

文章编号: 1001-2486(2009)03-0001-05

超声速气液两相流液化升压装置研究*

黄奕勇, 许军校

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 基于超声速气液两相流升压原理的水蒸气液化升压装置具有液化迅速、出口压力高的特点, 但是两相流升压的物理过程十分复杂, 目前分析模型中考虑的参数较少, 对细节刻画不够全面。针对这一问题, 文章建立了两相流分析模型, 考虑了液滴与水蒸气的传热、传质过程, 分析了冷却水温度、引射比、混合室收缩比、过冷度和速度滑移比对性能的影响; 得到了激波前的压力、干度、空泡份额与引射比的关系, 以及凝结激波前后的温度和压力与引射比的关系。计算结果表明: 为提高系统性能, 需要尽可能地提高液体的雾化程度, 降低冷却水的温度, 同时将引射比控制在 6~8 附近; 如果设计合理, 装置的升压系数可达 3 倍以上。

关键词: 两相流; 液化; 引射

中图分类号: V211.1 文献标识码: A

Research on the Supersonic Two Phase Flow Liquefaction Equipment

HUANG Yi-yong, XU Jun-xiao

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Liquefaction scheme based on the supersonic lifting-pressure principle of steam injector has good performance on outlet pressure and liquefaction speed. However, the physical proceed of equipment is very complex; many parameters haven't been contained in the theory equations. The paper established the theory equations which consider the heat and mass transfer between the steam and water. The effects made by the coolant water temperature, injection coefficient, convergent ratio, water undercooling and speed difference are analyzed. The results show that the water should be atomized as smaller as possible, the coolant temperature should be lower, and injection coefficient should be 6~8. If design is correct, the lifting-pressure ratio of the convergent-divergent type steam injector can reach three times than the original.

Key words: two phase flow; liquefaction; steam injector

蒸汽喷射器(喷射泵、射流泵、引射器)是一种利用高压流体抽吸低压流体的装置,具有体积小、启动快、安全可靠和高效节能等特点。超声速汽液两相流升压装置与普通的引射装置相比具有更大的出口压力,其压力高于入口蒸汽总压,被广泛应用于航天、供暖、化工、制冷、军工等领域。Cattadori 等^[1]研究了具有中心进汽、环周进水结构的超声速汽液两相流升压装置,其出口水压达到蒸汽压力的 1.1 倍; Deberne 等^[2]对具有中心进水、环周进汽结构的超声速汽液两相流升压装置进行了理论和试验研究,其出口水压达到蒸汽压力的 1.52 倍。Narabayashi 等^[3]对中心进水、环周进汽结构的超声速汽液两相流升压装置进行了高进水压力、低进汽压力条件下的试验研究,其出口水压可达蒸汽压力的 4 倍,但只有进水压力的 1.71 倍。我国在这一领域也开展了大量的理论和试验研究^[4-6]。由于两相流液化升压装置的物理过程十分复杂,目前的理论分析中考虑的因素还不够全面。

1 液化换热系统方案

高速液化装置如图 1 所示,该装置由蒸汽喷嘴、混合室和扩压段等三部分组成。混合室与扩压段间的喉部成为第二喉道。压力较高的水蒸气通过拉伐尔喷嘴形成超声速射流,冷却水在蒸汽的引射下进

* 收稿日期: 2009-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50406006)

作者简介: 黄奕勇(1972-),男,副教授,博士。

入混合室。水蒸气与水在混合室内发生动量、能量交换,二者的速度、温度差逐渐减小,蒸汽大部分凝结成水,再通过凝结激波完全转化为水。液体水在扩压段中将速度转化成压力,最终得到温度高于进口水温、压力高于蒸汽入口压力的水。

2 数学模型

喷射器工作特性计算有两种模型。第一种模型是利用 CFD 技术对喷射器内部的流场进行模拟,考虑各种可能的因素(包括液相凝结,热量和能量的转换,喷射器壁面的导热性和阻力,流体的粘性和非均相性)。这样的模型是最接近真实情况的,但是由于在混合室中流动的复杂性,至今为止还未建立起这种模型^[6]。第二种模型称为全局模型,它是在一个大的控制体当中建立守恒方程。本文采用全局模型,同时参照试验结果进行分析。

蒸汽由喷嘴以超声速喷出,与由环形通道喷出的液体射流相互撞击使其破碎成液滴,并在大的气、液相对速度作用下,液滴二次雾化成更小的液滴。过热蒸汽与液体接触,在界面上的蒸汽温度迅速降到液体温度,并有少部分凝结。此蒸汽降温凝结过程对远离界面的蒸汽来说是一个膨胀过程,因而压力迅速降低,一直降到对应液体温度的饱和蒸汽压。在混合室的前段主要是这些气液混合和液体破碎雾化,不断产生新的液面,所以液面温度保持相对较低的值。而凝结过程主要发生在混合室的后段和喉部处。此凝结过程的表现是:过热蒸汽与液滴的相对速度产生蒸汽与液滴的对流换热,在界面处产生凝结换热,汽液界面热阻很小可忽略,对流热和凝结热通过热传导传到液滴内部。当液滴直径很小时(10 μ m)可以认为液滴内部温度是均匀的。当液滴直径较大时,液滴内部的平均温度比表面温度低,此温度称为液体过冷度。例如,液滴直径 $d = 200\mu\text{m}$,热流 $q = 1\text{e}6\text{W}/\text{m}^2$,过冷度 $\Delta T = 13.8\text{K}$ 。所以后面分析中要适当考虑此过冷度,同时还要考虑蒸汽过热度以及蒸汽与液体两者速度滑移比。

图1中截面1前的流动是纯气相的,可利用一维等熵关系描述;截面2~3间的流动是纯液相的,可用伯努里方程描述。中间的混合段为两相流区间,最为复杂,下面对其进行分析。

2.1 混合室流动分析与阻力计算

混合段壁面所受到的压力与结构设计密切相关(例如混合室的收缩角度、收缩面积比、引射方式等等)。由于目前尚无人成功建立完备的 CFD 计算模型,因此这里结合文献[5]试验的数据来确定阻力的表达式。图2显示了该试验装置中测压点的分布。图3中给出了各点压力的试验测量值,图中的不同曲线代表不同的出口背压。从图3可以得到如下结论:

(1) 混合室收缩段各点的压力与出口压力无关,这说明大部分混合室段是超声速的。

(2) 混合室喉部发生压力突变,这表明喉部附近出现了激波。

(3) 混合室中间一段的压力变化不大。混合室入口处水的速度很低,气流则是超音速的,因此速度滑移比很大。大速度差导致液体破碎雾化和气液混合,对应对流换热和蒸汽凝结换热。在混合室后段主要发生蒸汽凝结换热。根据混合室的试验压力分布数据(图3),将混合室前3/4长度作为前段,其余为后段。前段末的饱和蒸汽压力为 p_{m1} ,后段的饱和蒸汽压力由 p_{m1} 升到激波前的 p_{v2} 。于是混合室的阻力为

$$f = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_m^2)(p_{v1} + p_{m1})/2 + \frac{\pi}{4}(D_m^2 - D_2^2)(p_{m1} + p_{v2})/2 + f_{ric} \quad (1)$$

其中,

$$f_{ric} = 0.5\sigma(\rho_c V_{w0}^2 + \rho V^2) \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2)/\tan\theta_c \quad (2)$$

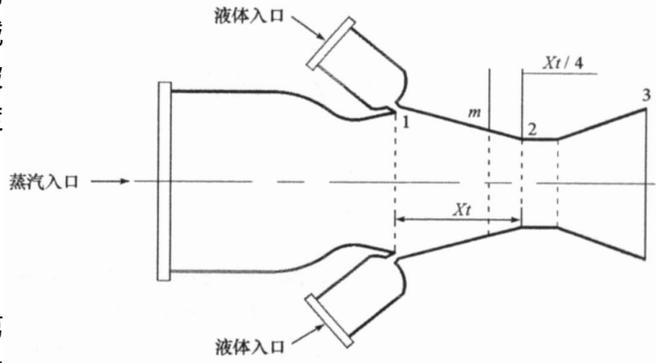


图1 高速液化装置

Fig. 1 High speed liquefy equipment

ρ 、 V 分别为两相流平均密度和平均速度, σ 为表面摩擦系数。

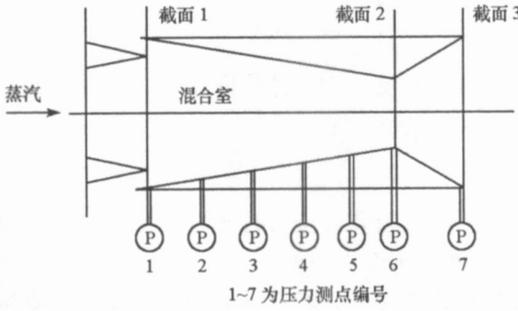


图2 压力测点分布图
Fig. 2 Measurement point distribution

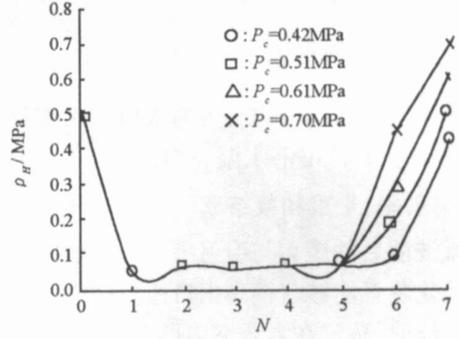


图3 混合室内压力变化趋势
Fig. 3 Measurement values of chamber pressure

2.2 混合室参数计算

水流量 m_{w1} 及流速 V_{w1} 计算如下:

$$\begin{cases} m_{w1} = C_d A_w V_{w1} \rho_{w1} \\ V_{w1} = \sqrt{2(p_{w0} - p_{v1}) / \rho_{w1}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, p_{w0} 是水的总压, p_{v1} 是水温的饱和蒸汽压。

激波前的动量守恒方程、能量守恒方程、质量守恒方程分别为

$$m_{s1} V_{s1} + p_{s1} A_{s1} + (m_{w1} V_{w1} + p_{w1} A_{w1}) \cos \theta - f = p_{v2} A_2 + (m_{s2} - \Delta m_{\dot{s}}) V_{s2} + (m_{w2} + \Delta m_{\dot{w}}) V_{w2} \quad (4)$$

$$h_{s0} m_{s1} + h_{w0} m_{w1} = \left(h_{w2} + V_{w2}^2 / 2 \right) (m_{w2} + \Delta m_{\dot{w}}) + \left(h_{s2} + V_{s2}^2 / 2 \right) (m_{s2} - \Delta m_{\dot{s}}) \quad (5)$$

$$m_{s1} + m_{w1} = A_2 [\alpha \rho_s V_s + (1 - \alpha) \rho_w V_w] \quad (6)$$

其中, ΔT_{col} 和 ΔT_{heat} 分别为水的过冷度和蒸汽的过热度; T_v 和 P_v 分别为水蒸气饱和温度和饱和压力; 水温为 $T_w = T_v - \Delta T_{col}$; 蒸汽温度为 $T_s = T_v + \Delta T_{heat}$; $\Delta m_{\dot{s}}$ 为激波前蒸汽凝结流量; α 为空泡份额; x 为含气率(干度), 两参数计算如下:

$$\alpha = 1 \left[1 + \frac{\rho_s V_s (1 - x)}{\rho_w V_w x} \right] \quad (7)$$

$$x = (m_{s2} - \Delta m_{\dot{s}}) / (m_{s2} + m_{w2}) \quad (8)$$

激波后的动量方程, 能量方程和质量方程为:

$$p_{v2} A_2 + (m_{s2} - \Delta m_{\dot{s}}) V_{s2} + (m_{w2} + \Delta m_{\dot{w}}) V_{w2} = p_2 A_2 + (m_{s2} + m_{w2}) V_2 \quad (9)$$

$$m_{w2} h_{w0} + m_{s2} h_{s0} = (m_{w2} + m_{s2}) (h_{w2} + V_2^2 / 2) \quad (10)$$

$$V_2 = (m_{s2} + m_{w2}) / (A_2 \rho_{w3}) \quad (11)$$

2.3 混合室蒸汽凝结流量计算

蒸汽凝结过程的计算是整个计算的核心。假设喷入混合室的液体都雾化成液滴, 蒸汽与液滴接触进行热和质量交换。液滴与蒸汽的传质传热模型建立在 Nusselt 模型的基础上。此模型假设: (1) 液滴形状维持球形; (2) 液化的液体沿球表面流动形成层流液膜; (3) 忽略流动动量变化, 仅受静力的作用; (4) 通过液膜向液滴传热; (5) 忽略蒸汽流动对液滴表面摩擦力, 液膜表面摩擦力主要由蒸汽凝结动量交换所产生; (6) 不考虑体积力。这种情况下, 液滴与水蒸气间的传热、传质方程分别为 (12)、(13) 式, 式

中, $N = \frac{\lambda \Delta T}{H_v \mu}$, D 为液滴直径。

$$\alpha = 0.998 \sqrt{\frac{U_{\infty} \lambda^2 \rho}{\mu D (1 + N)}} \quad (12)$$

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{q}{H_v} = \frac{\alpha (T_{sat} - T)}{H_v} \quad (13)$$

进入混合室的水在气流的冲击下被雾化成不同直径的液滴。为简化分析,将液滴的直径分为大、中、小三组,以此模拟水的雾化状态。在计算中,针对不同的液滴直径分别进行传热、传质的计算。

3 计算结果与分析

高速液化装置冷却装置的入口处水蒸气总压为 0.67MPa,总温 506K(过热度 30K)。冷却水的入口压力设定为 0.47MPa,水温 347K。

3.1 引射率,干度和凝结率

激波前后的压力与引射率的关系如图 4 所示,可见两相流在激波后压力有明显的跃升,这也正是超音速液化装置能够获得高出口压力的原因。图 5 给出了激波前干度与引射率的关系。可以看出在喉部凝结激波前,蒸汽在混合室内已大部分凝结。这种快速凝结要求液体在混合室内充分雾化成小液滴,增加汽液界面。引射率为 5 时,激波前干度为 0.02263,对应激波前蒸汽凝结率为 86.42%,即还有 13.58%的蒸汽需在激波中凝结,蒸汽凝结需要时间,也即需要一定的距离,因此混合室喉部需要一定的长度,否则升压能力下降。

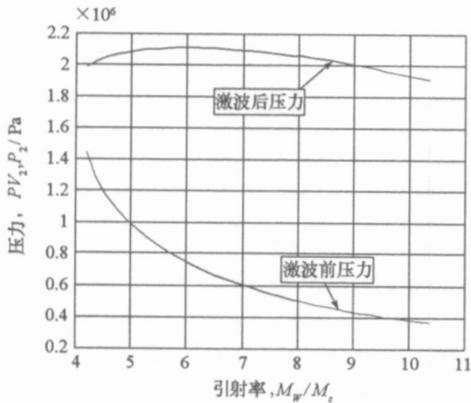


图 4 激波前后的压力与引射率的关系

Fig. 4 Pressure vs. injection coefficient

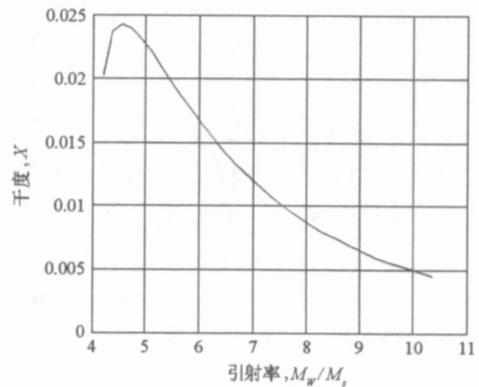


图 5 激波前干度随引射率的变化

Fig. 5 Dryness before shock vs. injection coefficient

由于大部分水蒸气在激波前已经凝结为水,因此激波前后液体的温度变化不大,如图 6 所示。另外图 5 已经表明引射率越大,激波前水蒸气的质量百分比越低,激波后水的温升越低,这点在图 6 中得到了体现。

3.2 水过冷度和蒸汽过热度的影响

蒸汽过热度主要影响蒸汽与液体的对流换热,但蒸汽与液体的换热主要是凝结换热,所以蒸汽过热度影响不大。水过冷度直接影响混合室蒸汽饱和温度,过冷度越大,饱和蒸汽温度越高,随之饱和蒸汽压越大,使混合室阻力增加,因而升压能力下降,如图 7 所示。

3.3 速度滑移比的影响

进入混合室的蒸汽速度比水速度大很多,存在速度滑移比,它的大小将影响混合室的特性。(9)式表明滑移比增加使空泡份额减少,从而汽液混合流的密度增加,有利于激波前压力的提高,如图 8 所示。

3.4 混合室收缩面积比对增压能力的影响

混合室收缩面积比越大,增压能力越强。因为通过激波混合流的密度突升,使激波前的动能转变为压力能的能力与密度流速(ρV)成比例,即近似与收缩面积比成正比,所以增压能力提高。如图 9 所示。

3.5 冷却水入口温度对增压能力的影响

冷却水入口温度直接影响混合室饱和蒸汽压,入口水温度降低使饱和蒸汽压也降低,从而混合室阻力减小。另外入口水温度降低使激波前混合流的密度增加。这些都有利于升压能力的提高,如图 10 所示。

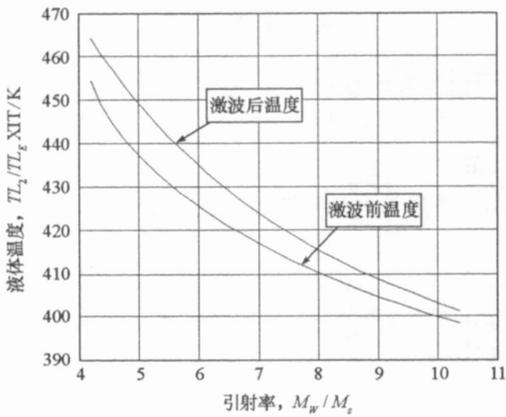


图6 激波前后的液体温度与引射率的关系

Fig.6 Liquid temp. before shock vs. injection coefficient

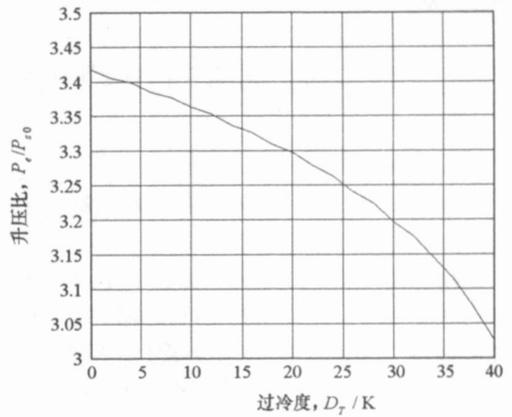


图7 水过冷度对升压比的影响

Fig.7 Water undercooling vs. pressure ratio

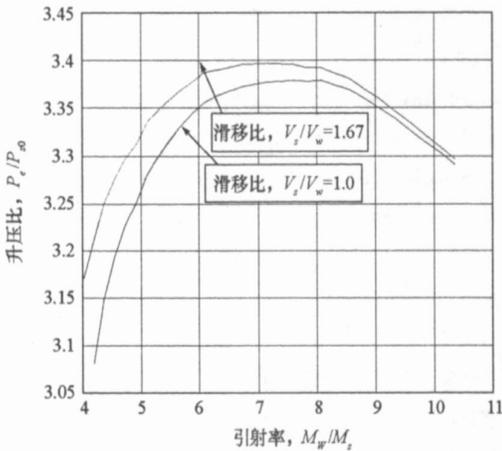


图8 速度滑移比对升压比的影响

Fig.8 Speed difference vs. pressure ratio

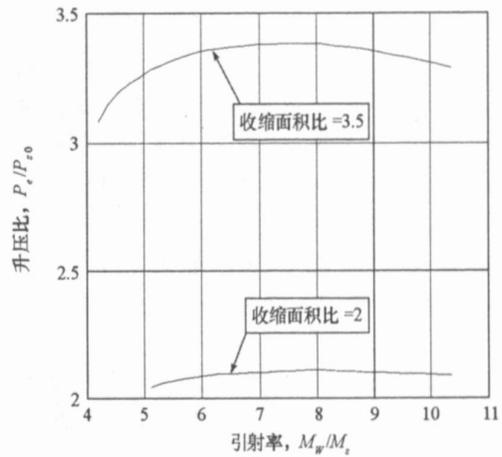


图9 混合室收缩面积比对升压比的影响

Fig.9 Convergent ratio vs. pressure ratio

4 结论

(1) 在扩压装置第二喉部形成凝结激波, 需要蒸汽在混合室内大部分凝结。另外减小混合室阻力的途径之一是减小液体的过冷度。这些要求液体在混合室内充分雾化成小液滴。(2) 引射率太低或太高, 增压性能均有下降。引射率在8附近是合适的。(3) 增加混合室收缩面积比能提高增压能力。(4) 冷却水温度高使饱和蒸汽压高, 混合腔阻力大, 造成增压能力下降。(5) 凝结激波前后不但有压力激变, 而且有蒸汽凝结分数激变, 这就决定凝结激波与纯气体压力激波有所差异。激波中流体压力升高, 促使蒸汽凝结, 而蒸汽凝结需要时间, 因而混合室喉部需要一定长度。(6) 超声速气液两相流升压装置不但能够有效液化水蒸气, 而且可以获得较高的出口压力(是水蒸气总压的3倍左右)。

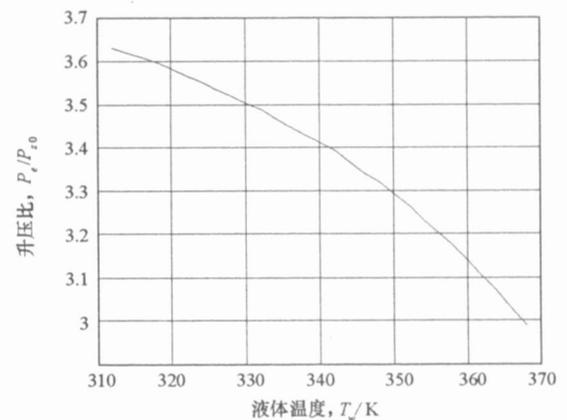


图10 液体温度对升压比的影响

Fig.10 Liquid temperature vs. pressure ratio

略剪切变形对挠度的影响,但对于夹芯复合材料薄壁箱梁,梁的高度与跨度之比要小于 $1/20 \sim 1/18$ 时才可以忽略剪切变形对挠度的影响。

4 结束语

(1) 计算夹芯复合材料箱梁的挠度时,可将夹芯铺层等效为均质的厚度不变的正交异性层,推导出复合材料箱梁截面的弯曲刚度和剪切刚度,将夹芯复合材料箱梁等效为等刚度等跨度的均质箱梁进行计算。

(2) 剪切变形对夹芯复合材料箱梁挠度的影响比普通箱梁严重,在高跨比小于 $1/20 \sim 1/18$ 时才可能忽略剪切变形对夹芯复合材料箱梁挠度的影响。

参考文献:

- [1] 刘建成,林铸明,许德强,等. 复合材料在渡河桥梁中的应用和发展[J]. 工兵装备研究, 2004, 23(1): 41- 45.
- [2] 李宏江,叶见曙,万水,等. 剪切变形对波形钢腹板箱梁挠度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 17- 20.
- [3] 吴亚平. 复合材料薄壁箱梁的剪滞剪切效应分析[J]. 土木工程学报, 1996, 29(4): 31- 37.
- [4] Xiang Y Q, Yao Y D, Wang J F. Analysis of Shear Lag Effect in Box Girder of Cable-stayed Bridge with Mono-tower and Mono-cable Plane[C]// Proceedings of IABSE Symposium, Shanghai, 2004: 284- 285.
- [5] Wu G F, Xu H. Theoretical and Experimental Study on Shear Lag Effect of Partially Cable-stayed Bridge [J]. Zhejiang University Science, 2005, 6A (8): 875- 877.
- [6] 夏利娟,金成定,汪痒宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 999- 1001.
- [7] Fu M H, Yin J R. Equivalent Elastic Parameters of the Honeycomb Core[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31 (1): 113- 118.
- [8] 何伟. 利用 MSC Patran/Nastran 分析复合材料夹层结构[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(suppl).
- [9] 石建军,吴东辉,迟波,等. Shell91 单元在复合材料蜂窝夹层结构分析中的应用[J]. 纤维复合材料, 2006(3): 40- 42.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] 程富强. 环周进汽的汽-液两相流喷射升压装置研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [2] 严俊杰,刘继平,邢泰安,等. 变截面超音速汽-液两相流升压过程的研究[C]// 中国工程热物理学会 2002 年学术会议, 大连, 2002.
- [3] 杨晨,唐胜利,何祖威. 一种两相流动态数学模型的建模方法及应用[J]. 发电设备, 1999, 39 (3): 11- 20.
- [4] 郭锦鹏. 低压蒸汽喷射器换热装置的特性研究[D]. 武汉: 华北电力大学, 2004.
- [5] 刘继平,严俊杰,陈国慧. 进水温度对汽液两相流激波升压特性影响的实验研究[J]. 热能动力工程, 2001, 16(6): 622- 624.
- [6] 严俊杰,刘继平,邢泰安,等. 变截面通道内超音速两相流升压过程的研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 27(3): 221- 224.