

文章编号: 1008-1542(2005)02-0160-06

# 计算流体力学(CFD)的通用软件

翟建华

(河北科技大学国际交流与合作处, 河北石家庄 050018)

**摘要:** 对化学工程领域中的通用 CFD(Computational Fluid Dynamics) 模拟软件 Phoenics, Fluent, CFX 等的具体特点和应用情况进行了综述, 指出了他们各自的结构特点、特有模块、包含的数学模型和成功应用领域; 给出了选用 CFD 软件平台的 7 项准则, 对今后 CFD 技术的发展进行了预测, 指出, 今后 CFD 研究的主要方向将集中在数学模型开发、工程改造和新设备开发及与工艺软件的匹配连用等方面。

**关键词:** 计算流体力学; 模拟软件; CFX; FLUENT; PHOENICS

中图分类号: TQ015.9 文献标识码: A

## Review of commercial CFD software

ZHAI Jiarrhua

(Department of Internation Exchange and Cooperation, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

**Abstract:** The paper summarizes the features and application of the CFD simulation software like Phoenics, Fluent and CFX etc in chemical engineering, and discusses their structure features, special modules, mathematical models and successful application areas. It also puts forward seven rules for the good choice of commercial CFD code for the CFD simulation researchers. Based on the prediction of the technology development, it points out the possible research direction for CFD in the future will focus on the development of mathematical model, project transformation, new equipment and their matching application with technological software.

**Key words:** CFD; simulation software; CFX; FLUENT; PHOENICS

CFD(Computational Fluid Dynamics) 软件是计算流体力学软件的简称, 是用来进行流场分析、计算、预测的专用工具。通过 CFD 模拟, 可以分析并且显示流体流动过程中发生的现象, 及时预测流体在模拟区域的流动性能, 并通过各种参数改变, 得到相应过程的最佳设计参数。CFD 的数值模拟, 能使我们更加深刻地理解问题产生的机理, 为实验提供指导, 节省以往实验所需的人力、物力和时间, 并对实验结果整理和规律发现起到指导作用。随着计算机软硬件技术的发展和数值计算方法的日趋成熟, 出现了基于现有流动理论的商用 CFD 软件。这使许多不擅长 CFD 工作的其他专业研究人员能够轻松地进行流体数值计算, 从而使研究人员从编制繁杂、重复性的程序中解放出来, 以更多的精力投入到研究问题的物理本质、问题提法、边界(初值)条件和计算结果的合理解释等重要方面上, 充分发挥商用 CFD 软件开发人员和其他专业研究人员各自的智力优势, 为解决实际工程问题开辟了道路。

CFD 研究走过了相当漫长的过程。早期数值模拟阶段, 由于缺乏模拟工具, 研究者一般根据自身工作性质和研究过程, 自行编制模拟程序, 其优点是针对性强, 对具体问题的解决有一定精度, 但是, 带来的问题

收稿日期: 2004-08-21; 修回日期: 2004-11-21; 责任编辑: 张 军

作者简介: 翟建华(1964), 男, 河北平乡人, 教授, 主要从事化工 CFD、高效传质与分离和精细化工方面的研究。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

也非常明显:第一,大家使用的程序语言不尽相同,使得程序运行环境不尽兼容;第二,模拟介质不同,目的各异,从而造成研究者在信息交流上的困难和成果在实际应用推广中的迟缓;第三,由于方程求解和离散方法不同,程序运行速度相差很大,同时由于对问题认识差异,对方程简化处理方法不同,造成同一问题和条件下得到不同计算答案,使人们对 CFD 的实用性产生误解和怀疑;第四,由于研究者计算机背景知识差异,造成相同参数的后处理方式不统一,研究结果缺乏可比性,从而失去可靠性;第五,重复研究造成大量时间和财产浪费,比如,在塔板液体流动模拟研究中,采用相同的描述方程,仅由于离散计算和编程缺陷,会得出不同结论,模拟结果不能再现塔板上液体流动的滞流区,从而得出数学方程适应性的差异结论,因而限制了模拟计算技术的发展。因此,以相对完善的商业模拟平台为基础,经二次开发使之适合一个过程的工作应该是 CFD 的发展方向。

化学工程的模拟计算始于 20 世纪 90 年代后期。以前,虽然人们希望得到并想方设法寻找某些偏微分方程的精确数值解,但限于数值离散方法论和数值计算工具的条件,无法实现这一目的。我们知道,描写化工过程的传质、传热、动量传递方程都是高阶非线性偏微分方程,要想得到精确解十分困难,需要若干边界条件方程和辅助方程对主体方程组加以限制和封闭,需要功能强大的计算机储存和计算。因此,大家几乎都是利用有限简化方法进行数学方程代数离散化,并辅以计算精度限制,进而求解得到一定意义上的数值解。在此背景下,CFD 通用软件包的出现成了必然。

## 1 常用 CFD 通用软件结构

计算流体力学商业软件包括以下几个模块:几何模型建立(CFD-build)与网格生成模块、前处理模块(Pre processor)、核心处理模块(CFD-solver)、后处理模块(Post processor)、软件使用教程及软件说明(Tutorial and Menu)。几何模型建立及网格生成是由使用者本人根据研究的具体问题建立的相应二维或三维模拟模型,然后再按其外形结构和具体过程特点进行数学网格化处理并生成 CFD 计算网格文件(几何文件)的过程,它是 CFD 模拟计算的工作基础。一般地,CFD 软件平台都可以实现与 CAD 的对接,以增强其处理复杂几何形状问题的能力。

前处理模块(CFD-Pre)主要是提供模拟过程基础平台及计算环境,与几何文件(mashing file)连接,建立具体问题的流体进出口边界及其边界条件,提供模拟介质的特性参数及数据库等。CFD 的核心部分(CFD-solver)包括整个“软件包”功能下的所有可能的数学模型,向使用者提供由所研究问题性质决定的相应数学模型,同时提供使用者自编程接口程序和接口命令;该模块的另一功能是向使用者提供模拟过程数学方程的计算方法、数学离散方法、收敛方法和准则,进而形成模拟命令程序(Command File)。后处理模块(CFD-post)向使用者提供模拟运算数据的存储、交换导出和各种参数图,并与基本图形处理工具(Graphical View and Plotting)实行连接,是模拟计算结果处理好坏的重要环节,可以为使用者提供模拟几何模型上不同位置的参数分布图,并可以打印输出。

使用教程及说明(Tutorial and Menu)主要向初学者提供具体的计算范例和使用说明、技巧以及使用时的适时帮助。总的来说,CFD 模拟软件使用方便与否,主要取决于软件人机交互使用的方便程度和上述几个模块过程的完善性,重要环节就是数学模型及模型参数的实用性。

就 CFD 本质来讲,流体动力学是建立能准确描述具体流动过程的数学微分方程组,依据模拟几何模型和流动过程特点给予相应的边界条件,最后,将上述方程组联立求解得出一定精度模拟结果。计算机的应用仅是快速准确实现上述目的的手段,真正技术核心是如何将高阶偏微分方程科学离散化,如何确定离散单元,如何使计算过程快速收敛。在不稳定流体流动和湍流规律研究成果基础上,利用有限体积的理念,解决了无数流动分子与流体整体特征之间的联系关系,使上述过程成为现实。

## 2 CFD 商业软件的基本选用原则

化学工程实际过程中,目前常用软件平台有 Phoenics, FLUENT, CFX 等 3 种。它们各有其特点和相应的最佳应用领域,实际过程中,使用者要依据研究问题的具体情况选择模拟平台。笔者认为,合理选用 CFD 软件是模拟成功的前提,CFD 通用商业软件的选用原则应有以下几方面。

1) 条件原则 充分考虑自身现有的软件工作环境,在合理物理模型前提下,首选现有软件,做到不盲目,

讲实效。

2) 实用原则 从具体问题出发,选择的模拟软件要包括相应的数学模型,依据问题的复杂程度,不盲目追求模型的复杂程度和精确度,以实用为模型选用准则。

3) 计算机原则 充分利用现有计算机条件,内存够用为限。计算流体力学对计算机的基本要求:一是计算速度(CPU);二是随机内存空间(RAM)。一般地,要求计算机内存存在 512 M, CPU 在 1.7 G 以上即可。

4) 行业原则 要充分借鉴前人研究成果,尽可能与前人研究具有可比性,相似性。特别是具有特殊性的某些飞行器、运动器的研究。同时,选择适当的数据处理与导出方式,以形成相似或类似的图表格式,便于比较对照。

5) 匹配原则 建立几何模型要考虑模型的复杂程度,尽可能与实际物体一致,又有升华提高,做到模拟计算与几何模型生成方法合理匹配;几何模型网格划分疏密程度与计算机内存合理匹配;几何模型与边界条件合理匹配;物理模型与模拟软件合理匹配。合理建立几何模型对达到模拟精度要求起决定作用。

6) 计算精度原则 不要特意追求模拟计算精度,一般地,以满足工程实际要求为易,不过分追求高精度,收敛准则要适当。否则,计算很难收敛,时间和费用花费将很高。

7) 阶段原则 模拟计算不是万能的,不可能解决所有问题,要分阶段工作。比如,以简单平台和模型取得计算初值,然后,进行精确模拟,从而节约时间,保证计算稳定性和收敛性。

### 3 几种通用 CFD 软件

这些 CFD 软件功能强大,应用广泛。在航天航空、环境污染、生物医学、电子技术等各个领域发挥了巨大作用,世界上有越来越多的工程师更倾向于使用这些软件来完成自己的设计。根据不同行业特点及具体情况,中国使用较多的 CFD 软件主要有: Spalding 开发的 Phoenics<sup>[1]</sup>, Gosman<sup>[2]</sup> 开发的 TEACH 和 FLOW3D,美国 Creare 公司开发的 FLUENT 和英国 AEA Technology, Harwell, UK 开发的 CFX ;日本公司开发的 Star CD<sup>[3]</sup>及布鲁塞尔大学和瑞典航空研究所共同开发的 NUMECA(FINE)<sup>[4]</sup>;中国也有相应的模拟计算程序,主要有 TEAM, FACI<sup>[5]</sup>和 DTFS<sup>[6]</sup>等计算程序。其中较为常用的 CFD 模拟软件有 Phoenics, CFX 和 FLUENT。

#### 3.1 Phoenics 软件

Phoenics 软件包是流行较早的商业化工模拟软件,自 1997 年在中国推广使用以来,以其低廉价格和代理商成功的商业运做模式,在中国高校和研究单位得到了很好推广。其特点是计算能力强、模型简单、速度快,便于模拟前期的参数初值估算,以低速热流输运现象为主要模拟对象,尤其适用于单相模拟和管道流动计算。其包含有一定数量的湍流模型、多相流模型、化学反应模型。如将层流和湍流分别假设成两种流体的双流模型 MFM,适用于狭小空间(如计算机模块间)的流动与传热模型 LEVEL,用于暖通空调计算的专用模块 FLAIR 等。不足之处在于:计算模型较少,尤其是两相流模型,不适用于两相错流流动计算;所形成的模型网格要求正交贴体(可以使用非正交网格但易导致计算发散);使用迎风一阶差分求值格式进行数值计算,不适合于精馏设备的模拟计算;以压力矫正法为基本解法,因而不适合高速可压缩流体的流动模拟;此外,它的后处理设计尚不完善,软件的功能总量少于其他软件。其最大优点是对计算机内存、运算速度等指标要求相对较低。其边界条件以源项形式表现于方程组中是它的一大特点。该软件的最新版本默认使用 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convection Kinetic Scheme)<sup>[7]</sup>数值求解格式;软件推荐选用格式为 SMART 和 HQUICK 数值求解。文献[4]曾使用该软件包对大型板式塔进行模拟,从结果看,模拟没有很好地反映塔板上液体流动速度的大小及方向。由于缺乏使用群体和版本更新速度慢,以及其他新兴软件的不断涌现,使得其实际应用受到很大限制,目前,应用较少,此处不再赘述。

#### 3.2 FLUENT 软件

FLUENT 于 1998 年进入中国市场,据报道<sup>[8]</sup>它的世界市场占有率为 40%,是应用较广的软件之一。

Creare Ltd Fluent V3.02[M]. New Hampshire, (USA), 1987.

CFXV5.0: AEA Technology Engineering Software Plc, Harwell, U K, 2000.

SPALDING, B. ZHUBRI In S. MFM Simulation of flows near walls, PHOENICS/POLIS/LECTURE/MFM[Z].

在中国的使用具有一定应用范围和影响力,尤其是用于汽车外形阻力及动力计算和造型优化计算方面较为成功。针对不同应用领域,FLUENT 开发了某些专用模块,如化工搅拌器模拟计算模块(MIXSIM)、暖通空调模块(AIRPAK)等使其应用范围得到了一定推广。软件设有 SIMPLE, SIMPLER, PISO 等压力修正法,供使用者选用。笔者认为,当用于化学工程的多相错流模拟时,要十分谨慎。早期版本 V4.3 主要侧重于数学模拟计算,模型也较多,依据实际问题要求,使用者可以自行设计和选择软件组合方式、模型及边界条件进行计算组合并实现与主体计算程序的链接。缺点是:人机交互性较差,计算中,需要使用者输入的选择操作较多,计算机使用界面操作不便,后处理功能效果不佳。其最大优势是强大的前处理程序模块 Gambit,使得建立几何模型、网格化处理等非常方便,特别适合于外形复杂的 CFD 模拟过程。这是该版本在中国得到广泛应用的主要因素之一。

新版本 V5.5 在原平台基础上,对原有缺陷进行了有效改进。中心模块以数学模型为依托,实现了既定的预先模拟组合,减少了模型参数和人为输入环节,界面更加友好方便;另外,其后处理能力效仿 CFX 得到了加强。但该版本数学模拟方程较少,因此,限制了此版本的单独推广应用。实践证明,如果将 2 个版本结合使用,能使 FLUENT 发挥最好效果。该软件的最大特点是具有专门几何模型制作软件 Gambit 模块,并可以与 CAD 连接使用,同时备有很多附加条件和附加方程添加接口,使用了目前较先进的离散技术和计算精度控制技术,如多层网格法、快速收敛准则以及光滑残差法等,数学模型的离散化和软件计算方法处理较为得当。

实际应用中发现,该软件在模拟单相流动或进出口同向或反向流动时,可以得到较好的模拟计算结果,且具有一定的计算精度。但其缺乏较好的适用于精馏塔模拟计算的多相流体数学模型,在处理诸如精馏塔板上错流流体模拟计算时,很难得到收敛结果,模拟效果不尽如人意。

FLUENT 软件包主要具有常用的 6 种湍流数学模型、辐射数学模型、化学物质反应和传递流动模型、污染物形成模型、相变模型、离散相模型、多相模型、流团移动模型、多孔介质、多孔泵模型等。提供了 2 种数值计算方法,它们是单个方程计算(Segregate Solver)方法和多方程计算(Coupled Solver)方法,见图 1,图 2。

### 3.3 CFX 软件

CFX 软件是 CFD 领域的重要软件平台之一,在欧洲使用广泛。1995 年进入中国市场,目前应用较为广泛。该软件主要由 3 部分组成: Build, Solver 和 Analyse。Build 主要是要求操作者建立问题的几何模型,与 FLUENT 不同的是,CFX 软件的前期处理模块与主体软件合二为一,并可以实现与 CAD 建立接口,功能非常强劲,网格生成器适用于复杂外形的模拟计算。Solver 主要是建立模拟程序,在给定边界条件下,求解方程;Analyse 是后处理分析,对计算结果进行各种图形、表格和色彩图形处理。该平台的最大特点是具有强大的前处理和后处理功能以及结果导出能力,具有较多的数学模型,比较适合于化工过程的模拟计算。

较新版本是 CFX5 (Version 5.6),是在原来 CFX4.3 基础上发展的,增加了几何模型设计功能和网格适用技术,使模型建立、网格生成、边界条件建立更方便;它同时包括结构网格(Structured Mesh)、非结构网格(Unstructured Mesh)和复合网格(Hybrid Grid),

采用计算松弛技术和压力修正技术,先进的多方程联解法(Couple Solver)使得模拟计算更可靠、快速准确;采用了完整的菜单交互操作和完整的模拟定义构成、模拟计算与分析、结果处理系统,使得 CFX 更直观,更方便;完善的在线帮助体系使得使用者更得心应手。在图形建立方面不仅可以与 FLUENT 媲美,且在数学模型上,新的收敛和模拟计算上都有了新的突破。CFX5.6 包括以下几方面: CFX-Build, CFX-Solver and

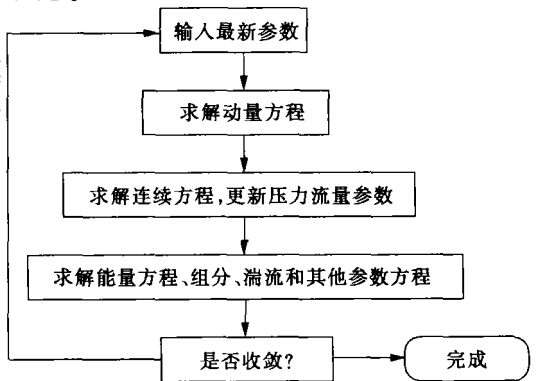


图 1 单个方程计算法简图

Fig. 1 Sketch of the segregated solution method

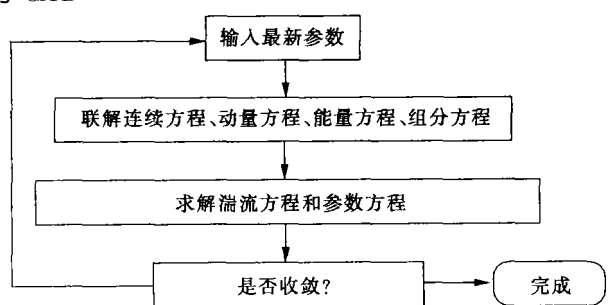


图 2 多方程联解法简图

Fig. 2 Sketch of the coupled solution method

Solver Manger, CFX-5 Feature Tutorials, CFX-Visualise and Reference Manuals.

CFX 包括的主要数学模型有零方程模型(zero equation), K-Epsilon Equation, RNG K-Epsilon Model, Reynolds Stress Model 等, 具体为真实气体和截面间质量传递模型(real gas and interphase mass transfer model); 稳定及非稳定湍流模型(steady-state and transient flow); 层流和湍流模型(laminar and turbulent flow); 传热模型和辐射模型(heat transfer and thermal radiation); 浮力流动(buoyancy condition); 非牛顿流体流动(non-Newtonian flows); 燃烧模型(combustion); 化学反应模型(chemical reaction related); 多相流模型(multiple phases flows); 多孔介质模型(flows in multiple frames and reference); 拉格朗日粒子流动模型(Lagrangian particle tracking) 等。特别地, 在管道流动和两种流体并流流动条件下, 其模拟结果与实际操作吻合良好, 并得到了实际应用和验证。

CFX 提供有以下几种多相流模型: 多相流模型(multifield model); 均质流动模型(homogeneous model); MUSIG Model; 代数滑移模型(algebraic slip model)。与 FLUENT 不同的是, 它没有 VOF 模型。CFX 的多相模拟模型适用条件为 1) 流体不可压缩或微压缩; 2) 无热辐射; 3) 各湍流过程中, 流体使用相同的湍流模型进行模拟等;

MUSIG(Multiple Size Group) 模型既考虑了分散相的分布和尺寸, 又考虑了气泡的分裂和聚合, 非常适合化学工程领域的数学模拟。但其缺点是需要较大的计算空间和内存, 一般的计算机不能运行或得不到精确的收敛结果。在凝固(solidification) 模型中, 可用于铸造金属熔液的流动模拟。其多相流是指在模拟区域内, 存在有一种以上流体的情况, 每相流体具有自身的流动范围, 譬如液滴在空气内流动, 气泡在液体中上升, 水蒸汽在锅炉内生成, 油-气-水在油井内的流动等。也可模拟固体粒子在气体或液体内的输送, 其模拟方法通常使用拉格朗日(Lagrangian) 法。特别是在模拟大量粒子输送时, 拉氏方法非常适用<sup>[9]</sup>。CFX 把所有相都看成具有同一个压力场, 直觉上出口处的相界面很难确定, 通常要采用平均质量流速及分率来区分。

从上面列举的例子可以看出, CFD 所讲的“相”与热力学上讲的“相”含义不尽相同, 具有更广泛的意义。另外, 多相流一定要与多组分流动区别开。多组分流动指相混合的物质以分子级进行混合, 其内部的速度、温度、浓度分布以及物质传递取决于其浓度差大小。而多相流动是指物质混合尺寸大于分子级, 各相都有自身的流动场, 具有不同的流速, 相间的相互作用通过相间传递完成。

CFX 提供了强大的计算结果处理和输出功能, 它包括 CFX-Visualise, CFX-View, CFX-Linegraph, CFX-Analyse 等 4 部分内容, 几乎可以输出计算的各种参数的模拟曲线、图形, 可以任意对计算域中的各方位、各剖面进行计算参数的图形展示, 非常方便快捷。同时, 还可以动画处理计算参数。关于 CFX 的各种模型、具体适用场合、其他细节可参阅 CFX 使用说明书<sup>[4]</sup>。

## 4 CFD 今后的研究方向

笔者认为, 今后 CFD 在化学工程领域的主要研究方向将集中在以下几方面。

1) 利用 CFD 技术解决具体生产过程中的工程实际问题, 创建高效、清洁的生产工艺和设备。

2) CFD 技术与化工工艺计算模拟软件譬如 Pro2, Hysis 或者 Aspen 等平台的有效结合, 使整个过程更具效率性。

3) 目前塔板上流体流场模拟与塔板效率计算的有效结合, 这一领域的研究今后将加大力度, 相信在不久将来会有所突破。

4) CFD 技术与新设备、新工艺的开发相结合, 创新工艺设备。

5) 基础理论研究将主要集中在: 针对具体过程建立新型有效的数学模型; 进一步完善模拟方程的新算法; 减少 CFD 对计算内存的需要量, 提高计算速度; 建立新的差分格式, 完善几何模型非正交网格和复合网格的生成与计算收敛; 物理分析与数值模拟相结合, 建立完善的边界条件格式; 两相流模型及交错流型的模拟等。

6) 解决实验室成果向产业化过度的瓶颈问题。

7) 今后, 模型建设的主要依据将为“三传一反+X”, X 表示将来出现的内涵和学识基础<sup>[10]</sup>。其中, 急需解决的问题是精确的模拟计算中过程参数确定, 复杂和混合网格快速生成及计算收敛技术, 新型数学模型的

研发等方面。

## 5 结束语

1) 对目前流行的 CFD 模拟平台分别进行了概述,指出了它们各自的特点、适宜的应用领域和应注意的问题。

2) CFD 技术开发需要诸如工程学、物理学、数学、计算机科学、CAD 技术、图象处理技术、现代流场实验测试技术等多学科的人材进行交融合作。

3) 完善的前处理程序和几何模型建立对成功模拟至关重要;网格生成过程和复合网格技术应用可以推动 CFD 技术的快速发展。可以预见不久将来 CFD 技术作为一个学科得到快速发展。

4) 没有万能软件。选择模拟软件要考虑具体问题的实际需要和特点,除了与研究者使用经验有关外,还与研究者目前能得到的平台有关。

## 参考文献:

- [1] SPALDING D B. Mathematics and Computers in Simulation[M]. Holland: North Holland, 1981.
- [2] GOSMAN A D, LDERISH F J K. Teach 2E[M]. London: Imperial College, 1986.
- [3] 王晓玲. 精馏塔板上三维流场及传质的模拟[D]. 天津大学, 2002.
- [4] 李向群, 丁 桦, 于 敏. 利用 NUMECA 公司的 FINE 对带一副翼的翼身组合体进行数值模拟计算[A]. 中国科学院力学研究所. 第四届实用计算流体力学经验交流会论文集[C]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2002.
- [5] 范维澄, 万跃鹏. 流动及燃烧的模式与计算[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1992.
- [6] 刘春江. 蒸馏塔板上计算流体力学及其实验验证研究[D]. 天津大学, 1998.
- [7] LEONARD B P. A stable and accurate convection modeling procedure based on quadratic upwind Interpolation[J]. Comp Meth Appl Mech Engrg, 1979, 29: 59-98.
- [8] 姚 征, 陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(20): 137-144.
- [9] 尹晔东, 王运东, 费维扬. 计算流体力学(CFD)在化学工程中的应用[J]. 石油化工技术, 2000, 7(3): 166-169.
- [10] 郭慕孙. 化学工程到过程工程[A]. 中国科学院过程研究所. 过程工程中的复杂系统科学会议 190 次学术研讨会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2002.

(上接第 132 页)

## 4 结 论

单独喷丸处理促进了 1Cr18Ni9Ti 合金表面氧化铬的形成,但由于其附着性不好,使得合金的抗氧化性能提高效果不明显。400 °C 退火处理使经喷丸处理的试样表面层的压应力得到了释放,提高了氧化膜的抗剥落性能。退火处理可起到低温预氧化的效果,合金表面优先形成氧化铁膜,氧化膜下氧压下降并且铬含量相对提高,有利于合金表面发生选择性氧化形成保护性氧化铬膜。因此,经过喷丸及退火处理后,合金的抗高温氧化性能得到了显著提高。

## 参考文献:

- [1] 朱日彰, 何业东, 齐慧滨. 高温腐蚀及耐高温腐蚀材料[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- [2] 王仁智, 宋德玉. 喷丸强化技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.
- [3] 左 禹. 喷丸、化学镀 Ni-P 对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢抗应力腐蚀的影响[J]. 材料保护, 1994, (10): 5-8.
- [4] MINAMI Y, TOOYAMA A, SEKI M, et al. Stearn oxidation resistance of shot blasted stainless steel tubing after 10-year service[J]. NKK Technical Review, 1996, 75: 1-10.
- [5] KAWAURA H, KAWAHARA H, NISHINO K, et al. New surface treatment using shot blast for improving oxidation resistance of tiAl base alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2002, 329-331: 589-595.
- [6] CARL W. Formation of composite scales consisting of oxidation of different metals[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1956, 11: 627-633.
- [7] 马 静, 何业东, 王文青, 等. 喷丸与 ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 叠层对 Cr5Mo 合金高温氧化性能的影响[J]. 河北科技大学学报, 2004, 25(4): 33-36.
- [8] MA JING, HE YE-DONG, WANG DEREN, et al. The effects of pre oxidation and thin Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on the selective oxidation of 1Cr18Ni9Ti Alloy[J]. Material Letters, 2004, 58: 807-812.
- [9] WAGNER C. Reaktionstypen bei der oxydation von legierungen[J]. Z Elektrochem, 1959, 63: 772-782.
- [10] 马 静, 何业东, 胡建文, 等. 退火处理对喷丸处理 1Cr18Ni9Ti 合金选择氧化的影响[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(3): 46-49.