

# TIG 电弧辅助激光焊 TA2 直缝薄壁焊管的组织性能研究

王博士, 孔 谅, 李 芳, 王 敏, 张跃龙

(上海交通大学 上海市激光制造及材料表面改性重点实验室, 上海 200240)

**摘 要:**为解决纯钛 TA2 直缝管在钨极氩弧焊(TIG)高速焊接时出现的咬边、驼峰成形缺陷等问题,提出了 TIG 在前的电弧辅助激光焊工艺。针对  $\phi 19\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}$  的 TA2 直缝焊管,对单 TIG 自熔焊和 TIG 电弧辅助激光焊采用不同的热源模式,采用 Abaqus 软件建立焊接有限元模型,对比分析了这两种焊接过程中的温度循环曲线和焊后残余应力,并对得试验到的 TA2 薄壁焊管进行了显微组织分析及性能测试。结果表明:模拟所得的两种接头的焊缝轮廓尺寸与实际接头轮廓相近,TIG 电弧辅助激光焊接时焊缝中心温度、焊后 Von Mises 应力低于 TIG 焊接的。与 TIG 焊相比,TIG 电弧辅助激光焊的焊缝中心及热影响区的显微组织更小,抗拉强度、伸长率基本持平,屈服强度更高。在获得良好焊缝成形的条件下,采用 TIG 电弧在前的电弧辅助激光焊方法可以获得较高的焊缝质量。

**关键词:** TIG 电弧辅助激光焊;TA2 薄壁管;组织;残余应力

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20210258

中图分类号: TG404;TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)05-0135-06

## Microstructure and Properties of TIG Arc Assisted Laser Welding TA2 Thin-Walled Straight Pipe

WANG Boshi, KONG Liang, LI Fang, WANG Min, ZHANG Yuelong

(Shanghai Key Laboratory of Material Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of undercut and hump defects during tungsten inert gas (TIG) welding of TA2 thin-walled straight pipe, the laser-TIG arc hybrid welding process was conducted. For TA2 straight welded pipe with size of  $\phi 19\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}$ , use different heat source models for single TIG self-welding and TIG arc assisted laser welding, the Abaqus software was used to establish welding finite element model, and the temperature cyclic curve during the two processes and postweld residual stress were comparatively analyzed. And the microstructure analysis and mechanical property test of the TA2 thin-walled pipe obtained by experiment were further carried out. The results show that the contour sizes of the simulated two joints are similar to the actual joints. The weld center temperature and the postweld Von Mises stress of TIG arc assisted laser welding are lower than that of TIG welding. Compared with that of TIG welding, the microstructure of the weld center and heat affected zone of TIG arc assisted laser welding is smaller, and the tensile strength and elongation are basically unchanged, and the yield strength is higher. High weld quality can be obtained by using arc assisted laser welding with TIG arc in the front under the condition of good weld forming.

**Key words:** TIG arc assisted laser welding; TA2 thin-walled pipe; microstructure; residual stress

针对纯钛薄板的焊接,较为常用的焊接方法是钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)和高能

束焊接,尤其是激光焊。但是 TIG 高速焊接纯钛薄板时容易出现咬边、驼峰和较大的焊接变形<sup>[1]</sup>;激光焊接纯钛薄板时需要控制的因素较多,尤其是间隙容忍度差,容易出现咬边,且冷却速度较快,接头中各区域组织不均匀性较大,影响接头的可靠性和服役寿命<sup>[2]</sup>。激光-TIG 电弧复合焊接工艺,兼顾氩弧焊和激光焊的优势,两个热源的协同效应,提高了焊接速度和焊接稳定性,同时允许更大的焊接装配间

收稿日期:2021-01-027

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0301205)

作者简介:王博士(1991-),男,河南鹿邑人,博士研究生,主要从事焊接接头的残余应力模拟分析及疲劳断裂性能研究;

电话:18818209727;E-mail:018050910032@sjtu.edu.cn

通讯作者:孔谅(1966-),男,吉林长春人,副研究员,主要从事材料连接的界面行为及接头性能研究;E-mail:ingerkongliang@sjtu.edu.cn

隙和工艺参数窗口范围,有效改善焊缝的微观组织,得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。Song等<sup>[5]</sup>对比分析了TIG与激光-TIG复合焊接镁合金,结果表明相对于TIG焊接,复合焊接有更宽的工艺参数选择范围。马然等<sup>[6]</sup>研究了光纤激光-TIG电弧复合焊的工艺参数对1mm厚TC4薄板成形组织及力学性能的影响;优化工艺参数下,复合焊接头的抗拉强度高于母材的。刘黎明等<sup>[7]</sup>采用低功率脉冲激光与TIG电弧复合焊接实现了在对接间隙为0~0.5mm范围内的1mm厚TC4薄板的优质焊接。周洋等<sup>[8]</sup>采用高速摄影对比分析了0.5mm厚TA2薄板TIG电弧辅助激光高速堆焊时,两个热源间距、激光在前引导电弧和电弧在前引导激光时的熔池特征行为。

在采用不同热源模型研究钛合金薄板残余应力的分布和分布方面,徐建新等<sup>[9]</sup>模拟分析了2.5mm厚TA15薄板激光焊接时残余应力的分布,结果表明焊接熔合区存在较大的残余应力,并指出可以通过调控热输入来减小残余应力。李兴霞等<sup>[10]</sup>研究了不同的热源模型对激光焊接4mm厚TC4板时残余应力的分布特点,并指出针对薄板激光焊应采用均匀体热源模型。付康<sup>[11]</sup>采用数值模拟研究了1mm厚TC4薄壁圆管激光环焊时的残余变形。目前,针对TIG电弧在前辅助激光焊接薄板时的温度场和残余应力分布状态的研究文献较少。为了进一步研究TIG电弧辅助激光焊接过程中温度场和残余应力分布特点,采用Abaqus有限元商业软件对纯钛TA2薄壁管的TIG电弧和TIG电弧辅助激光焊接过程进行热弹塑性有限元分析,分析两种焊接过程的温度场及残余应力场,及其对接头组织性能的影响规律,进而为薄壁焊接钛管等钛合金结构件的焊接方法的选择和焊接规范参数的优化提供理论和工程应用指导。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料及焊接方法

TA2钛带原材是按照ASTMB265标准中Gr2牌号进行生产的,化学成分如表1所示。开卷钛带宽度60mm,厚度0.7mm,经过压辊冷弯成形后,形成直缝焊管,规格为 $\phi 19\text{mm}\times 0.7\text{mm}$ 。

将焊接钛管分为两组进行焊接:一组采用TIG电弧自熔焊;另一组采用TIG电弧辅助激光焊。前期的工艺试验表明,采用TIG电弧在前模式时,具

表1 工业纯钛TA2的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of pure TA2 (wt%)

Fe	C	O	N	H	Ti
0.30	0.10	0.20	0.05	0.015	余量

有良好的对接间隙容忍度。TIG电弧辅助激光焊平台如图1所示,TIG电弧与激光之间为旁轴模式。采用TIG电弧在前,激光在后,两者之间的平行间距为8mm。两组TIG焊接所使用的焊机均为MPT-500D高频脉冲焊机,且都采用直流反接的方式。进行TIG焊接时不开激光器,工艺参数为焊接电流160A,焊接速度3m/min。TIG电弧辅助激光焊工艺参数如表2所示。

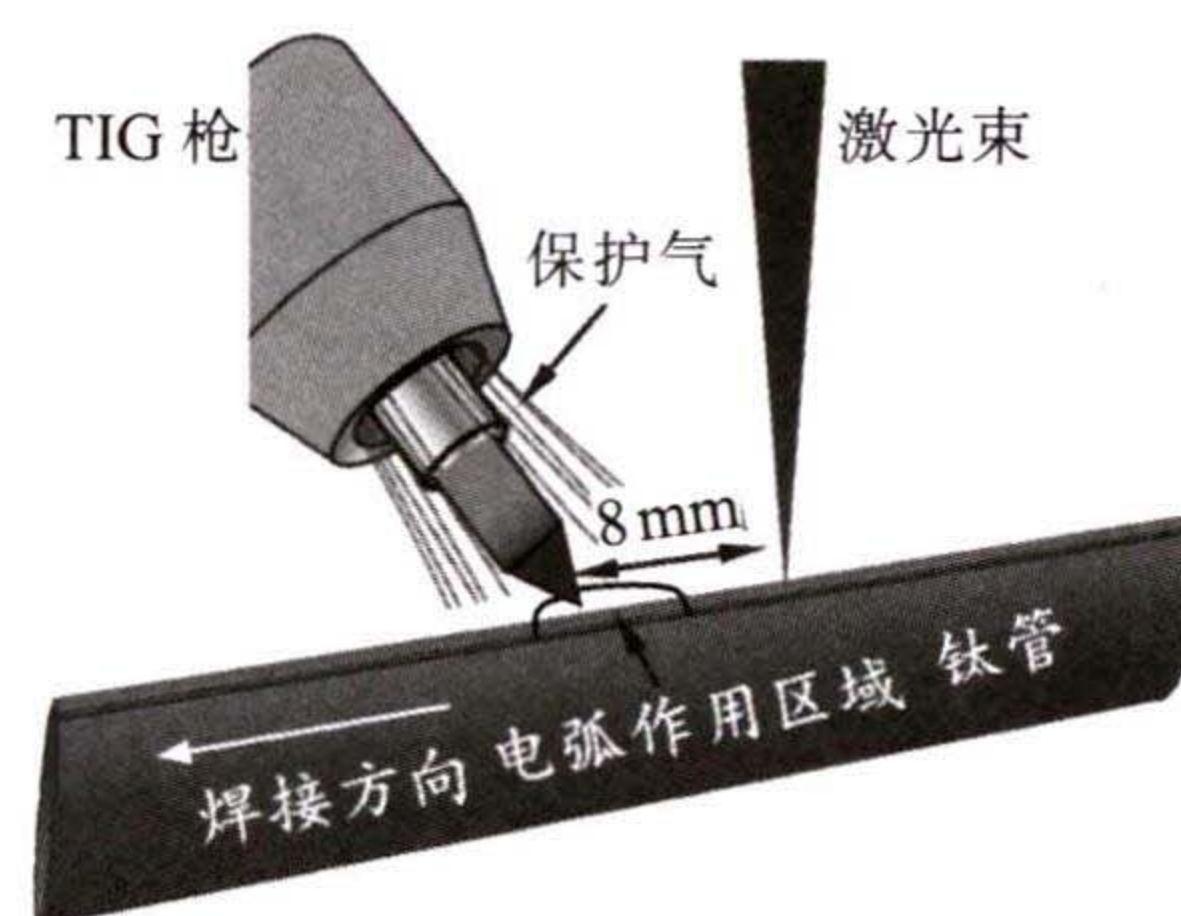


图1 TIG电弧辅助激光焊接平台示意图  
Fig.1 Schematic of TIG arc assisted laser welding platform

表2 TIG辅助激光焊工艺参数  
Tab.2 Process parameters of TIG arc assisted laser welding

TIG电流/A	激光功率/W	离焦量/mm	焊接速度/(m·min <sup>-1</sup> )
80	1000	+25	3.5

### 1.2 焊接有限元模型的建立

直缝焊钛管在成形及焊接过程中受到两侧成形挤压辊轮的约束,焊接完成受到两侧定径辊轮的约束,几乎很难发生位移变化。所以,利用Abaqus软件建立直缝焊钛管热弹塑性有限元分析模型时,不考虑背部余高,选取部分成形挤压辊轮间的钛管来研究其焊接过程中温度场和残余应力场的演变过程。

TA2纯钛薄壁直缝焊管的有限元分析模型如图2所示,尺寸为 $\phi 19\text{mm}\times 0.7\text{mm}$ ,长度400mm。兼顾激光焊光斑直径的大小和计算的精度及效率,直缝焊钛管的焊缝及热影响区附近的单元网格尺寸为 $0.05\text{mm}\times 0.05\text{mm}\times 0.05\text{mm}$ ,单元类型为C3D8T。

对所建立的热弹塑性有限元模型进行计算时分

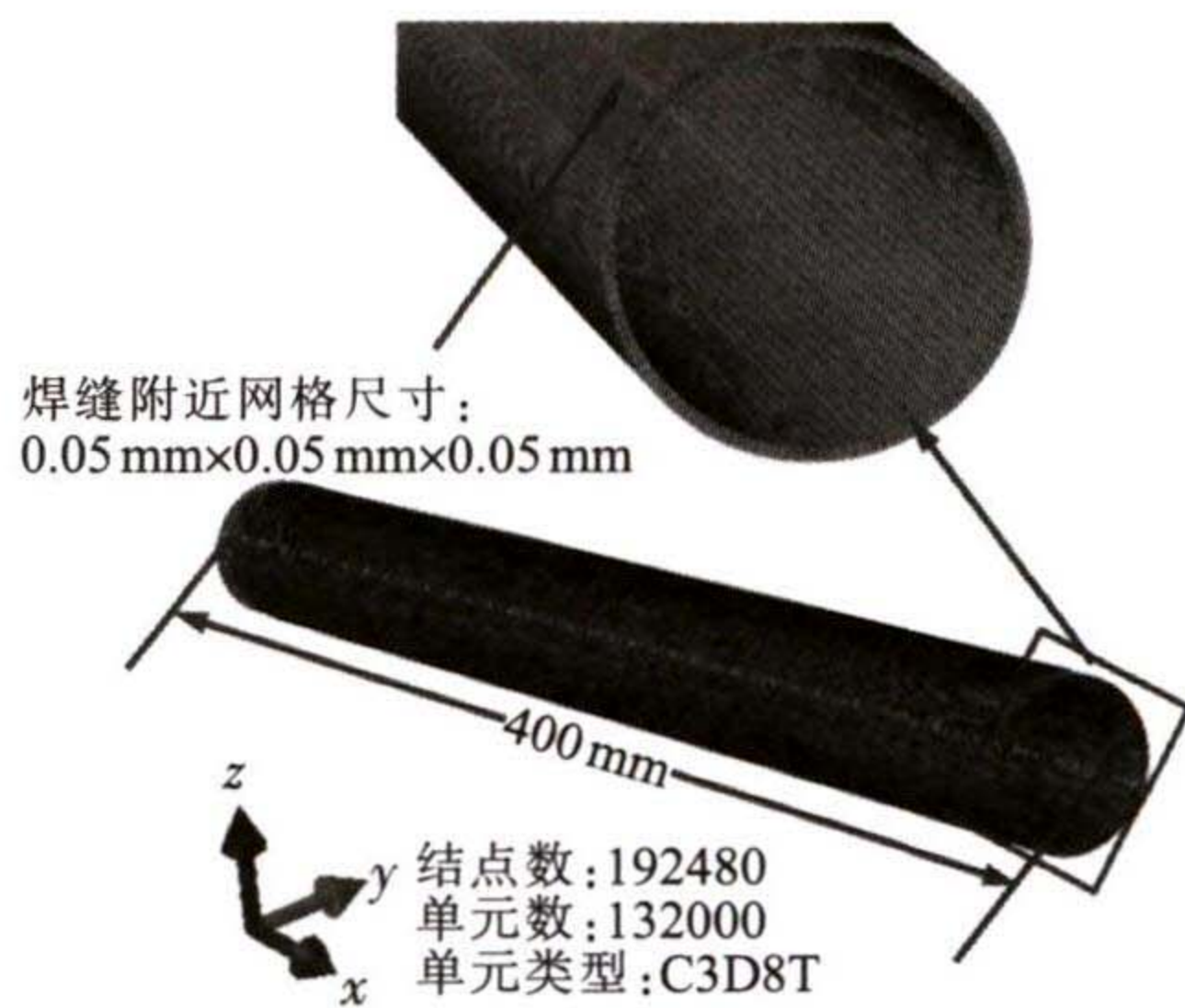


图2 直缝焊管有限元模型

Fig.2 Finite element model of the straight pipe

为3个方面:①力学边界条件,为了更加符合直缝焊钛管焊接过程中辊轮的约束情况,所有节点在焊接过程及焊后冷却过程任何方向的位移都设为0;②温度场边界条件,初始温度设置为20℃,直缝焊钛管所有表面均设置为对流和辐射的换热边界,辐射系数 $\varepsilon$ 为0.85, Stefan-Boltzman 常数 $\sigma$ 为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$ ,对流换热系数 $h_0$ 为 $20 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ;③纯钛 TA2 热物理性能参数,参照文献 [9-10]和 JMatPro 软件计算获得,如图3所示。

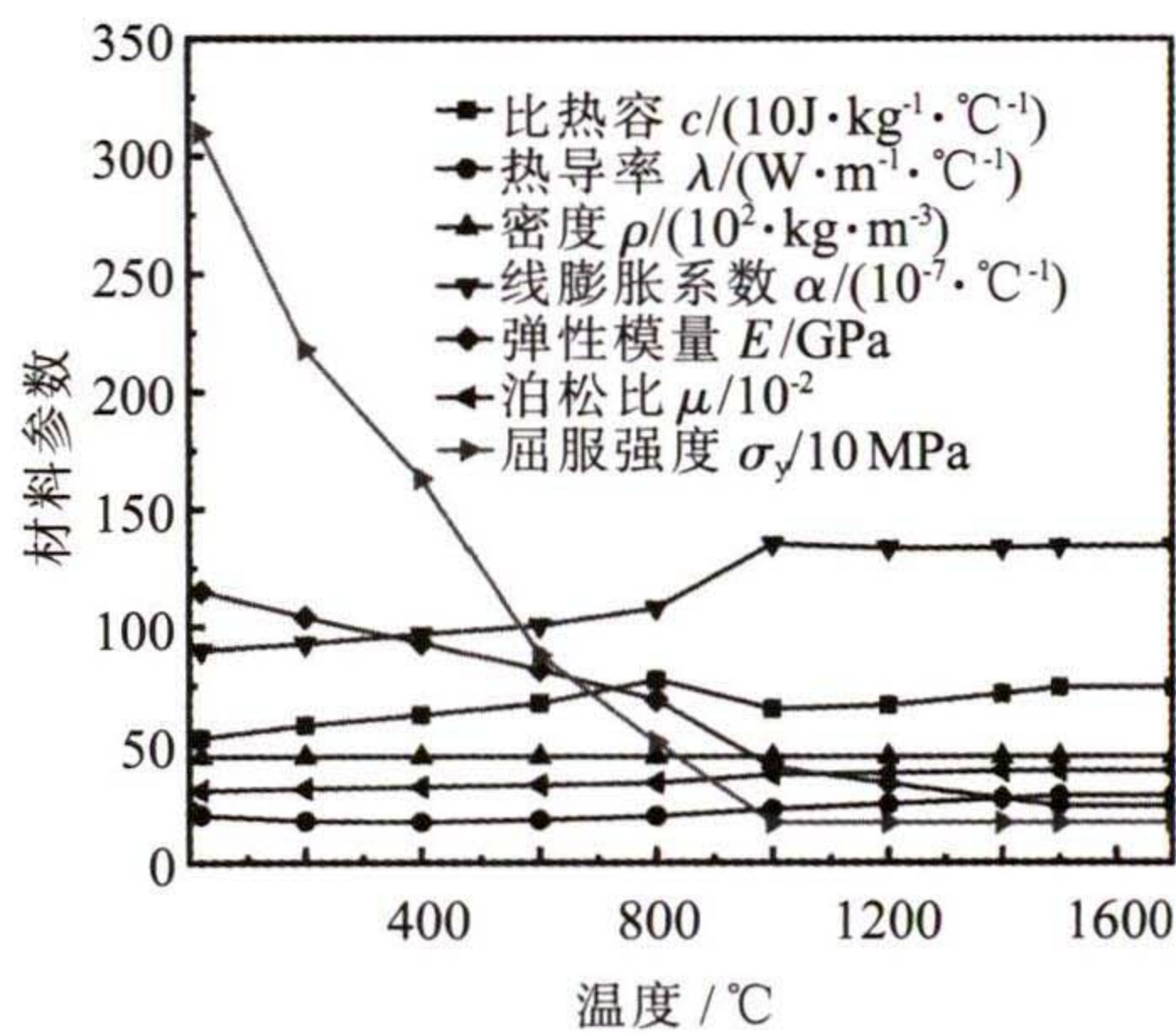


图3 纯钛 TA2 的热力学性能

Fig.3 Thermodynamic parameters of TA2 titanium

针对 TIG 焊接方法,电弧加热区域会形成尾焰,电弧热流分布模式符合体积热源特征,且实际焊接时,由于速度较快,熔池前沿尺寸常常较短,而熔池后端则形成较长的拖尾。为了模拟这种情况,常使用双椭球形体热源模型。双椭球形体热源模型的热源前半部分和后半部分使用两个不同的椭球形作为受热区域,其模型如图4所示,热源的热流密度分布如式(1)、(2)所示。

对于 TIG 电弧辅助激光焊, TIG 电弧在前,充分预热 TA2 表面,激光束作用在预热金属的表面时其

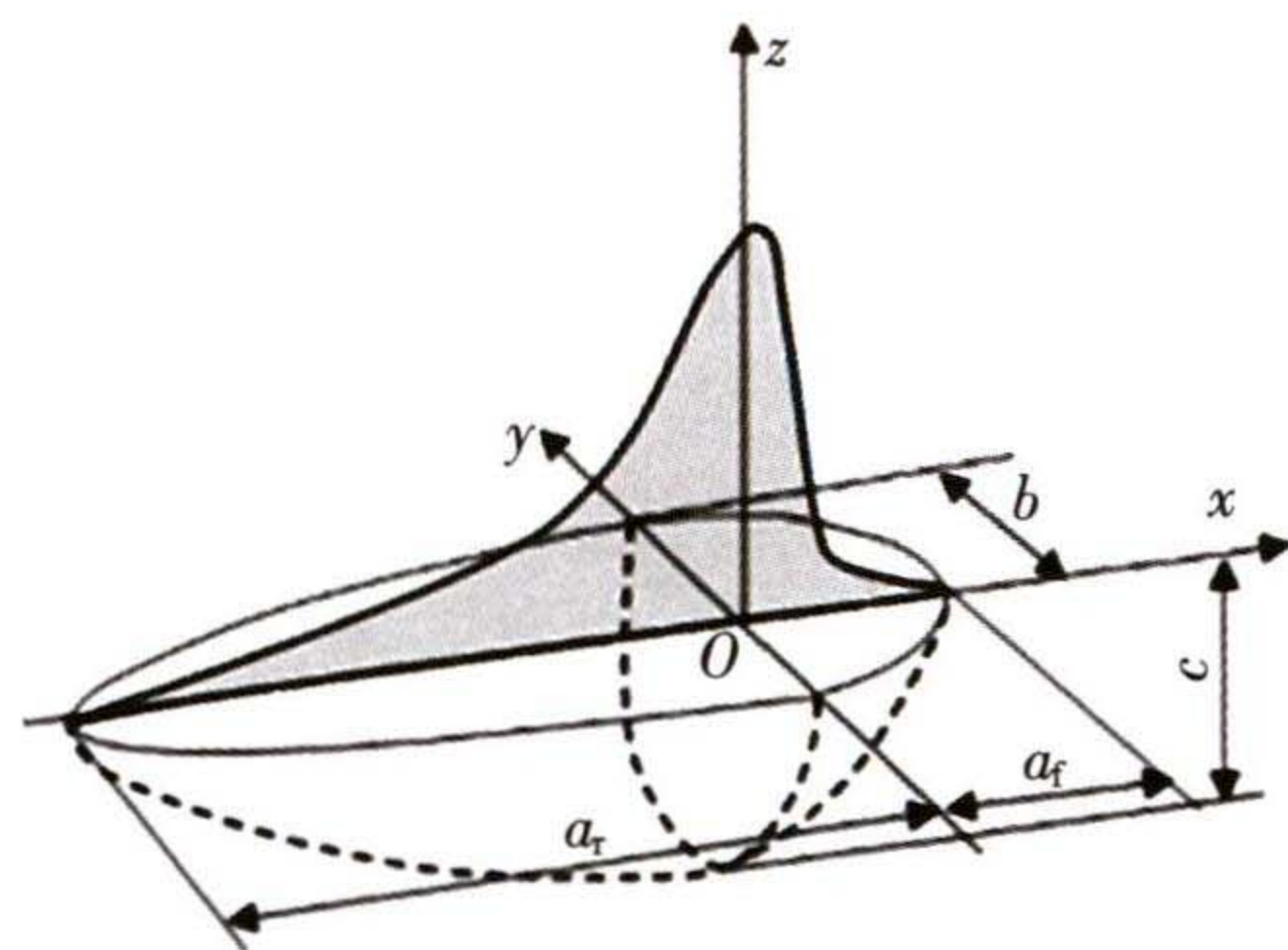
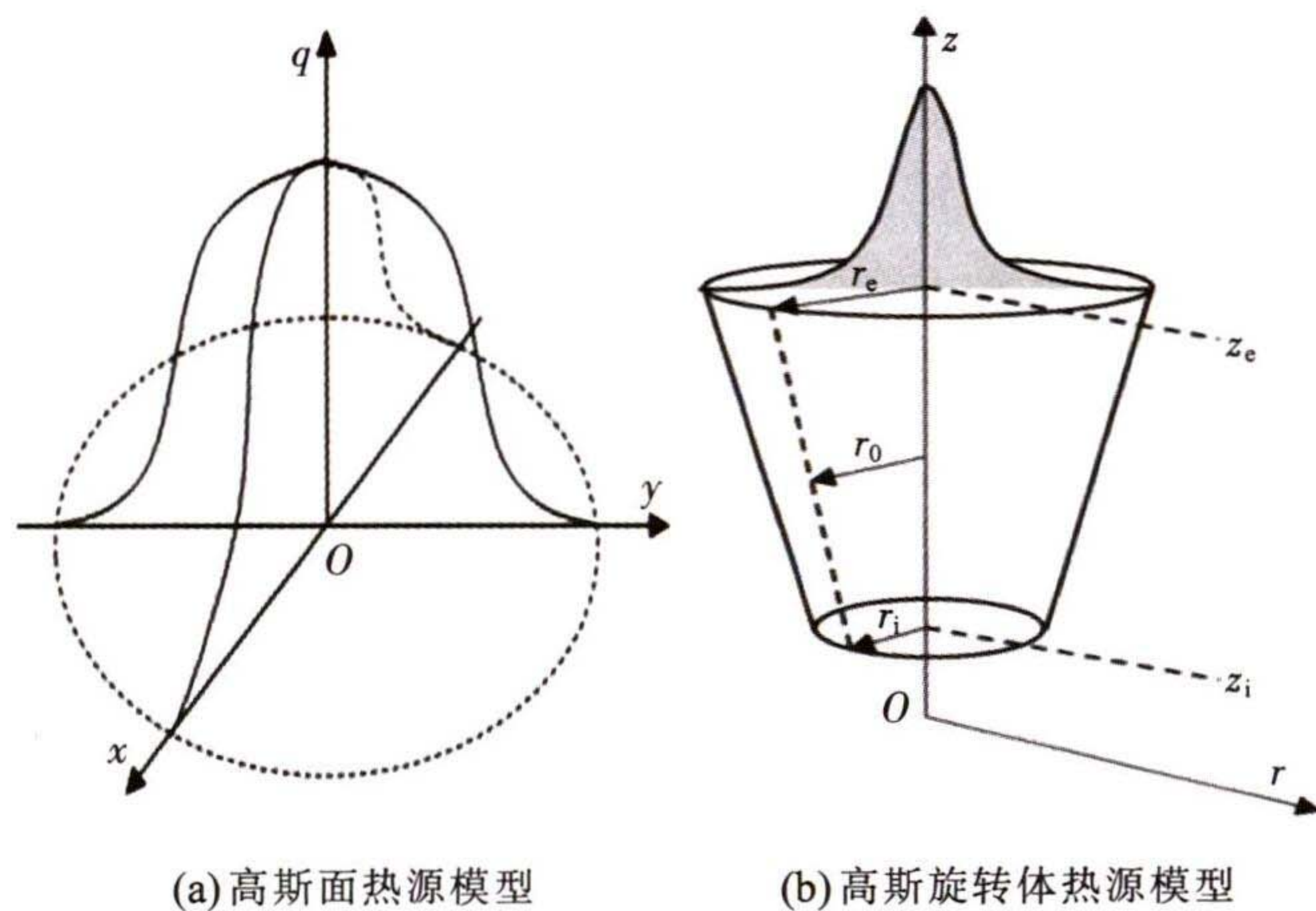


图4 TIG 焊的双椭球形体热源模型

Fig.4 Double ellipsoid heat source model of TIG welding

吸收率大大增加。文献[12]指出采用 TIG 电弧辅助激光焊接 0.5 mm 厚纯钛 TA2 板时,电弧和激光平行间距为大于 6 mm 时,不会形成共熔池的现象。因此, TIG 电弧在前模式的 TIG 电弧辅助激光焊时, TIG 电弧热源采用高斯面热源模型,如图5(a)所示,热源的热流密度分布如式(3)所示;激光焊焊接薄板时参照文献[13],采用高斯旋转体热源模型,如图5(b)所示,热源的热流密度分布如式(4)所示。



(a) 高斯面热源模型

(b) 高斯旋转体热源模型

图5 TIG 电弧辅助激光焊热源模型

Fig.5 Heat source model of TIG-assisted laser welding

体积热源前端 1/2 椭球热流密度分布的表达式为:

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3} f_i Q}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

体积热源后端 1/2 椭球热流密度分布的表达式为:

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

式中:  $Q$  为热源热输入有效功率;  $a_f, a_r, b, c$  为热流分布体积参数;  $f_i, f_r$  为前后椭球热量分布函数,  $f_i + f_r = 2$ 。

高斯面热源:

$$q(r) = \frac{3\eta UI}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

式中:  $q(r)$  表示距热源中心  $r$  的点单位时间所接收到的热量;  $U$  和  $I$  分别表示焊接的电流和电压;  $\eta$  表示焊接热效率, 取 0.7;  $r_0$  代表有效加热半径。

高斯旋转体热源:

$$q(r,z) = \frac{9Qe^3}{\pi(e^3-1)} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right)}{(z_e-z_i)(r_e^2+r_i^2+r_0^2)} \quad (4)$$

$$r_0(z) = r_i + (r_e - r_i) \frac{z - z_i}{z_e - z_i}$$

式中:  $z_e, z_i$  分别为旋转体的上下底面的  $z$  向坐标;  $r_e, r_i$  分别为旋转体上下底面的半径;  $r_0$  为旋转体的中心半径。

## 2 结果与分析

### 2.1 TA2 焊管焊缝的宏观成形

图 6 为采用 TIG 焊和 TIG 电弧辅助激光焊的  $\phi 19\text{mm} \times 0.7\text{mm}$  的纯钛 TA2 薄壁直缝管形貌。采用这两种焊接方法均得到全熔透的焊接接头, 焊缝表面成形良好, 无驼峰、咬边等缺陷, 正面和背面呈现银白色, 焊缝成形圆滑过渡且均匀整齐。

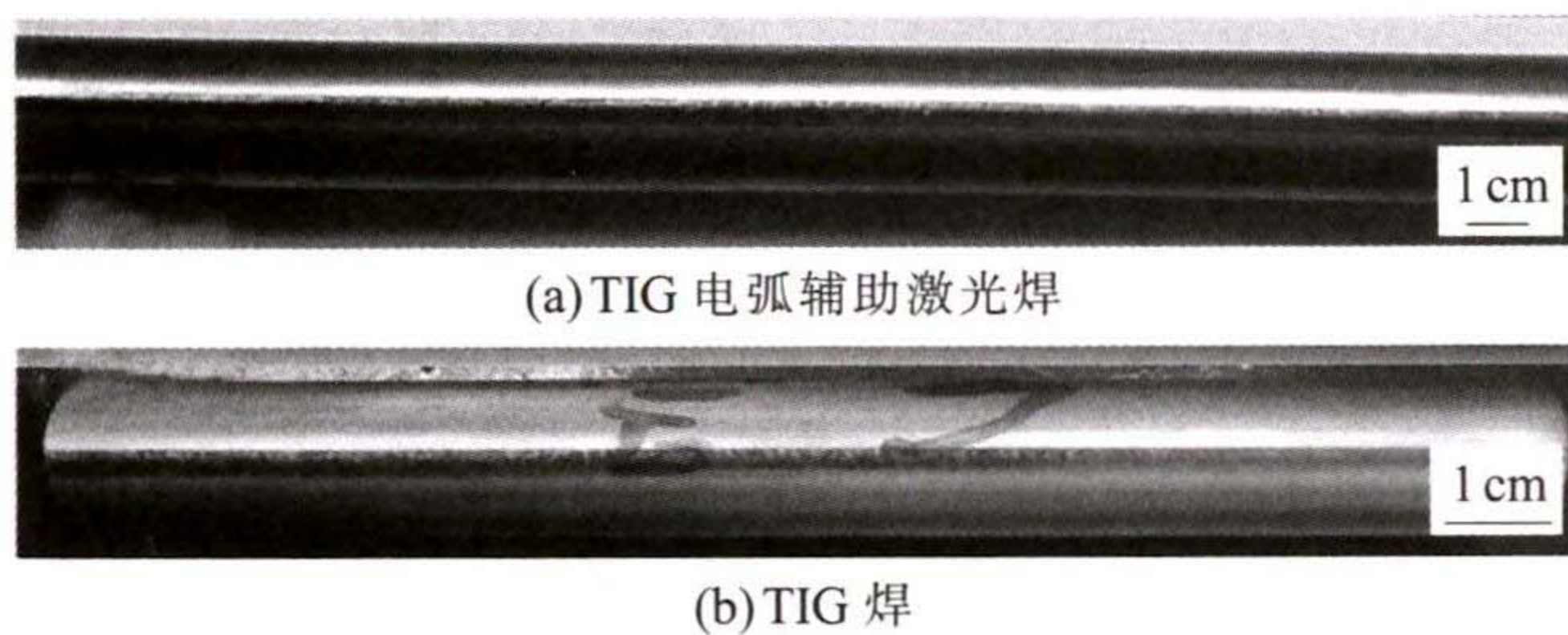


图 6 焊缝宏观形貌  
Fig.6 Micromorphologies of the welds

### 2.2 TA2 焊管的模拟结果分析

首先对比分析的是模型所得的熔池横截面与实际焊缝熔池横截面的差别, 两者越接近, 表明建立的热弹塑性模型越接近实际的焊接过程。图 7 为模拟得到 TIG 电弧辅助激光焊和 TIG 焊的焊缝轮廓和实际接头的金相轮廓。可以看出除了背部余高之外, 两者基本一致, 这验证了 TIG 电弧辅助激光焊接纯钛 TA2 薄壁直缝焊管选用的高斯面热源和高斯旋转体热源组合模型的准确性。采用 TIG 电弧辅助激光焊纯钛 TA2 薄壁直缝焊管时模拟得到的焊缝区的宽度约为 2.7mm, 小于 TIG 焊模拟获得的 4mm。

图 8 为模拟计算获得的纯钛 TA2 焊缝中心的温度循环曲线。结果表明, TIG 电弧辅助激光焊接纯

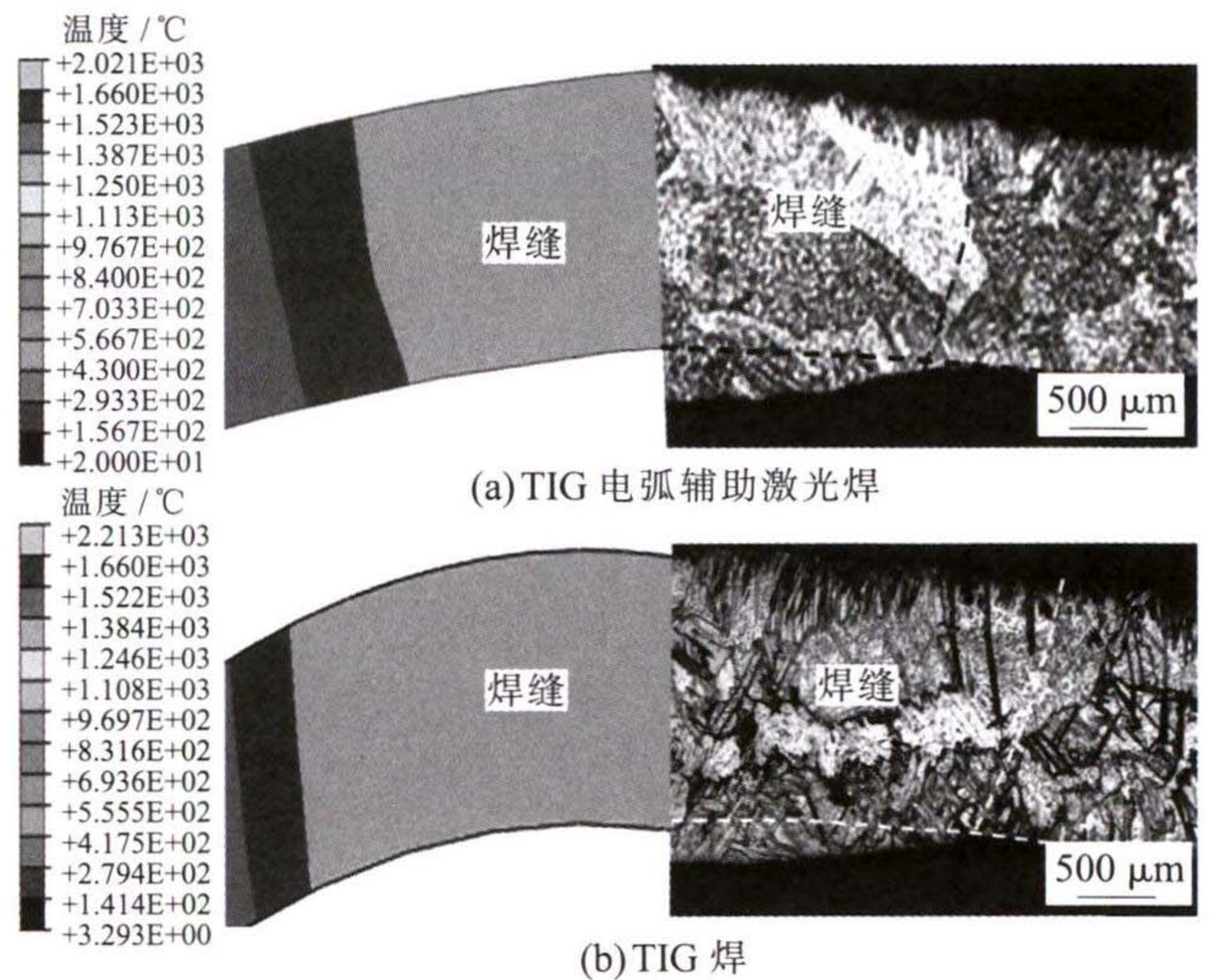


图 7 焊接接头模拟轮廓和实测结果对比  
Fig.7 Comparison between the simulated and measured cross-section of the joints

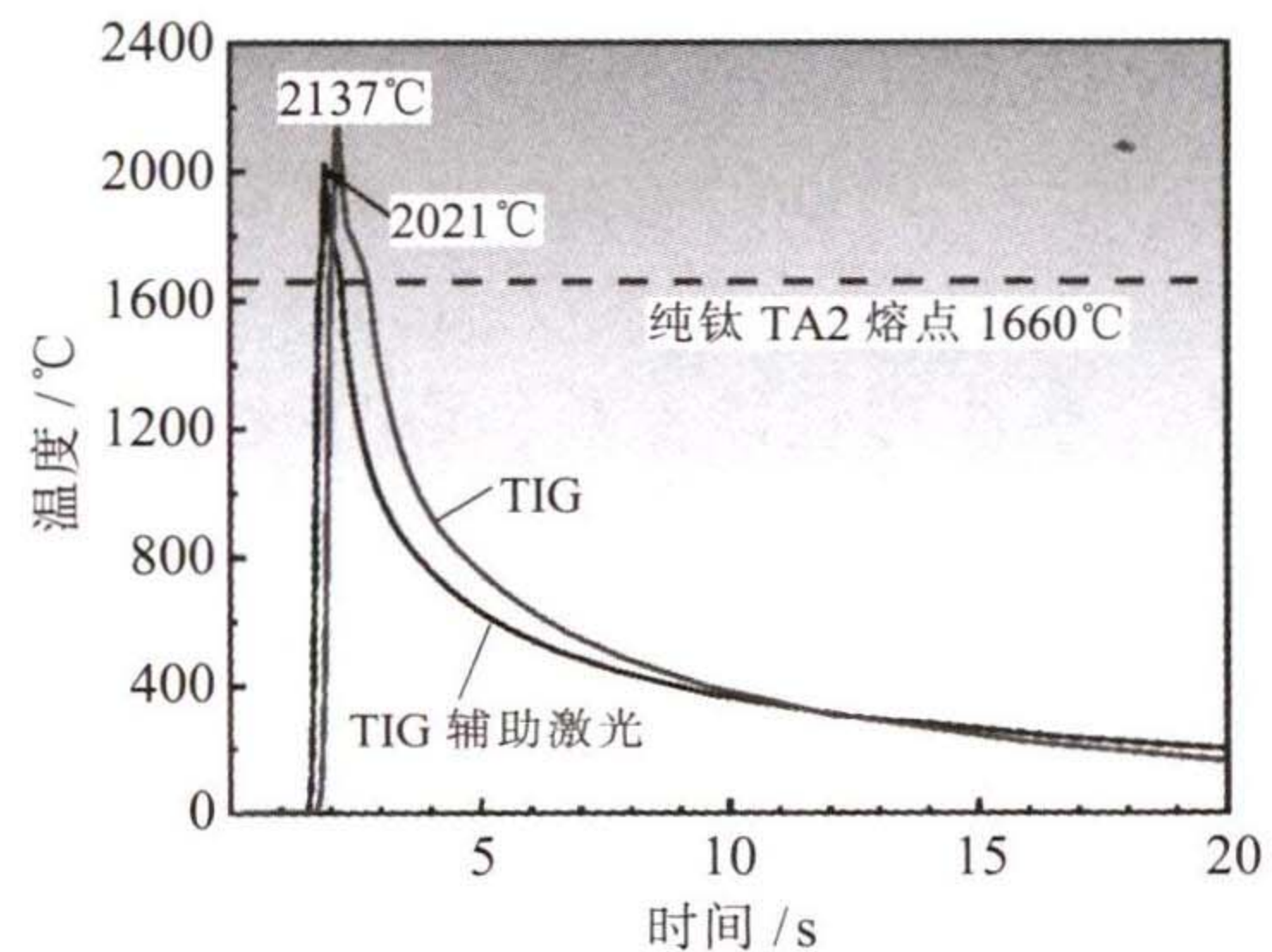


图 8 焊接接头中心的温度循环曲线  
Fig.8 Thermal cycle curves of the weld center

钛 TA2 薄壁直缝管时, 焊缝中心峰值温度为 2021°C, 低于 TIG 焊接的 2137°C, 这是因为 TIG 电弧辅助激光焊接时, 小电流的 TIG 辅助电弧只起到预热作用, 激光热源能量集中, 焊缝熔化区域小, 散热快。

对于 0.7mm 的纯钛 TA2 薄壁直缝管来说, 不考虑内外表面上残余应力的差别。图 9 对比分析

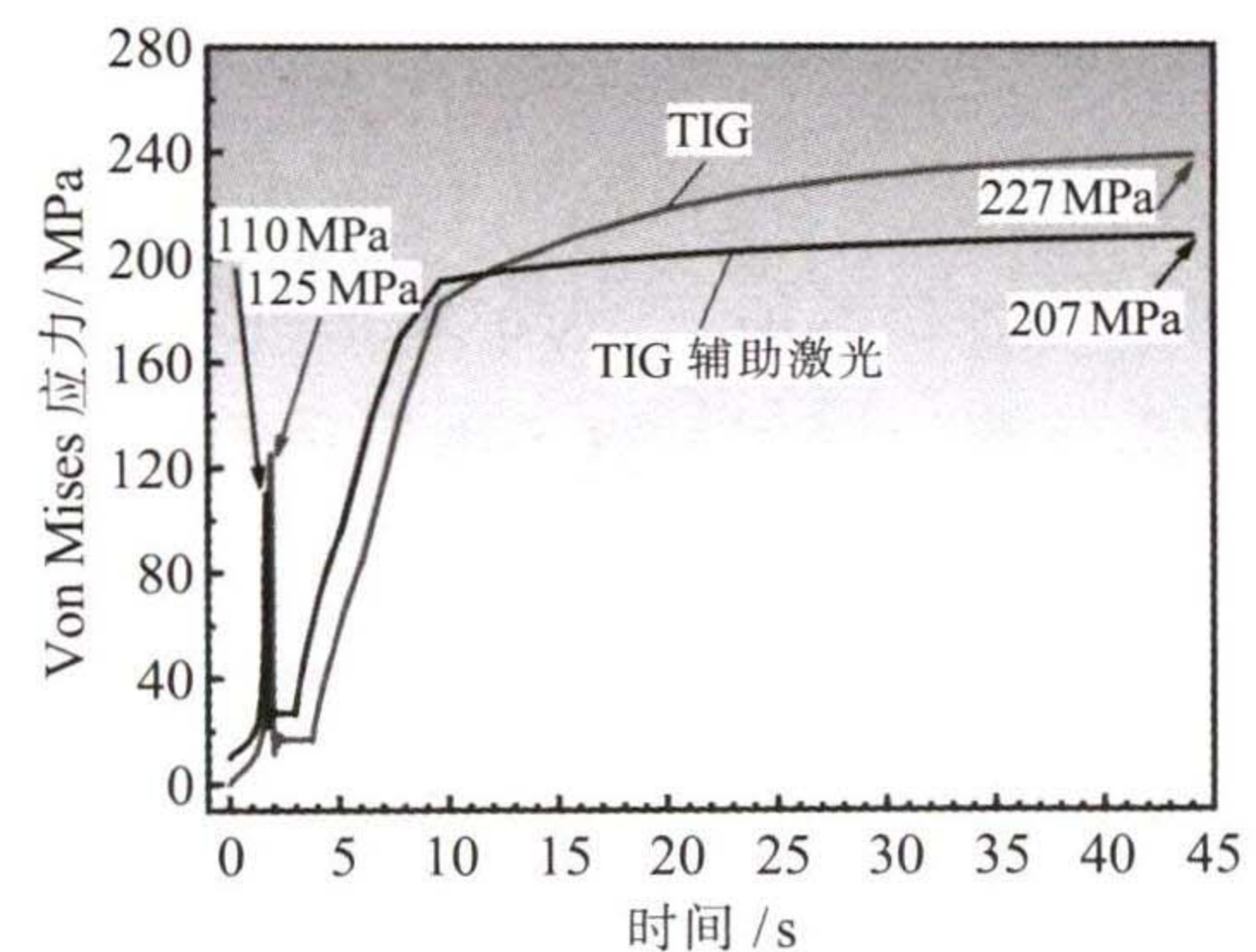


图 9 焊接接头中心的 Von Mises 应力变化  
Fig.9 Von Mises stress curves of the weld center

TIG 电弧辅助激光焊和 TIG 焊接纯钛 TA2 薄壁直缝管的焊缝中心 Von Mises 应力变化。焊接结束后,温度迅速降低,焊缝的 Von Mises 应力趋向一个稳定值,TIG 电弧辅助激光焊焊缝中心的 VonMises 应力为 207MPa,小于 TIG 焊的 227MPa。对于满足焊透要求的焊接接头,TIG 电弧辅助激光焊具有一定优势。

### 2.3 TA2 焊管的显微组织分析

图 10、11 分别给出了 TIG 电弧辅助激光焊和 TIG 焊接头的组织。图 10 (b)、图 11 (b)为靠近母材热影响区的组织,TIG 电弧辅助激光焊中锯齿状  $\alpha$  相变大,针状的  $\alpha$  相较少,TIG 焊为细条状的晶粒。图 10(c)、图 11(c)为熔合线处的组织,TIG 电弧辅助激光焊为相对较小的锯齿形  $\alpha$  相,晶粒内部包含了少量针状  $\alpha$  相,TIG 为粗大的锯齿形晶粒,并且晶界处具有明显的锯齿形特征。图 10(d)、11(d)为焊缝中心的组织,TIG 电弧辅助激光焊接头中,晶界为较小的锯齿形  $\alpha$  晶粒,晶粒内部包含了大量的针状  $\alpha$  相;TIG 为粗大的等轴晶,晶界处包含少量的细小锯齿形  $\alpha$  相。可以看出,两种焊接工艺得到的焊缝均焊透,TIG 电弧辅助激光焊焊缝区的宽度大大减小。但与 TIG 焊接头相比,TIG 电弧辅助激光焊焊缝中心的组织得到细化,晶粒细小,这与之前数值模拟所得的 TIG 电弧辅助激光焊熔池的最高温度低于 TIG 熔池的温度结果也吻合。

### 2.4 TA2 焊管的力学性能分析

参照 GB/T3625—2007《换热器及冷凝管用钛及钛合金管》标准,对两种焊接方法下纯钛 TA2 薄壁直缝管进行力学性能测试,拉伸试验结果如表 3 所示。TIG 电弧辅助激光焊纯钛 TA2 薄壁直缝管的拉

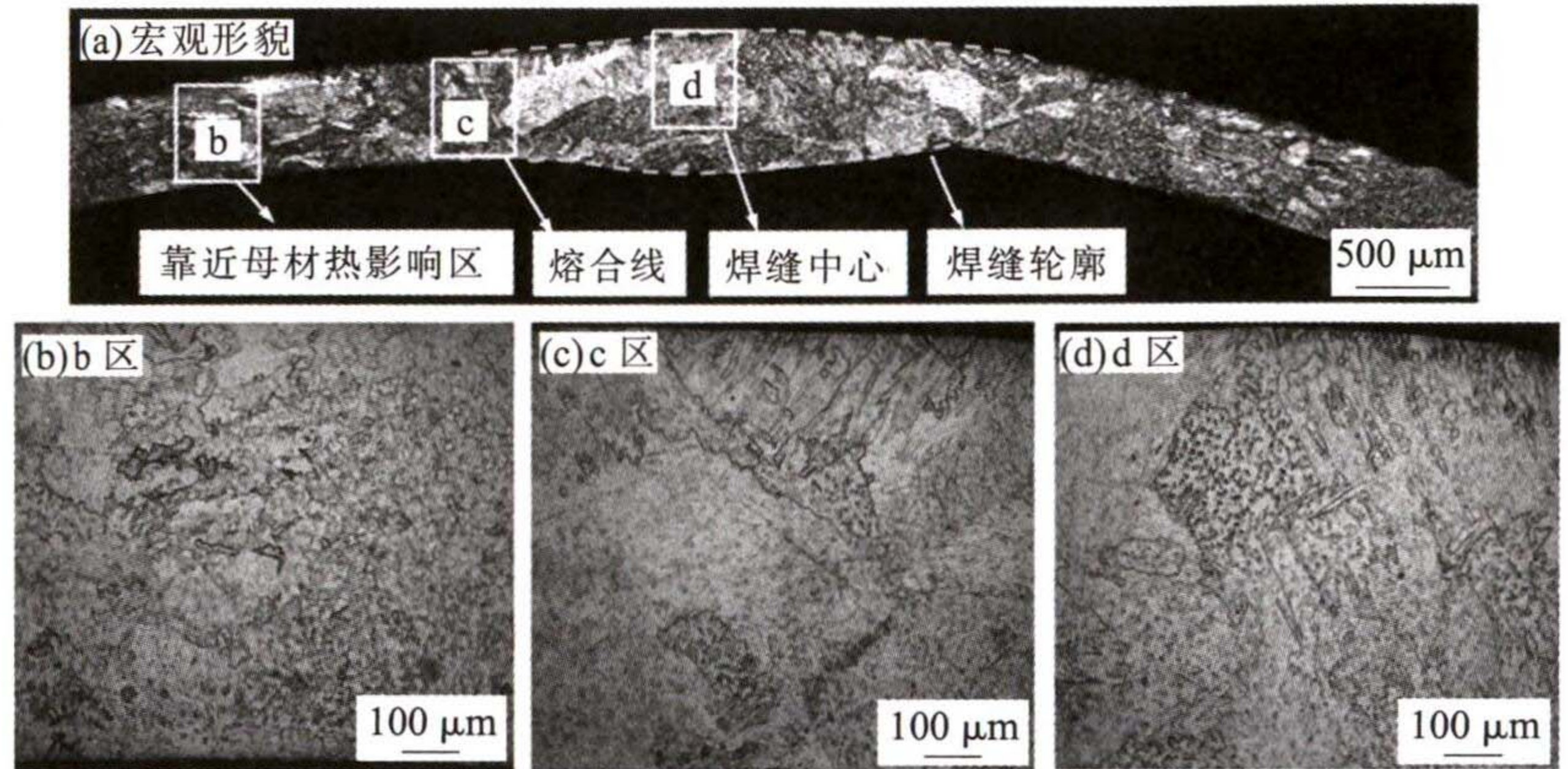


图 10 TIG 辅助激光焊接头的组织  
Fig.10 Microstructure of TIG-assisted laser welding joint

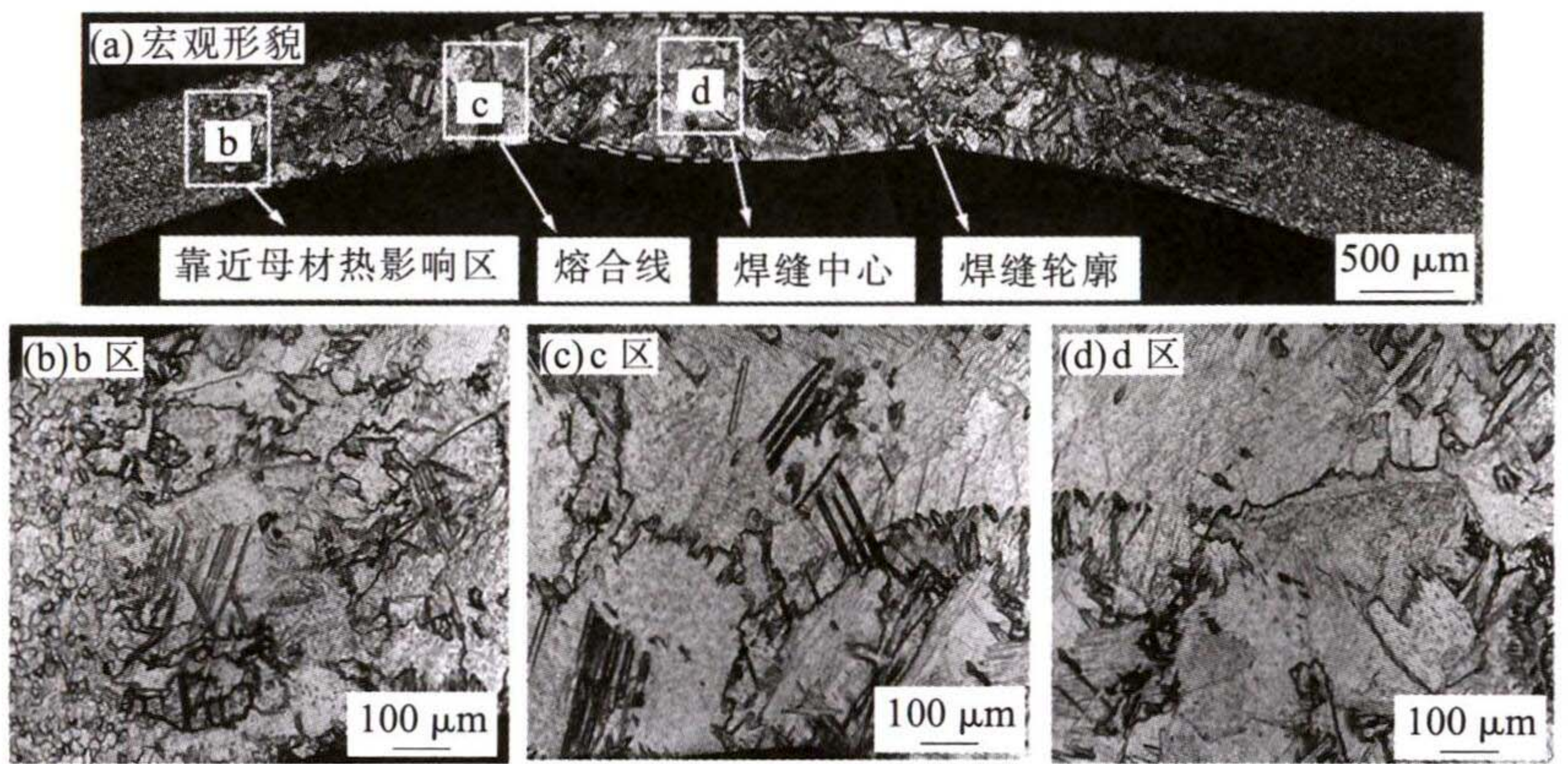


图 11 TIG 焊接头的组织  
Fig.11 Microstructure of TIG welding joint

表 3 直缝管的拉伸试验结果  
Tab.3 Tensile test results of the straight pipes

焊接方法	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
TIG 辅助激光焊	385	452	35
TIG 焊	355	456	36

伸、压扁和扩口试验后外观如图 12 所示。试验结果表明, $\phi 19\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}$ TIG 电弧辅助激光焊接头的屈服强度比 TIG 焊提高 30 MPa,进一步证明了 TIG 辅助激光焊接头冷却速度较快,接头获得细小组织。拉伸试样的断裂处具有明显的缩颈,压扁试验后焊缝处无裂纹,扩口试验扩大率为 22%,焊缝处未发现裂纹。

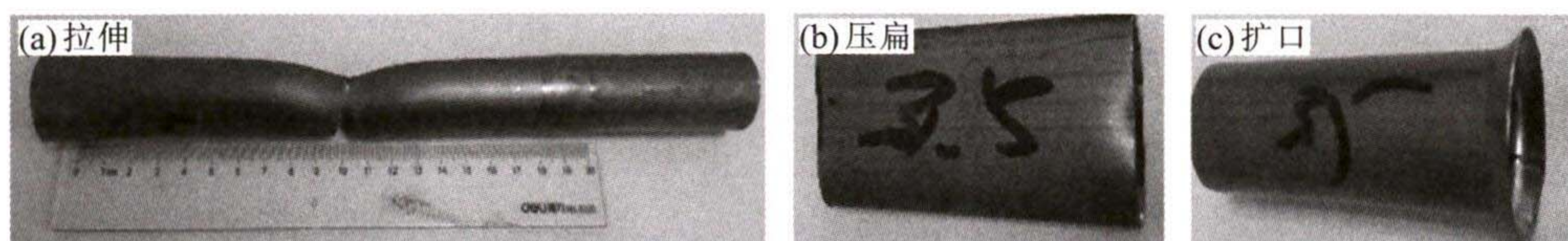


图 12 TIG 电弧辅助激光纯钛 TA2 薄壁焊管力学测试后的外观  
Fig.12 Appearance of TIG arc assisted laser welded TA2 thin-walled pipe after mechanical test

### 3 结论

(1) 采用 Abaqus 软件建立了 TIG 焊和 TIG 电弧辅助激光焊两种焊接方法有限元模型,对 TIG 焊选用双椭球体热源,对 TIG 电弧辅助激光焊选用高斯面热源、高斯旋转体热源的组合模型,模拟得到两种接头的焊缝轮廓与实际轮廓相近度极高,验证了模拟的准确性。


(2) 模拟得到 TIG 电弧辅助激光焊的焊缝中心温度低于 TIG 焊的;TIG 电弧在前的电弧辅助激光焊的焊后稳态时焊缝中心的 Von Mises 应力值为 197 MPa,小于 TIG 焊的 227 MPa。

(3) 采用 TIG 电弧在前的电弧辅助激光焊接工艺可以实现纯钛 TA2 薄壁直缝管的高质量焊接。焊缝中心及热影响区附近的显微组织较 TIG 焊的细小,屈服强度比 TIG 焊缝的高。

#### 参考文献:

- [1] 陈思杰,牛春莉. 钛及钛合金先进连接技术研究[J]. 热加工工艺,2015,44(3):18-21.
- [2] 孙文君,王善林,陈玉华. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术,2019,62(18):63-72.
- [3] Tsubulskiy I, Kuznetsov M, Akhmetov A. Effect of welding position and gap between samples on hybrid laser-arc welding efficiency [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,682:

35-40.

- [4] Ribic B, Palmer T A, Debroy T. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. International Materials Reviews, 2013, 54(4):223-244.
- [5] Song G, Diao Z, Lv X Z. TIG and laser-TIG hybrid filler wire welding of casting and wrought dissimilar magnesium alloy[J]. Journal of Manufacturing Process, 2018,34:204-214.
- [6] 马然,董韶喆,吴世凯,等. 薄板钛合金光纤激光-钨极惰性气体保护电弧复合焊接工艺研究[J]. 中国激光,2014,41(5):85-92.
- [7] 刘黎明,史吉鹏,王红阳. 低功率激光诱导电弧复合焊接钛合金薄板工艺研究[J]. 机械工程学报,2016,52(18):38-43.
- [8] 周洋,孔谅,王敏,等. 纯钛 TA2 薄板电弧辅助激光焊高速焊接过程的电弧和熔池特征行为研究[J]. 电焊机,2020,50(7):24-29.
- [9] 徐建新,明平伟. 钛合金焊接薄板残余应力有限元数值分析[J]. 中国民航学院学报,2006,24(S1):33-35.
- [10] 李兴霞,王红玉,张建勋. TC4 钛合金激光焊缝形貌与残余应力数值研究[J]. 稀有金属材料与工程,2014,43(4):911-915.
- [11] 付康. TC4 钛合金薄壁圆管对接激光焊焊接变形数值模拟[J]. 内江科技,2020(7):17-18.
- [12] 周洋. 基于电弧辅助的 TA2 薄板激光焊工艺与接头性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [13] Chukkan J R, Vasudevan M, Muthukumaran S. Simulation of laser butt welding of AISI316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219:48-59. 

(上接第 134 页)

#### 参考文献:

- [1] 马志宝. 火电厂高温高压管座结构形式分析[J]. 内蒙古电力技术,2017,35(4):73-76.
- [2] 苗兴伟. 火力发电厂高温高压管道的管座焊接[J]. 设备管理与维修,2017(19):66-67.
- [3] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990:30-180.
- [4] 龚德平. T91 钢与 12Cr1MoV 钢的管管 TIG 焊对接接头组织和性能研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2018.
- [5] 魏昭祯,杨少红. 基于 ANSYS 的铝合金 T 型接头数值模拟分析[J]. 热加工工艺,2019,48(21):156-159.

- [6] 李智钟,周建平,许燕,等. 基于 Sysweld 的 T 形管焊接件温度及应力应变场数值模拟分析 [J]. 焊接学报,2016,37(4):77-80.
- [7] 葛可可,陈凤林,侯春明,等. 钛合金厚板窄间隙焊接残余应力模拟研究[J]. 热加工工艺,2020,49(13):132-135.
- [8] 黄本生,陈权,杨江,等. Q345/316L 异种钢焊接残余应力与变形数值模拟[J]. 焊接学报,2019,40(2):138-144.
- [9] 余成,刘乾. 核岛反应堆压力容器大直径接管马鞍形焊缝焊接工艺[J]. 电焊机,2016,46(11):38-44.
- [10] 任晋宇,徐得志,吴亮,等. 舰艇典型分段焊接工艺仿真及其变形规律分析[J]. 船舶工程,2020,42(7):100-106. 