

# 高氮钢 TIG 焊接数值模拟及组织性能分析

王波<sup>1</sup>,郭顺<sup>2</sup>,蔡雅君<sup>2</sup>

(1. 江苏烁石焊接科技有限公司,江苏 南京 211135; 2. 南京理工大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**采用 TIG 热源进行高氮钢焊接研究,通过设置合理工艺,高氮钢可实现无微裂纹、无气孔的良好连接。采用有限元方法对高氮钢焊接的热力过程进行模拟,结合光学显微镜和扫描电镜等表征方法对接头的微观组织进行分析,同时对接头进行抗拉强度测试。结果表明,高氮钢 TIG 焊接头平均拉伸强度可达 950 MPa。焊缝微观组织主要为粗大的奥氏体枝晶及少量铁素体。拉伸结果表明该接头为韧性断裂,断口表面有多种尺度的韧窝。

**关键词:**高氮钢;TIG;数值模拟;微观组织

**中图分类号:**TG113.26+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0025-04

## Numerical Simulation and Microstructure and Properties of High Nitrogen Steel TIG Welding

WANG Bo<sup>1</sup>, GUO Shun<sup>2</sup>, CAI Yajun<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Shuoshi Welding Technology, Co., Ltd., Nanjing 211135, China;

2. College of Material Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** TIG welding method is used to study the welding characteristics of high nitrogen steel. By setting up reasonable process, the joints of high nitrogen steel can be perfectly connected without defects, i.e., micro-cracks and pore. Finite element method is used to simulate the thermodynamic process of its welding. The microstructure of the joints is analyzed by optical microscopy and scanning electron microscopy, and the tensile strength of the joints is tested. The experimental results show that the average tensile strength of high nitrogen steel welded joints can come to 950 MPa. Microstructures of the weld are mainly composed of coarse austenite dendrite and a small amount of ferrite. Tensile test results show that the joint is ductile fracture, and there are many dimples with different sizes on the fracture surface.

**Keywords:** High nitrogen steel; TIG; numerical simulation; microstructure

## 0 引言

高氮奥氏体不锈钢是近年开始研发的一种新型不锈钢材料,其通过 N 元素来替换传统不锈钢中的 Ni 元素。N 是强化和稳定奥氏体的元素,其形成奥氏体的能力与 C 相同,是 Ni 的近 30 倍,因而 N 能替代 Ni 来稳定奥氏体,同时还能强化奥氏体,其强化机制主要体现在固溶强化、沉淀析出强化及细化晶粒强化 3 个方面<sup>[1-2]</sup>。高氮奥氏体不锈钢是指基准氮含量超过 0.6 wt.% 的钢。高氮钢具有优良的塑性和抗拉强度,还具有良好的耐腐蚀性和冷加工性能,以 N 代替 Ni 同时可以节约大量的 Ni 资源,因而高氮奥氏体钢具有广阔的应用前景。

焊接是高氮不锈钢结构件制造中不可缺少的加工方法,但是高 N 含量特征的奥氏体不锈钢在焊接时通常会出现变形、热裂纹及气孔等缺陷。如何提高高氮奥氏体不锈钢试件的焊接性能,进而获得与其基体等强度的焊接接头,对于广泛应用其焊接件具有非常重要的研究意义。崔博<sup>[3]</sup>等采用激光-电弧复合热源对 8 mm 厚的高氮钢板进行焊接试验,研究不同保护气体组成对焊缝形貌和气孔缺

陷的影响。结果表明,高氮钢焊接成形较好,但具有明显的气孔倾向。通过改变保护气体,可抑制气孔的产生并提高焊接过程的稳定性。

王力锋<sup>[4-5]</sup>等采用激光-电弧复合方式焊接了高氮奥氏体不锈钢,并研究表明:焊缝组织为奥氏体+少量  $\delta$  铁素体,焊缝中析出的  $\delta$  铁素体随热输入加大而增多。不同焊接工艺时的拉伸断裂位置均在焊缝区,拉伸强度最高可达到 967.58 MPa,其断裂特征呈现为韧性断裂。徐娟娟等<sup>[6]</sup>采用 307Mo 不锈钢焊丝,对 7 mm 和 12 mm 厚高氮钢进行光纤激光-MIG 复合焊接零间隙对接工艺试验,并表明了高氮钢在熔焊过程中易出现气孔、氮化物等问题,但通过合适的工艺参数调试,可获得良好成形的焊接接头。

为探究高氮钢焊接接头的力学性能,进一步推进高氮奥氏体不锈钢的应用,本文基于之前的研究,开展了高氮钢的 TIG 薄板焊模拟及焊接特性分析研究。文中结合有限元模拟的方法,通过构建 TIG 焊接温度场分布云图、热循环曲线、应变及应力分布,揭示 TIG 焊过程各接头区域热力规律。同时,采用 OM、SEM 等分析技术对高氮钢接

**基金项目:**国家自然科学基金项目(61727802)

**作者简介:**王波(1977—),男,辽宁铁岭人,工程师,硕士研究生,研究方向为焊接无损检测、焊接工艺、焊接数字化研究应用与技术推广。

头的组织和断口进行观察分析。该研究结果可为高氮奥氏体不锈钢焊接的后续研究提供参考。

## 1 试验方法

试验待焊件尺寸为 150 mm×50 mm×1.5 mm 的高氮奥氏体不锈钢,高氮钢的质量分数为氮(N) 0.8、铬(Cr) 20、锰(Mn) 18、镍(Ni) 1.8、碳(C) ≤0.03、磷(P) ≤0.01、硫(S) ≤0.01。为了减小焊件表面的污染物及氧化层的不利影响,在开始焊接前,采用 240#、400#和 600# SiC 砂纸依次打磨待焊面并用丙酮擦拭,焊接时试板不开坡口,单面焊双面成型。优化的焊接参数为电流 85 A,电压 15 V,纯 Ar 保护气流量 10 L/min,焊接速度 20 cm/min。

有限元方法(FEM)是分析焊接热力过程的有力工具,本试验采用了有限元模拟软件 Simufact.welding 对焊接过程进行热力模拟。焊接温度场是一个典型的不稳定瞬态热传导过程,通过构建式(1)所示三维热传导控制方程,可对 1 个区域内的温度随时间变化进行较准确预测。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) +$$

$$Q_v(x, y, z, t) = \rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 、 $C$ 与 $\lambda$ 分别代表材料的密度、比热和热导率; $T$ 表示温度; $t$ 表示时间; $Q$ 表示内部热源。热物理参数设置如表 1 所示。因密度随温度的变化较小,可以忽略不计,在模型中选取高氮钢密度为 7.966 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 高氮钢的热物理性能参数

| 性能参数   | 温度 $T/(\text{°C})$ |                   |                   |                   |                   |                 |
|--|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
|  | 20                 | 200               | 400               | 800               | 1 000             | 1 400           |
| 比热容 $C/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1})$   | $4.5 \times 10^8$  | $5.2 \times 10^8$ | $5.6 \times 10^8$ | $6.1 \times 10^8$ | $6.4 \times 10^8$ | $7 \times 10^8$ |
| 热导率 $\lambda/(\text{N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 14.1               | 16.4              | 18.9              | 24.5              | 27.2              | 33.6            |

另外,影响模拟过程中的重要因素为热源模型。为了能够体现 TIG 的热源特征,模拟采用优化的 J.Goldak 双椭球模型<sup>[10]</sup>。该模型示意图如图 1 所示,其由 2 个不同的 1/4 椭球体组成,前、后椭球内热流密度分布具有差异性,对应的分配函数如式(2)和式(3)所示。J.Goldak 双椭球模型对于体现 TIG 熔池具有很好的适应性,即熔池前端区域温度梯度大,后段区域长拖尾特征。为提高计算效率及准确性,采取非均匀网格划分及 8 节点 6 面体网格单元方法。其中,在焊缝中心,即距离焊缝 3 mm 内生成的网格尺寸为 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm,在距离焊缝 10 mm 外生成的网格尺寸为 5 mm×5 mm×1.5 mm,在二者之间添加一层过渡网格。

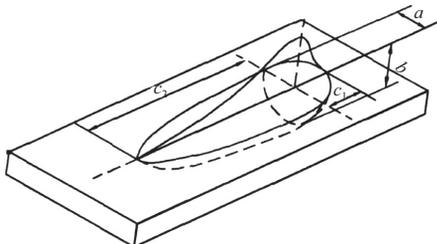


图 1 双椭球热源模型

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi^{3/2}abc} \exp\left(-3\left(\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c_1}\right)^2\right)\right) \quad (2)$$

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi^{3/2}abc} \exp\left(-3\left(\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c_2}\right)^2\right)\right) \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 为双椭球的形状参数,大小根据实际焊接情况而定; $c$ 代表半轴长; $Q$ 为热输入功率; $f_1$ 、 $f_2$ 分别为前、后椭球功率分配系数, $f_1+f_2=2$ 。其中,该研究中的模拟热源的参数设置为: $a=2.5$  mm, $b=1.5$  mm, $c_1=3.5$  mm, $c_2=8.5$  mm, $f_1=0.65$ 。

对于接头的组织特征观察,其试样制备尺寸为 10 mm×10 mm×1.5 mm,用 240#、400#、600#、800#砂纸按顺序打磨,并用 W2.0 研磨膏抛光。试样采用 FeCl<sub>3</sub> 的盐酸水溶液进行腐蚀,其配比为 5:1,腐蚀 10 s。采用 Zeiss 蔡司光学显微镜,场发射 SEM 对接头微观组织及成分进行测试。室温下采用 SANS CMT 5105 万能试验机对接头进行抗拉强度测试,制样标准依据国标 GB/T228-2002。

## 2 结果及讨论

### 2.1 温度分布云图

有限元模拟的温度场分布如图 2 所示,截取的观点分别为焊接中段进程时间为 5 s 和结束阶段 10 s 的温度分布云图。由该两图可知,TIG 熔焊池具有长拖尾特征。熔池前端温度梯度大,后端温度梯度小,试板两侧的温度分布具有对称性。另外,2 个观察点截取时间不同,但是温度分布趋势具有很好的一致性。同时可观察到,距离焊缝较远位置的温度变化较小,由于模拟热源对远离焊缝的区域为非直接接触加热,而通过热传导方式由于材料的导热特征因素,其温度的变化往往较小,即与焊缝的位置距离越近,其温度变化越大。这些不相一致的温度变化特征使得材料具有不同的热胀冷缩特征,进而引起焊接的残余应力,降低材料的力学性能。之前的研究表明<sup>[7-9]</sup>,较大的温度梯度被认为是造成焊缝附近应力集中甚至开裂的重要原因。以上模拟的温度分布特征与实际 TIG 焊过程是相近似的。TIG 焊由于其电弧能量密度较低,其形成的熔池一般较大,并表现为大熔宽、小熔深特征。

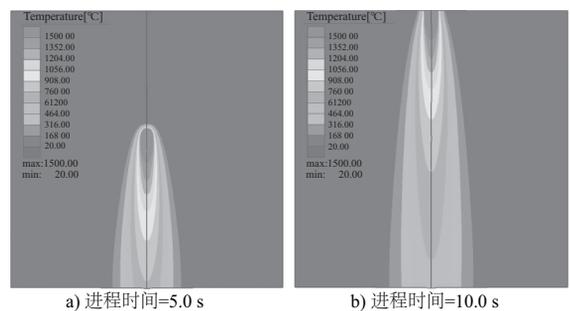


图 2 温度场分布云图

为了探究 TIG 模拟过程的纵向截面温度分布规律,通过线性截取不同的工艺进程的截面温度分布图,得图 3 所示结果。该温度分布云图表明,当热源负载开始作用于试

板时,熔池快速形成,熔池形态呈现为倒钟形态;当进程时间约为 1 s,试板熔透,熔池趋近于稳定。在进程时间为 5 s 时,其熔池特征上部熔宽明显高于下部,此时上部熔宽为 5.2 mm,下部熔宽为 1.6 mm,其与真实的熔池形态相一致。依据模拟中的熔池边界匹配原则可知,该模拟具有有效性,能够较为准确地反映焊接过程中温度的分布特征。

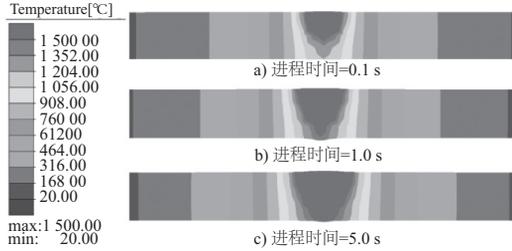


图3 纵向截面温度场云图

在焊接过程中,焊接温度场的形成是由多次前一进程温度特性叠加产生,每一位置温度受前一热条件影响。在高氮钢试板纵向截面上,温度界线类似于扇形弧线,并由熔池中心向外发散,由于温度梯度的减小,温度界线在远离焊缝中心位置时逐渐趋近为直线。通过对比图 3 不同时间进程下的纵向截面温度云图可知,材料两侧温度场是对称的,其温度分布特征可近似地推测出焊接接头的熔合区、热影响区和母材的分界线及其各自的组织形成特征。由该图可知,稳定的焊接熔池形成的热影响区约为 3~4 mm,在此区域内,原母材的奥氏体区将发生明显的长大行为,在此区域外的母材部分组织变化较小。

## 2.2 应变及应力分布

上节的温度场模拟结果表明,高氮钢接头在焊接过程各区域具有不相一致的温度梯度变化。不同的受热状态会引起试板差异性的变形行为,进而对接头的变形及应力状态产生重要的影响,并最终体现在接头力学性能上。因此,研究高氮钢 TIG 焊接过程中的变形及接头应力对于高氮钢力学性能分析具有重要的参考作用。

图 4 所示为高氮钢 TIG 焊过程中试板的总变形量。该图表明,热源载荷作用到试板上时,高氮钢板将发生快速的变形,其总变形量与热源载荷作用位置的距离呈现负相关性,即随着两者距离的增加而逐渐减小。2 个侧试板的变形趋势是一致的。由于高氮钢板具有高硬度及良好的塑性特征,变形区主要出现在焊缝周围区域,其变形数值最大约为 0.44 mm,该结果与实际焊接的相一致。

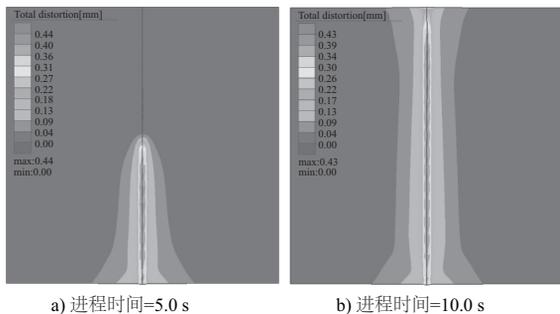


图4 模拟总变形量

另外,由图 4 可知,在焊接中段进程时间为 5.0 s 时,高氮钢板总变形线类似于一个钟型。等变形线在焊缝处的前端梯度大,后端变形近似相同,也就是热源远离后原变形区将保持变形量不变。对于远离焊缝处变形区,其变形值较小,甚至几乎没有变形。在热源负载与试板的作用过程中,热输入是引起焊接变形主要因素,因而,在高热输入的位置,变形趋势明显。试板不同区域的变形行为与接头应力将具有密切关联。

图 5 为接头的应力分布图,其截取的时间点为焊接稳定状态及结束阶段。由图 5 可知,焊缝处由于金属的熔化再结晶行为,该处的应力状态得以松弛,最高应力主要集中在热源载荷的前端以及熔合区附近,接头的应力峰值可达 400 MPa,这将对接头的力学性能产生不利的影响。在焊接完成后,接头的应力呈现左右对称特征,并呈现类似于椭球状。原因主要是由于工件的约束状态所导致的,试板的中部由于拘束度大、变形大,因而应力值较高。对于试板的边缘区域,由于未施加工装固定及小的热输入,因而应力值小。试板的应力状态表明,焊接接头在熔合线附近区域将会发生应力集中现象,实际施焊时需严格控制工艺参数。

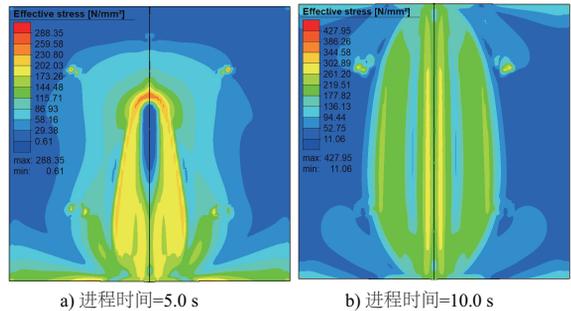


图5 接头应力分布云图

## 2.3 微观组织及力学性能分析

图 6(a) 和图 6(b) 所示为热影响区及焊缝区的主要微观组织特征。由图 6 可知,高氮钢接头的热影响区由奥氏体相组成,与母材基体相一致。但是由于靠近熔池,高的热输入使得热影响区发生了明显的晶粒长大行为。晶粒尺寸随着与熔合区距离的减小而粗化现象加重,由霍尔-佩奇关系可知,晶粒粗化,其强度值将减小,因而,靠近熔合区的热影响区是接头的薄弱位置。另外,在距离熔合区较远的热影响区,可观察到少量的退火孪晶出现。退火孪晶的出现可能是由于晶粒来不及通过位错滑移、攀移、交滑移等低速变形机制来进行塑性变形,进而形成许多层错,并最终形成了孪晶。对于焊缝的熔合区,该区域是基体与焊缝相连接的位置,该处组织、成分及应力状态存在着很大的不均匀性,并往往是接头的最薄弱位置。另外,材料中含有的少量杂质元素可能在此处形成偏析,增加此处的热裂纹倾向。在该接头中,熔合区连接良好,未观察到明显的低熔点共晶存在,这与高氮钢中杂质元素的含量少有直接的关系。

图 6(b) 所示为高氮钢的焊缝区典型组织,由此图可知,其微观组织主要是奥氏体的枝晶区,枝晶间由于亚共

析钢的特点而存在少量的铁素体相析出。高氮钢呈现为奥氏体钢的焊接特征,而热裂纹往往是奥氏体钢焊接的主要缺陷之一。这主要是由于奥氏体钢线膨胀系数大,导热系数小,进而焊缝金属在高温的停留时间加长,焊缝受到的拉伸应变增大,同时,奥氏体钢凝固温度相差大,进而枝晶间的低熔点偏析增加了热裂倾向。但该接头中未观察到明显的热裂纹存在。

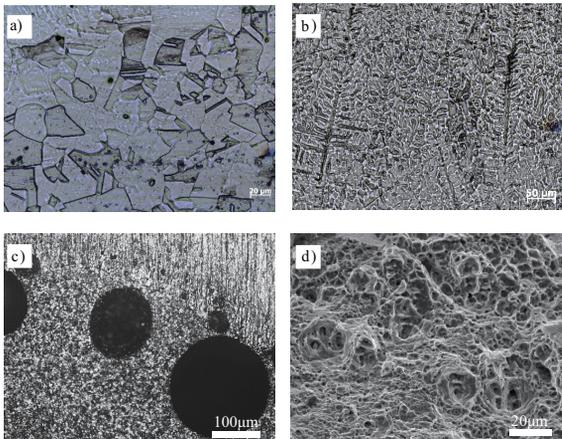


图6 高氮钢接头的微观组织特征

高氮钢焊接存在的主要问题是焊接气孔。高氮钢焊接气孔主要是由于在焊接过程中,N元素可在熔融态金属中存在较大的过饱和度,但是当温度下降后,N元素在金属焊缝中的溶解度将发生快速下降,导致无法溶解的N原子将以氮气的形式析出。由于高氮钢凝固速率快,来不及逸出的氮气将滞留在焊缝中进而形成了微气孔。图6c)所示为N气孔在焊缝金属中形态,其近似圆形并可能形成多个微气孔。其中,氮气孔的形成具有一定的规律性,在熔合区附近具有相对较明显的气孔倾向。其原因为熔合区的液态金属流动速率较慢,因而氮气逸出动力条件较差,气孔更易形成。

试验同时对高氮钢接头进行了拉伸力学测试,经过3组试验,拉伸强度达950 MPa,相当于基材强度(1032 MPa)的92%,该结果表明了TIG焊接高氮钢材料的适用性。图6d)所示为高氮钢拉伸的断口形态,由该图可知,断裂表面具有明显的韧窝特征,韧窝密集,深度较浅,部分韧窝中心位置显示有第二相粒子的存在。以上结果表明了高氮钢TIG焊接头的拉伸断裂呈现为韧性断裂模式。

### 3 结语

通过采用TIG焊方式对薄板高氮钢进行了焊接模拟及工艺试验,试验结果表明:

1) 高氮钢TIG焊具有较好的成形特征,接头平均拉伸强度可达950 MPa,相当于基材强度(1032 MPa)的92%。

2) 模拟显示了高氮钢焊接时具有不均匀的温度分布特征,形成的熔池特征表现为大熔宽、小熔深,变形及应力结果表明焊缝区变形最大,接头的熔合区附近接头残余应力最大。

3) 焊缝的微观组织主要为粗大的奥氏体枝晶及少量铁素体,由于枝晶偏析的存在,其具有一定的热裂纹倾向。拉伸结果表明该接头为韧性断裂模式,断口表面具有密集并深度浅的等轴韧窝。

#### 参考文献:

- [1] 吴贇. 高氮不锈钢固溶处理及抗晶间腐蚀性能研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2017.
- [2] 高昂. 高氮钢MIG焊缝增氮及接头组织性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] 崔博, 张宏, 刘佳, 等. 保护气体对高氮钢焊接熔滴过渡模式和气孔缺陷的影响研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 87-94.
- [4] 王力锋, 刘凤德, 刘双宇, 等. 高氮钢复合焊接接头组织与力学性能研究[J]. 中国机械工程, 2016(24): 3382-3388.
- [5] 王力锋, 刘凤德, 刘薇娜, 等. 高氮钢激光-电弧复合焊接接头组织与力学性能研究[C]. 兰州:第二十次全国焊接学术会议论文集, 2015.
- [6] 徐娟娟. 高氮钢光纤激光-MIG复合焊接工艺试验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.
- [7] 余淑荣, 熊进辉, 樊丁, 等. 异厚度铝合金薄板激光拼焊温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 17-20.
- [8] 张天宇, 陈华. 异厚度6005A铝合金激光拼焊数值模拟[J]. 长春工业大学学报, 2011, 32(2): 173-177.
- [9] 余淑荣, 樊丁, 熊进辉, 等. 异厚度铝合金薄板激光拼焊应力应变场数值模拟[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 25-28.
- [10] JOSHI, SURAJ, HILDEBRAND, et al. Characterization of material properties and heat source parameters in welding simulation of two overlapping beads on a substrate plate[J]. Computational Materials Science, 2013, 69(1): 559-565.

收稿日期:2019-08-29

(上接第10页)

- [9] WANG Feng, ZHAO Jianshe, LV Yanming, et al. Experimental research on improving accuracy of electrochemical machining of deep narrow grooves[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(12): 1-9.
- [10] FENG Zhujian, EVERARDO Granda, WAYNE Hung. Experimental investigation of vibration-assisted pulsed electrochemical machining [C]. Procedia Manufacturing, 2016(5): 798-814.
- [11] 李振兴, 刘茂兴, 赵潮, 等. 脉冲振动电解加工对圆柱型面复

制精度的影响[J]. 电加工与模具, 2017(1): 30-34.

- [12] 唐家鹏. FLUENT 14.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社, 2013.
- [13] 徐家文, 云乃彰, 王建业, 等. 电化学加工技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [14] 江伟, 干为民, 张晔. 叶片脉冲电解加工过程的多场耦合模拟 [J]. 电加工与模具, 2015, 2: 24-28.

收稿日期:2018-10-19