

## 焊接过程三维应力变形数值模拟研究进展

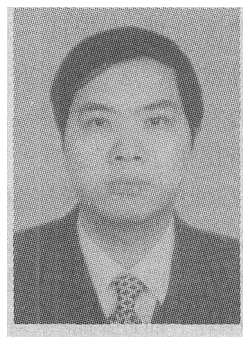
张建强<sup>1,2</sup>, 赵海燕<sup>1</sup>, 吴 甦<sup>1</sup>, 鹿安理<sup>1</sup>, 蔡志鹏<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 武汉大学 材料工程系, 武汉 430072)

**摘 要:** 焊接非平衡加热、冷却过程导致产生焊接应力与变形,严重影响焊接过程及结构的服役行为,是焊接结构生产制造过程中必须解决的关键技术问题之一。作者对目前国内外焊接过程中焊接应力与变形的数值模拟研究及工程应用进行了分析。结合研究小组的研究工作,对大型复杂结构焊接过程中三维焊接应力变形数值模拟存在的困难、需要解决的主要技术问题进行了评述,并介绍了几个工程应用实例。

**关键词:** 焊接应力; 焊接变形; 三维数值模拟

**中图分类号:** TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2003)05-91-06



张建强

### 0 序 言

焊接非平衡加热、冷却过程产生的焊接应力与变形,不仅影响焊接结构的制造精度,而且对结构的服役性能产生重大影响。焊接应力和变形一直是焊接领域广泛关注和研究的课题之一。为此广大焊接工作者开展了长期、大量深入的研究工作,取得许多重要成果,并在焊接结构生产中得到了广泛应用。但是由于焊接过程的复杂性及影响因素较多,因而准确获得焊接应力和变形的分布规律并加以调节和控制相当困难,而数值分析方法和计算机技术为解决焊接应力与变形问题提供了可行途径<sup>[1]</sup>。

利用计算机研究焊接应力和变形问题始于20世纪60年代,主要研究一维焊接应力的产生机制<sup>[2]</sup>。20世纪70年代以来由于有限元技术的发展,数值模拟方法在焊接应力变形中的研究和应用日益广泛,但基本上是针对二维问题<sup>[3,4]</sup>。在大多数情况下,焊接应力变形是三维问题,特别是现代焊接结构越来越大型复杂化,而且还存在许多不确定因素<sup>[5-13]</sup>。虽然有些可以简化为二维问题分析,但是在实际工程中真正可以简化的例子并不多,因此三维焊接应力变形模拟是必然趋势。

目前对于复杂和大型焊接结构的应力与变形的预测还存在许多困难,主要表现为数值模拟中结构的自由度规模庞大;材料高温性能参数缺乏,以及材

料性能的严重非线性变化严重影响了求解过程的精度和效率;焊接过程的复杂性导致在精确的数值模拟过程中计算工作量很大<sup>[14-17]</sup>。目前制造业数值模拟及仿真分析的发展趋势是建立尽可能精确的模型,获得精确的结果,进而全面科学地分析过程的本质。焊接应力与变形数值模拟同样面临相同的问题,其发展趋势也应是在建立精确模型的基础上,获得焊接应力与变形的物理本质及规律,从而为工程预测和控制提供坚实技术基础<sup>[17]</sup>。要将焊接应力与变形数值模拟技术全面运用于实际生产并用来指导工艺设计、制订和优化焊接工艺还有许多问题需要解决,并且大型复杂结构焊接应力和变形的数值模拟过程中还存在许多困难,相应研究工作和成功的实例较少。随着计算机硬件环境的不断提高,软件技术和数值模拟方法的改进,大型复杂结构的焊接应力和变形预测可望成为现实,但在目前硬件和软件条件下,仍有许多问题亟待解决。作者在国内研究工作的基础上,结合课题组近年来在该领域所进行的研究工作,就大型复杂结构焊接过程中三维应力变形数值模拟存在的问题和进展进行分析。

### 1 热源模型

#### 1.1 高斯热源模型

热输入是焊接过程的重要边界条件,高斯热源描述了距热源斑点为 $r$ 的点的热流密度 $q(r)$ 为

$$q(r) = q_m \exp(-Kr^2), \quad (1)$$

式中: $q_m$ 为加热斑点中心的最大热流密度( $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ); $K$ 为能量集中系数。

收稿日期: 2002-12-27

基金项目: 国家计委产业化前期关键技术研究项目(计高技[1998]2077号);清华大学985重点项目

\* 参加此项研究工作的还有王 煜

由于焊接热源在时间和空间上分布不均匀,要求空间上模拟焊接热源的区域需要用极细的网格,时间上需要分成很细的时间步,才能比较精确地模拟焊接过程。在焊缝较长特别是实际复杂构件的焊接时,模拟计算的规模和所需的计算时间会急剧增加,使实际构件焊接过程的模拟难以实现。Cai Z<sup>[18]</sup>等将移动的高斯点热源分段化,作为分段带状高斯热源处理,在保证一定精度的前提下,大大提高了计算效率。这种简化的热源模型可有效地进行焊接应力变形的模拟计算,为大型实际焊接结构的数值分析提供了可能。

### 1.2 Goldak 双椭球热源模型

双椭球模型<sup>[19]</sup>所描述的热流输入分布在一定的体积内。模型考虑焊接中的“挖掘”“搅拌”作用,特别适用于描述高能束焊接,如电子束焊、激光焊等深宽比较大的深熔焊接过程的热输入,见图 1。

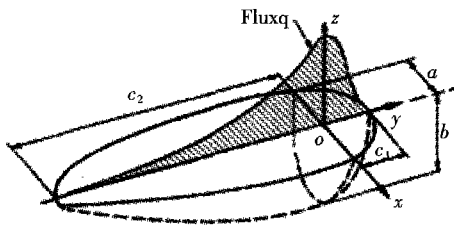


图 1 双椭球体热源模型

Fig. 1 Double ellipsoid model of heat source

椭球沿  $y$  轴前半部分的热流密度为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1 \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3z^2/b^2} e^{-3[y+v(\tau-t)]^2/c_1^2} \quad (2)$$

而椭球沿  $y$  轴后半部分的热流密度为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_2 \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3z^2/b^2} e^{-3[y+v(\tau-t)]^2/c_2^2} \quad (3)$$

式中:  $a, b, c_1, c_2$  为热源形状参数( $m^3$ );  $Q$  为热输入功率(W);  $f_f, f_r$  为前后部分的能量分布参数。

模型分成前后长度不同的两部分,是为了能更好地反映出焊接过程中移动热源的前端和后端不同的温度梯度分布(前端较陡,后端较缓)。在一般计算时,作为简化处理,取  $c_1 = c_2 = c$ 。热源可由统一方程描述为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3z^2/b^2} e^{-3[y+v(\tau-t)]^2/c^2} \quad (4)$$

同样,由于在大型复杂结构焊接应力变形的模拟过程中,采用双椭球热源模型时计算工作量大,效

率低,也可将双椭球热源进行分段化处理,模拟效率大大提高。

## 2 三维焊接应力变形数值模拟技术

### 2.1 动态可逆自适应网格生成技术<sup>[20]</sup>

由于目前有限单元法在焊接数值模拟中占据了主导地位,并且逐步从一维发展到三维。因此网格生成技术对于提高计算效率和精度具有重要影响。由于在焊接过程中,只有焊缝附近经历了快速的温度变化,而采用动态可逆自适应网格划分方法,在指定区域内的网格划分较密,而其它的区域网格划分较粗,并且指定的区域随焊接热源同步移动,其原则为进入热源的区域自动变密,离开此区域网格自动变粗,恢复到原始状态。因此网格的划分和运算工作量大大减少,从而使计算效率得到提高,一般缩短约 1/3 左右的计算时间。动态可逆自适应网格划分的关键技术为网格划分判据的设置;网格细分功能的启动;新旧网格间的数据传递。

### 2.2 并行计算技术<sup>[17]</sup>

采用并行计算技术是解决焊接数值模拟中计算工作量庞大、计算时间长的有效途径之一。且在提高计算效率的同时,能保证必要的计算精度。目前并行系统有两类,单机并行和分布式并行系统。在单机并行环境(Origin2000 服务器)下,应用商用软件 MARC 对并行计算的效率进行了对比分析,结果见表 1。由表 1 可以看出,加速比与中央处理器(CPU)个数相差无几,加速性能极为优越,随着 CPU 个数的增加,并行计算的优越性更加明显,但对于单机并行系统,所用 CPU 个数受到数据通讯和进程调度相关的体系结构的限制。在分布式并行系统中,计算时间并不随 CPU 个数的增加而单调减少,采用 Direct profile 和 Direct sparse 时这种现象尤为明显,采用 6 个 CPU 时计算时间最短,随后呈现出上升趋势,采用 Hard-ware sparse 求解器时,计算时间逐步减少,到 15 个 CPU 时趋于稳定。在分布式并行系统中,受数据通讯速度的限制,并行加速效

表 1 不同类型求解器与 CPU 匹配下的加速比

Table 1 Speedup ratio of different solvers and CPU matching

Solver	1CPU	2CPU	3CPU	4CPU
Direct sparse	1	2.02	3.01	3.94
Iterative sparse	1	1.86	2.67	3.52
Hardware sparse	1	2.11	3.10	3.99
Direct profile	1	1.94	3.00	4.32

果存在一个最佳值。由于分布式并行处理系统具有高性能价格比和机动灵活等特点,随着数据通讯技术的提高和完善,分布式并行系统的计算效率将有很大的发展空间,可望在短时间内得到迅速发展。

### 2.3 材料高温性能参数的处理<sup>[16,21]</sup>

材料的高温性能参数对焊接过程数值模拟的精度和计算效率均有较大影响,目前材料高温性能参数方面的数据较少;其次在熔化、半熔化状态下,材料的力学性能参数非常低,必然导致有限元刚度矩阵的奇异性增加,解的收敛性和稳定性变差,计算时间相应增加,有时会出现“锁死”现象,高温区的存在还会使得弹塑性模型不能精确描述材料的本构关系。通过采用4种材料模型,研究了不同材料高温性能参数对计算结果和时间的的影响。4种模型中,600℃以下时材料的屈服强度均相同,其差别在于高温区内的性能。计算结果表明,如果将接近熔点温度区间的材料屈服极限提高到8.7~10 MPa,即对材料高温性能进行适当调整,可明显提高计算效率,而对计算精度的影响很小。

### 2.4 焊缝金属熔敷过程的描述<sup>[7,22]</sup>

在进行焊接过程数值模拟时会经常遇到多层焊和焊缝金属的熔敷现象,解决这一问题的方法是采用单元死活技术,在分析过程中将不考虑“死”单元的存在。这种技术可以通过使单元变“死”而有效地将这些单元所在的材料从模型中消去,在适当的时候激活这些单元则可以使这些单元处的材料重新参与分析。在焊接过程中,随着热源的移动,填充金属和母材熔化形成熔池,这个过程的实现方法是,在划分网格时将焊缝划成独立的单元,并且在焊接前定义为“死”单元。模拟焊接过程时,焊缝处的单元按顺序被激活,与焊缝的填充过程同步,从而减少了单元数量,提高了模拟效率。

### 2.5 分段移动热源<sup>[23]</sup>

焊接热源在时间和空间上分布极不均匀,因此在空间上模拟焊接热源的区域需采用很细的网格,时间上分成很细的时间步,才能比较精确地模拟焊接过程。在焊缝较长特别是在模拟实际大型复杂结构的焊接过程时,运算的规模和计算时间急剧增加,使问题的求解难以实现,因此对焊接热源进行适当的简化,在保证一定精度的前提下,提高计算效率,对于焊接过程数值模拟具有非常重要的理论和实际意义。

对于一条焊缝,如果焊接热源的移动速度足够快,那么焊缝上施加的热源就可以近似变换为一等效的、提前一定时间作用的带状热源(垂直于运动方向的带条上呈高斯分布的热源)。对于具体焊接结构和某一焊速的移动热源,总存在一特定焊缝长

度(假设为 $a$ ),在此长度之内,移动热源可以近似处理成带状热源(图2),那么对于长度为 $l$ 的焊缝,就可以被分为 $n$ 段长度为 $a$ 的带状热源,并且在焊缝长度方向上顺序施加。当 $n$ 趋向无穷大时,则分段化的带状热源就成为移动的高斯圆形热源。

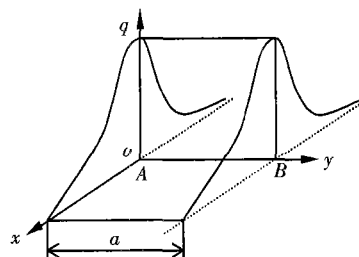
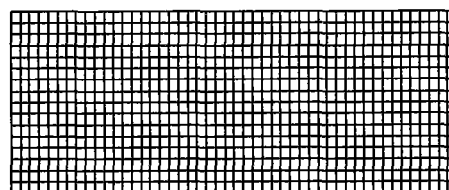


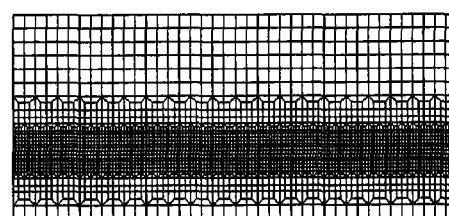
图2 带状高斯分布热源模型

Fig. 2 Heat source model of zonal Gaussian distribution

为了比较移动热源分段处理后的计算精度和效率,对尺寸为480 mm × 180 mm的平板堆焊过程进行了数值模拟。计算采用了粗、细两种不同的网格(图3),单元数分别为608和3 240。分别计算了移动热源和分段带状热源的情况,计算方案如表2所示。所用的单元为4节点壳元,板厚为6 mm;材料为16Mn,其物理特性和力学性能随温度非线性变化。



(a) Fine mesh (nodes: 3 308)



(b) Coarse mesh (nodes: 833)

图3 计算时采用的粗细不同的两种网格划分方案

Fig. 3 Two kinds of mesh schemes used in calculation

数值模拟表明,使用细网格时,分段热源计算的焊接残余变形和残余应力与移动热源相比均差别不大,能够满足数值模拟的要求;在粗网格情况下,采用足够多的分段数,对焊接残余变形的模拟结果与移动热源相比也是较吻合的,但焊接残余应力的结果却差得较多。这是因为焊接残余应力在焊缝及其附近区域的变化大、梯度大,网格足够细才能表现出焊接残余应力的变化;而变形可以看作是应力对长

表 2 不同网格和热源分段下的计算方案  
Table 2 Calculation schemes of different mesh and heat subsection

Heat source	Fine mesh	Coarse mesh
Moving	(1) Moving	(3) One segment (4) Two segments ( each segment is 240 mm)
Segment	(2) One segment	(5) Three segments ( the first is 120 mm, the second is 240 mm, the third is 120 mm)

度的积分,与结构形式有很大关系,由于各部分变形协调的影响,结构的焊接残余变形反映整体的相对位移的变化,所以变形的模拟对网格尺寸的变化并不

敏感(和残余应力相比)。对于一定长度的焊缝,段数分得越多,分段热源计算出的结果和移动热源的结果越接近。

表 3 比较了采用不同的计算方案所用的计算时间。SP2 表示 IMB 的 SP2 分布式并行系统,用到了 12 个 CPU;Origin 是指 Origin2000 服务器,用到了其中的 3 个 CPU。由表 3 可以看出,与移动热源相比,分段热源可大幅度减少计算时间,提高计算效率,尤其在使用粗网格的情况下,效果尤其明显。表 3 中,12 个 CPU 的细网格移动热源所需的计算时间为 48.5 h,而采用粗网格带状热源(分 3 段),保证一定的计算精度,使用 3 个 CPU 的计算时间只有 0.3 h,所需计算时间约为原来的 1/160。

表 3 不同的计算方案所用计算时间的比较  
Table 3 Calculation time comparison used different schemes

Computer schemes	Moving fine mesh	One segment fine mesh	Coarse mesh ( three segments)	Coarse mesh ( two segments)	Coarse mesh ( one segment)
Computer-type	SP2	SP2	Origin	Origin	Origin
CPU numbers	12	12	3	3	3
Computer time(h)	48.5	5.77	0.311	0.286	0.251

因此采用分段移动热源模型可大幅度提高焊接结构三维数值分析的计算效率。计算表明,分段移动热源和传统的高斯移动热源相比,在焊缝区域使用细网格时,应力和变形均吻合得很好;使用粗网格时,能较好地模拟焊接变形,但焊缝及其附近区域的残余应力则有较大的差异。

2.6 相似理论在焊接变形数值模拟中的应用<sup>[24]</sup>

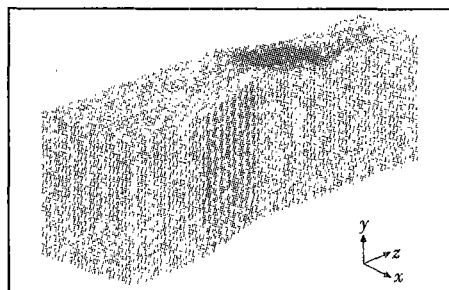
由于焊接过程的复杂性,用数值方法模拟复杂实物的可行性受到一定的限制,而利用数值模拟和物理模拟相结合的方法优化焊接工艺是焊接工程中的重要发展方向。因而利用物理模拟中的相似关系对实物经过一定的转换从而减小问题的复杂性,并对焊接过程进行数值模拟,然后将所得结果变换到实际结构中,则是一种较为可行的方法。有限元和试验研究表明,数值模拟的温度场、应力和应变场和利用相似原理获得的结果完全吻合,因此通过模拟件可以推知实际构件的应力和应变。但是目前利用相似原理和数值模拟相结合研究焊接应力变形还存在一些困难,一是在减小结构尺寸的同时热源的几何尺寸也要相应减小,导致物理模拟困难。其二是为了准确描述温度场,有限元网格相应要加密,因此模拟件上网格和结点数与原结构相同,数值模拟工作量并未减少。在以后的工作中,可以通过对热源进行简化,适当加大单元尺寸,以减少运算量,在保证计算精度的同时,提高计算效率。

3 工程应用实例

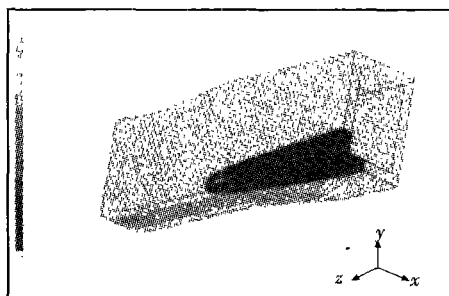
3.1 大型挖掘机斗杆焊接应力数值模拟<sup>[13]</sup>

由于采用传统的焊后热处理,国产大型挖掘机斗杆在使用过程中经常发生早期断裂,随着钢材强度级别的提高,主要通过严格控制焊接工艺而不是靠焊后热处理来保证焊接结构的使用安全性已成为发展趋势。美国 and 德国已实施焊后不进行热处理的制造工艺仍然可以保证焊接结构的可靠运行。因此通过控制材料成分、优化焊接工艺参数与焊接顺序,从而控制结构中的焊接残余应力,以达到国产高强度钢焊接结构焊后不进行热处理具有十分重要的理论意义和工程价值。在采用单元激活技术和移动热源边界条件精确描述多层焊焊缝金属的熔敷及移动热源基础上,在 SGI 公司的 Origin2000(4CPU)上采用 MARC 大型通用非线性有限元分析软件和高效并行计算技术。在分析中采用热弹塑性理论,考虑了材料的物理性能和力学性能随温度的变化以及相变对温度场和应力场的影响,采用 Von Mises 屈服准则,在整个数值模拟过程中采用弱耦合解法,仅仅考虑温度场对应力场的影响而不考虑应力场对温度场的影响,并且假定焊接热源遵循高斯分布。分别研究了高(8.5 kJ/cm)、中(6.5 kJ/cm)、低(5.5 kJ/cm)三种焊接热输入条件下斗杆上焊接残余应力的分布。同时模拟了 4 条主焊缝焊接顺序对焊接残余应力的

影响,图4为网格和温度场计算模型。研究发现,斗杆箱形结构中4条主焊缝采用不同焊接顺序时,结构的拘束度有很大的变化,因此导致盖板和腹板上横向残余应力的分布存在很大的差异。在数值模拟过程中,通过不同的边界条件模拟了拘束度对主焊缝焊接时残余应力分布情况的影响,并结合物理模拟提出了推荐采用的焊接线能量、焊接顺序及工艺措施。



(a) Mesh model of different section



(b) Welding temperature field

图4 挖掘机斗杆的计算模型和温度场

Fig.4 Calculation model and temperature field of box-pole

### 3.2 大型桥式起重机主梁焊接数值模拟<sup>[25]</sup>

三峡工程用大型桥式起重机单钩起重量达1 200 t,是目前世界上单钩起重量最大的起重机,主梁全长35 m,两端支点间距33.5 m,高3.5 mm,宽2.7 m,主梁横截面积和结构的刚性很大,制造过程中对主梁的焊接变形要求很严格,由于影响焊接变形的因素很多,因而控制主梁的焊接变形十分困难。清华大学与太原重型机械集团公司合作采用数值模拟和实际测量相结合,通过建立合适计算模型,如图5

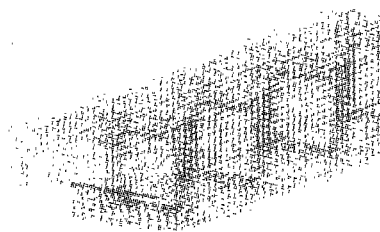


图5 主梁的局部网格划分模型

Fig.5 Local mesh model of main beam

所示,采用分段移动热源、多CPU并行计算、相似理论等方法研究了在装配、焊接过程中主梁挠度的变化及焊后残余挠度值,得到了主梁焊接变形的变化规律及数值。结果表明,数值模拟结果和实测结果一致,并将主梁的焊接变形控制在技术要求范围内。

## 4 结束语

由于焊接过程的复杂性以及焊接结构三维数值模拟中自由度大、计算效率低、计算精度难以保证等特征。通过介绍近年来三维焊接应力变形数值模拟研究现状,并结合研究小组在该领域所进行的研究工作,对已取得的进展及关键问题进行了分析。采用合适的热源模型和动态可逆自适应网格生成技术可以减少网格和结点数目,在保证计算精度的同时,可大大提高运算效率;通过适当调整材料高温性能参数有利于有限元解的收敛性,提高计算效率;利用单元“死活”技术描述多层焊及焊缝金属的熔敷;利用并行计算技术可提高焊接数值模拟的计算效率;在焊接物理模拟过程中采用相似理论可以有效减小模拟件的几何尺寸,减少结构的自由度和计算工作量;采用上述提高焊接数值模拟效率的方法,在保证计算精度的条件下,可以有效提高计算效率。但是将三维焊接过程数值模拟技术广泛运用于工程实际,仍然需要进一步提高计算效率和保证计算精度。

## 参考文献:

- [1] Masubuchi K. Prediction and control of residual stress and distortion in welded structures [A]. Proceedings of the international symposium on theoretical prediction in joining and welding [C]. Osaka, Japan, 1996. 71 ~ 88.
- [2] Tall L. Residual stress in welding plates - a theoretical study [J]. Welding Journal, 1964, 43(1): 10s ~ 23s.
- [3] Masubuchi K. Application of numerical analysis in welding [J]. Welding in the World, 1979, 17: 11 ~ 12.
- [4] Ueda Y, Yamakawa T. Analysis of thermal elastic - plastic stress and strain during welding [J]. Trans Japan Welding Soc, 1971, 2(2): 90 ~ 100.
- [5] Ueda Y, Fukuda K. A new measuring method of three dimensional stress based on theory of inherent strain [J]. Trans. JWRI, 1979, 8(2): 89 ~ 96.
- [6] Karlsson R I, Josefson B L. Three-dimensional finite element analysis of temperature and stress in a single-pass butt-welded pipe [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1990, 112(1): 76 ~ 78.
- [7] Lindgren L E, Runnewalm H, Nasstrom M O. Simulation of multi-pass welding of a thick plate [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 44(9): 1301 ~ 1316.
- [8] Tso-Liang Teng, Chih-Cheng Lin. Effect of welding conditions on

- residual stresses due to butt welds[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(12): 857 ~ 864.
- [9] Tso-Liang Teng, Peng-Hsiang Chang. Three-dimensional thermomechanical analysis of circumferentially welded thin-walled pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(3): 237 ~ 247.
- [10] Wang J, Ueda Y, Murakawa H, et al. Improvement in numerical accuracy and stability of 3-D FEM analysis in welding[J]. Welding Journal, 1996, 75(4): 129s ~ 134s.
- [11] 汪建华, 陆皓. 焊接结构三维热变形的有限元模拟[J]. 上海交通大学学报, 1994, 28(6): 59 ~ 65.
- [12] Khaled Abdel-Tawab, Ahmed K, Noor. Uncertainty analysis of welding residual stress fields[J]. Comput. Methods Appl Engng, 1999, 179(3/4): 327 ~ 344.
- [13] 鹿安理, 史清宇, 赵海燕. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟[J]. 中国机械工程, 2001, 12(2): 183 ~ 186.
- [14] Lindgren L E. Finite modeling and simulation of welding. part 1: increased complexity[J]. Journal of Thermal Stress, 2001, 24(2): 141 ~ 192.
- [15] Lindgren L E. Finite modeling and simulation of welding. part 3: efficiency and integration[J]. Journal of Thermal Stress, 2001, 24(4): 305 ~ 334.
- [16] Shi Q Y, Lu A L, Zhao H Y, et al. Effect of material properties at high temperature on efficiency and precision in numerical simulation for welding process[A]. International conference on computational engineering science[C]. 2000. 655 ~ 660.
- [17] 鹿安理, 史清宇, 赵海燕, 等. 焊接过程仿真领域的关键技术问题及其探索性研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1, 2): 201 ~ 206; 201 ~ 205.
- [18] Cai Z, Lu A, Zhao H. Line gauss heat source model: an efficient approach for numerical welding simulation[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 6(2): 84 ~ 88.
- [19] Goldak J, Chakravarti. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15B(2): 299 ~ 305.
- [20] Shi Q Y, Lu A L, Zhao H Y, et al. Development and application of adaptive mesh technique in three dimensional numerical simulation of welding process[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letter), 2000, 13(1): 33 ~ 39.
- [21] Lindgren L E. Finite modeling and simulation of welding. part 2: improved material modeling[J]. Journal of Thermal Stress, 2001, 24(3): 195 ~ 231.
- [22] Zhao H Y, Lu A L, Shi Q Y, et al. Simulation of welding process of T-joints[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letter), 2000, 13(1): 205 ~ 212.
- [23] 蔡志鹏, 赵海燕, 鹿安理, 等. 焊接数值模拟中分段移动热源模型的建立及应用[J]. 中国机械工程, 2002, 13(3): 208 ~ 210.
- [24] 蔡志鹏, 鹿安理, 史清宇. 相似理论在焊接温度场和应力场中的应用[J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 79 ~ 82.
- [25] 蔡志鹏, 赵海燕, 鹿安理, 等. 结合模型试验的数值模拟方法在大型结构焊接变形控制中的应用[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 100 ~ 103.

**作者简介:** 张建强, 男, 1964 年 9 月出生, 副教授, 博士研究生。主要从事焊接结构强度与断裂、异种钢焊接、焊接过程数值模拟等方面的教学和科研工作, 主持和参加完成各类科研项目 10 余项, 发表论文 50 余篇。

**Email:** zhangjq00@mails.tsinghua.edu.cn

[上接第 90 页]

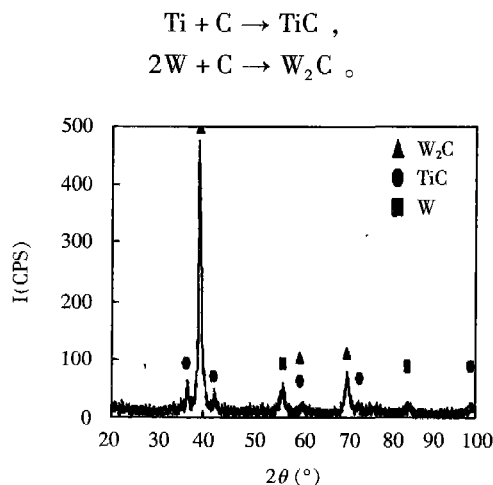


图 10 强化层表面层相结构分析

Fig. 10 Phase structure analysis by X-ray

### 3 结 论

(1) 电火花强化技术可在 TC1 合金表面制造高熔点的 WC-8Co 材料强化层, 最大厚度大于 50 μm。

(2) 强化层与基体之间有明显过渡区, 主要元素在界面间过渡平缓。证明电极材料与基体合金化过程充分。

(3) 强化层表面由 TiC、W<sub>2</sub>C 和少量 W 相组成。

(4) 强化层的显微硬度达到 1 129 HV, 高出基体 3 倍以上。基体表面性能已发生改变。

### 参考文献:

- [1] 陈钟燮. 电火花表面强化工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [2] Arvand Agarwal, Narendra B Dahotre. Synthesis on boride coating on steel using high energy density process: comparative study of evolution of microstructure[J]. Materials Characterization, 1999, 44(1): 31 ~ 44.

**作者简介:** 汪瑞军, 男, 1967 年 7 月出生, 高级工程师, 博士研究生。主要研究方向为表面工程技术领域的研究。近年在新型电火花表面强化技术, 高速电弧喷涂系统方面开展深入研究, 已开发出多系列成套设备并投入市场。发表论文 18 篇。

**Email:** wangrj@caams.org.cn