

电弧功率对 Laser + GMAW-P 复合热源 焊热场特征的影响 *

武传松 胥国祥 秦国梁 王旭友 林尚扬
(山东大学材料连接技术研究所, 济南 250061) (机械科学研究院哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080)

摘要 焊接 HAZ 的热场特征, 如 HAZ 的宽度和焊接热循环的参数等, 对焊接接头的组织和性能有重要影响, 是决定焊接接头质量的关键因素. 本文应用已建立的复合热源焊的组合式体积热源模型, 对 Laser + GMAW-P 复合热源焊的热场进行数值分析, 定量研究不同电弧功率对 Laser + GMAW-P 复合热源焊 HAZ 宽度和热循环参数等热场特征基础数据的影响规律, 并与单激光焊和单 GMAW-P 焊的情况进行了比较, 以期为从冶金上揭示复合热源焊的特点奠定基础.

关键词 复合热源焊, HAZ 宽度, 热循环, 数值模拟

中图分类号 TG407

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2009)06-0119-06

EFFECT OF ARC POWER ON THERMAL FIELD CHARACTERISTICS OF LASER+GMAW-P HYBRID WELDING

WU Chuansong, XU Guoxiang, QIN Guoliang
Institute for Materials Joining, Shandong University, Jinan 250061

WANG Xuyou, LIN Shangyang
Harbin Welding Institute, China Academy of Machinery Science & Technology, Harbin 150080

Correspondent: WU Chuansong, professor, Tel: (0531) 88392711, E-mail: wucs@sdu.edu.cn

Supported by National Key Technologies R & D Program of China (No.2006BAF04B10)

Manuscript received 2008-12-17, in revised form 2009-04-08

ABSTRACT The combination of laser welding with pulsed gas metal arc welding (GMAW-P) forms laser + GMAW-P hybrid welding which can not only enhance capability of the two processes, but also compensate the deficiencies of each individual. Therefore, laser + GMAW-P hybrid welding is an increasingly accepted joining technology for a variety of industrial sectors. As applications become more widespread, there is growing need to understand the fundamental issues of this new welding process, such as the relationship between the numerous process parameters and the weld quality. For key factors determining the weld quality, the thermal field characteristics of heat affected zone (HAZ) in welding, such as HAZ width and thermal cycle parameters, have significant effects on the microstructure and properties of welded joint. In this paper, an adaptive combined heat source model developed for laser + GMAW-P hybrid welding was employed to conduct the numerical analysis of thermal field in hybrid welding. The influence of different levels of arc power on the HAZ width and thermal cycle parameters in hybrid welding is quantitatively analyzed, and the relevant data obtained in sole laser welding, GMAW-P, and laser + GMAW-P hybrid welding are compared to each other. It has been found that HAZ width in hybrid welding is less than that in GMAW-P even if the power input of laser + GMAW-P hybrid welding is 2 kW larger than that of GMAW-P. When the arc power is lower, there is a small difference of HAZ width between GMAW-P and laser + GMAW-P, while the difference is narrowed when the arc power is higher. Laser + GMAW-P hybrid welding causes a larger cooling time and lower peak temperature which are beneficial to the improvement of microstructure and properties in HAZ. The results are very useful for demonstrating the process features and understanding the advantages of hybrid welding.

KEY WORDS hybrid welding, HAZ width, thermal cycle, numerical simulation

* “十一五”国家科技支撑计划重点项目 2006BAF04B10 和黑龙江省自然科学基金重点项目 ZJG0601 资助

收到初稿日期: 2008-12-17, 收到修改稿日期: 2009-04-08

作者简介: 武传松, 男, 1959 年生, 教授

激光与脉冲熔化极气体保护电弧 (Laser + GMAW-P) 的复合热源焊, 充分利用两个热源的优点, 并弥补各自的不足, 产生“1+1>2”的协同效应, 从而实现高速、高效、优质和大熔深焊接^[1,2]. 作为一种新型焊接工艺, Laser + GMAW-P 复合热源焊的新特点已经引起国际上的广泛重视, 发达国家纷纷投入大量资源启动多项重大研发项目, 在工艺实验方面开展了较多的研究, 以期尽快将其应用于实际生产^[3,4]. 由于复合热源焊技术近几年才受到重视, 而激光与电弧的相互作用机制比较复杂, 目前国际上对这种新工艺的机理和内在规律的研究还很少^[5,6], 在一定程度上阻碍了其更广泛的实际应用. 因此, 深入开展复合焊工艺机理的研究, 对于揭示其优质、高效焊接的物理本质, 实现众多工艺参数之间的优化和匹配, 具有重要意义.

在前期研究^[7-9]中, 对脉冲电弧热流和熔滴热焓的分布模式以及激光能量作用模式作出了恰当的描述和处理, 建立了适用于 Laser + GMAW-P 复合热源焊的组合式体积热源模型, 并对准稳态条件下复合热源焊的焊缝形状和尺寸进行了数值模拟, 为定量研究复合焊工艺参数对焊缝成形的影响规律提供了理论依据. 但是, 前期工作只是对复合热源焊焊缝成形本身进行了数值预测, 没有涉及复合热源焊的热场特征, 如热影响区 (heat affected zone, HAZ) 的尺寸和焊接热循环的参数等. 而这些热场特征对焊接接头的组织和性能有重要影响, 是决定复合热源焊质量的关键因素. 本文应用已建立的复合热源焊的组合式体积热源模型, 对 Laser + GMAW-P 复合热源焊的热场进行数值分析, 研究不同电弧功率对复合焊 HAZ 宽度和热循环参数等热场特征基础数据的影响规律, 并与单激光焊、单 GMAW-P 焊的情况进行比较, 以期为从冶金上揭示复合热源焊的特点奠定基础.

1 3 种焊接工艺的实验条件

本研究涉及的三种焊接工艺 (单激光焊、单 GMAW-P 焊、Laser + GMAW-P 复合热源焊), 焊件均为 8 mm 厚低碳钢板 Q235, 焊接速度均为 1 m/min.

(1) 激光焊: Nd:YAG 固体激光器, 激光波长 1.06 μm , 输出聚焦透镜焦距为 200 mm, 焦点直径为 0.6 mm,

离焦量 $\Delta z=1$ mm, 激光功率为 2 kW.

(2) GMAW-P 焊: 有 5 组参数 (见表 1). 焊丝直径为 1.2 mm. 熔滴过渡模式为一脉一滴.

(3) Laser + GMAW-P 复合热源焊: 激光前置且垂直于焊件表面, 激光参数同 (1); GMAW 焊枪在后, 光—丝间距 1 mm, 光—丝夹角为 27° ; GMAW-P 焊的 5 组参数见表 1, 其他同 (2). 与焊接参数相对应, 有 5 组 5 种复合热源焊接条件.

2 3 种焊接工艺的热场数值分析模型

前期工作中已经分别对激光焊和激光 + GMAW-P 复合热源焊的焊接温度场进行了数值分析, 并利用工艺实验测量的焊缝横断面形状和尺寸证明了所建模型的计算精度^[7-9]. 建立的 GMAW-P 的焊接温度场模型, 对表 1 所示 5 种工艺条件下的 GMAW-P 焊缝横断面形状, 数值模拟结果显示其精度均满足要求. 这里仅对模型特点做以下简要介绍:

(1) 单激光焊: 根据激光焊缝横断面的形状特点, 表征激光焊接热作用的体积热源, 是一系列热流峰值 $q_m(0, z)$ 和分布参数 $r_0(z)$ 按某种规律不断变化的高斯热源沿工件厚度方向 (z 方向) 积分叠加而成的. 这里采用“锥体—峰值指数递增”热源模型, 其特点是, 热源作用半径 $r_0(z)$ 沿焊件厚度方向呈线性衰减 (即热源作用区域为锥体); 热源中心轴 (z 轴) 上, 热流密度值 $q_m(0, z)$ 以指数规律递增变化.

(2) 单 GMAW-P 焊: 电弧热流分为脉冲电弧热流和基值电弧热流两部分, 将脉冲和基值电弧热流分别表示为两个分布参数不同的双椭圆平面分布热源; 与相同电弧功率连续焊相比, 脉冲电弧热流分布参数较大, 基值期间电弧热流分布参数较小.

(3) 激光 + GMAW-P 复合热源焊: 组合式体积热源由下述三部分热输入叠加而成: (a) 两个分布参数不同的双椭圆分布的电弧热流, 作用于焊件表面; (b) 熔滴带入熔池的热焓, 按双椭球体分布; (c) 激光热源按峰值递增的曲面旋转体分布, 作用于从焊件表面到焊件深处. 因此, 适用于复合热源焊的组合式体积热源模型为: “两个双椭圆分布 + 双椭球体分布 + 锥体—峰值指数递增”模

表 1 GMAW-P 焊接工艺参数
Table 1 The process parameters in GMAW-P

Process	Peak current, A	Background current, A	Averaged voltage, V	Pulse frequency, Hz	Wire feed rate, m/min	Arc power W
GMAW-P1	533	13.672	21.7	86	3.1	1970.36
GMAW-P2	528	15.525	22.9	116	4.1	2741.13
GMAW-P3	525	15.625	24.0	125	5.0	3465.60
GMAW-P4	550	37.109	25.4	136	6.2	4401.82
GMAW-P5	501	93.750	29.0	192	8.2	7264.60

式.

将上述各类热源作用模型作为热传导方程的内热源项, 采用有限差分法求解, 对 8 mm 厚低碳钢板 Q235 在不同试验条件下的焊接温度场和熔池形状进行了模拟计算, 获得有关焊接热场特征的各项数据.

3 结果和讨论

前期工作 [7-9] 中已经利用工艺实验测量的焊缝横断面形状和尺寸数据分别对激光焊、GMAW-P 焊和 Laser + GMAW-P 复合热源焊的焊接温度场数值分析结果进行了验证, 证明所建模型的计算精度符合要求. 本文主要应用所建立的模型, 通过对单激光焊、单 GMAW-P 焊和 Laser+GMAW-P 复合热源焊的热场数值分析, 获得 HAZ 宽度和热循环参数等热场特征基础数据, 并进行比较.

3.1 焊件表面的 HAZ 宽度

对于低碳钢 (也包括某些低合金钢), 根据组织上的特征, 焊接 HAZ 可分为四个区: 熔合区 (熔点温度—1533 K)、过热区 (overheated zone, OHZ)(1533 K—1373 K)、相变重结晶区 (1373 K—1173 K) 和不完全重结晶区 (1173 K—1023 K)^[10]. 由于熔合区很窄, 在本文中将其和 OHZ 合并计算为 OHZ 的宽度. OHZ 冷却后容易得到粗大组织, 韧性很低, 易在该区产生裂纹和脆化, 是焊接接头的薄弱环节. 对于工件上表面的 HAZ 宽度, 定义为从熔合线到温度 1023 K 处的距离; OHZ 宽度定义为从熔合线到温度 1373 K 处的距离.

图 1 单 GMAW-P 焊和 Laser + GMAW-P 复合热源焊时焊件上表面在不同焊接条件下的 HAZ 宽度. 可以看出, 由于焊接速度较快 (1 m/min), 三种焊接方法产生的 HAZ 宽度都比较窄. 激光焊的 HAZ 宽度最小, 为 1.112 mm, 这反映出激光焊具有热输入高度集中的工艺特点. 而复合热源焊和单 GMAW-P 焊相比, 复合热源焊的 HAZ 宽度要小于单 GMAW-P 焊. 这是因为激光对电弧有一定的压缩作用, 虽然熔池宽度增加 (因总的热输入大), 但电弧热输入分布的范围减少, 从而减小了 HAZ 宽度. 随着电弧功率的增大, 激光对电弧的压缩作用减小, 而电弧对激光的散射作用增强, 因此复合热源焊和 GMAW-P 焊两者在 HAZ 宽度上的差距逐渐减少. 当电弧功率增大到 7000 W 以上时, 两种工艺的 HAZ 宽度几乎相等.

HAZ 各部分中, OHZ 是对焊接接头影响最大的区域, 是焊接接头的薄弱环节. 表 2 给出了焊件上表面在焊接工艺和不同参数条件下的 OHZ 宽度, 从表 2 可知, 与 HAZ 总宽度相比, 复合热源焊和单 GMAW-P 焊在 OHZ 宽度方面的差别更大, 复合热源焊的 OHZ 明显小于 GMAW-P 的 OHZ. 而复合热源焊和单 GMAW-P 焊的 HAZ 宽度不同, 主要就体现在 OHZ 宽度的不同上. 对于复合热源焊, 随着电弧功率的增大, 激光对电弧的压缩作用下降, 复合热源焊 HAZ 和 OHZ 的宽度也逐渐增加. 需要强调的是, 与单 GMAW-P 焊相比, Laser + GMAW-P 复合热源焊本身的热输入要大 2 kW; 但即使如此, 复合热源焊 HAZ 宽度仍然比 GMAW-P 的小, 尤其是易出现魏氏组织、脆化、裂纹的 OHZ 小, 因此复合热源焊的接头性能要优于单 GMAW-P 焊.

3.2 焊件上表面的热循环曲线

不同焊接工艺产生的焊缝宽度不同, HAZ 宽度和位置也不同. 在比较单激光焊、GMAW-P 焊和复合热源焊的 HAZ 热循环曲线时, 其位置 (即离开焊缝中心线的距离) 是不同的. 为了进行比较, 所取位置均以三种焊接工艺条件下熔合线最大宽度处为起点; 沿 y 方向, 计算点到该起点的距离为 d , 如图 2 所示. 计算了激光焊、GMAW-P 焊和复合热源焊的 HAZ ($d=0.2$ mm, $d=0.8$ mm) 的热循环曲线、冷却时间 t (从 800 °C 冷却到 500 °C 所用的时间) 和峰值温度.

图 3 示出了三种焊接工艺 (激光焊、GMAW-P 和复合热源焊) 不同条件下焊件表面 HAZ 中的热循环曲线.

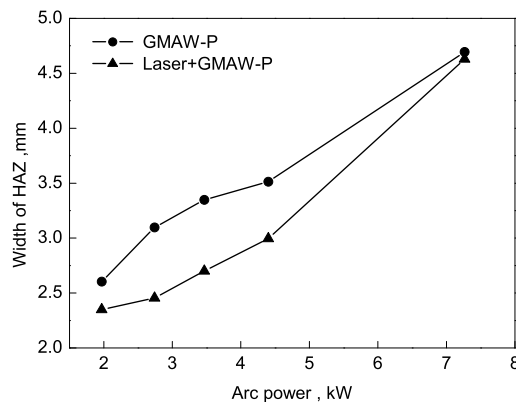


图 1 不同焊接工艺条件下的 HAZ 宽度
Fig.1 HAZ width at different welding conditions

表 2 焊件表面 HAZ 中的 OHZ 宽度
Table 2 Comparison of the OHZ width in HAZ

Process	Laser	GMAW-P					Laser+GMAW-P				
		a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
OHZ width, mm	0.381	1.189	1.294	1.370	1.459	2.130	0.886	1.005	1.114	1.239	1.936

Note: a, b, c, d and e indicate GMAW-P₁, GMAW-P₂, GMAW-P₃, GMAW-P₄ and GMAW-P₅ separately

可以看出, 对于不同的焊接条件, 由于焊接速度较高 (1.0 m/min), 三种焊接工艺的加热速度和冷却速度都非常快. 在冷却过程中, 复合热源焊的温度一直高于

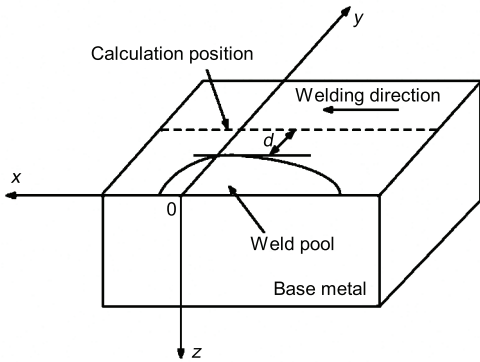


图 2 焊件上表面 HAZ 热循环曲线计算位置示意图

Fig.2 Schematic of the position for calculating thermal cycle

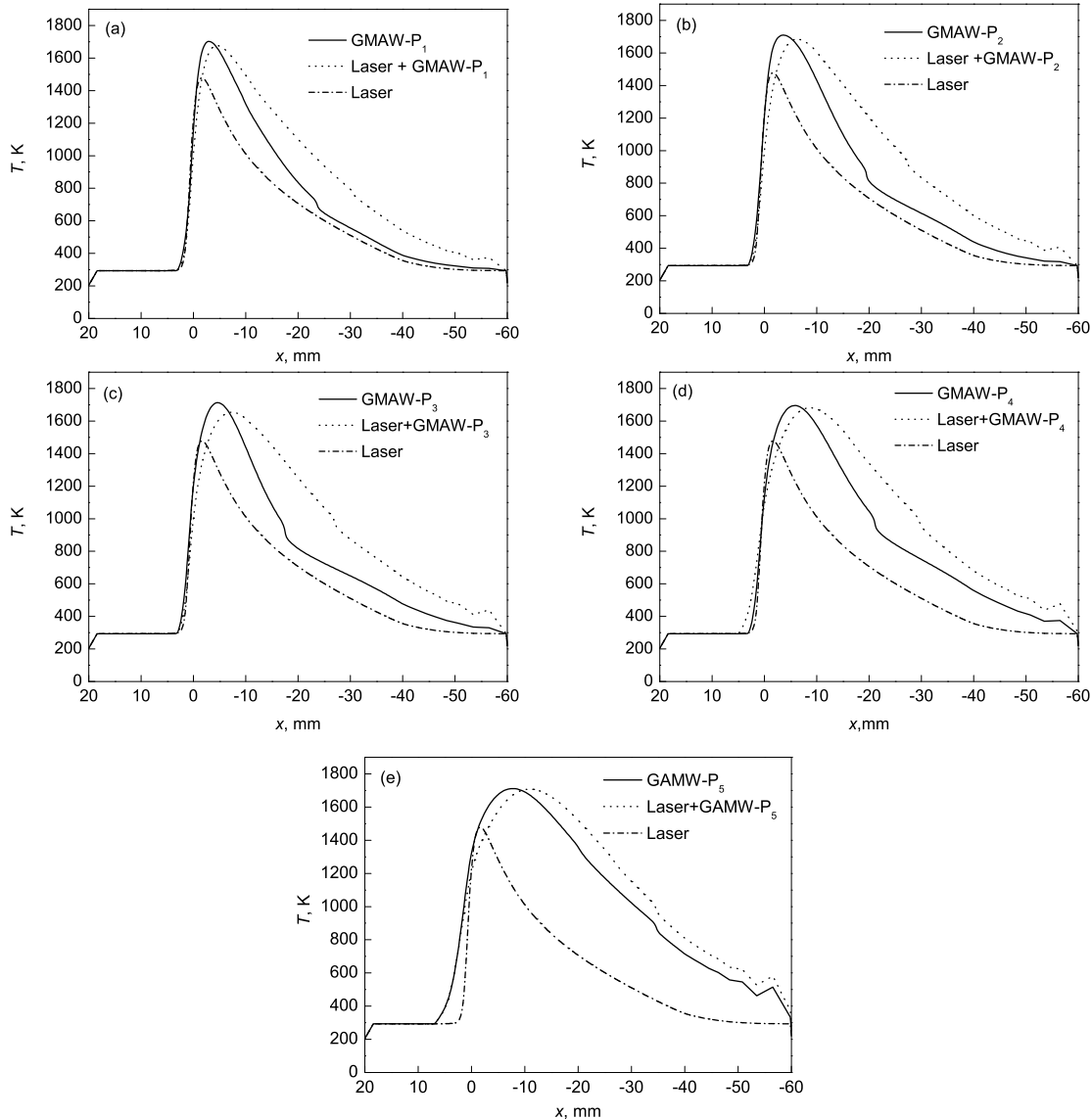


图 3 焊件表面 HAZ 中的热循环曲线 ($d=0.2$ mm)

Fig.3 The thermal cycle curves in HAZ on top surface ($d=0.2$ mm)

GMAW-P 焊 (表明复合热源焊的冷却速度慢), 而 GMAW-P 焊的温度一直高于激光焊 (说明激光焊冷却速度最快). 计算得到的冷却时间 t 如图 4 所示 (激光焊的冷却时间为 0.516 s), 对于所采用的不同焊接条件, 三种焊接工艺的 HAZ 冷却时间都小于 1 s. 当电弧功率较小时, 复合热源焊冷却时间 t 最大, 激光焊次之, GMAW-P 焊最小. GMAW-P 焊的冷却时间 t 小于激光焊的情况, 这与脉冲电弧热输入的脉动性有关. 脉冲电流作用的间歇性, 减小了其有效作用时间; 当基值电流作用时, 熔池及周围区域电弧热输入急剧减少, 温度急剧下降; 与连续焊相比, 这种间歇性作用在冷却过程中可以起到加快冷却速度的作用, 当焊接速度较大和脉冲频率低时更为明显. 因此, 当电弧功率较小、频率较低时, GMAW-P 焊的冷却时间 t 小于激光焊的冷却时间 t . 相对于激光焊和 GMAW-P 焊, 复合热源焊由于激光能量和电弧能量的综合作用, 增大了总的作用能量, 使其冷却时间 t 均大于前两者的数

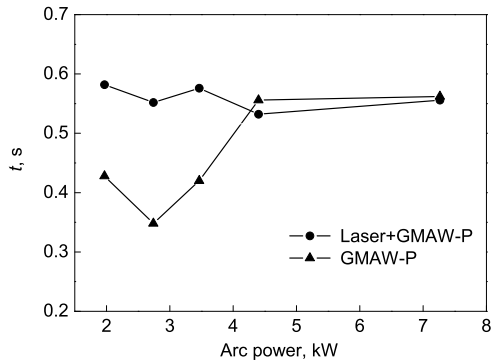


图 4 焊件表面 HAZ 中的冷却时间 $t(d=0.2 \text{ mm})$

Fig.4 The cooling time t in HAZ on top surface ($d=0.2 \text{ mm}$)

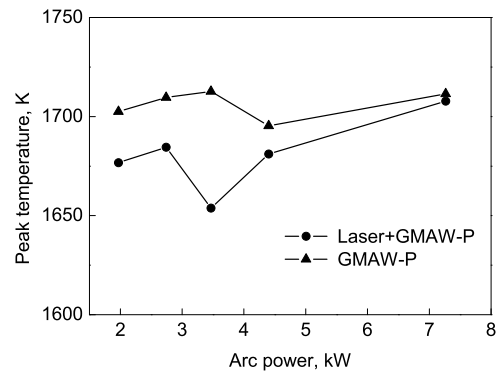


图 5 焊件表面 HAZ 中的峰值温度 ($d=0.2 \text{ mm}$)

Fig.5 The peak temperature in HAZ on top surface ($d=0.2 \text{ mm}$)

值. 当电弧功率较大时, 随着脉冲频率和电弧热输入的增加, GMAW-P 焊的冷却时间逐渐增大; 而当进一步增大电弧功率时, 冷却时间变化不大, 并与复合热源焊相近. 而对于复合热源焊, 由于激光能量的加入及激光的稳弧作用, 当电弧功率增大时, 冷却时间一直变化不大. 此时, GMAW-P 焊和复合热源焊的冷却时间 t 都大于激光焊的数值. 图 5 是焊件表面 HAZ 中的峰值温度 (激光焊时表面峰值温度为 1478 K). 可以看出, 由于激光热源作用范围很小, 热输入高度集中, 温度梯度大, 因此, 激光焊 $d=0.2 \text{ mm}$ 处的峰值温度远远小于 GMAW-P 焊和复合热源焊的情况. 由于复合热源焊熔宽大于 GMAW-P 焊, 且激光对电弧有压缩作用, 使得复合热源焊与 GMAW-P 焊相比, 作用在熔池外部的电弧热量较少, 因此复合热源焊 HAZ 峰值温度小于 GMAW-P 焊.

在焊接过程中, 冷却速度和峰值温度对于 HAZ 的组织 and 性能有着至关重要的影响. 冷却速度的大小直接影响到焊后 HAZ 的组织, 而峰值温度是影响 HAZ 特别是 OHZ 晶粒长大的最重要因素. 由上述计算结果可以看出,

由于焊接速度较高, 三种焊接工艺在 $d=0.2 \text{ mm}$ 处 HAZ 冷却速度都很快, 由钢的 CCT 图^[10] 可得该区组织应完全为马氏体组织. 因此, 三种工艺冷却时间的差别对此处 HAZ 组织的影响不大. 但是冷却速度越小, 越有利于减小马氏体滑移的抗力, 有利于条状马氏体的形成^[10], 因此在此方面复合热源焊和激光焊略优于 GMAW-P 焊. 此外, 由于计算结果可以看出, 三种焊接工艺中, 激光焊的峰值温度最小, 其次是复合热源焊, 而 GMAW-P 的峰值温度最大, 因此, 激光焊时 HAZ 此处晶粒最小, 而 GMAW-P 焊 HAZ 此处晶粒最大, 即性能最差.

综上所述, 激光焊 HAZ 最小, 其 OHZ 晶粒最小, 但激光焊熔池小, 且熔池深而窄, 不利于流体流动, 容易形成气孔等缺陷^[11]. GMAW-P 焊熔池较大, 但熔深很小, 且 HAZ 较宽, 接头比较脆弱. 复合热源焊既可得到大熔深, 又可得到较大的熔宽, 且 HAZ 宽度及性能优于 GMAW-P 焊.

3.3 焊件上表面横向 (垂直焊接方向) 的温度分布曲线

图 6 给出了三种焊接条件下 (激光焊、GMAW-P

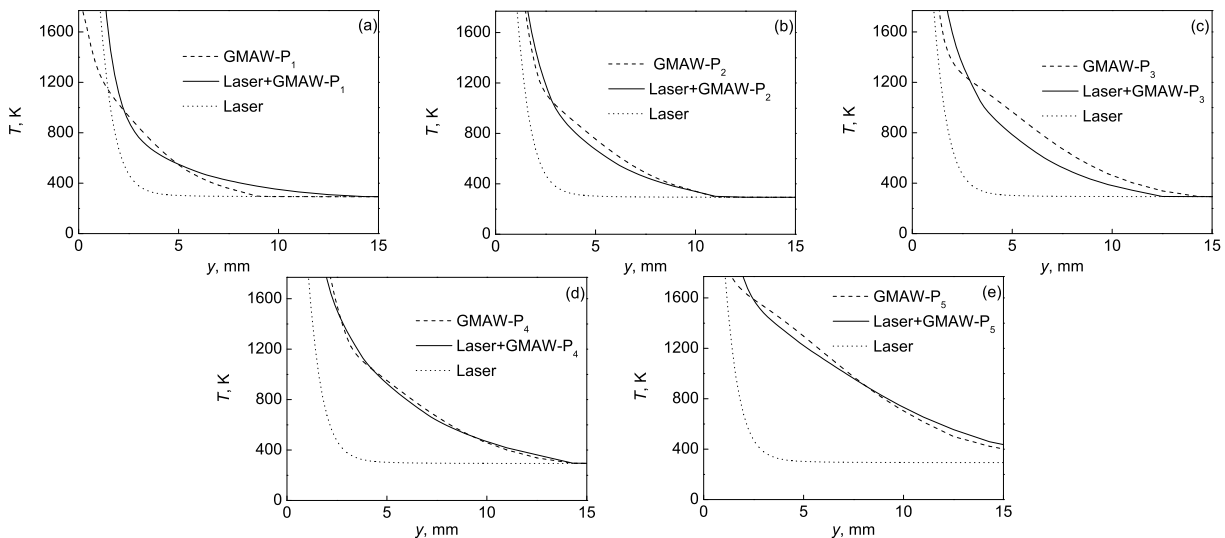


图 6 焊件上表面横向 (垂直于焊接方向) 的温度变化曲线

Fig.6 The temperature distribution along the transverse direction (perpendicular to the welding direction) on top surface ($x=0.0 \text{ mm}$)

焊、Laser+GMAW-P 复合热源焊) 焊件上表面横向 (沿垂直于焊接速度方向, $x=0.0$ mm) 的温度变化曲线, 其中最高温度为熔点, 即温度变化曲线始于上表面熔合线. 可以看出, 对于三种焊接工艺, 在不同的焊接条件及不同位置, 激光焊的温度变化最快, HAZ 最窄, 这体现了激光能量高度集中作用的结果. 对于 GMAW-P 焊和复合热源焊, 当电弧功率较小时, 在横向 (y 方向) 上, 复合热源焊的温度变化速度大于 GMAW-P. 且随着沿 y 方向的距离增大, 复合热源焊的温度有时逐渐小于 GMAW-P 焊, 这是因为激光对电弧的压缩作用, 减小了电弧在 y 方向上的作用范围所致. 当电弧功率较大时, 由于激光对电弧的作用减弱, 复合焊和 GMAW-P 焊 y 方向上的温度变化曲线基本一致.

4 结论

(1) 对激光焊、GMAW-P 焊和激光 +GMAW-P 复合热源焊的 HAZ 宽度和热循环曲线分别进行了数值计算. 三种焊接工艺中, 激光焊的 HAZ 最小. 尽管复合热源焊的热输入比 GMAW-P 焊大了 2 kW, 复合热源焊焊件上表面的 HAZ 宽度仍然小于 GMAW-P 焊. 当电弧功率较小时, 复合热源焊与 GMAW-P 焊的 HAZ 宽度差别较大; 当电弧功率较大时, 两者的差距缩小.

(2) 因为采用的焊接速度较高, 三种焊接工艺获得的焊件上表面 HAZ 中的冷却速度都较大. 当电弧功率较小时, GMAW-P 焊冷却速度最大 (t 值低), 激光焊次之, 复合热源焊最小. 当电弧功率较大时, 激光焊的冷却速度较大 (t 值低), GMAW-P 焊和复合热源焊的冷却速度相当.

(3) 对于三种焊接工艺条件下焊件上表面 HAZ 中的

热循环峰值温度, GMAW-P 焊最高, 复合热源焊次之, 激光焊最小.

参考文献

- [1] Ishide T, Nayama M, Watanabe M, Nagshima T. *Weld International*, 2001; 15: 940
- [2] Shi S, Howse, D. In: Chinese Mechanical Engineering Society, ed., *Proc Int Forum on Welding Technology in Shipping Industry*, Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2007: 41
(Shi S, Howse D. 见: 中国机械工程学会主编, 造船焊接国际论坛论文集, 北京: 中国机械工程学会, 2007: 41)
- [3] Defalco J. *Weld J*, 2007; 86(10): 41
- [4] Stauffer H. *Weld J*, 2007; 86(10): 36
- [5] Bagger C, Olsen F O. *J Laser Appl*, 2005; 17: 2
- [6] Mahrie A, Beyer E. *J Laser Appl*, 2006; 18: 169
- [7] Xu G X, Wu C S, Qin G L, Wang X Y, Yin S Y. *Acta Metall Sin*, 2008; 44: 163
(胥国祥, 武传松, 秦国梁, 王旭友, 林尚扬, 金属学报, 2008; 44: 163)
- [8] Xu G X, Wu C S, Qin G L, Wang X Y, Yin S Y. *Acta Metall Sin*, 2008; 44: 119
(胥国祥, 武传松, 秦国梁, 王旭友, 林尚扬, 金属学报, 2008: 44: 119)
- [9] Xu G X, Wu C S, Qin G L, Wang X Y, Yin S Y. *Acta Metall Sin*, 2009; 45: 107
(胥国祥, 武传松, 秦国梁, 王旭友, 林尚扬, 金属学报, 2009: 45: 107)
- [10] Zhang W Y. *Welding Metallurgy*, Beijing: Machinery Industry Press, 2002: 109
(张文敏. 焊接冶金学, 北京: 机械工业出版社, 2002: 109)
- [11] Rasmussen D, Dubourg L. In David S A, DebRoy T eds., *Proc 7th Int Conf on Trends in Welding Research, ASM International*, 2006: 133