

# 有限元仿真模拟在超声喷水无损检测用水套设计中的应用

罗明 马兆庆 吴君豪 蔡鹏 吴时红

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 水套在超声喷水穿透检测中具有重要作用,为设计出具有良好耦合效果的水套,减少水流紊流对声波耦合的影响,本文通过构建探头套几何模型、物理建模、数值求解的有限元仿真方法对探头水套进行流体动力学仿真。结果表明,在无整流装置下,从入水口射入的水流撞击探头套内壁,产生严重紊流,进入出水管后,紊流状态仍然保持,水流流线方向杂乱。增加整流装置后,探头套内紊流得到很好的抑制,使得进入出水管的水流流线方向趋向一致,这种现象随着整流片增多而效果越加明显。本文为后续模拟水流经过出水口后的水柱状态,特别是随着初始水流速度加大后的水柱状态,以及利用有限元多物理场模拟功能,在加入声场后,模拟紊流状况下声场的变化打下了基础。

**关键词** 有限元仿真,超声喷水穿透,探头水套,紊流

中图分类号:TP273.5

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.011

## Application of FEM Simulation in the Design of Water Jackets for Ultrasonic Water Spray Non-destructive Testing

LUO Ming MA Zhaoqing WU Junhao CAI Peng WU Shihong

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Water jacket plays an important role in ultrasonic water spray penetration detection. In order to design a water jacket with good coupling effect and to reduce the influence of water flow turbulence on acoustic coupling, this paper constructs a finite element simulation of geometric model, physical model, and numerical solution for the probe jacket to conduct fluid dynamics simulation. The simulation results show that without a rectification device, the water injected from the inlet collides with the inner wall of the probe sleeve, causing severe turbulence. After entering the outlet pipe, the turbulent state is still maintained, and the direction of the water flow line is chaotic. After adding a rectification device, the turbulence inside the probe sleeve is well suppressed, making the direction of the water flow into the outlet pipe conforming to consistency. This phenomenon becomes more pronounced as the number rectifying element increase. This article aims to simulate the state of the water column after the water flow passes through the outlet, especially after increase of initial water flow velocity. The use of FEM's multi-physical field simulation function with addition of sound fields has laid the foundation for simulating changes in sound fields under turbulent conditions.

**Key words** Finite element method simulation, Ultrasonic water spray penetration, Probe water jacket, Turbulence

### 0 引言

航空航天中使用的复合材料具有卓越的比强度、比模量,良好的抗疲劳特性,材料性能的可设计性和易加工性等优点<sup>[1]</sup>。受到成型工艺的制约,复合材料在制备过程中容易产生孔隙、分层和脱粘等缺陷<sup>[2]</sup>,

这些缺陷会降低复合材料结构的使用寿命,如果关键部位存在脱粘和分层等致命缺陷,将造成灾难性的后果。因此,对复合材料内部缺陷进行无损检测具有极其重要意义。目前,用于复合材料的无损检测技术较多,包括射线、超声、激光全息照相、红外成

收稿日期:2023-10-29

第一作者简介:罗明,1983年出生,高工,主要从事超声自动检测及成像技术。E-mail:121322830@qq.com

像等技术,其中,超声检测技术对孔隙、分层和脱粘等面积型缺陷较为灵敏,而被广泛应用在航空、航天领域复合材料构件的生产过程中。目前超声喷水穿透自动无损检测技术因其不与工件硬接触,耦合效果好,检测效率高,信号特征简单,被广泛用于复合材料的无损检测<sup>[3]</sup>。

超声喷水穿透自动检测需要设计专用的喷水探头套,利用压力驱动水从喷水探头套喷嘴高速射出,形成喷射水柱,实现发射、接收探头与复合材料之间非接触声耦合方式检测<sup>[3]</sup>。按照探头套布局方式可分为垂直上下喷水、水平左右喷水以及其他方式喷水,前两种方式是最常见的喷水方式。在喷水检测过程中,喷水效果直接影响检测灵敏度,而喷水效果又与探头套内部结构,喷水速度,探头套布局方式等有关。在探头套结构和布局一定的情况下,喷水速度直接决定了水流的雷诺数,是影响水流层流的重要参数,流速达到一定数值时,水流将由层流变为紊流,超声在其中传播产生衰减和散射,不利于喷水超声检测<sup>[4]</sup>。在垂直上下喷水时,喷水的流速一般比较小,特别是位于上面探头的流速可以设置得很小,管内水流呈低雷诺数的层流状态,水流在自重的作用下,实现稳定耦合,即使上面探头距离工件较远,耦合效果也很好。但在水平左右喷水时,由于水流自重影响,使得喷出的水柱产生弯曲,影响检测灵敏度,特别是工件结构复杂时,探头距离工件表面较远的情况下,水柱弯曲的现象更加明显,此时必须加大喷水速度,但加大喷水速度后,在探头套内水流呈高雷诺数紊流的状态,进而影响检测灵敏度,因此,如何设计一种超声喷水套使得水柱能又远又直,还能有效减少紊流,变得非常重要。

有限元法(Finite Element Method, FEM)是一种非常有效的计算偏微分方程近似解的数值方法,有限元法起源于20世纪中期对弹性力学问题的数值求解<sup>[5-6]</sup>,后来扩展到计算流体力学、热学、电磁学等领域,在科学研究和工程中有十分广泛的应用<sup>[7]</sup>。随着计算机辅助设计(CAD)、复杂几何形状的自动网格划分、稳健的求解器等方面的进步,性能优秀、使用方便的有限元计算软件包应运而生<sup>[8]</sup>。

本文利用有限元仿真方法对探头水套进行设计,通过构建探头水套几何模型,物理建模,数值求解,结果分析,然后优化探头套几何模型,并重复上述过程,设计出一种紊流少,耦合良好的模型。

## 1 探头喷水套紊流数学模型

### 1.1 雷诺数

雷诺数是一种可用来表征流体流动情况的无量纲数,其公式如下:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

式中, $\rho$ 、 $v$ 、 $\mu$ 分别表示流体的密度、速度、黏度系数, $d$ 表示特征长度。例如,流体流过圆形管道,则 $d$ 为管道的当量直径。利用雷诺数可区分流体的流动是层流或紊流,一般雷诺数小于 $2 \times 10^3$ 为层流,大于 $4 \times 10^3$ 的为紊流状态,介于二者之间的为过渡状态。本文对探头水套内水流状态进行仿真,研究如何抑制紊流,实现层流。

### 1.2 $k-\varepsilon$ 紊流模型

本实验紊流模型采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型,由于此模型不仅具有较好的稳定性,还能有效节省计算资源,因此常用于工业应用领域<sup>[9]</sup>。对 $k-\varepsilon$ 两方程模型做出如下假设:探头套内流体做定常流动,管道内流体为不可压缩牛顿流体。理论上,流体在流动过程中满足质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程<sup>[10]</sup>。本实验是不考虑热交换的单纯流场计算问题,因此不需要包含能量守恒方程。该模型的主要控制方程有质量守恒方程、动量守恒方程以紊流动能 $k$ 方程的传递和紊流耗散率 $\varepsilon$ 方程。

#### (1) 质量守恒方程

质量守恒方程描述了流体在时间和空间上质量守恒的关系。其数学表达式为:

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

式中, $\rho$ 表示流体密度, $u$ 表示流体的速度场, $\nabla$ 是散度运算符。方程左侧表示空间上质量的变化,其中 $\nabla \cdot u$ 表示空间体积变化,因为假设液体为不可压缩,所以体积变化为0,满足质量守恒。

#### (2) 动量守恒方程

动量守恒方程描述了流体在时间和空间上动量守恒的关系。其数学表达式为:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \rho F \quad (3)$$

在体积一定的情况,密度表示质量,方程左边代表质量和加速度的积,右边第一项带面流体所在空间的压力差,第二项代表黏滞力,第三项代表作用在流体上的所有外力。

#### (3) 紊流动能 $k$ 方程和耗散率 $\varepsilon$ 方程

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$P_k = \mu_t \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中,  $\mu_t$  为紊流性系数;  $P_k$  为由平均速度梯度所产生的紊动能的增量,  $\sigma_k$  为  $k$  的有效普朗特数,  $\sigma_\epsilon$  为  $\epsilon$  的有效普朗特数<sup>[11-12]</sup>;  $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 $C_\mu$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\epsilon$  为经验常数。

## 2 仿真模拟

### 2.1 构建三维几何模型

本实验几何模型是省略现有喷水探头套中探头部分, 保留水流经部分而建立的三维模型, 如图1所示, 图中箭头表示水流方向。

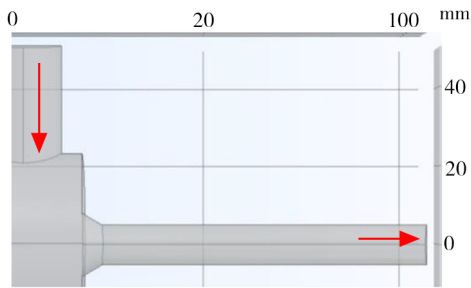


图1 探头水套模型

Fig. 1 Probe water jacket model

### 2.2 初始条件

设置入口处的速度为 1 m/s, 水密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>, 黏度 0. 842 Pa·s, 套内压力 1 MPa, 内径在 10~46 mm 之间, 经验常数  $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 $C_\mu$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\epsilon$  分别取值为 1. 44、1. 92、0. 09、1、1. 3; 采用壁函数自动进行壁处理。

### 2.3 网格划分

网格选用物理场网格控制模式, 设置为“极细化”, 网格划分为自由剖分三角形网格(图2)。网格划分参数如下, 顶点单元数: 21, 边单元数: 1 650, 边界单元数: 8. 899 4×10<sup>4</sup>, 单元数: 4. 600 84×10<sup>6</sup>, 最小单元质量: 9. 613×10<sup>-2</sup>。

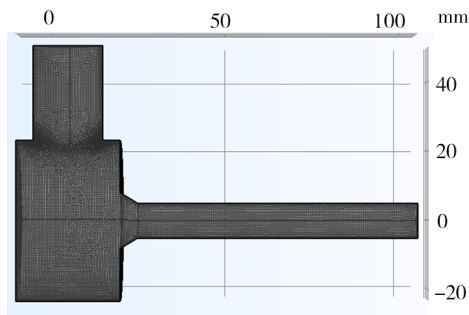


图2 网格划分效果

Fig. 2 Grid division effect

## 3 结果及讨论

根据式(2)~式(7)对探头水套内水流流线进行有限元仿真模拟, 结果如图3所示。流线定位均从入水口界面开始, 均匀分布, 不同的颜色表示流速, 颜色越红流速越大, 可见水流由进水口进入探头套内后撞击到套壁后形成强烈的紊流, 在进入出水管后

紊流仍然保持强烈状态, 这样的紊流在喷射出水口形成的水柱会卷入空气, 引起声波的严重散射和衰减。

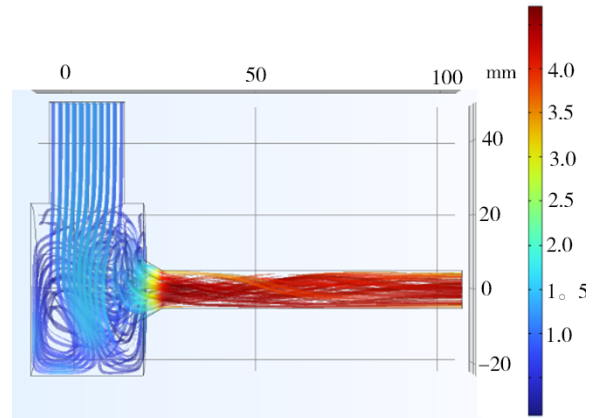
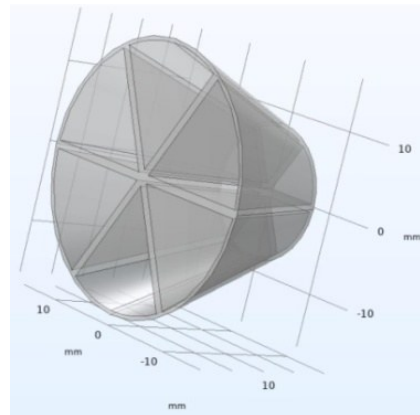


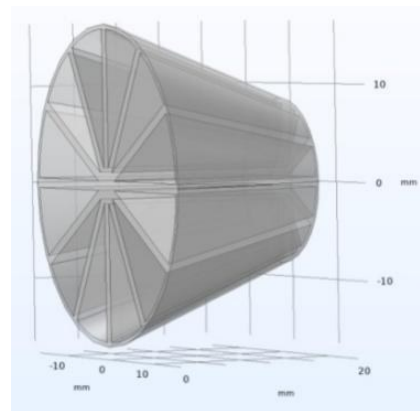
图3 无整流时探头套内水流流速流线图

Fig. 3 Flow velocity streamline diagram inside the probe sleeve without rectification

为了减轻探头套内的紊流, 设计了2种整流装置, 如图4所示, 整流装置设置为锥体, 中间有整流片, 将锥体均分为几部分, 其中图4(a)将锥体6均分, 图4(b)将锥体12均分。图5是加整流装置的模型。



(a) 6均分



(b) 12均分

图4 整流装置

Fig. 4 Schematic diagram of rectifier device

图6是6均分和12均分整流装置下的水流流线仿真模拟结果,可见水流在进入出水管后,紊流得到很好的抑制,整流装置均分度越高,效果越好。

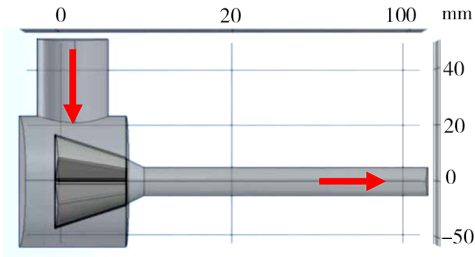
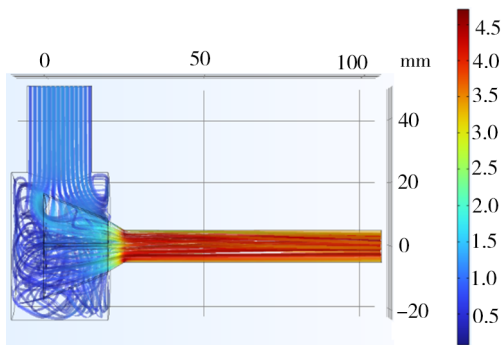


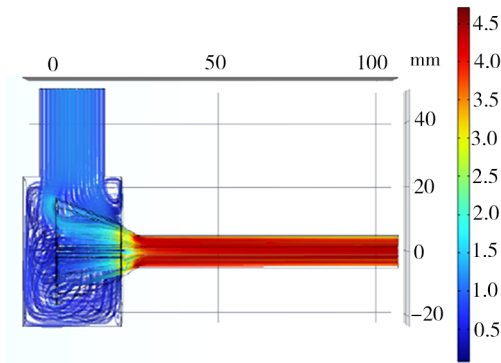
图5 带整流装置的探头水套模型

Fig. 5 Probe water jacket model with rectification device

由式(1)可知,3种情况下,水套内雷诺数均在 $1 \times 10^4$ 以上,在出水口处,雷诺数甚至达到了 $4.5 \times 10^4$ ,远高于 $4 \times 10^3$ 的紊流阈值,但增加整流片后,出水管内紊流却得到抑制,说明锥体的作用将套内的紊流状态进行强制引导,使得水流在进入出水管时,水流方向尽量一致。



(a) 6均分整流



(b) 12均分整流

图6 不同均分整流装置下探头套内的水流流线图

Fig. 6 Water flow diagram inside the probe sleeve under different number of evenly distributed

从图7探头喷水的实际效果也可以看出,没有整流时,水柱发散,这主要是水套内紊流造成的,而整流后,水柱比较平直,该结果同仿真结果的一致性较好。



(a) 无整流时



(b) 有整流时

图7 探头喷水实际效果

Fig. 7 Actual effect of probe spay water

#### 4 结论

本文利用有限元仿真软件对探头水套进行流体力学仿真,仿真数学模型采取单向流紊流 $k-\varepsilon$ 模型,求解过程采取稳态求解,流体材料为纯净水,不可压缩连续流体。网格划分为自由剖分三角形网格,模拟探头套内从入水口到出水口之间的水流状态,仿真结果表明:

(1)在无整流装置下,从入水口射入的水流撞击探头套内壁,产生严重紊流,进入出水管后,紊流状态仍然保持,水流流线方向杂乱;

(2)增加整流装置后,探头套内紊流得到很好的抑制,使得进入出水管的水流流线方向趋向一致,这种现象随着整流片增多而效果越加明显;

(3)本文为后续模拟水流经过出水口后的水柱状态,特别是随着初始水流速度加大后的水柱状态,以及利用有限元多物理场模拟功能,在加入声场后,模拟紊流状况下声场的变化打下了基础。

#### 参考文献

- [1] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化工工业出版社, 2011: 8.  
WANG Yaoxian. Composite material structure design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 8.
- [2] 唐桂云,等. 先进复合材料的无损检测[J]. 纤维复合材料, 2006(3): 33.  
TANG Guiyun. Non-destructive testing of advanced composite materials [J]. Fiber composite materials, 2006(3): 33.
- [3] 赵建华,等. 超声波喷水穿透法在先进复合材料检测中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2012(4): 105.  
ZHAO Jianhua. Application of ultrasonic water spray penetration method in advanced composite material testing [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012(4): 105.
- [4] 王柄方,等. 复合材料喷水超声检测工艺[J]. 无损宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第3期

检测,2010(8):617.

WANG Bingfang. Composite material waterjet ultrasonic testing process[J]. Non-Destructive Testing,2010(8):617.

[5] CLOUGH R W. The finite element method in plane stress analysis [C]. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Conference on Electronic Computation of American Society of Civil Engineers, Pittsburgh, PA, Sept. 8-9, 1960:345-378.

[6] 冯康. 基于变分原理的差分格式[J]. 应用数学和计算数学,1965,2(4):238-262.

FENG Kang. Difference scheme based on variational principle [J]. Applied Mathematics and Computational Mathematics,1965,2(4):238-262.

[7] LOGAN D L. 有限元方法基础(国际单位制版)[M]. 5版,张荣华,等,译. 北京:电子工业出版社,2014.

LOGAN D L. Fundamentals of finite element method (international system of units version) [M]. 5<sup>th</sup>, Zhang Ronghua translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.

[8] TABATABAIAN M. Fundamentals of finite element for engineers [M]. Dulles, VA: Mercury Learning & Information, 2014.

[9] PENG L, et al. 2. 5D CFD simulations of gas-solids flow in cylindrical CFB risers[J]. Power Technology, 2016, 291: 229-243.

[10] 李萍,等. 雷诺实验的有限元\_Multiphysics模拟[J]. 系统仿真技术,2018(3):170.

LI Ping. Finite element multiphysics simulation of reynolds experiment[J]. System Simulation Technology, 2018(3):170.

[11] HABIB M A, BEN-MANSOUR R, KHALIFA A, et al. Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction [J]. Computers & Fluids, 2012, 57: 110-123.

[12] H GU, L LI. Computational fluid dynamic simulation of gravity and pressure effects in laser metal deposition for potential additive manufacturing in space [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2019, 140(SEP. ): 51-65.