

# 优化核电燃料棒焊接工艺的数字仿真

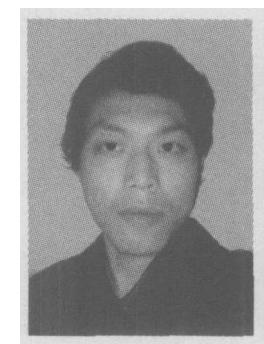
郑 舒<sup>1</sup>, 胡国辉<sup>1</sup>, 陈方泉<sup>2</sup>, 杨焕明<sup>3</sup>

(1. 上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072 2 上海大学 机械制造  
及自动化学院, 上海 200436 3. 国营建中化工总公司, 四川 宜宾 644000)

**摘要:** 用数字化仿真技术, 基于 Navier-Stokes 方程和重整化群  $k-\epsilon$  湍流模型, 采用贴体坐标和交错网格系统, 并运用网格自适应技术对核电燃料棒周边的网格进行自动加密与生成, 用 SIMPLEC 算法对核电燃料棒以及焊接腔体进行了联合计算。通过对焊接腔体内部的周边流场情况的分析, 发现了原有结构存在的不足, 并针对此缺陷提出了优化的设计方案。

**关键词:** 计算流体力学; 核燃料棒; SIMPLEC 算法

中图分类号: TG49 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)01-33-04



郑 舒

## 0 序 言

焊接技术是制造技术的重要组成部分, 近几十年来, 原子能、航天、电子等部门的迅猛发展, 对焊接技术提出了更高的要求(高温、耐蚀、高压、强韧性等)。作者所研究的焊接工艺是针对核电工程的核电燃料棒氩弧焊接所设计的。

核电工程的核燃料元件是核反应堆活性区的主要部件和能量的来源。由于核燃料元件的工作条件十分恶劣, 高通量的中子辐射使材料产生严重的辐照损伤, 燃料的辐照肿胀现象和裂变产物以及高温高压下的工作条件会使燃料元件受到强烈的应力作用和侵蚀作用。因此, 对核燃料元件的设计和制造提出了很高的要求。同时, 核燃料元件设计和制造的质量, 直接影响着核反应堆本身的可靠性、先进性和经济性。为了使核燃料元件在运行中避免破损、泄露等事故, 要求每一个核燃料元件具有良好的耐腐蚀性、密封性和足够的强度。

Zr是核反应堆工程中常用的材料, 在室温和高温下具有足够高的塑性和强度, 在中子的辐照作用下具有良好的稳定性, 有较好的加工性能和焊接性能。因此, 它对高温水冷反应堆是一种非常有价值的材料。目前, 在反应堆工程中, 它经常用来作为核燃料的元件包壳、元件盒以及高压工艺管道等结构部件。Zr本身的焊接性很好, 线膨胀系数较低。但是, Zr在高温下具有极大的活泼性, 可与任何气体

发生反应。当温度超过 400 ℃以后, 立即与氧气、氮气、氢气以及二氧化碳等发生化合反应, 导致合金脆化。因此, Zr与锆合金只能适合于在中等温度范围使用。当大气进入焊缝时, 气体(特别是氧气)与 Zr 作用生成脆性化合物, 且使焊缝中含有杂质, 使塑性急剧下降, 同时抗腐蚀性能和加工性能变坏。因此焊接加工时为了防止大气污染, 焊缝应尽可能地减少与空气的接触, 同时使得焊缝以均匀速度冷却, 缩短过热的金属与大气的接触时间<sup>[1]</sup>。

为了使核电燃料棒尽可能少与外界空气接触, 工程中通常在焊接腔体中焊接核电燃料棒, 焊枪处设置了保护气进气口, 用一定流速的高纯度的氩气来喷向焊接元件, 希望在焊接元件外部形成一层惰性气体包围层。但实际操作中发现这样的操作并不能使得腔体中被焊接元件得到有效的保护。通常保护较好的焊缝应该是光亮的银白色。若受到大气的污染, 则随污染程度的不同, 呈现灰白色、黑灰色、淡紫色。因而由此生产出的燃料棒不能很好地满足工程要求。

作者认为, 焊件的质量在很大程度上依赖于腔体内的流场结构。因此, 运用计算流体力学技术, 对腔体内流场进行分析将有助于改善腔体设计, 提高焊接质量。作者拟采用数值模拟技术, 以焊接剖面为研究对象, 描述出原有腔体内速度场、温度场情况; 并同时针对原有结构, 提出改进的焊接腔体结构, 并对改进结构的速度场、温度场进行模拟, 在两者的物理数据进行比较之后提出解决方案。设想中的改进有两方面, 首先是焊接腔体几何形状的改进, 其次是在焊接腔体出口处给定适当的负压。

# 1 基本方程和数值处理

## 1.1 基本控制方程

描述腔体内流体运动的控制方程如下。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho \mathbf{u}) = \nabla p + \nabla \cdot (\mu \text{grad} \mathbf{u}), \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div} \left( \frac{\kappa}{\varphi} \text{grad} T \right) + S_T, \quad (3)$$

状态方程

$$p = p(\varphi, T), \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $t$  为时间;  $\mathbf{u}$  为速度矢量;  $p$  为流体压力;  $T$  为温度;  $\mu$  为动力粘度系数,  $\varphi$  为定压比热;  $\kappa$  为流体传热系数;  $S_T$  为流体的内热源及由于粘性作用流体机械转换为热能的部分, 简称  $S_T$  粘性耗散项。

对于湍流计算, 引入了重整化群 (renormalization group RNG)  $k - \epsilon$  模型。该模型是由 Yakho 和 Orzag<sup>[2]</sup> 应用重整化群的方法导出的。

## 1.2 数值处理和边界条件

由于核电燃料棒焊接腔体内部的计算区域较复杂, 为避免计算区域局部地区产生网格奇异现象, 采用非结构网格的扩展有限体积法<sup>[3]</sup> 对连续方程和动量方程在空间方向离散。对离散方程的求解采用 SIMPLEC ( semi implicit method for pressure-linked equations consistent) 算法<sup>[4]</sup>, 对动量方程、湍流动能方程和湍流耗散方程采用二阶迎风格式。

对于未改进的原始结构 (图 1) 在整个计算域内给定初始条件为  $u = v = 0$  环境温度取室温 288 K, 进口处通入氩气其密度为  $1.6 \text{ kg/m}^3$ 。计算域中主要的边界条件 (见图 1) 是进口处边界条件设置为速度入口条件, 大小为  $0.7 \text{ m/s}$  通入的氩气气流方向垂直于进气口, 出口处边界条件设置为压力出口条件, 并给定压强  $101325 \text{ Pa}$  刚性壁面均采用无滑移边界条件。焊件进行焊接时在腔体内旋转, 其旋转中心轴固定于整个流场计算域坐标体系的原点上, 且给定逆时针旋转速度为  $1.6 \text{ r/s}$  A 处为了得到更好的计算结果, 对于近壁面处的边界条件采用壁面函数方法<sup>[5]</sup> 来处理。对于高温电弧处 (图 2 中温度界面) 给定温度为  $30000 \text{ K}$ 。

改进后腔体结构的特点是在腔体下方对称地放置出流口, 其在燃料棒附近的三维网格参见图 2

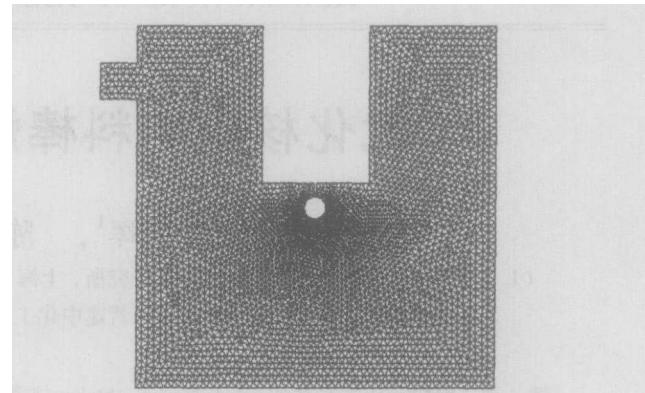


图 1 原始腔体焊接结构剖面上的二维计算网格

Fig. 1 Two dimensional grids in cross section of unimproved structure cavity

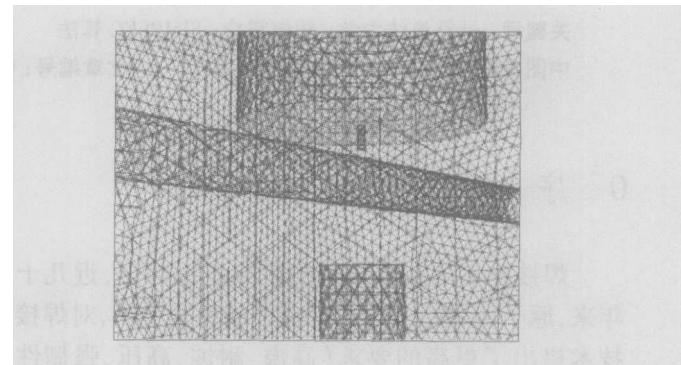


图 2 改进后腔体结构局部放大图

Fig. 2 Magnified image of nuclear fuel stick with improved structure

计算中初始条件和原始的结构中的设置相同。计算域中保护气进口处边界设为压力入口条件, 通入的氩气气流方向垂直于进气口, 其压强是  $101330 \text{ Pa}$ 。为了保证在焊件附近的流体附着在焊件上, 保护气出口处给定适当负压, 在计算中设为  $51325 \text{ Pa}$ 。

图 1 为原始腔体结构焊接剖面的二维网络划分后焊接腔体的剖面图。其中焊接腔体边长  $200 \text{ mm}$ , 核电燃料棒的半径  $5 \text{ mm}$ , 保护气进口处边长  $50 \text{ mm}$ , 焊枪长  $93 \text{ mm}$ , 保护气出口处边长  $20 \text{ mm}$ 。流场计算域内所划分的单元数为 757 411 个, 界面数为 1 351 265 个, 节点数为 103 854 个。

图 2 为改进后腔体结构的三维网格划分后核电燃料棒及其周边的局部放大图。流场计算域内所划分的单元数为 748 212 个, 界面数为 1 515 815 个, 节点数为 134 416 个。

## 2 计算结果分析

沿燃料棒壁面附近取一圆周线, 见图 3。通过分析该圆周线上的流场数据来分析流场特性。其中旋转壁面中心处为坐标原点  $(0, 0)$ , 横、纵坐标在图

中分别标记为壁面半径为 5 mm, 其它点坐标分别为  $A(5, 0)$ ,  $B(0, 5)$ ,  $C(-5, 0)$ ,  $D(0, -5)$ 。为了便于说明计算结果, 在圆周线上标记  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  四点。在以后的计算结果中, 曲线  $a$  代表沿着核电燃料棒的壁面  $CBA$  周边网格节点处情况, 曲线  $b$  代表沿着核电燃料棒的壁面  $CDA$  周边网格节点处情况。

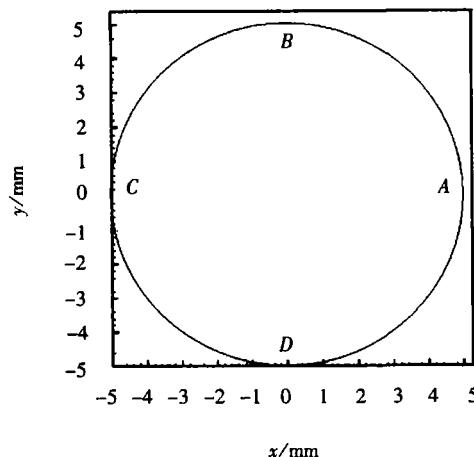


图 3 焊接核电燃料棒壁面附近圆周线

Fig. 3 Circumference near welded nuclear fuel stick

图 4 是原始的腔体结构中流场沿圆周线网格点上流体速度的大小。图 5 则是改进后腔体结构中相应位置的流体速度。计算结果发现, 改进后的结构由于在焊接腔体的出口处加载了负压, 所以焊接元件周围流体的最大速度有很大提高。从原始结构最大速度  $1.1 \text{ m/s}$  提升到改进结构后的  $160 \text{ m/s}$ 。与原始结构的图 4 相比, 以横坐标为 0 处作为比较点, 改进后的结构中速度场的对称性有明显的改善, 降低了由于流场速度不均衡所导致的紊乱。并

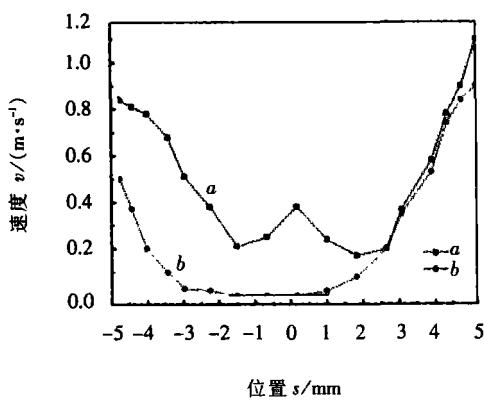


图 4 原始结构核电燃料棒旋转壁面周边网格节点处流场速度

Fig. 4 Flow velocity on computational grids around rotating wall of fuel stick with unimproved structure

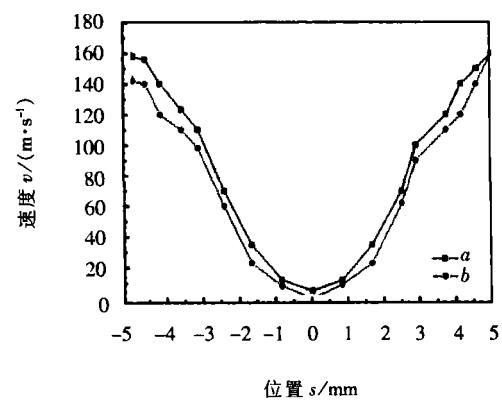


图 5 改进结构核电燃料棒旋转壁面周边网格节点处流场速度

Fig. 5 Flow velocity on computational grids around rotating wall of fuel stick with improved structure

发现在原始结构图 4 横坐标为  $-2.5 \sim 0.83$  范围内对于  $b$  曲线中出现了速度大小几乎为零的一段区间 (即核电燃料棒的下端靠近  $D$  点的一小段区域内), 这就意味着当腔体内混有其它气体的时候, 通入的保护气 (氩气) 在  $-2.5 \sim 0.83$  这个区间内不能有效地把杂质气体带走, 从而降低了其保护的效能。相比而言, 在改进后的结构 (图 5) 中, 速度接近于零的区域只出现在  $-0.33 \sim 0$  范围内, 因此改进后的结构能比原始的结构更有效地带走杂质气体。图 6 分别为改进前和改进后沿圆周线流场温度的分布情况。在原始的焊接腔体结构中, 对于  $b$  线, 即沿核电燃料棒下段  $CDA$  处周边各网格节点处的温度主要集中在  $300 \sim 1000 \text{ K}$  之间; 而对于改进后的结构图 7, 在核电燃料棒的下段  $CDA$  处周边各网格节点处温度主要集中于  $300 \sim 500 \text{ K}$  之间。这意味着在改进后的腔体结构中, 燃料棒原材料  $Zr$  所接触的周围

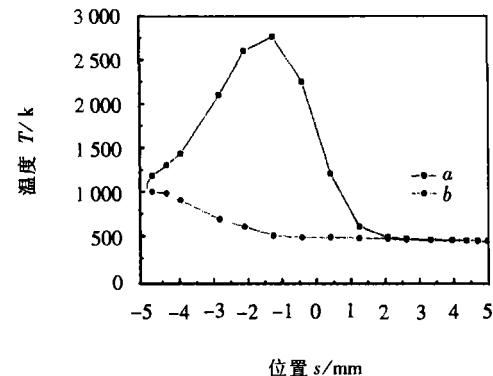


图 6 原始结构核电燃料棒旋转壁面周边网格节点处流场温度

Fig. 6 Temperature on computational grids around rotating wall of fuel stick with improved structure

杂质气体的温度要比原始结构的情况下要低, 因而与杂质气体发生反应的几率也会相应地降低。因此, 改进后的焊接腔体结构能更有效地减少与杂质气体的化学反应程度, 从而更有效地保护核电燃料棒。

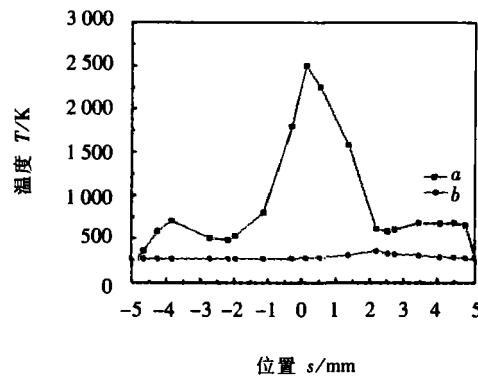


图 7 改进结构核电燃料棒旋转壁面周边网格节点处流场温度

Fig 7 Temperature on computational grids around rotating wall of fuel stick with improved structure

### 3 结 论

针对目前核燃料棒焊接中存在的问题, 利用计

[上接第 32 页]

劣的比较结果。从焊缝中心图像和数据分析可以看出, Canny 焊缝中心图像和实际焊缝中心图像非常贴近, 而且综合其各参数值优于其它算子的结果, 偏差和横向波动幅度小, 曲线平滑度和连续性好, 检测效果良好。

### 4 结 论

Canny 边缘检测算子是一种十分有效的焊缝边缘检测方法, 其抗噪性能好, 定位精确度高。利用 Canny 对焊缝图像进行边缘检测, 检测出的焊缝边缘图像连续、清晰, 适用于视觉传感的焊缝跟踪图像处理过程。

算流体力学技术, 采用贴体坐标和交错网格系统、网格自适应技术对核电燃料棒周边的网格进行自动加密与生成, 并用 SIMPLE 算法对核电燃料棒、焊接腔体内的流场进行了联合计算。模拟结果表明改进后的结构, 即将腔体出流口改为在腔体下方, 且焊接腔体出口处给定适当负压, 对防止腔体内空气混杂到焊件的周围, 对提高焊接效率起到了一定的作用。

### 参考文献:

- [1] 杨林. 核电燃料棒 TIG 焊机的研制 [D]. 上海: 上海大学, 2004.
- [2] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 39 - 51.
- [3] Chow B, Cross M, Pericleous K. A natural extension of the conventional finite volume method into polygonal unstructured meshes for CFD application [J]. Applied Math. Modeling 1996 20 (2): 170 - 183.
- [4] Van Doormal J P, Raithby G G. Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows [J]. Numerical Heat Transfer 1984 (7): 147 - 163.

作者简介: 郑舒, 男, 1980 年 4 月出生, 硕士研究生。研究方向为计算机辅助设计 CAD/CAE, 发表论文 1 篇。

Email: zheng\_shu@gmail.com

### 参考文献:

- [1] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 高向东, 罗锡柱. 基于卡尔曼滤波的焊缝检测技术研究 [J]. 机械工程学报, 2004 40(4): 172 - 176.
- [3] John Canny. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transaction Pattern Analysis 1986 PAMI-8 679 - 698
- [4] 林卉, 赵长胜, 舒宁. 基于 Canny 算子的边缘检测及评价 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2003 17(2): 3 - 6.
- [5] 杨振亚, 白治江, 王成道. 自适应 Canny 边缘检测算法 [J]. 上海海运学院学报, 2003 24(4): 373 - 377.

作者简介: 谢志孟, 男, 1979 年出生, 硕士研究生。研究方向为制造自动化网络与测控技术, 发表论文 2 篇。

Email: gaoxd@senu.edu.cn

ture toughness test standard  $\delta$  - Resistance curve tests were conducted with multiple specimens at 5 °C in welded joints of X56 pipeline steel. And then the  $\delta_2$  values of weld and HAZ were obtained. The assessment was carried out by using the maximum stress at different water depth and the stress concentration and residual stress were also considered. The tolerable surface flaw sizes were gained at perfect alignment and maximum allowable misalignment. This study lays the foundation for judging the acceptability of flaws.

**Keywords** British standard tolerable size engineering critical assessment

**Finite element analyses of instantaneous stresses of hot plate welded joint of plastic pressure pipes** WANG Jian ping<sup>1</sup>, HUO Li xing<sup>1</sup>, GU Kan feng<sup>2</sup> (1. School of Materials Science and Engineering Tianjin University Tianjin 300072 China 2 Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences Shenyang 110015 China). p21 - 25

**Abstract** Based on constitutive relationship of thermal viscoelastic integral model considering the properties of material which depend great on temperature fluctuation and the effect of phase transition latent heat heat force coupling function and bad step character of ANSYS were employed to simulate the hot plate welding procedure of high density polyethylene(HDPE) plastic pressure pipe. The finite element analyses on stresses distribution of welded joint was conducted and transient stresses distribution pattern in axial radial and circumferential directions were obtained. Residual stresses was measured by the math method and the sachsmethod and it showed that the actual measured results of the residual stresses are basically coincident with the results of numerical analysis.

**Keywords** high density polyethylene pressure pipe hot plate welded joint instantaneous stress finite element analyses

**Effect of single component fluoride flux on TIG arc shape for Ti al by** LIXiao hong ZHANG Lian feng DU Yu xiao (Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute Beijing 100024 China). p26 - 28

**Abstract** BT20 titanium alloy of 2.5 mm thickness was welded by conventional TIG and single component fluoride flux TIG respectively. The results showed that the influences of different single component fluorides on the shape of arc are different. And the relationship of arc shape and the weld penetration was also obtained.

**Keywords** single component fluoride flux A-TIG welding arc shape

**Edge detection of weld image based on Canny operator** XIE Zhi meng GAO Xiang dong (Department of Mechanical and Electrical Engineering Guangdong University of Technology Guangzhou 510090 China). p29 - 32 36

**Abstract** Weld edge is the most important characteristic in a weld

image. The fact of selecting an appropriate edge detecting operator and obtaining the accurate weld edge information is a key process in weld image processing. The canny operator was used to extract the weld edge and its principle and implementation were discussed. And the canny operator, kirsch operator, prewitt operator, robert operator, sobel operator and gauss laplace operator were applied in detecting the weld edges to test the effects respectively. The analysis of the weld image and weld center coordinates showed that the canny operator is a very effective way to detect the weld edge and also suitable for the seam tracking process based on vision sensors.

**Keywords** Canny operator edge detection seam tracking image processing

**Numerical simulation of improving welding efficiency of TIG surface protection** ZHENG Shu<sup>1</sup>, HU Guo hui<sup>1</sup>, CHEN Fang quan<sup>2</sup>, YANG Huan ming<sup>3</sup> (1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics Shanghai University Shanghai 200072 China 2. College of Manufacturing Automation Shanghai University Shanghai 200436 China 3. Jian Zhong Chemicals Corporation Sichuan Yibin 644000 China). p33 - 36

**Abstract** Based on the Navier-Stokes equation and renormalization group (RNG)  $\kappa-\epsilon$  turbulence model the flows around the nuclear fuel stick and the weld cavity were simulated numerically by the SMPLE algorithm. The body fitted coordinates, staggered grid method and self adaptive technique was utilized in this study. Through the analysis of flow around the nuclear fuel stick and the weld cavity the defect of the old structure was found out and two methods to improve the welding efficiency were proposed.

**Keywords** computational fluid dynamics nuclear fuel stick SMPLE algorithm

**Superplastic solid state welding of dissimilar steels under different microstructure by ultra fineing treatment** ZHANG Ke ke<sup>1</sup>, YANG Yun lin<sup>1</sup>, ZHAO Ning<sup>2</sup>, WANG Chang sheng<sup>1</sup>, WANG Yao li<sup>1</sup> (1. Material Science and Engineering College Henan University of Science and Technology Henan Luoyang 471003 China 2. School of Material Science and Engineering Xian Jiaotong University Xian 710049 China). p37 - 40

**Abstract** The microstructures of 40Cr and T10A steel and its surfaces were ultra fined through salt bath cyclic quenching, high frequency hardening and laser hardening. Then influence of the welded surface microstructure of steel on the process and joint quality of isothermal superplastic solid state welding (ISSW) for 40Cr/T10A dissimilar steels was studied. The experimental results showed that the welded surface microstructure of steel plays an important role in the formation of ESW joint. The welding temperature of ESW extends to low temperature ranges and the initial strain rate extends to higher strain rate ranges while having finer