

文章编号:1000-582X(2010)09-113-06

溴化锂溶液竖管内降膜蒸发传热性能分析

石程名¹,王 洋¹,宫世吉²

(1. 重庆大学 动力工程学院,重庆 400044;2. 济南钢铁公司,山东 济南 250101)

摘 要:为了直接高效利用低温烟气余热驱动制冷,对不同热流密度、不同浓度溴化锂水溶液竖管内层流降膜蒸发的传热性能进行了实验研究。结果表明,降膜传热系数随溶液进口浓度升高而减小,随热流密度增加而显著增大。对实验数据进行多元线性回归计算,得到实验范围内降膜传热系数关联式。用该关联式设计降膜蒸发传热的降膜式发生器,并对相同传热量的沉浸式发生器进行设计,性能对比表明,降膜式发生器在传热系数、换热组件重量和体积上有十分显著的优势。

关键词:溴化锂溶液;降膜蒸发;传热系数;关联式

中图分类号:TB657.9,TQ051.8

文献标志码:A

Heat transfer performance analysis of lithium bromide solution falling film evaporation in vertical tube

SHI Cheng-ming¹, WANG Yang¹, GONG Shi-ji²

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Jinan Iron and Steel Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, P. R. China)

Abstract: For making the refrigeration system directly driven by low temperature waste flue gas heat more efficiently, an experimental research on the heat transfer of vertical in-tube laminar falling film with different heat fluxes and different concentrations of lithium bromide solution is conducted. The outcome of falling film evaporation experiments show that the heat transfer coefficient increases with the decrease of inlet concentration of lithium bromide solution and significantly increases with the increase of heat flux. Based on multiple linear regression calculation of experimental data, an experimental correlation of falling film heat transfer coefficient is obtained. A falling film generator of lithium bromide absorption chiller is designed from the correlation, and the immersed generator whose heat load is equal to the falling film generator is designed. The comparison of the two generators on heat transfer coefficient, weight and volume of heat transfer components shows that the falling film generator has great advantages.

Key words: lithium bromide solution; falling film evaporation; heat transfer coefficient; correlation

低品位气体热源用作溴化锂吸收式制冷机的驱动能源时,若采用沉浸式发生器,气体热源在管内的对流传热系数很低,并且难以加装肋片实现强化传热。因此发生器的总换热系数和热流密度都很低,

导致整个发生器消耗的金属材料多,体积庞大。另外静液柱高对发生器的传热性能带来严重的不利影响,如图 1 所示,在低压发生器中,静液柱高度为 300 mm 时,发生器换热量就只有无静液柱影响时换

收稿日期:2010-05-14

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAB21B02-1-2)

作者简介:石程名(1951-),男,重庆大学副研究员,主要从事热管及热管换热器、制冷技术的理论和实验研究。(Tel)023-65105730;(E-mail) cmsshi@cqu.edu.cn。

热量的 20% 左右。对此,笔者提出采用竖管内降膜蒸发^[1]来解决这些问题。气体热源在管外加热管内自上而下流动的溶液薄膜,并且可以在管外加装肋片强化传热,这样可以获得较高的传热系数,无静液柱的影响提高发生器的传热性能。

降膜蒸发换热应用于制冷、化工、炼油和海水淡化工业^[2]。早期理论研究较多,实验研究较少^[3]。在对降膜蒸发的研究中,主要有大空间内平板降膜蒸发^[4-5]、水平管外壁面降膜蒸发^[2,6]、槽道内壁面降膜蒸发^[7-8]和竖直圆管内外壁面降膜蒸发。对竖直圆管降膜蒸发的研究主要有:Chun 等^[9]进行了竖管内纯水降膜蒸发的实验研究得到了大量试验数据,目前,很多研究者在验证理论模拟的准确性时多以他们的试验数据为准;Struve^[10]在加热管内以 R11 为工质进行了降膜蒸发实验研究,发现了局部传热系数是由流动速度、热流密度和膜厚决定的;Fujita 等^[11]用纯水在竖管内进行了层流和紊流降膜流动传热实验,实验表明,层流时, Re 增大使传热系数降低,但降低的幅度不大;本课题组^[12]曾对竖管内溴化锂溶液层流降膜蒸发进行了数值模拟,得到了液膜内温度和速度分布;Adomeit 等^[13]通过粒子显微显微镜系统观察了水膜的速度分布、膜厚和表面波特性。这些研究表明,在较低热流密度时,就可得到相对较大的降膜传热系数。

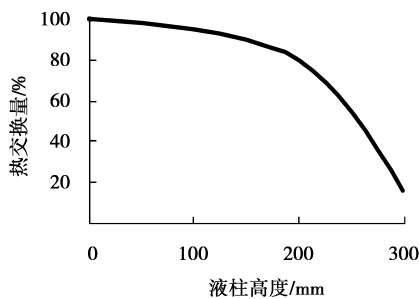


图 1 静液柱对发生器的换热量的影响

目前,研究溴化锂溶液降膜蒸发传热性能的文獻报道极少。为了了解降膜发生器的性能,笔者进行了热流密度 $q_w = 10\ 000 \sim 25\ 000\ \text{W/m}^2$, 溶液进口浓度 $W_{in} = 49.5\% \sim 58\%$, 溶液进口体积流量 $q_{in} = 7 \sim 13.458\ \text{mL/s}$ 时层流降膜蒸发传热性能试验。根据试验结果,对降膜发生器和沉浸式发生器进行对比设计。

1 实验装置与实验范围

1.1 实验装置

竖管内溴化锂溶液降膜蒸发传热实验系统如图 2 所示。实验压力为当地大气压力。在高位液罐中布置了电加热器用来对进入实验管的溶液加热到接近饱和温度。考虑到溴化锂溶液的腐蚀性,所有管材和液罐均采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。降膜蒸发管尺寸为 $\phi 25\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$, 加热长度为 760 mm。降膜管实验段上装有 12 支通过校验的镍铬-镍硅热电偶,为了保证温度测量的准确性, $\phi 0.2\ \text{mm}$ 的漆包热电偶丝紧贴等温壁面长度达 20 mm 以上。实验管长度方向每支热电偶的间距为 60 mm,周向上 4 支热电偶互呈 90° 布置。在高位液罐内布置有热电偶测量进入实验管溶液的温度。所有温度测点都是通过 Agilent 34970A 连入电脑进行监控和测试。

布膜器安装如图 3 所示,汽液之间采用两个锥面实现密封。在管套和布膜器之间环缝里形成液膜,该液膜沿着发生管下流。发生管的垂直度经过校核以保证发生管内液膜完整和润湿管壁均匀。通过调节高位液罐中溶液高度来控制进入试验管的质量流率,采用在管外布置电阻丝模拟加热。

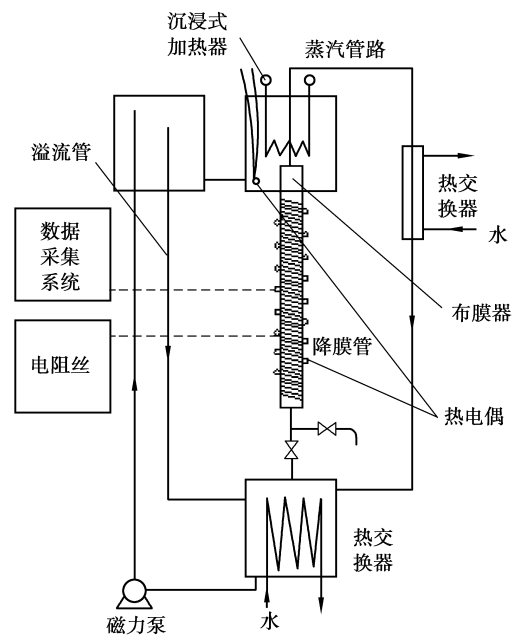


图 2 实验装置系统图

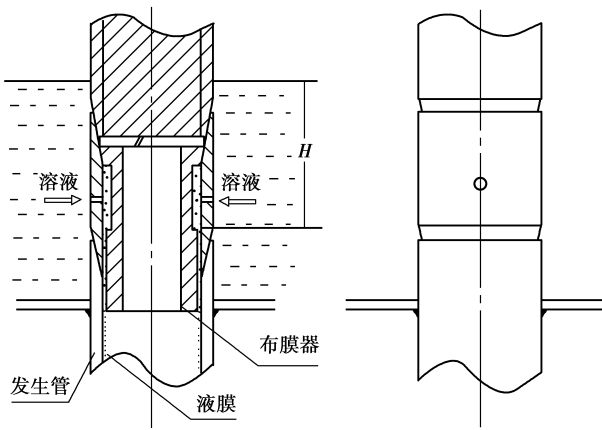


图 3 布膜部分示意图

1.2 实验范围

表 1 实验工况

参数名称	符号(单位)	取值范围
入口浓度	$W_{in}(\%)$	49.5~58
入口流量	$q_{in}(\text{mL/s})$	7~13.458
热流密度	$q_w(\text{W/m}^2)$	10 000~25 000
环缝的液膜厚度	$\delta_m(\text{mm})$	0.25
工作压力	$p(\text{Pa})$	9 725

2 实验结果

降膜蒸发传热实验的关键是要能够在管内壁形成均匀稳定的液膜。在出现布膜器倾斜或环缝部分堵塞时会出现某个测温点温度偏高,在实验中采用多点监测,以壁温稳定均匀作为判定依据,发现问题及时调整。本实验对溴化锂溶液进口流量和温度、试验管外壁温、溴化锂溶液出口温度、加入热通量等参数进行测量。

为了验证实验数据的可靠性,进行热平衡计算是非常必要的。根据能量平衡和质量平衡方程可得到理论散热损失:

$$Q_l = Q_o + M_{out}(H_s - H_{out}) + M_{in}(H_{in} - H_s), \quad (1)$$

式中:下标 l, i, o, s 分别代表散热损失、换热管内、外壁面和蒸汽,下同, H 代表焓值, J/kg 。 M_{in} 是流入实验管溶液的质量流量,由溶液在高位液罐中加热到接近饱和温度时,通过多次测量体积流量取平均值,然后由 $M_{in} = \rho q_{in}$ 计算得到; M_{out} 是流出实验管溶液的质量流量,由测量得到的流出实验管的溶液温度通过质量平衡计算得到。

用式(1)计算的散热损失都在 4.2% 以下。由定性分析可知,当加热负荷较低、工作温度较高时,总的相对误差较大。实验工况下,最低负荷为 501.51 W,此时保温层外壁温度为 34.5 °C,室内温度为 26.1 °C,采用大空间内自然对流换热进行计算,管外保温层散热损失 $Q_l = h_o A_o \Delta T = 16.369 \text{ W}$,降膜发生过程散热损失小于 3.3%。两者吻合得很好。可以认为实验系统设计合理。根据所用测量仪器的测量范围和精度,对降膜平均传热系数进行了误差分析计算,降膜管平均换热系数的相对误差为:

$$\epsilon_r(h) = \epsilon_r(Q_o) + \epsilon_r(A) + \epsilon_r(\Delta T) = 0.65\%, \quad (2)$$

式中: $\epsilon_r(Q_o) = 0.62\%$, 为加入热量的相对误差限; $\epsilon_r(A) = 0.01\%$, 为面积相对误差限; $\epsilon_r(\Delta T) = 0.02\%$, 为加入温度测量的相对误差限。综合来看实验结果,由于测量仪器系统误差引起的降膜传热系数的相对误差在合理范围以内,可以认为实验数据可靠。但以上误差没有包含系统的随机误差和降膜管不完全垂直导致降膜厚度的不均匀造成的误差。

降膜管外壁温:

$$T_o = \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} T_n. \quad (3)$$

降膜管内外壁温:

$$T_i = T_o - \frac{1}{2\pi\lambda_w L} q_w \ln \frac{R_o}{R_i}. \quad (4)$$

液膜侧传热系数:

$$h_m = \frac{Q_w}{A_i \Delta T} = \frac{Q_o - Q_l}{A_i (T_i - T_m)}, \quad (5)$$

其中: L 为传热管传热段长度, m ; T_n ($n = 1, 2, \dots, 12$) 为试验管外壁不同点的温度; T_m 为管内溶液的平均温度。

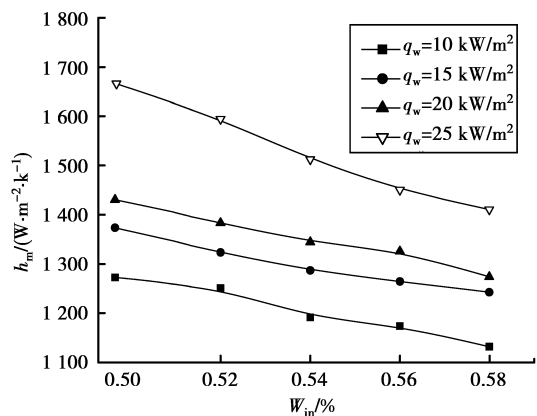


图 4 不同热流密度时 h_m 与 W_{in} 关系

图 4 是进口体积流量为 $q_{in} = 7 \text{ mL/s}$ 时,溴化锂

溶液进口浓度 W_{in} 对降膜蒸发传热系数 h_m 的影响。由图可知,在不同的实验工况下,降膜蒸发传热系数 h_m 随着进口浓度 W_{in} 的升高而减小,其原因是相同的降膜流量和热流密度下,进口溶液浓度越高,溶液的导热系数越小,质量扩散系数变小,黏度越大,表面张力增加,使液膜的流动性能变差,从而导致降膜蒸发传热系数随着浓度的增大而减小。

图5所示为不同的入口浓度下蒸发传热系数 h_m 与热流密度 q_w 的关系。由图可以看出,在一定的进口流量下,不同浓度的降膜传热系数随热流密度的变化趋势是相同的,即降膜蒸发传热系数 h_m 随着热流密度 q_w 的增加而升高,而且热流密度增加的越大,传热系数增加越明显。这是由于热流密度增加,导致溶液蒸发量增大,降低了液膜厚度;同时壁面流体过热度也会增大,液膜黏度变小,液膜流动加剧,质量扩散系数增大,传热系数增大更明显。这也符合人们普遍认知的规律。但是,值得一提的是传热系数在热流密度从 10 kW/m^2 到 20 kW/m^2 ,传热系数的增加比较均匀。当热流密度从 20 kW/m^2 增加到 25 kW/m^2 时,传热系数增加的幅度比热流密度从 15 kW/m^2 增加到 20 kW/m^2 时的幅度高得多,尤其是在溶液浓度低时更明显。笔者认为出现这种现象有可能是传热机理发生了改变,有从单纯的表面蒸发向核态沸腾转变的可能。也许表面蒸发向核态沸腾的转化热流密度就在这个热流密范围内,这一点有待进一步研究。

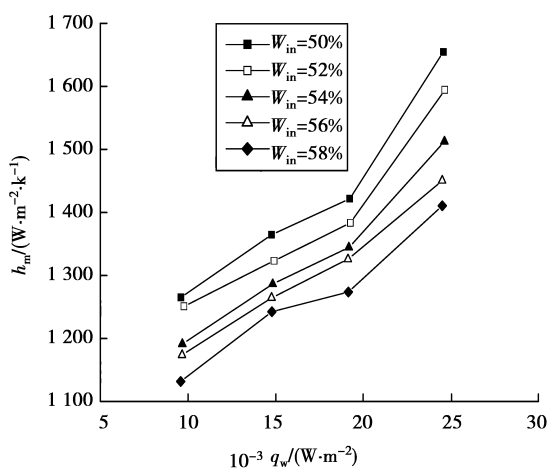


图5 不同进口浓度时 h_m 与 q_w 关系

图6是溶液浓度为49.5%时不同热流密度的进口流量 q_{in} 与传热系数 h_m 的关系图。由图看出随着溶液入口流量的增加,蒸发传热系数先减小,但流量增大至约 9.5 mL/s 后,传热系数有缓慢增加的趋势。

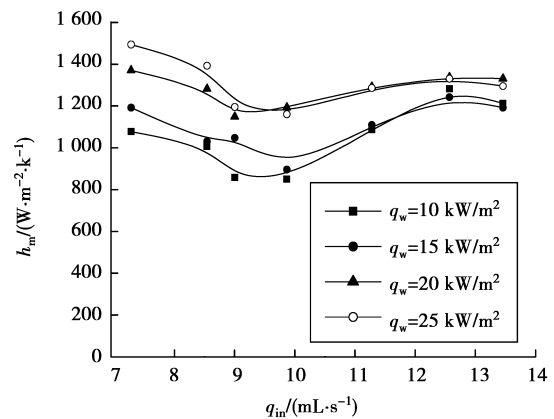


图6 不同热流密度时 q_{in} 和 h_m 关系图

势。这与文献[9]得到的在低雷诺数下传热系数随雷诺数增加而减小的结果一致。为了便于使用,将降膜蒸发传热实验数据整理成关联式。本实验的雷诺数 $Re = 4\Gamma/\mu = 287 \sim 770 < 1000$,属于层流^[14],其中 Γ 为单位周边质量流量, kg/ms 。由于溴化锂溶液的密度和黏度较大,因此雷诺数取值范围较小。在这一流态区域中,考虑到影响传热的主要因素是热流密度和溶液的浓度^[10],采用多元线性回归分析处理实验数据时,将溶液进口浓度、热流密度和雷诺数作为降膜蒸发传热系数的主要影响因素,用下式表示:

$$h_m = aW_{in}^b q_w^c Re^d \quad (6)$$

通过对实验数据进行回归计算得上式中各系数分别为: $a = 129.7712$, $b = -0.8058$, $c = 0.2422$, $d = -0.0856$,即本实验范围内垂直竖管内降膜蒸发传热系数的实验关联式为:

$$h_m = 129.7712 W_{in}^{-0.8058} q_w^{0.2422} Re^{-0.0856} \quad (7)$$

对方程进行显著性检验的 F 值是 102.6097 ,复相关系数 R 为 0.9524 ,方程是显著可靠的。得到的换热系数关联式可供降膜蒸发器的设计参考。

将本实验中计算得到的传热系数与文献[15]中沉浸式发生器表面传热系数对比,如图7所示。管外沉浸沸腾传热系数是管束的整体平均传热系数。由图可以看出,竖管内降膜蒸发传热系数和管外沉浸式发生器的表面传热系数随热流密度增加而增加,但前者在低加热热流密度 ($q_w < 15 \text{ kW/m}^2$) 换热系数比后者要大,在 $q_w > 15 \text{ kW/m}^2$ 时后者强于前者。竖管内降膜蒸发传热系数整体上升趋势比较平缓,管外沉浸传热系数上升趋势显著,其原因是管外浸没溶液液位的原因,在低热流密度时,虽然在加热管束处能产生蒸汽,但是在气泡上升过程时,整个换热过程仍属于微弱的自然对流,传热系数较

小。而随热流密度增大,气泡明显增多,扰动作用加强,整个发生器内沸腾剧烈,从而传热系数明显变大。

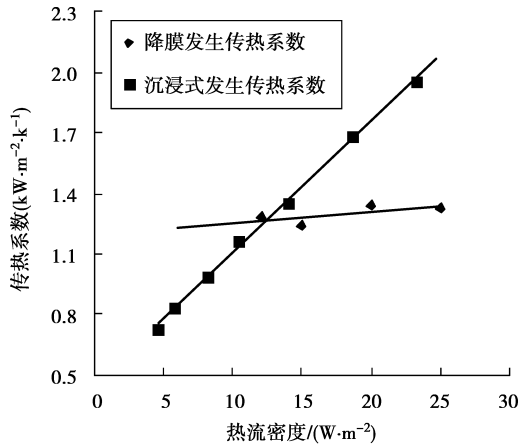


图 7 管内降膜传热系数与管外浸没传热系数对比

通过对比可以发现,在使用驱动热源方面,降膜式发生器比浸没式发生器更适合低热流密度的发生传热,有利于气体类低品位热源的回收利用,对节能减排有着重要意义,具有广阔的发展前景和应用价值。为了进行管内降膜式发生器与沉浸式发生器的性能比较,对一个烟气驱动的发生器分别进行设计。烟气流量为 49 800 Nm³/h,入口温度为 170 °C,出口温度为 150 °C。管内降膜发生器的传热管的管外径 $d_o = 0.025$ m,壁厚 $\delta_w = 0.002$ m,肋间距 $S_f = 0.01$ m,肋厚 $\delta_f = 0.0015$ m;沉浸式发生器的传热管的管外径 $d_o = 0.038$ m,壁厚 $\delta_w = 0.003$ m。通过计算,降膜雷诺数 $Re = 552$,属于层流,降膜蒸发传热采用本实验得到的式(7)计算,沉浸式管外蒸发传热系数采用文献[15]的数据计算。其他详细计算步骤在此省略,计算的主要结果数据如表 2 所示。

由表 2 看出,沉浸式发生器溶液蒸发和烟气对流的传热系数都很小,使其热流密度很低。降膜式发生器溶液蒸发传热系数和基于内管面积的烟气侧折算传热系数都很高。降膜式发生器的总传热系数是沉浸式发生器的总传热系数的 4.37 倍,而降膜式传热管的重量只有沉浸式的 31.93%,降膜式传热管簇的体积是沉浸式传热管簇体积的 52.1%。从这 3 个参数的比较看出,降膜式发生器的传热性能十分优秀。因此,全面研究溴化锂溶液降膜蒸发传热规律不但有很高的学术价值,而且采用这种发生器用于低品位气体热源驱动溴化锂吸收式制冷,节约高品位能源,还有很高的经济性。

表 2 结果对比

项目	符号	单位	降膜式	沉浸式
传热量	Q	W	388 880.73	
进口溶液温度	T_{in}	°C	81.15	
出口溶液温度	T_{out}	°C	87.60	
进口溶液浓度	W_{in}	%	56	
出口溶液浓度	W_{out}	%	59	
传热温差	ΔT	°C	75.42	
热流密度	q_w	W/m ²	19 610	3 900
溶液传热系数	h_m	W/(m ² ·K)	1 323	608
烟气传热系数	h_g	W/(m ² ·K)	381.39	66.72
总传热系数	K	W/(m ² ·K)	262.07	59.58
传热面积	A_o	m ²	19.826	86.542
传热管长度	L	m	2.3	0.98
传热管根数	N		130	878
传热组件重量	m	kg	726.31	2 274.5
传热组件体积	V	m ³	1.012	1.940 4

3 结 语

通过实验得到溴化锂溶液管内薄液膜层流 Re 小于 770 的降膜蒸发传热关联式(7),用该式对降膜式发生器进行传热计算。由管内降膜式发生器与沉浸式发生器的性能对比可知,降膜式发生器的传热性能十分优秀。采用这种发生器利用低品位气体热源驱动制冷有很高的经济效益,采用管内降膜发生器的溴化锂吸收式制冷机可广泛应用于烟气余热的回收。

参考文献:

[1] SHI C M, XU C J. Study on falling film generation heat transfer of lithium bromide solution in vertical tubes[J]. Journal of Thermal Science, 2009, 18(3): 241-246.

[2] T RIBATSKIG, M. JACOBI A. Falling-film evaporation on horizontal tubes-a critical review [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 635-653.

[3] ARSHAVSKI I, NEKHAMKIN Y, OLEK S, et al. Conjugate heat transfer during falling film evaporation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1995, 22(2): 271-284.

[4] ZHANG F, WU Y T. An investigation of falling liquid films on a vertical heated/cooled plate[J]. International

- Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(1):13-28.
- [5] ZHANG F, TANG D L. Study on the temperature distribution of heated falling liquid films[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2008, 237(7):867-872.
- [6] YANG L P, SHEN S Q. Experimental study of falling film evaporation heat transfer outside horizontal tubes [J]. Desalination, 2008, 220(1/3):654-660.
- [7] BEN JABRALLAH S, BELGHITH A, CORRIOU J P. Convective heat and mass transfer with evaporation of a falling film in a cavity[J]. International Journal of Thermal Science, 2006, 45(1): 16-28.
- [8] BEN JABRALLAH S, CHERIF A S. Experimental study of the evaporation of a falling film in a close cavity[J]. Desalination, 2005, 180(1/3): 180-195.
- [9] CHUN K R, SEBAN R A. Heat transfer to evaporating liquid film [J]. ASME Journal of Heat transfer, 1971:391-396.
- [10] STRUVE H. Heat Transfer to an evaporating falling refrigerant film[C]// 12th Congress of the International Institute of Refrigeration, August, 1967, Madrid, Spain. [S. l.]: IEEE, 1967:284-291.
- [11] FUJITA T, UEDA T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21:109-118.
- [12] SHI C M, WANG Y, HU H L, et al. Mathematical simulation of lithium bromide solution laminar falling film evaporation in vertical tube [J]. Journal of Thermal Science, 2010,19(3):239-244.
- [13] ADOMEIT P, RENZ U. Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000 (26): 1183-1208.
- [14] UEDA T, TANAKA H. Measurements of velocity, temperature and velocity fluctuation distributions in falling liquid films [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1975(2):261-267.
- [15] 戴永庆. 溴化锂吸收式制冷技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1996.

(编辑 王维朗)



(上接第 108 页)

- [4] SAKUMA Y, MATSUMURA Y, AKISUE O. Influence of Content and Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 400°C Transformed Steel Containing Retained Austenite[J]. ISIJ Internatinal,1991,31(11):1348-1353.
- [5] KURIYAMA Y, TAKAHASHI M, OHASHI H. Trend of car weight reduction using high-strength steel [J]. Automatics,2001,55(4):51-57.
- [6] STANDER N, ROUX W, EGGLESTON T, et al. A design optimization and probabilistic analysis Tool for the Engineering Analyst [M]. Livermore, USA: [s. n.], 2006.
- [7] MAJESKE K D, HAMMET P C. Identifying sources of variation in sheetmetal stamping[J]. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2003(15): 5-18.
- [8] JACQUES P J, LADRIERE J, DELANNSP F. On the influence of interactions between phases on the mechanical stability of retained austenite in transformation-induced plasticity multi-phase steels [J]. Metallurgical Materials Transactions, 2001, A32 (11):2759-2768.
- [9] IPCC: Climate Change 2007. The physical science basis intergovernmental panel on climate change [R]. Switzerland: Geneva, 2007.
- [10] STREICHER A M, SPEER J G, MATLOCK D K. Response of Retained Austenite in a C-Si-Mn High Strength TRIP Sheet Steel[J]. Steel Research, 2002, 73(6):287-293.
- [11] BURKHARDT L. Simulation des Warmumformprozesses auf Basis der Identification einflussreicher Parameter[D]. Germany: ETH Zürich,2008.
- [12] 王昶,何玉林,胡亚民,等. 轿车车身覆盖件冲压模具工艺补充面设计与应用[J]. 锻压技术, 2006, 31(5): 100-103.
- WANG CHANG, HE YU-LIN, HU YA-MIN, et al. Application and practice for addenda of stamp forming process of auto-body panel [J]. Forging & Stamping Technology,2006,31(5):100-103.
- [13] FISCHER F D, REISNER G, WERNER E, et al. A new view on transformation induced plasticity (TRIP) [J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16 (7/8): 723-748
- [14] 王孝培. 冲压手册[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [15] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

(编辑 王维朗)