













图4 加热 1.5 和 2.0 s 时焊接电弧温度场和熔池形状的计算结果

Fig.4 Calculated weld arc temperature distributions and weld pool shapes for heating times of 1.5 s (a) and 2.0 s (b)

可见,随着加热时间的延长,熔池体积不断增大,但电弧的温度分布变化并不大,这说明当焊接电流较小时,熔池自由表面形状的变化对焊接电弧温度场的影响很小.这与其他研究者给出的结果是一致的<sup>[14]</sup>.

#### 4 结论

(1) 根据实际 GTA 焊接成形特点,建立了定点 GTA 焊接过程电弧 / 熔池系统的统一数学模型,该模型反映了熔池自由表面变化对焊接电弧和熔池系统热物理参量场的影响.

(2) 数值计算中采用了电弧和熔池两子系统不断循环迭代求解的计算策略,并将熔池表面形状确定方程作为迭代求解的约束条件,根据计算所得的表面形状,不断重新构造计算域网格,更新计算域形状,实现电弧与熔池系统的双向耦合.

(3) AISI 304 不锈钢材料的定点 GTA 焊接过程的数值分析和实验验证表明,当焊接电流较小时 ( $I \leq 200A$ ),熔池自由表面形状的变化对焊接电弧温度场的影响很小.因此在焊接电弧和焊接熔池的数值模拟中可采用刚性表面假设.这样可大大简化计算过程,提高计算效率.

感谢澳大利亚 CSIRO 应用物理部 A.B.Murphy 教授提供了有关 Ar 等离子体热物理性能数据.

#### 参考文献

[1] Choo R T C, Szekely J, Westhoff R C. *Metall Trans*, 1992; 23B: 357  
 [2] Kim W H, Fan H G, Na J S. *Metall Trans*, 1997; 18B: 679

[3] Lowke J J. In: Ushio M ed, *Proceedings of International Symposium on Theoretical Prediction In Joining and Welding*, Joining and welding Research Institute, Osaka University, 1996: 1  
 [4] Choo R T C, Szekely J, Westhoff R C. *Metall Trans*, 1992; 23B: 371  
 [5] Fan H G, Kovacevic R. *J Phys D: Appl Phys*, 1998; 31: 2929  
 [6] Lei Y P, Shi Y W, Murakawa H, Ueda Y. In: Cerjak L, Bhadeshia H eds, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4*, Book695, The Institute of Materials, London, 1998: 89  
 [7] Kim W H, Fan H G, Na S J. *Numer Heat Transfer*, 1997; A32: 633  
 [8] Goldak J, Bibbt M, Moore J, Patel B. *Metall Trans*, 1986; 17B: 587  
 [9] Tao W Q. *Calculation of Heat Transfer*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995: 507  
 (陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1995: 507)  
 [10] Lei Y P, Shi Y W. *Numer Heat Transfer*, 1994; B26: 455  
 [11] Murphy A B, Arundell C J. *Plasma Chem Plasma Proc*, 1994; 14: 451  
 [12] Lei Y P. *Ph D Thesis*, Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1994  
 (雷永平. 焊接熔化与凝固过程数值模拟, 博士学位论文, 西安交通大学, 1994)  
 [13] Zacharia T, David A S, Vitek J M, Debroy T. *Weld J*, 1989; 69: 499s  
 [14] Winkler C, Amberg G, Inoue H, Koseki T. In: Cerjak L, Bhadeshia H ed, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4*, Book695, The Institute of Materials, London, 1998: 37