

无内热源下 R134a 喷雾冷却瞬态过程研究

王 露,周年勇,曹玉春,徐慕豪

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213164)

摘 要:搭建以 R134a 为制冷工质的闭式喷雾冷却试验台,试验研究喷雾冷却瞬态传热过程,建立了准确描述其传热过程的试验曲线,分析了蒸发压力对传热性能的影响,并阐述了每个瞬态传热阶段的传热机理。试验蒸发压力变化范围为 0.207~0.331 MPa,流量范围为 0.140~0.164 L/min。结果表明:膜态沸腾区在瞬态冷却过程中所占时间最长,且表面温度冷却速率保持在 0.10 °C/s,热流密度维持在 20 W/cm² 以下,故穿越膜态沸腾区的耗时决定着喷雾冷却瞬态过程的冷却速率;增加蒸发压力,可以提升冷却速率,当蒸发压力从 0.207 MPa 增加到 0.331 MPa 时,表面温度从 130 °C 冷却至 30 °C 所需的时间从 508 s 降至 381 s;喷雾冷却瞬态过程在过渡沸腾区存在表面温度突变点,随着蒸发压力提高,突变点对应温度增加。

关 键 词:喷雾冷却;蒸发压力;瞬态热流密度;传热过程;无内热源

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.032

[引用本文格式]王 露,周年勇,曹玉春,等.无内热源下 R134a 喷雾冷却瞬态过程研究[J].热能动力工程,2020,35(2):224-229. WANG Lu,ZHOU Nian-yong,CAO Yu-chun,et al.Study on the cooling process of R134a spray without heat source[J].Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(2):224-229.

Study on the Cooling Process of R134a Spray without Heat Source

WANG Lu,ZHOU Nian-yong,CAO Yu-chun,XU Mu-hao

(College of Petroleum Engineering,Changzhou University,Changzhou,China,Post Code:213164)

Abstract: A closed-loop spray cooling system with R134a as working medium was set up. The transient heat transfer process of spray cooling was studied experimentally and the cooling curve was accurately described. Also, the influence of evaporation pressure on the heat transfer performance was analyzed, and the heat transfer mechanism of each stage was described. Experimental evaporation pressure ranged from 2.07 bar to 3.31 bar and the flow rate ranged from 0.14 L/min to 0.164 L/min. The results showed that the film boiling regime takes the longest time in the whole transient cooling process, and the cooling rate of surface temperature remains at 0.10 °C/s, while the heat flux maintains below 20 W/cm². The transient spray cooling rate is determined by the time of going through film boiling regime, and can be improved by increasing the evaporation pressure. When the evaporation pressure increases from 2.07 bar to 3.31 bar, the time required to cool the surface temperature from 130 °C to 30 °C decreases from 508 s to 381 s. Besides, there is a surface temperature discontinuity in the transition boiling regime of transient spray cooling process, and the corresponding temperature can be improved by increasing the evaporation pressure.

Key words: spray cooling, evaporation pressure, transient heat flux, heat transfer process, without heat source

收稿日期:2018-12-16; 修订日期:2019-01-09

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20180960)

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20180960)

作者简介:王 露(1995-),女,江苏扬州人,常州大学硕士研究生,E-mail:kevrnw@163.com.

通讯作者:周年勇(1986-),男,江苏盐城人,常州大学讲师,E-mail:zhounianyong@cczu.edu.cn.

引 言

喷雾冷却由于较小的传热温差需求、良好的换热性能、均匀的壁面温度及较少的工质需求量等^[1-2]优点,被认为是最有应用前景的冷却技术之一,其瞬态传热过程也常被应用于金属的淬火、定向能武器发射后的急速恢复及核岛的消防应急等工程领域。

临界热流密度 CHF 是判断冷却性能的重要依据,除此之外,喷雾冷却过程中的传热系数及冷却表面温度均匀性也受到了大量学者关注。部分学者专注于研究喷雾冷却过程的影响因素,并分析如何提升 CHF,目前普遍认可的方法为增加喷雾体积流量^[3-4],使用多喷嘴^[5]进行喷雾冷却,减小液滴尺寸、增加液滴密度,并增大液滴速度^[6]及在冷却介质中添加有促进作用的添加剂^[7-8]等;但是喷嘴高度^[9-11]、喷射角度^[12-13]等影响因素对 CHF 的具体影响还存在争议。还有部分学者通过改变喷雾流量^[3-4]、冷却表面温度^[14-15]、过冷度^[9]、喷雾高度^[9-11]和液滴物性^[6]等手段分析喷雾冷却过程中传热系数的影响因素,Zhang 等人^[10]、Gao 等人^[11]发现,减小喷雾高度可以增加了水喷雾的传热系数

却加剧了表面的传热不均匀性。

上述研究中,众多学者主要研究了开式系统下喷雾冷却过程中过渡沸腾或膜态沸腾单一区域内的传热机制及影响因素,冷却工质主要为水及盐溶液,应用在冷却初始温度较低或不导电场合难以获得良好的冷却效果。本文以 R134a 为工质展开闭式循环系统的喷雾冷却瞬态过程研究,建立准确描述喷雾冷却瞬态传热过程的试验曲线,分析蒸发压力对传热过程的影响,为喷雾冷却的进一步工程应用提供理论基础及数据支撑。

1 试验装置及数据处理

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示,闭式循环喷雾冷却试验台主要由喷雾腔、加热系统、供液系统和测控系统组成,其工作原理为:制冷剂气体从气液分离器中流出,经压缩机压缩后进入预冷器预冷,冷却后进入冷凝器冷凝至过冷液态。过冷工质经节流阀调节后由喷嘴喷射至加热表面。换热结束后的冷却工质流入预冷器升温至过热状态,确保管内制冷剂为气态。气态工质再进入水冷器进行二次控温,避免某些工况下压缩机吸气温度过高,最后经气液分离器后进入压缩机,完成循环。

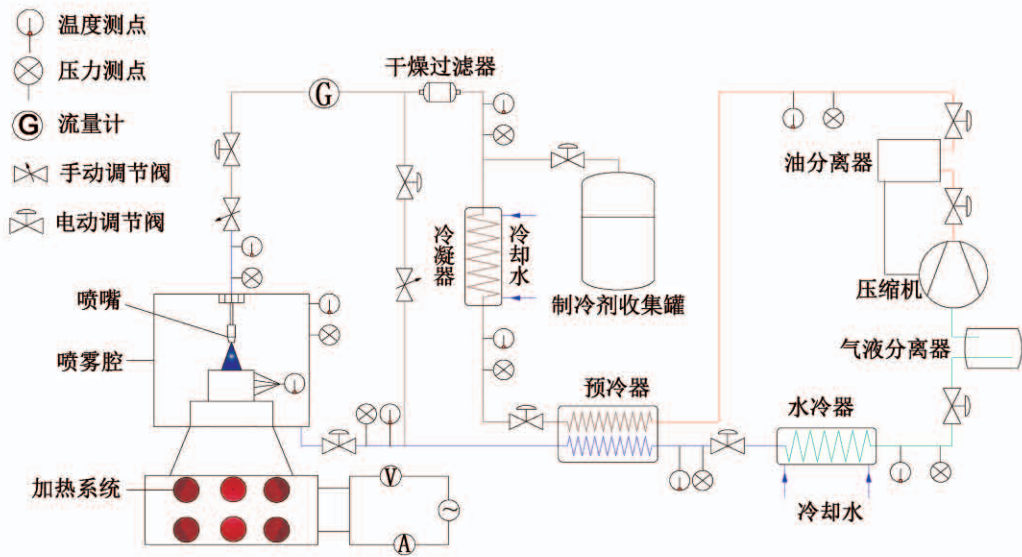


图 1 闭式循环喷雾冷却试验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a closed loop spray cooling experimental system

如图 2 所示,在距冷却表面 16.5、24.5、32.5 及 40.5 mm 位置安装 K 型热电偶。喷嘴型号为美国

斯普瑞公司的 1/8GG - SS1.5,调整喷雾高度为 60 mm;冷却基体材料为紫铜(直径 $D = 24$ mm,高度

$H=52\text{ mm}$);加热器控制加热功率 P 范围 $0\sim1\,500\text{ W}$,配置 PW9901 智能参数测量仪读取监控电功率、电流等参数。

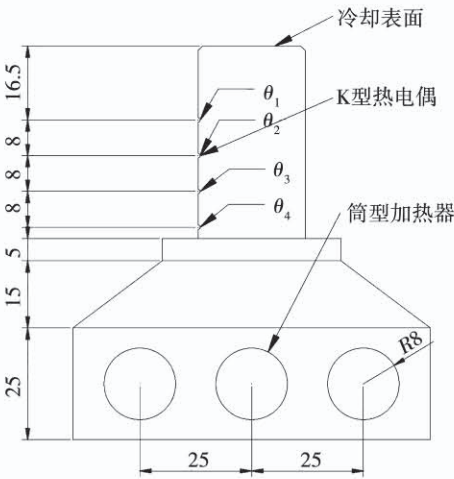


图2 模拟热源温度测点布置图(mm)
Fig.2 The temperature measurement points
of the heat source(mm)

1.2 数据处理

在试验中,热流密度 q 、冷却表面温度 T_w 和表面换热系数 h 是最重要的 3 个参数,可测数据主要为紫铜元件上不同位置对应的温度,但冷却表面温度 θ_w 并不适合使用一维傅里叶导热定律直接求解,当温度急剧变化时,还需要考虑紫铜块本身热容的影响。其中,热流密度计算式^[16]:

$$q=\lambda\frac{\theta_i-\theta_j}{10000\delta_1}-\frac{\delta_1\rho c_p}{10000}\frac{d\theta_j}{dt}\tag{1}$$

式中: q —热流密度, W/cm^2 ; λ —铜的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; θ_i 、 θ_j —不同位置热电偶所测温度, $^\circ\text{C}$; δ_1 — i 和 j 相应位置热电偶之间距离, m ; ρ —铜的密度, kg/m^3 ; c_p —铜的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

喷雾冷却表面温度计算式为:

$$\theta_w=\theta_j-10\,000\frac{q\delta_2}{\lambda}\tag{2}$$

式中: δ_2 — j 位置热电偶与冷却表面之间的距离, m 。

喷雾冷却表面传热系数计算式为:

$$h=\frac{q}{\theta_w-\theta_{in}}\tag{3}$$

式中: h —表面换热系数, $\text{W}/(\text{cm}^2\cdot^\circ\text{C})$; θ_{in} —冷却介质温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.3 误差分析

测量仪器及其精度如表 1 所示。

表 1 测量仪器及其精度

Tab.1 Measuring instruments and the precision

测量数据	测量仪器	量程	精度
冷却工质进口温度			
喷雾腔温度	PT100 铂电阻	- 50 ~ 150 $^\circ\text{C}$	$\pm 0.15\text{ }^\circ\text{C}$
环境温度			
加热块柱体温度	K 型针式热电偶	0 ~ 800 $^\circ\text{C}$	$\pm 0.004 t $
喷嘴进口压力	压力传感器	0 ~ 1.6 MPa	$\pm 0.25\%\text{ FS}$
喷雾室内腔压力			
喷雾流量	液体涡轮流量计	0 ~ 10 L/min	$\pm 1\%$

试验中热流密度、加热表面温度和综合传热系数的不确定度分别为 $\pm 5.6\%$ 、 $\pm 2.9\%$ 和 $\pm 5.4\%$ 。

2 结果与讨论

试验过程中,确保系统内制冷剂充注量为设定值,加热器功率为 500 W。加热冷却基体,当加热块测点 1 的温度达到 150 $^\circ\text{C}$ 时,关闭加热器,启动制冷系统,将冷却表面温度冷却至基本稳定状态后,记录试验数据,关闭压缩机;调整系统阀门,改变蒸发压力 p_e ,重复上述试验步骤。在蒸发压力 p_e 为 0.207 ~ 0.331 MPa,流量 G 为 0.140 ~ 0.164 L/min 的工况下,展开无内热源的喷雾冷却瞬态热流密度、热表面温度及传热系数的分析。

2.1 喷雾急速冷却传热过程的分析

在蒸发压力 $p_e=0.318\text{ MPa}$ 时,建立了瞬态喷雾冷却热流密度和表面温度随着时间变化的试验曲线。如图 3 所示,测点 1 温度达到设定温度后开启制冷系统,此时制冷系统处于启动初期,热流密度逐渐增加,温度呈下降趋势,待热流密度不再继续增加后,冷却系统此时可以排除制冷系统启动初期对传热性能的影响,喷雾冷却进入膜态沸腾阶段时,热表面温度呈线性下降趋势。热流密度缓慢降低至最小值雷登弗罗斯特点 Leidenfrost Point (LFP) 时,对应的热表面温度 $\theta_{\text{LFP}}=89.03\text{ }^\circ\text{C}$,热流密度 $q_{\text{LFP}}=17.28\text{ W}/\text{cm}^2$,喷雾冷却开始进入过渡沸腾阶段;在热表面温度达到 $\theta_{\text{STD}}=82.30\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度突变点 Surface Temperature Discontinuity (STD) 前,热流密度缓慢增长,表面温度的下降幅度没有明显变化;温度下

降至 STD 点后,热流密度快速增大,表面温度开始急速冷却,并在较短时间内开始进入核态沸腾区,此时 $q_{CHF} = 51.70 \text{ W/cm}^2$, $\theta_{CHF} = 36.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在核态沸腾区内,热流密度下降幅度越来越小,热表面温度在短暂的急速冷却后逐渐趋向于平稳。当热表面温度低于制冷剂饱和状态点时,喷雾急速冷却传热过程将进入单相区,但由于核态沸腾后期热表面温度下降十分缓慢,试验完成单相区的传热过程将耗费大量时间,且 R134a 制冷剂单相区的实际利用价值不高,为了节省试验时间,故未展现单相区的传热过程。

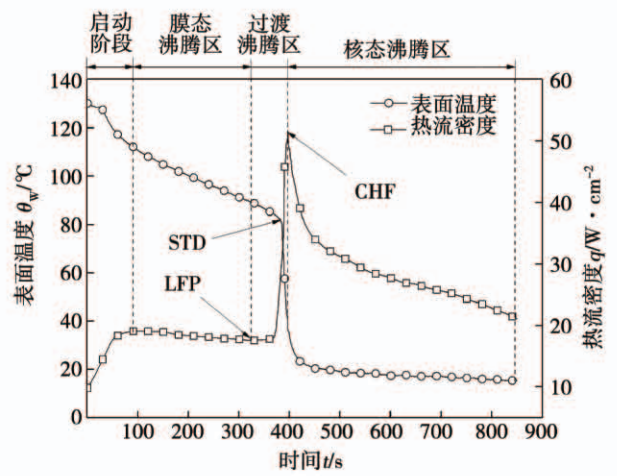


图 3 蒸发压力 $p_e = 0.318 \text{ MPa}$ 时热流密度和表面温度变化图

Fig. 3 Heat flux and surface temperature variation at $p_e = 0.318 \text{ MPa}$

2.2 蒸发压力对喷雾急速冷却传热过程的影响分析

如图 4 所示,不同蒸发压力下,热流密度随着时间的推移,都呈先快速增加,再线性下落至最低点,后短暂缓慢上升,再开始急速增长,待达到最大值后,先急速下降后缓慢线性下降;随着蒸发压力的增加,启动阶段和膜态沸腾区的热流密度数值变化不大,但达到 LFP 及 CHF 的时间有所减少,CHF 值逐渐增加。

如图 5 所示,不同蒸发压力下,表面温度随着时间的推移,先较快速下降,再缓慢线性下降,再急速下降,最后趋于平稳。随着蒸发压力的增加,热表面温度达到 STD 所需时间越来越短,同时蒸发压力不

断提高,进液温度随之升高,表面过热度降低,趋于平稳的热表面温度也逐渐升高,从 $9.80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $19.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

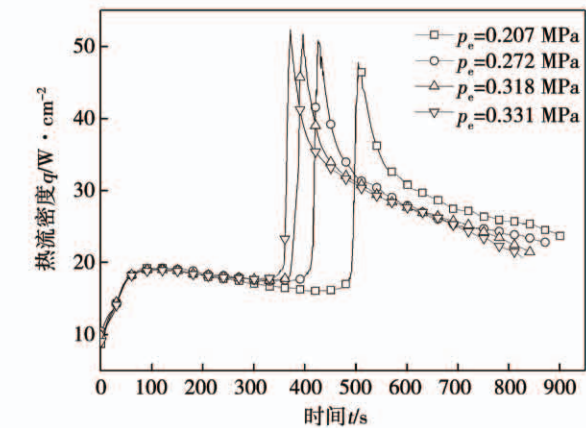


图 4 不同蒸发压力下热流密度随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of heat flux with the different evaporation pressure

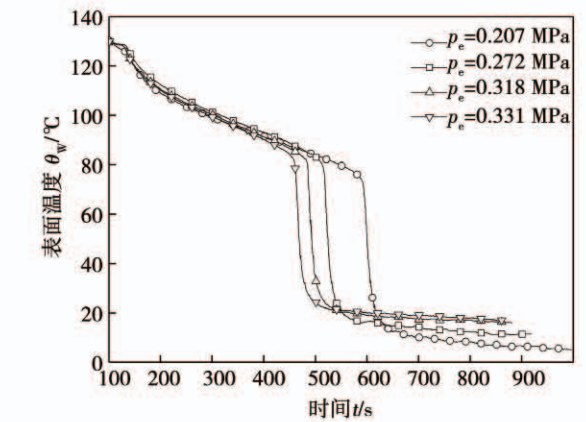


图 5 不同蒸发压力下热表面温度随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of surface temperature with the different evaporation pressure

如图 6 所示,不同蒸发压力下,表面传热系数随着时间的推移,先缓慢升高,再趋向于平稳,再急速上升,最后不断趋近于平稳。随着蒸发压力的增加,喷雾急速冷却传热过程中的传热系数的最大值也相应增大。

试验过程中,随着冷却工质蒸发压力 p_e 的不断提升,CHF 呈上升趋势。表面温度的变化趋势与表面传热系数能够很好地对应,但热流密度体现在表面温度上就有些许的滞后性。

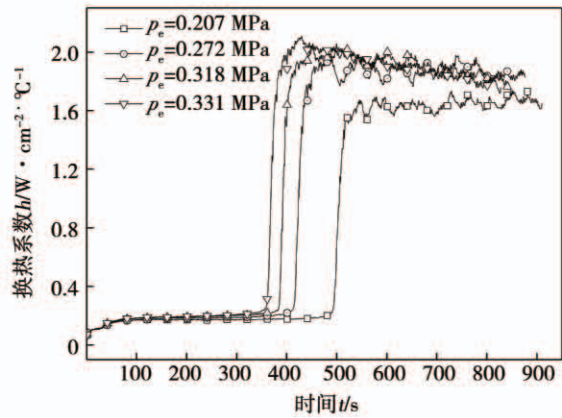


图 6 不同蒸发压力下表面传热系数随时间变化曲线
Fig. 6 Curves of heat transfer coefficient with the different evaporation pressure

2.3 各蒸发压力下喷雾急速冷却极值点的分析

除去冷却系统启动初期的准备时间, LFP、CHF 点将喷雾急速冷却试验曲线为 3 个典型区域: 膜沸腾区、过渡沸腾区和核沸腾区。另外, 表面温度曲线在过渡沸腾区内存在 STD 点, 该点标志着喷雾急速冷却的传热能力开始显著增强, 冷却速率急速增大。

如图 7 所示, 随着喷雾冷却系统内蒸发压力的增加, 冷却过程的 CHF、LFP 都呈线性增大, 其中当蒸发压力 $p_e = 0.207 \text{ MPa}$ 时, $q_{\text{LFP}} = 15.75 \text{ W/cm}^2$, 蒸发压力 $p_e = 0.331 \text{ MPa}$ 时, $q_{\text{LFP}} = 17.61 \text{ W/cm}^2$, 在 LFP 点时的热流密度提升了 11.8%; 当蒸发压力 $p_e = 0.207 \text{ MPa}$ 时, $q_{\text{CHF}} = 47.06 \text{ W/cm}^2$, 蒸发压力 $p_e = 0.331 \text{ MPa}$ 时, $q_{\text{CHF}} = 52.30 \text{ W/cm}^2$, 在 CHF 点时的热流密度提升了 11.1%。

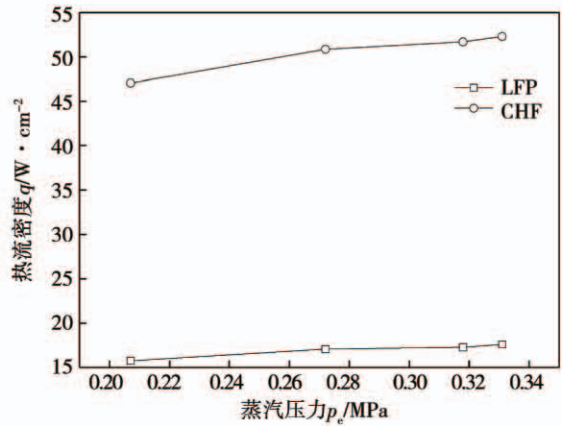


图 7 不同蒸发压力下的 CHF 及 LFP 点
Fig. 7 Points of the CHF and LFP under different evaporation pressure

如图 8 所示, 随着蒸发压力的增加, 到达 LFP 点和 CHF 点的时间逐渐减少, 其中当蒸发压力 $p_e = 0.207 \text{ MPa}$ 时, 到达 LFP 点的时间为 417 s, 而蒸发压力 $p_e = 0.331 \text{ MPa}$ 时, 到达 LFP 点的时间为 321 s; 当蒸发压力 $p_e = 0.207 \text{ MPa}$ 时, 到达 CHF 点的时间为 510 s, 而蒸发压力 $p_e = 0.331 \text{ MPa}$ 时, 到达 CHF 点的时间为 374 s, 所用时间降低了 26.7%; 另外, 过渡沸腾区持续时间在喷雾急速冷却过程中所占比例最小, 膜态沸腾区的耗时最大; 随着蒸发压力的增加, 膜态沸腾区表面温度冷却速率保持在 $0.10 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 热流密度也保持在 20 W/cm^2 以下, 数值变化并不明显; 增大蒸发压力, 可以减少穿越膜态沸腾区的时间, 提升冷却速率, 当蒸发压力从 0.207 MPa 增加到 0.331 MPa 时, 表面温度从 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷却至 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 所需的时间从 508 s 降至 381 s, 所用时间减少了 25%。

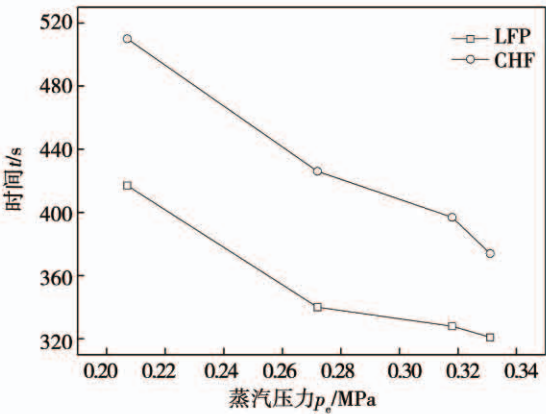


图 8 不同蒸发压力下达到 CHF 及 LFP 点的时间
Fig. 8 Time required to reach CHF and LFP under different evaporation pressure

由表 2 可知, 随着喷雾冷却系统内蒸发压力的增加, 到达 STD 点的时间逐渐减少, 且 STD 点处温度值不断上升; 另外, STD 出现在 CHF 之前, 随着蒸发压力的增加, 两点之间的时间间隔变化并不明显, 过渡沸腾区耗时很短。

表 2 各蒸发压力下 STD 点参数

Tab. 2 The STD points under different evaporation pressure

蒸发压力/MPa	STD 点时间/s	距 CHF 点时间/s	STD 点温度/°C
0.207	492	18	72.83
0.272	415	11	78.98
0.318	382	15	82.30
0.331	355	19	83.22

2.4 喷雾急速冷却传热过程的机理分析

对于以 R134a 为制冷剂的喷雾急速冷却过程,其在启动阶段,液滴撞击热表面换热,由于热表面温度远远高于出液温度,液滴迅速在热表面汽化形成薄蒸汽层,此时液滴汽化成膜过程中吸收了部分热量,造成热流密度快速上升及表面温度快速下降,但这一趋势未能延续较长时间。膜沸腾区内,热表面相对稳定的蒸汽膜层极大地降低了喷雾冷却的传热性能,热流密度开始下降,直至最低点,热表面温度的下降速率也变缓;在热流密度达到 LFP 之后,喷雾急速冷却过程进入过渡沸腾区,该区域为不稳定的膜态沸腾与核态沸腾交替存在组成的混合沸腾区。过渡沸腾初期,膜态沸腾占主导,热表面被一层较为完整的汽膜所包裹,少量液滴能够接触热表面,但未能浸润全部热表面,此时传热性能较差,冷却速率较低;但随着表面温度的降低,液滴与热表面接触频率增加,核态沸腾的比重逐渐增大;当表面温度到达 STD 点时,核态沸腾占主导,传热性能迅速增强,热表面温度开始大幅降低。当热流密度到达 CHF 时,喷雾急速冷却过程进入核态沸腾区,此时喷雾急速冷却的换热性能最强,表面温度的降低幅度也最大,但随着表面温度的不断降低,喷雾急速冷却的传热温差逐渐减小,其阻碍效应变得十分显著,导致核态沸腾的后期冷却速率也十分缓慢。

由表 3 可知,蒸发压力的变化主要影响制冷剂的流量,随着蒸发压力的增大,制冷系统的循环流量逐渐增大,流量的增大将促进喷雾急速冷却的传热速率。随着蒸发压力的增加,喷雾急速冷却的速率也相应增大,制冷剂流量前期占主导因素,其带来的增益效应强于传热温差减小带来的削弱效应,但是随着蒸发温度的不断升高,必然导致喷雾急速冷却的速率增加变缓慢,甚至出现下降趋势。

表 3 制冷循环参数

Tab.3 Parameters of refrigeration cycle

蒸发压 力/MPa	蒸发温 度/℃	冷凝压 力/MPa	冷凝温 度/℃	流量/ L · min ⁻¹
0.207	-8.83	0.767	29.08	0.140
0.272	-2.22	0.766	29.72	0.150
0.318	2.48	0.766	29.54	0.164
0.331	3.35	0.772	30.05	0.164

3 结 论

搭建了以 R134a 为制冷工质的闭式喷雾冷却试验台,试验研究了无内热源条件下喷雾冷却瞬态传热过程,建立了准确描述其传热过程的试验曲线,分析了蒸发压力对传热过程的影响,得出结论:

- (1) 随着时间的推移,热表面温度呈先较快下降,再较缓慢类线性下降,再急速下降,最后趋于平稳的趋势;
- (2) 喷雾冷却膜态沸腾区持续时间较长,热流密度一直保持在 20 W/cm²以下,穿越膜态沸腾区的耗时决定着冷却过程的冷却速率,且所耗时间随蒸发压力增加而减少;
- (3) 喷雾瞬态冷却临界热流密度、传热系数随着蒸发压力、流量的增加而增加,最大临界热流密度可达 52.3 W/cm²;
- (4) 喷雾冷却瞬态传热过程在过渡沸腾区存在表面温度突变点 STD,标志着冷却过程中传热能力增强的开始,随着蒸发压力的增大,其值不断增大。

参考文献:

[1] CHENG W L,LIU Q N,ZHAO R,et al. Experimental investigation of parameters effect on heat transfer of spray cooling[J]. Heat and Mass Transfer,2010,46(8):911-921.

[2] 邓 增,沈 俊,戴 巍,等. 大功率半导体激光器散热研究综述[J]. 工程热物理学报,2017,38(7):1422-1433.
DENG Zeng,SHEN Jun,DAI Wei,et al. Review of heat dissipation of high power diode lasers[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2017,38(7):1422-1433.

[3] 张 伟,王照亮,徐明海. 闭式循环喷雾冷却传热特性实验研究[J]. 热能动力工程,2012,27(4):429-433,513-514.
ZHANG Wei,WANG Zhao-liang,XU Ming-hai. Experimental study of the atomization cooling and heat transfer characteristics of a closed type cycle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2012,27(4):429-433,513-514.

[4] MZAD H,TEBBAL M. Thermal diagnostics of highly heated surfaces using water-spray cooling[J]. Heat & Mass Transfer,2009,45(3):287-295.

[5] LIN L,PONNAPPAN R,YERKES K,et al. Large area spray cooling[C]. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,2006.