强度越低, 延伸率也越高, 相比 700 °C, 900 °C 的热拉伸温度下, 300, 450, 600 °C 同步热场条件下延伸率分别增加

了 19.70%、20.69%、21.21%。在相同高温下, 同步热场焊接接头的抗拉强度小于常规条件下的激光焊, 且随焊同步热场温度越高, 抗拉强度越低, 延伸率越高, 这表明随着同步热场温度的升高, 整体接头塑性更好。对于相同的焊接接头, 高温拉伸试样的温度越高, 抗拉强度越低, 延伸率越高。

图 7 为最佳焊接热输入下常规焊接接头及不同随焊高温条件下焊接接头在 800 °C 拉伸温度下拉伸应力应变曲线及延伸率。可以看出, 在相同的热拉伸温度下, 整体应变及延伸率均随同步热场温度的增加而增大。相比常规条件, 300, 450, 600 °C 同步热场条件下的延伸率分别增加了 9.8%、15.7%、19.8%, 这表明采用随焊热场的焊接方式可以明显提升焊接接头整体的塑性。

表 5 整体接头的高温拉伸试验结果

Table 5 Results of the high temperature tensile test of integral joints

| Test temperature / °C | Welding condition    | Tensile strength / MPa | Elongation / % |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|
| 700                   | convention           | 179.514                | 15.83          |
|                       | 300 °C thermal field | 142.871                | 17.50          |
|                       | 450 °C thermal field | 127.283                | 18.43          |
|                       | 600 °C thermal field | 114.984                | 19.09          |

| Test temperature / °C | Welding condition    | Tensile strength / MPa | Elongation / % |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|
| 750                   | convention           | 122.342                | 25.04          |
|                       | 300 °C thermal field | 97.332                 | 27.50          |
|                       | 450 °C thermal field | 85.964                 | 28.95          |
|                       | 600 °C thermal field | 78.437                 | 29.02          |
| 800                   | convention           | 78.647                 | 31.30          |
|                       | 300 °C thermal field | 62.582                 | 34.38          |
|                       | 450 °C thermal field | 55.275                 | 36.20          |
|                       | 600 °C thermal field | 50.375                 | 37.50          |
| 850                   | convention           | 52.933                 | 33.41          |
|                       | 300 °C thermal field | 42.135                 | 36.70          |
|                       | 450 °C thermal field | 37.465                 | 38.60          |
|                       | 600 °C thermal field | 33.914                 | 40.03          |
| 900                   | convention           | 48.671                 | 33.87          |
|                       | 300 °C thermal field | 38.546                 | 37.20          |
|                       | 450 °C thermal field | 32.920                 | 39.12          |
|                       | 600 °C thermal field | 30.914                 | 40.30          |
| Room temperature      | convention           | 475.498                | 7.20           |
|                       | 300 °C thermal field | 410.896                | 8.01           |
|                       | 450 °C thermal field | 350.432                | 8.84           |
|                       | 600 °C thermal field | 311.501                | 10.21          |

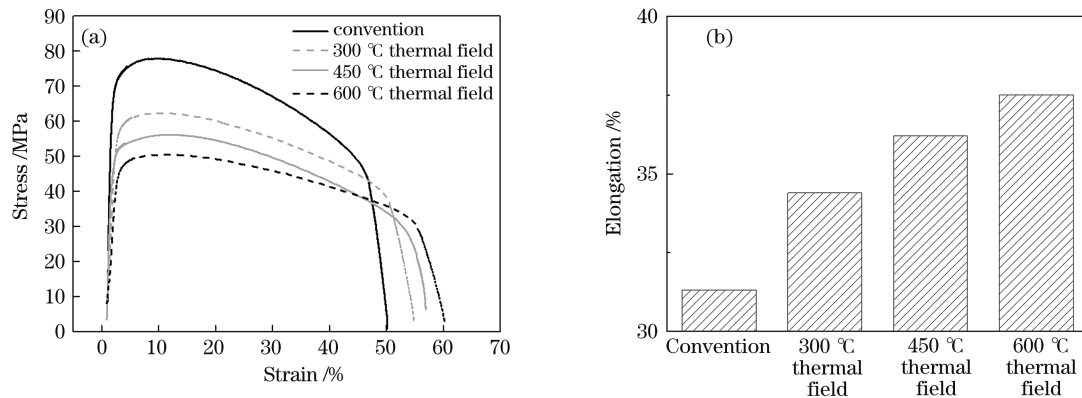


图 7 接头整体在 800 °C 高温拉伸下的实验结果。(a)应力应变曲线;(b)延伸率

Fig .7 Experimental results of the joint as a whole under high temperature tension at 800 °C .

(a) Stress-strain curve; (b) elongation

断口形状也可以判断接头的整体塑性,原因是在拉伸时,塑性较差的地方会先发生断裂,随着拉伸的进行,塑性较好的部位依然受到拉伸作用,最终在断裂时会表现为 V 型夹角。V 型夹角越小,说明其整体塑性越差,且塑性梯度较大。因此需对断裂后的试样进行分析,不同高温条件下的随焊同步热场

焊接接头整体在 800 °C 高温下拉断后的实物如图 8 所示。

从拉断后的试样可以发现,常规焊接接头断口 V 型夹角仅为 115°,原因是焊缝及近缝区域与母材的力学性能差异较大。焊缝区域组织中的马氏体强度高、塑性差,而母材为珠光体和铁素体,塑性较好。

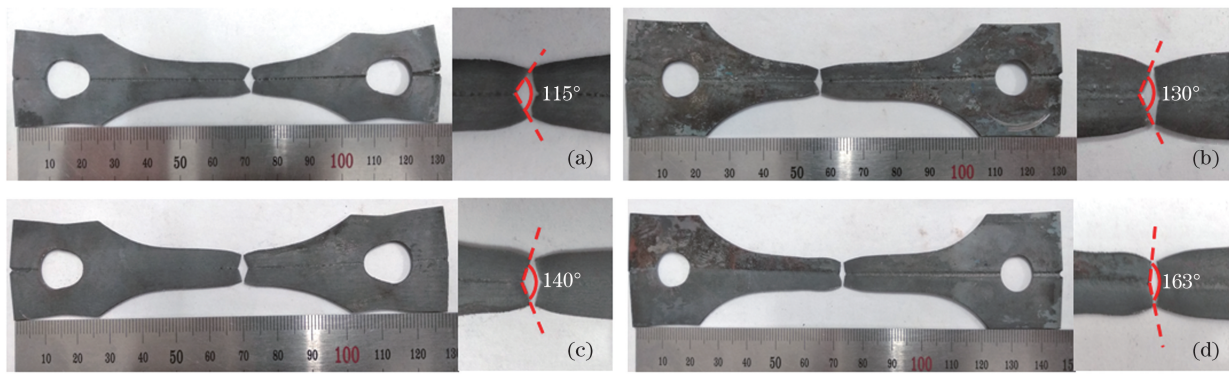


图 8 焊接接头整体拉断后的实物图。(a)常规焊;(b)300 °C热场;(c)450 °C热场;(d)600 °C热场

Fig. 8 Actual picture of the welded joint after being pulled off as a whole. (a) Conventional welding;

(b) 300 °C thermal field; (c) 450 °C thermal field; (d) 600 °C thermal field

在拉伸过程中,焊接接头中部的焊缝区域会首先产生裂纹,随着拉伸的进行在焊缝部位产生的裂纹会向两侧的母材方向扩展,裂纹向母材方向上的扩展与纵向拉伸同时进行,从而形成 V 型断口。若焊缝及近缝区域与母材的塑性差异较小,在拉伸变形时焊缝区域产生裂纹的时间会更晚,即试样拉断后产生的 V 型断口角度会更大。理想状态下,断口是完全齐整的,因此可以通过断口的 V 型角度大小评判接头各区域塑性差异的大小。从图 8 可以看出,随焊同步热场条件下接头断口的 V 型夹角明显较大,且随焊同步热场温度越高,V 型断口的角度越大,300,450,600 °C 热场温度下分别为 130°、140°、163°,相比常规条件,断口角度分别

增加了 13.04%、21.74%、41.74%。原因是随着同步热场温度的升高,焊缝的硬度、强度降低,塑性提高,与母材之间的塑性差异不断减小。在随焊同步热场温度为 600 °C 时,V 型夹角最大,整体接头的断口最齐整,接近平齐,此时焊缝区域的塑性与母材也最接近。

用扫描电镜对热拉伸试样断口的微观形貌进行观测,结果如图 9 所示。可以发现,微观特征主要为韧窝,韧窝尺寸越小表明其塑性越好。相比 450 °C 随焊同步热场条件下的断口,常规焊条件下的韧窝尺寸更大,韧窝大小不一且差异较大。而随焊同步热场条件下的韧窝较小,且更均匀,这表明随焊同步热场条件下的接头塑性更好。

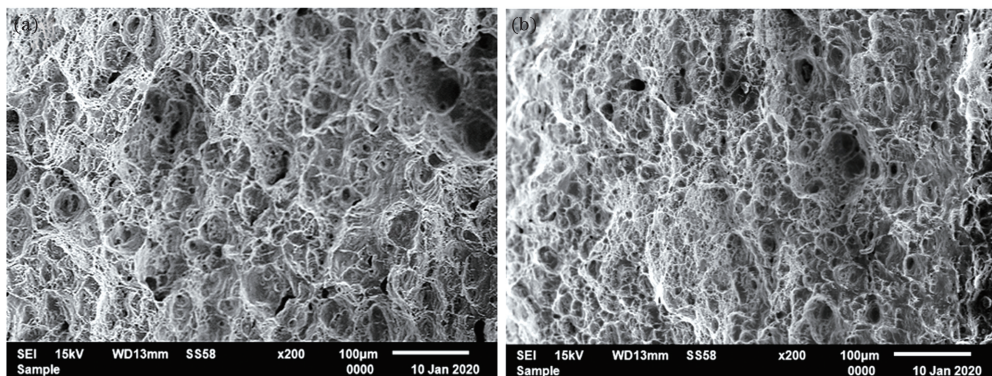


图 9 断口的微观形貌。(a)常规焊;(b)450 °C热场

Fig. 9 Micro morphology of the fracture. (a) Conventional welding; (b) 450 °C thermal field

#### 4.5 随焊同步热场条件下硼钢/Q235 钢接头各区域的塑性分析

对最佳热输入下图 3(b)所示各独立区域热拉伸试样进行高温拉伸试验,研究接头各区域的拉伸变形行为,图 10 为 800 °C 热拉伸温度下不同随焊同步热场条件接头各区域的应力应变关系图。

从图 10(a)可以发现,800 °C 高温下硼钢的抗拉

强度为 83 MPa,Q235 钢的抗拉强度为 37 MPa,硼钢发生断裂时应变更大,塑性优于 Q235 钢,两种母材之间的力学性能差异较大且焊缝抗拉强度最大,塑性最差。变形时焊缝与两侧热影响区的界面位置最易产生应力集中,是整个拼焊接头的薄弱区域。相比热影响区和母材,焊缝区域会最早发生断裂,裂纹从焊缝区域产生然后向两侧的热影响区扩展。两

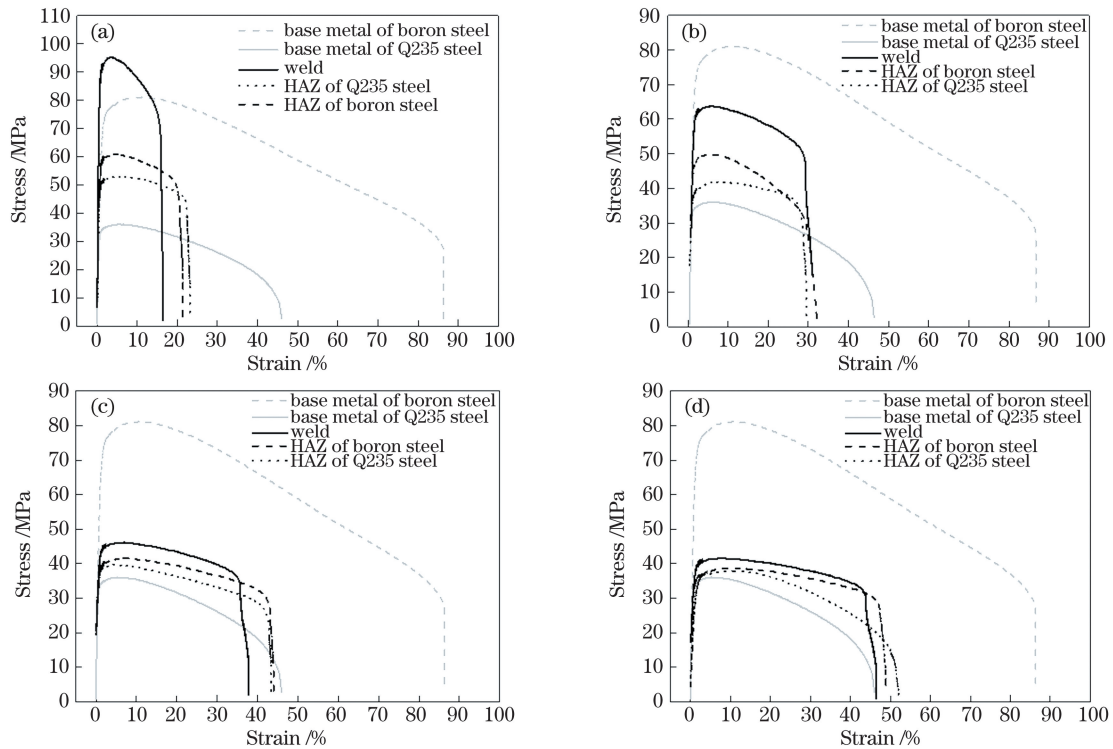


图 10 焊接接头各区域的应力应变关系。(a)常规条件;(b)300 °C热场;(c)450 °C热场;(d)600 °C热场  
Fig. 10 Stress-strain relationships of the each area of the welded joint. (a) Conventional condition;  
(b) 300 °C thermal field; (c) 450 °C thermal field; (d) 600 °C thermal field

侧热影响区的塑性稍好于焊缝,但不及母材,且 Q235 钢侧热影响区的塑性稍高于硼钢侧热影响区的塑性。

从图 10(b)~图 10(d)可以发现,对于不同的热场条件,焊接接头各区域的应力应变关系是不同的。600 °C 随焊高温条件得到的焊接接头各区域的力学性能最协调且接近于 Q235 钢母材,其强度及塑性均稍高于 Q235 钢母材;相比常规条件,焊缝区域的塑性应变增加了 31.47%,Q235 钢热影响区增加了 28.23%,硼钢热影响区增加了 28.61%。因此采用随焊同步热场条件下的激光焊接方式可以显著提高焊缝的塑性,且随着随焊同步热场温度的增加,焊缝的抗拉强度有明显降低,焊缝两侧热影响区的力学性能差异不断缩小,焊接接头各区域的力学性能也更协调。

图 11 为常规及随焊同步热场条件下焊接接头各区域在 800 °C 的屈服极限值,其中,距离焊缝中心负方向为硼钢侧,正方向为 Q235 钢侧。可以发现,相比常规焊,随焊 600 °C 热场条件下激光焊接接头各区域的屈服强度分布更均匀,焊缝与热影响区的屈服强度接近于 Q235 钢母材,其屈服强度分布差异最大值为两母材的差异。

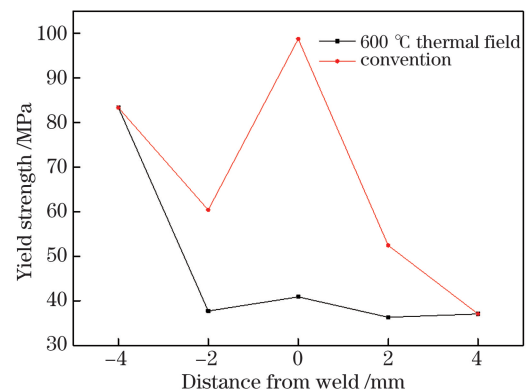


图 11 800 °C 下焊接接头的屈服强度分布  
Fig. 11 Distribution of yield strength of welded joints at 800 °C

图 12 为高温 800 °C 下焊接接头各区域试样拉断后的实物图,可以看出,高温下试样均被氧化,表面发黑且有氧化皮脱落。由于热拉伸试样均为独立区域,各试样断口比较齐整,两侧热影响区的单一试样拉断行程相差不大,焊缝试样的拉断行程稍小,断口为脆性断口。

图 13 为不同条件下硼钢/Q235 钢拼焊接头各区域的微观组织,虚线部分为接头各区域拉伸试件的取样位置。图 13(a)~图 13(c)中,常规条件下焊

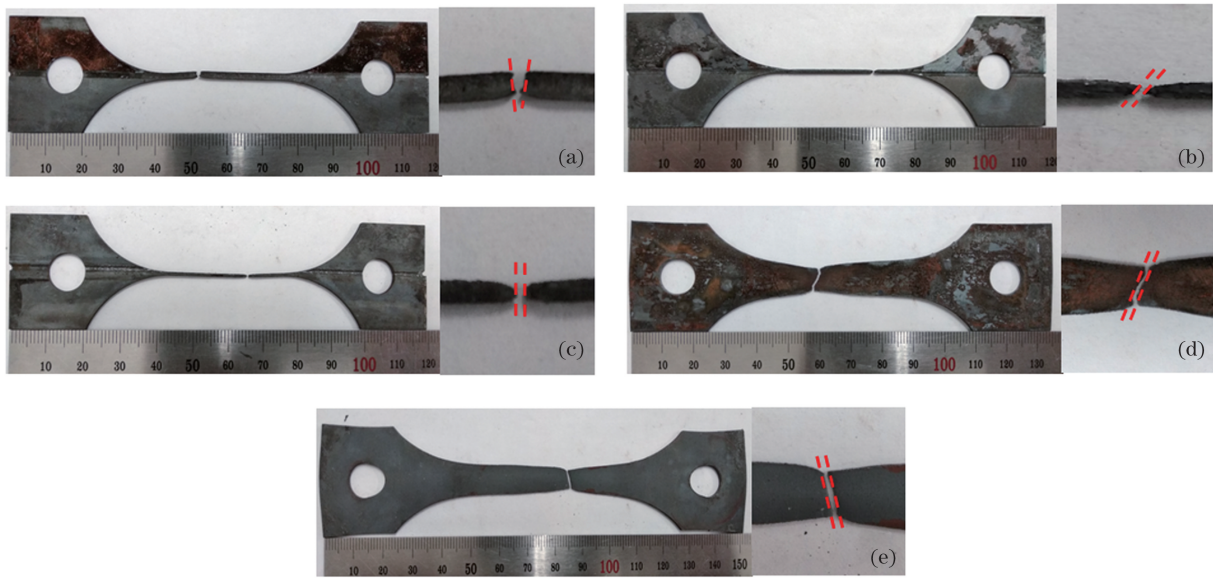


图 12 800 °C 下焊接接头各区域试样拉断后的实物图。(a)焊缝;(b)Q235 钢 HAZ;(c)硼钢 HAZ;(d)Q235 钢母材;  
(e)硼钢母材

Fig. 12 Physical image of the specimens in each area of the welded joint after being pulled off at 800 °C. (a) Weld;  
(b) HAZ of the Q235 steel; (c) HAZ of the boron steel; (d) base material of the Q235 steel; (e) base material of the boron steel

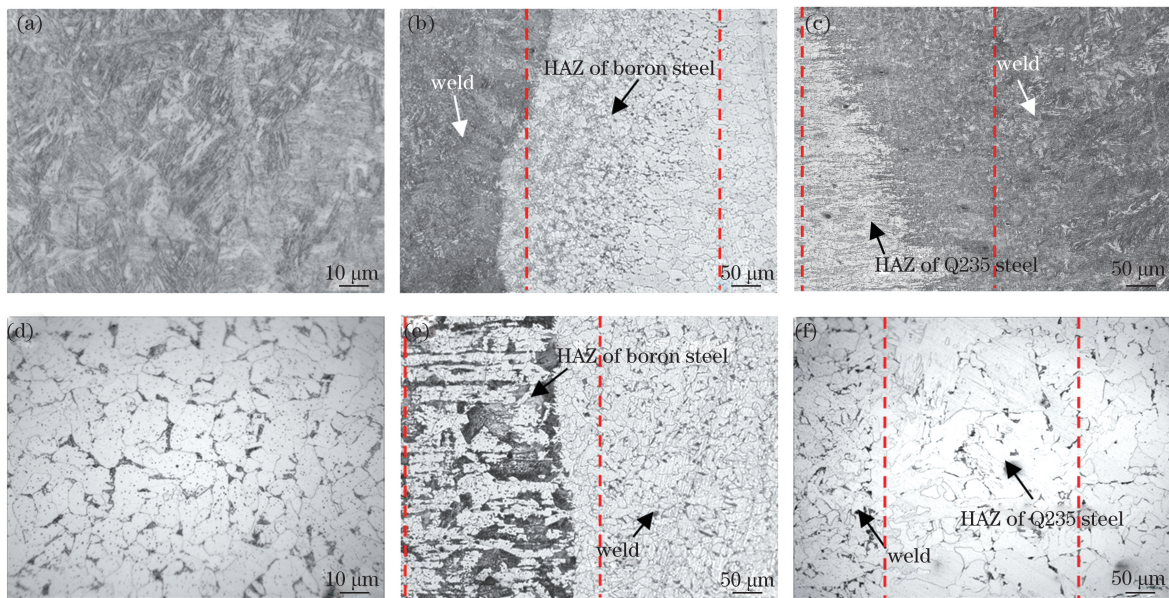


图 13 不同条件下硼钢/Q235 钢拼焊接头的微观组织。(a)常规条件的焊缝区域;(b)常规条件的硼钢 HAZ;(c)常规条件的 Q235 钢 HAZ;(d)600 °C 热场的焊缝区域(e)600 °C 热场的硼钢 HAZ;(f)600 °C 热场的 Q235 钢 HAZ

Fig. 13 Microstructure of the boron steel/Q235 steel welded joints under different conditions. (a) Weld area under conventional condition; (b) boron steel HAZ under conventional condition; (c) Q235 steel HAZ under conventional condition; (d) weld area under 600 °C thermal field (e) boron steel HAZ under the 600 °C thermal field; (f) Q235 steel HAZ under 600 °C thermal field

缝区域为板条状的马氏体组织,硼钢热影响区也为细小的马氏体组织。Q235 钢热影响区的宽度稍大于硼钢热影响区且组织有明显区别,靠近焊缝的熔合区大部分为铁素体和珠光体及少量的马氏体组

织,在焊缝与母材之间形成了参差不齐的界面。如图 13(d)~图 13(f)所示,随焊同步热场条件下拼焊接头成形良好,热场温度为 600 °C 时,焊缝区域几乎全部为铁素体及珠光体组织,晶粒分布均匀。Q235



钢热影响区组织为珠光体和铁素体,比常规条件下的珠光体及铁素体组织更粗大,几乎不存在马氏体组织,且距离焊缝越远,组织越细小。不同于常规条件下硼钢热影响区的马氏体组织,600 °C 热场条件下硼钢热影响区组织为塑性更好、晶粒更均匀的铁素体。显微组织中马氏体硬度高且脆性大,塑性变形能力差,而铁素体和珠光体组织塑性较好。

常规条件下焊缝区域及硼钢热影响区中马氏体组织占绝大部分,因此力学性能主要由马氏体决定,焊缝区域及硼钢热影响区塑性较差,而 Q235 钢热影响区中的马氏体含量较少,塑性优于焊缝区域及硼钢热影响区,焊缝两侧显微组织的差异较大,导致各区域之间产生了塑性梯度。在 600 °C 随焊热场条件下,焊缝区域组织绝大部分为铁素体及珠光体,硼钢热影响区组织绝大部分为铁素体且与焊缝区域铁素体组织的差异更小,焊缝区域及硼钢热影响区塑性均提高且更协调。Q235 钢热影响区几乎全部为铁素体及珠光体,且熔合线界面过渡更均匀,有利于协调焊缝及 Q235 钢热影响区的塑性,减小各区域之间的塑性梯度差异。由于高温热场对拼焊接头的作用,焊缝及热影响区焊接后的冷却速度降低,使温度场分布更均匀,且高温停留时间较长,可以有效避免淬硬组织的生成。随着热场温度的升高,接头中马氏体组织含量明显降低,铁素体及珠光体含量增加,各区域界面处的过渡更均匀,因此随焊同步热场条件下硼钢/Q235 钢激光拼焊接头的塑性高于常规条件且塑性协调一致性更好。

## 5 结 论

针对激光拼焊接头焊后存在的塑性不协调、应力奇异性等问题,提出了一种新的随焊同步热场方法,通过热拉伸试验研究了硼钢/Q235 钢激光拼焊接头及其各独立区域的塑性行为,最终得出了以下结论。

1) 该方法改善了焊缝与硼钢热影响区的组织转变,有效提高了硼钢/Q235 钢激光拼焊接头的整体塑性,降低了接头各区域的塑性梯度。

2) 对于整体硼钢/Q235 钢激光拼焊接头,随焊同步热场条件下的接头塑性优于常规焊接头,且随焊热场温度越高,接头整体的抗拉强度越低、延伸率越高,试样断口越平齐。

3) 对于硼钢/Q235 钢激光拼焊接头各区域,随着热场温度的升高,焊缝区的塑性有明显提高,焊缝及热影响区与母材之间的应力应变关系差异变小,接

头各区域的变形也更协调。相比常规条件,600 °C 随焊热场温度下的焊缝区域组织几乎全部转变为铁素体和珠光体组织,且组织更均匀。

4) 随焊热场温度为 600 °C 时,得到的焊接接头各区域力学性能最协调。

## 参 考 文 献

- [1] Merklein M, Johannes M, Lechner M, et al. A review on tailored blanks: production, applications and evaluation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 151-164.
- [2] Merklein M, Wieland M, Lechner M, et al. Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: a review [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 228: 11-24.
- [3] Song G, Fu C X, Yu P N, et al. Joints collapse of dissimilar aluminum alloys during laser-induced arc welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1002007.  
宋刚,符成学,于培妮,等.异种铝合金激光诱导电弧拼焊接头塌陷研究[J].*中国激光*, 2019, 46(10): 1002007.
- [4] Li X J, Huang J, Pan H, et al. Microstructure and formability of laser welding joint of QP1180 high-strength steel sheet [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302006.  
李学军,黄坚,潘华,等. QP1180 高强度钢板激光焊接接头的组织与成形性能[J].*中国激光*, 2019, 46(3): 0302006.
- [5] Huan P C, Wang X N, Zhu T C, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of 800 MPa grade hot-rolled high strength steel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102002.  
环鹏程,王晓南,朱天才,等. 800 MPa 级热轧高强度钢激光焊接接头的组织和力学性能[J].*中国激光*, 2019, 46(1): 0102002.
- [6] Wang Z J, Liu P X, Xu Y, et al. Hot stamping of high strength steel with tailored properties by two methods [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 1725-1730.
- [7] Hao L, Zhu G M, Wen Y H, et al. Study on hot stamping process of 38MnB<sub>5</sub> ultra high strength boron steel [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(4): 817-823.  
郝亮,朱国明,闻玉辉,等. 超高强度硼钢 38MnB<sub>5</sub> 的热冲压工艺研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(4): 817-823.
- [8] Song Y L, Hua L. Influence of inhomogeneous constitutive properties of weld materials on

- formability of tailor welded blanks [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 552: 222-229.
- [9] Lu J, Song Y L, Hua L, et al. Influence of thermal deformation conditions on the microstructure and mechanical properties of boron steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 701: 328-337.
- [10] Tang B T, Yuan Z J, Zhang B Y, et al. Characterization of hot stamping and quenching of laser tailor welded blanks of HSLA steel B340LA and boron steel B1500HS [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(2): 62-66.  
唐炳涛, 原政军, 张保仪, 等. 高强度钢 B340LA 与 B1500HS 钢激光拼焊板热冲压淬火性能 [J]. *材料热处理学报*, 2013, 34(2): 62-66.
- [11] Yu W, Qi Y, Li L, et al. Effect of cooling process after normalizing on the microstructure and properties of 1600 MPa ultra-high strength steel [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(1): 56-62.  
余伟, 齐越, 李亮, 等. 常化后冷却工艺对 1600 MPa 级超高强度钢组织性能的影响 [J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(1): 56-62.
- [12] Cui D, Wang B Y, Zhou J, et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of B1500HS steel laser tailor welded blanks [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(11): 1497-1504.  
崔栋, 王宝雨, 周靖, 等. 热处理对 B1500HS 钢激光拼焊板力学性能的影响 [J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(11): 1497-1504.
- [13] Hu Z L, Fan X X, Hua L. Forming theory and technology of aluminum alloy FSW tailor welded blank [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6): 206-212.  
胡志力, 范新欣, 华林. 高强铝合金 FSW 拼焊板变形规律与成形技术 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(6): 206-212.
- [14] Morawiec M, Róžański M, Grajcar A, et al. Effect of dual beam laser welding on microstructure-property relationships of hot-rolled complex phase steel sheets [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2017, 17(1): 145-153.
- [15] Grajcar A, Morawiec M, Róžański M, et al. Twin-spot laser welding of advanced high-strength multiphase microstructure steel [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92: 52-61.

## Plastic Gradient Coordination Behavior of Boron Steel/Q235 Steel Laser Welded Joint Under Welding with Synchronous Thermal Field

Zhou Guangtao<sup>1,2\*</sup>, Li Huachen<sup>1</sup>, Liu Fang<sup>1</sup>, Cui Hepeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fujian Key Laboratory of Special Energy Manufacturing, College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

### Abstract

**Objective** For hot stamping high strength boron steel B1500HS and Q235 steel, dissimilar materials laser welding tailored blanks combine the excellent properties of the two materials and can meet the special performance requirements of the structure. For example, B-pillar of automobile body structure requires that the upper and lower sections of B-pillar have low strength, while the middle section has high strength. However, due to the difference in mechanical properties of the materials connected at the end of the welded joint interface, the stress singularity and other mechanical mismatching effects are caused in the interface among weld, heat-affected zone (HAZ), and base metal (BM), forming a plastic gradient. So far, there are few researches on controlling the plastic gradient in each region of the welded joint during laser welding, so it is very necessary to find a method to control the plastic gradient of the welded joint. In this paper, welding with synchronous thermal field (WSTF) method is proposed in order to regulate the cooling rate of the joint, intervene the structural transformation of each region of the welded joint, reduce the plastic gradient and coordinate the plastic of each region. A comparative investigation of 2 mm boron steel/Q235 steel laser welded joint prepared by conventional laser welding and the WSTF conditions is carried out to systematically evaluate the differences about plasticity between them, and further provide a beneficial reference for the selection of controlling the plastic gradient of dissimilar material laser welded joint in practical engineering applications.

**Methods** Boron steel/Q235 steel laser welding tailor blanks are performed using YAG laser device. The welding conditions are conventional laser welding with 300, 450, 600 °C thermal fields, respectively. After that, high temperature tensile test, fracture morphology, and microstructure are observed by using electronic high temperature tensile testing machine, scanning electron microscope, and metallographic microscope, respectively. The high temperature tensile tests are conducted under 700, 750, 800, 850, 900 °C, respectively. By comparing the above results, the plastic gradient difference of boron steel/Q235 steel welded joint under conventional laser welding and WSTF conditions is obtained.

**Results and Discussions** By comparing the high temperature tensile test and microstructure of boron steel/Q235 steel laser welded joint under conventional laser welding with 300, 450, 600 °C synchronous thermal field, respectively, it can be found that: 1) elongation: compared with the conventional condition, the elongation of 300, 450, 600 °C increases by 19.70%, 20.69%, 21.21% respectively (**Table 5**). 2) fracture angle: under conventional laser welding conditions, the fracture Angle of the joint is only 115°. Under the synchronous thermal field conditions of 300, 450, 600 °C, the fracture angle increases by 13.04%, 21.74% and 41.74%, respectively (**Fig. 8**). 3) plastic strain: when the thermal field temperature is 600 °C, compared with the conventional conditions, the plastic strain in the weld increases by 31.47%, the HAZ of Q235 steel increases by 28.23% and the HAZ of boron steel increases by 28.61% (**Fig. 10**). The plasticity of each region is more gradual and harmonious. 4) microstructure: under conventional conditions, the majority of the weld and the HAZ of boron steel are martensite, while the content of martensite in the HAZ of Q235 steel is relatively small, and ferrite and pearlite account for the majority. Under the condition of 600 °C thermal field, the microstructure of the weld is mostly ferrite and pearlite, while the microstructure of the HAZ of boron steel is mostly ferrite and the difference with the ferrite microstructure of the weld is smaller. There is almost no martensite in the HAZ of Q235 steel, but all ferrite and pearlite, and the fusion line interface transition is more uniform (**Fig. 13**).

**Conclusions** The results show that through synchronously applying the preset thermal field during the laser welding process and laser heat source for boron steel/Q235 steel welded tailor blanks, under the synchronous effect of thermal field and laser heat source, the WSTF method improves the microstructure transformation of weld and HAZ of boron steel and Q235 steel. The method can effectively improve the plasticity of integrated boron steel/Q235 steel welded joint, significantly reduce the plastic gradient in each region of the joint and make it to be gradual and harmonious. For integrated boron steel/Q235 steel laser welded joint, the higher the temperature of the thermal field, the higher the elongation of the integrated welded joint, and the more flat the fracture surface. For each region of boron steel/Q235 steel laser welded joint, the plasticity of the weld is obviously improved, the difference of stress-strain relationship among the weld, the HAZ and the BM is reduced, and the deformation of each region of the welded joint is more coordinated. Due to the reduction of cooling rate of weld and HAZ after welding, the temperature is higher and the retention time is longer, the formation of the brittle organization is avoided. The difference between the weld and its both sides is smaller, the transition at the interface of each region is more uniform, and the plastic gradient is greatly reduced. Therefore, the plasticity of boron steel /Q235 steel laser welded joint is higher than that of conventional laser welding under WSTF, and the plasticity is consistent and coordinated.

**Key words** laser technique; welding with synchronous thermal field; laser welding; welded joint; hot stretch; plastic behavior

**OCIS codes** 350.3390; 160.3900; 350.3850