

# 面向玻璃化保存的射流微通道研究

陈春, 王吉, 邱兰兰, 蒋志豪, 江超杰, 周晓明

(电子科技大学, 成都 611731)

(Tel:15196655778, Email: zhouxm@uestc.edu.cn)

**摘要:** 玻璃化保存是一种理想的生物样品长期保存方法, 降温 and 复温过程对玻璃化保存的效果至关重要。射流微通道降复温结构具有超高的换热效率, 还能够提供较好的换热均匀性, 有助于实现适用于生物样品玻璃化保存降复温过程。本文建立了射流微通道数值仿真模型, 研究了分流室高度、射流阵列壁厚、射流孔沿流道数目等关键结构参数对换热性能的影响。结果表明: (1) 提高分流室高度有助于提高换热性能。(2) 存在最优的射流阵列壁厚和射流孔沿流道数目, 得到最好的换热性能。(3) 合理布局射流阵列小孔, 能够调节换热系统的换热均匀性。

**关键词:** 玻璃化保存; 射流微通道; 数值仿真; 换热均匀性

## Study on jet-impingement/micro-channel for Vitrification Preservation

Chen Chun, Wang Ji, Qiu Lanlan, Jiang Zhihao Zhou, Jiang Chaojie, Xiaoming

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China)

**Abstract** Vitrification preservation is an ideal method for long-term preservation of biological samples. The cooling and rewarming process is crucial for the preservation of vitrification. The jet-impingement/micro-channel structure has high heat exchange efficiency, and can also provide better heat transfer uniformity, which is conducive to the realization of a vitrification process for biological samples. In this paper, a numerical simulation model of jet microchannel was established, and the influence of key structural parameters such as the height of the shunt chamber, the wall thickness of the jet array, and the number of flow channels along the jet hole on the heat transfer performance were studied. The results showed that: (1) Increasing the height of the diverter chamber helped to improve the heat transfer performance. (2) There was an optimal wall thickness of the jet array and the number of flow paths along the jet hole to obtain the best heat transfer performance. (3) The reasonable layout of the jet array holes could regulate the heat transfer uniformity of the heat exchange system.

**Keywords** Vitrification preservation Jet-impingement/micro-channel Numerical simulation Heat transfer uniformity

## 0 引言

玻璃化保存是一种原理创新的低温保存方法<sup>[1]</sup>, 低温生物学中玻璃化保存是指在生物材料低温保存的所有阶段(降温、储存和复温)都避免冰晶的形成。射流微通道降复温结构除了具有超高的换热效率, 还能够提供较好的换热均匀性, 采用射流微通道结构能保证在温度均匀性的基础上实现超高速的降复温。

近年来, 国际传热学领域对微通道射流的研究较少。本世纪初, Jaeseon Lee 和 Issam Mudawar<sup>[2]</sup>对微通道射流的结构换热效果展开了实验和仿真研究。基于 k-e 模型对单相流换热特性进行了准确的预测, 并得到以下结论: (1) 射流速率对微通道射流的冷却效果具有很大影响, 增大射流速率能够提高换热效率, 降低换热表面温度。当射流速率过小时, 装置内对流换热占主导地位, 而当射流速率较大时, 射流换热占主导地位; (2) 当其它条件相同时, 换热壁面温度随着入口工质温度的降低而降低。(3) 单相流换热效率及壁面温度均匀性受微通道高度的影响, 较小的通道高度意味着横向流动对射流的影响较小, 但同时减小了换热面积, 而较大的通道高度射流受横向流影响较大, 降低了冷却性能。

除此之外, Jérôme Barrau 等<sup>[3]</sup>设计了喷嘴截面为矩形的射流微通道结构, 进行了相关实验, 研究了入口流速、微通道分布及高度对降温性能以及温度均匀性的影响。在国内, 清华大学的刘明艳<sup>[4]</sup>利用 FLUENT

\*基金项目: 面向玻璃化保存的微尺度传热机理和强化方法研究(51676030);

作者简介: 陈春, (1992- ), 男, 硕士研究生, 机械工程

软件对微通道射流的换热特性进行了数值仿真研究，发现驱动泵功率、通道尺度对微通道射流的传热性能有较大影响；华中科大的桂进乐<sup>[5]</sup>通过数值模拟对比分析，发现相对于微通道方法，微通道射流能有效改善温度均匀性，具有更高的换热效率。

国内外的研究者针对射流微通道内冷却液流动换热情况已经有了一定的研究<sup>[6-8]</sup>，但均未考虑射流降温（复）温工质在分流室的分配问题。射流微通道各结构参数都会对装置换热特性造成极大影响，装置结构设计困难。本文利用数值仿真软件 Fluent 研究各结构参数对玻璃化保存微通道射流方法换热特性影响规律，从而指导接下来的装置设计。

## 1 仿真研究

### 1.1 模型

如图 1 所示，装置的完整仿真几何模型由微通道芯片、上下两块阵列射流面板、样品组成。其中，微通道芯片（长  $L=30\text{mm}$ ，宽  $W=28.5\text{mm}$ ）包含上下两块铜制微通道阵列片、样品溶液和隔热密封片。微通道阵列片中流道高度  $H_c=1\text{mm}$ ，流道宽度  $w_w$  和肋板宽度  $w_c$  均为  $0.5\text{mm}$ ，样品和隔热密封片厚度均为  $0.5\text{mm}$ 。

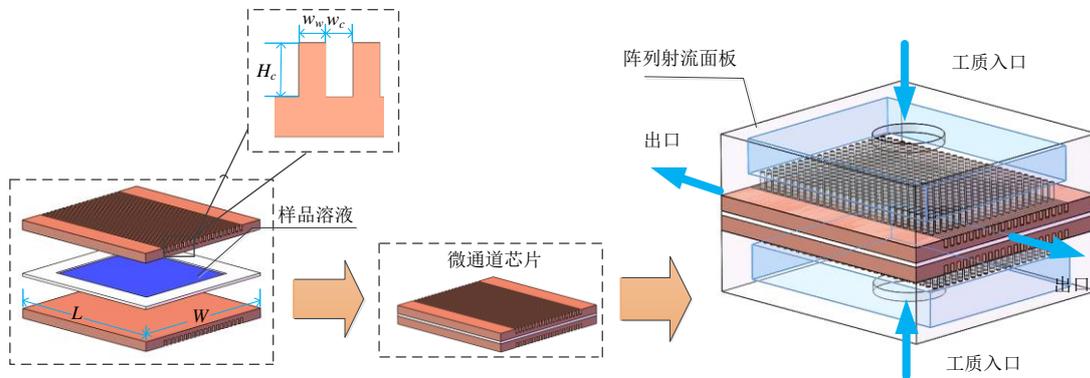


图 1 完整模型

考虑到完整仿真几何模型结构复杂，在数值求解过程中网格数量较大，并且模型中的液氮和样品在降温过程中都要经历相变，要对此进行仿真研究难度太大，因此需对模型进行简化。简化后的模型如图 2 所示，简化模型结构只有完整模型的八分之一，这是因为完整几何模型在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上均具有对称性。此外，在简化模型中还去掉了隔热垫片和样品溶液。本章的仿真目的是用于指导射流平直微通道式装置设计，装置中直接与样品接触的是微通道片内壁，而样品也是通过该内壁与外界进行换热而完成降温的，因此装置的换热特性完全能够由该内壁的换热特性来反映。针对该模型，本文主要研究的结构参数有：分流室高度  $H$ 、阵列射流壁厚  $Z$  和沿流道射流孔数目  $n$ 。

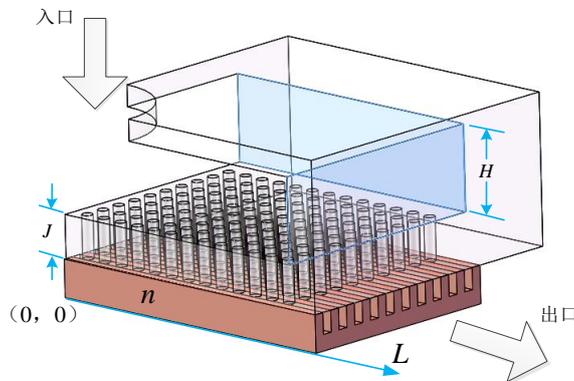


图 2 简化模型

## 1.2 仿真方法

Fluent 软件中  $k-\omega$  模型集合了对低雷诺数、可压缩流体、剪切流作出的修正，可用于描述射流、受壁面限制等流动情况。射流平直微通道中的流动情况非常复杂，其转捩雷诺数低，壁面边界层对流动影响极大，因此本文采用标准  $k-\omega$  湍流模型进行数值仿真计算。本文应用 PISO 算法进行压力速度耦合计算，并用一阶迎风迭戈格式。通过调节求解松弛因子，控制收敛性和收敛速度。射流平直微通道式装置降温过程为瞬态问题，在计算的每一时间步长均需要收敛。本文在流体域采用非结构网格，而在固体域划分结构网格，并通过对网格不断加密，观察结果变化以验证网格无关性。

## 1.3 仿真结果

### 1、分流室高度对换热特性影响

液氮从阵列小孔喷射入微通道流道内之前需要在分流室进行流量的分配，分流室高度  $H$  对换热特性会造成影响。为了分析分流室高度  $H$  对射流平直微通道换热特性影响，在其它条件不变的情况下，分流室高度分别取 2.5mm、5mm、10mm、15mm，进行仿真计算。

数值仿真计算的优点是能够提取流场、温度场中关心的任意物理量数值，而不受实际测量方法限制。这儿提取不同分流室高度下，微通道片内壁面由  $0^{\circ}\text{C}$  下降至  $-130^{\circ}\text{C}$  的平均降温速率、降温过程进行至 0.1s 时的瞬时对流换热系数，如图 3 所示；0.1s 时内壁面温度分布云图，如图 4 所示。

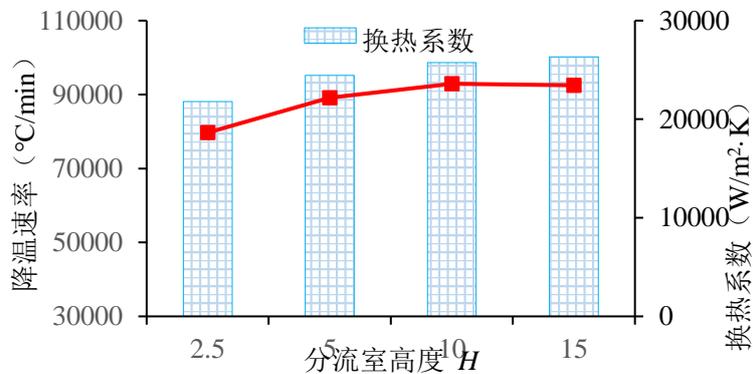
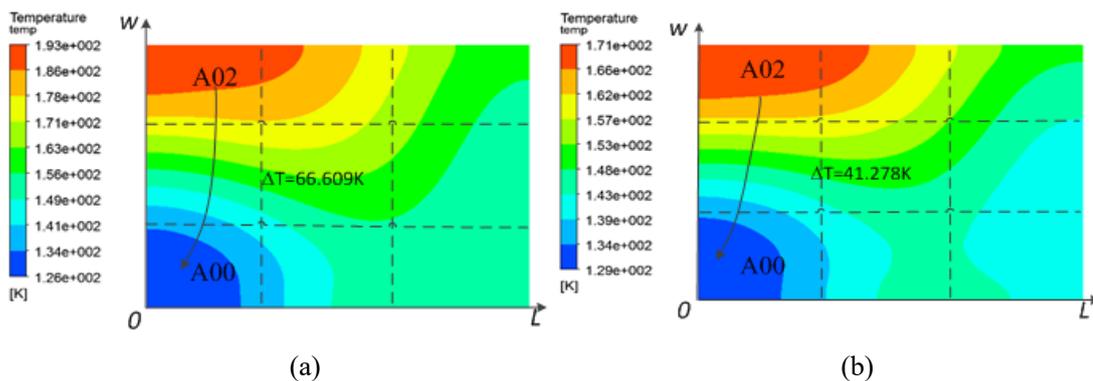


图 3 不同分流室高度下平均降温速率和 0.1s 时刻换热系数

由图 3 可知随着分流室高度的增加，降温速率与换热系数有相同的变化规律，均是先增后减，在  $H=10\text{mm}$  时获得降温速率极大值  $92924^{\circ}\text{C}/\text{min}$  和换热系数极大值  $25732 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。



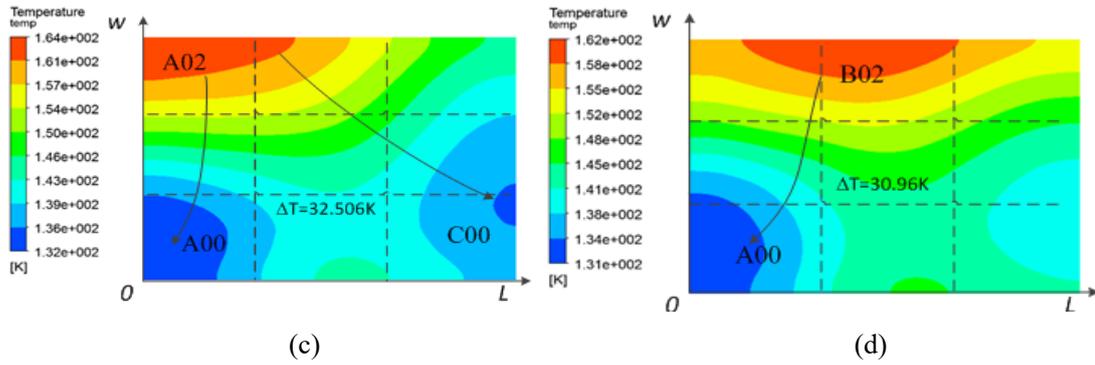


图 4 不同分流室高度下 0.1s 时刻内壁面温度分布。(a)  $H=2.5\text{mm}$  时内壁面温度分布；(b)  $H=5\text{mm}$  时内壁面温度分布；(c)  $H=10\text{mm}$  时内壁面温度分布；(d)  $H=15\text{mm}$  时内壁面温度分布

由图 4 可知，增加分流室高度能够改善内壁面温度均匀性，当分流室高度  $H=2.5\text{mm}$  时内壁面的最大温差高达  $66.609\text{K}$ ，而当  $H=10\text{mm}$  时最大温差仅  $32.506\text{K}$ 。但当  $H$  超过  $10\text{mm}$  后，继续增加分流室高度对减小最大温差效果有限，因此射流平直微通道式装置有一个最优的  $H$ ，在确保装置较高的换热效率的同时，保证优异的温度均匀性，通过仿真对比确定此最优  $H=10\text{mm}$ 。

## 2、射流孔沿流道数目对换热特性影响

相对于微通道式降温装置，射流平直微通道式装置的一个优点是工质入口在微通道上方，通过对小孔位置进行合理布置能够用于调节装置的温度均匀性。本节在其它条件相同的情况下， $n$  分别取 3、7、13，进行瞬态计算，期望获得最适合玻璃化保存射流平直微通道式装置设计的  $n$  值。

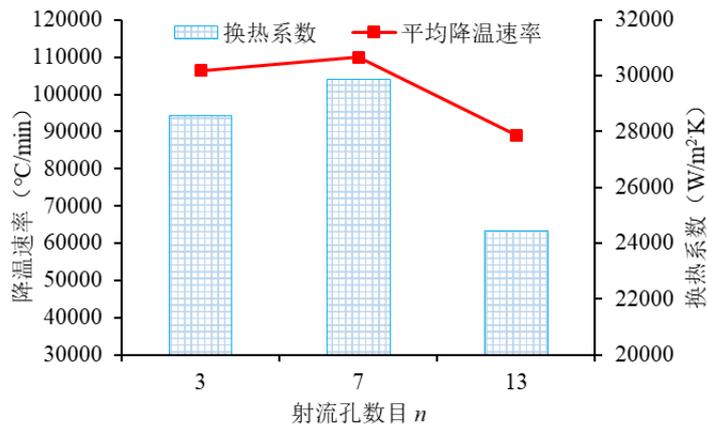
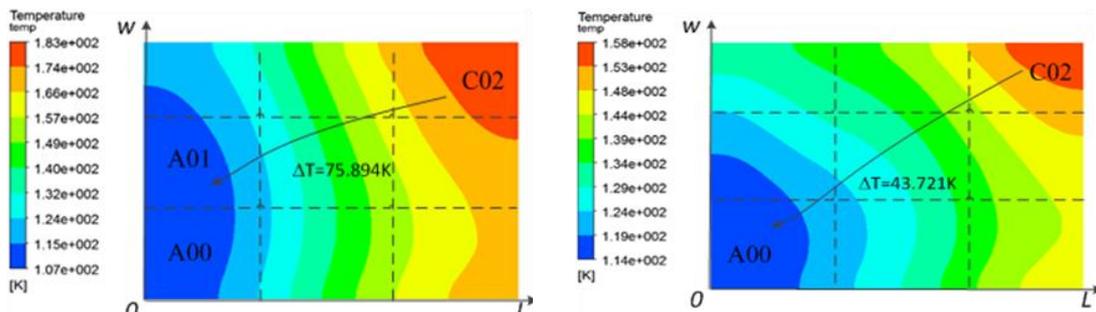


图 5 不同射流孔数目下平均降温速率和 0.1s 时刻对流换热系数

如图 5 所示，随着  $n$  的增加，降温速率及换热系数均先增后减，在  $n=7$  时取得极大值，分别为  $109995^{\circ}\text{C}/\text{min}$  和  $29889\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 。若以换热效率作为唯一的评价标准，则  $n=7$  是最优的射流孔数目。



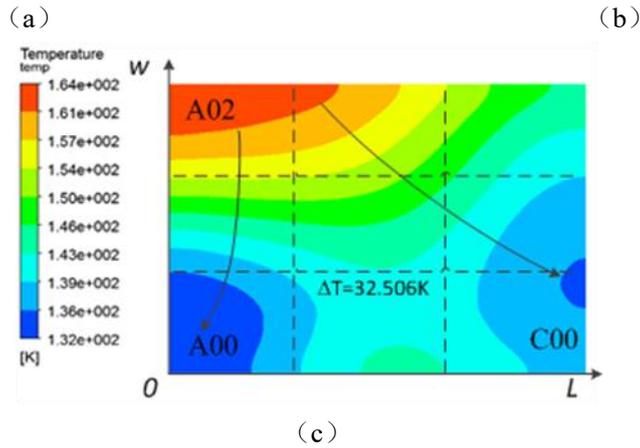


图 6 不同射流孔数目下 0.1s 时刻内壁面温度分布。(a) $n=3$  时内壁面温度分布；(b) $n=7$  时内壁面温度分布；(c) $n=13$  时内壁面温度分布

从图 6 的温度分布云图可以看到，随着  $n$  由 3mm 增加至 18mm，内壁面的最大温差不断减小，当  $n=3$  时，最大温差为 75.894K， $n=7$  时的最大温差为 43.721K，而  $n=13$  时，最大温差仅 32.506K。虽然整个内壁面上的最大温差， $n=7$  要远超过  $n=13$  时，但当仅考虑样品正对区域时， $n=7$  时的温差为 20.121K，而  $n=13$  时温差为 22.402K， $n=7$  时的温差反而小于  $n=13$ 。因此综上考量，本章在实验装置设计时，取  $n=7$ 。

### 3、射流阵列壁厚对换热特性影响

阵列射流是射流微通道的主要组成部分，其壁厚必然对传热性能有很大的影响，因此有很大的研究必要。在其它条件不变的情况下，通过不断减小壁厚（由 2mm 至 0.5mm），研究壁厚对射流平直微通道换热特性的影响规律，具体结果见图 7 和图 8。

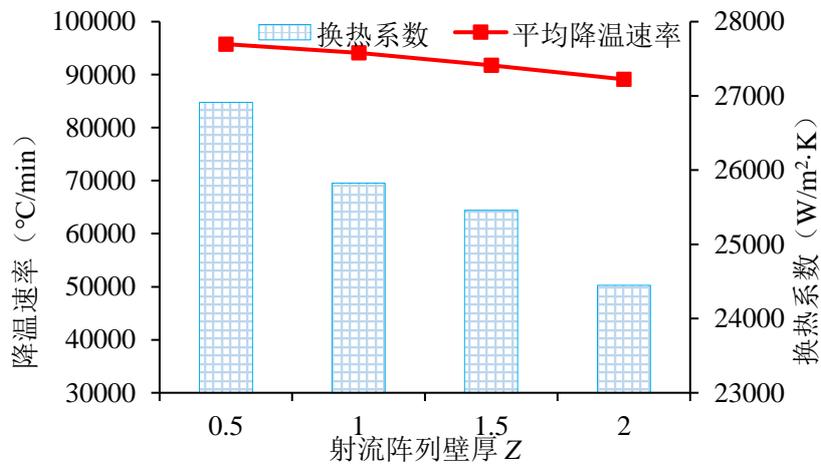


图 7 不同射流阵列壁厚下平均降温速率和 0.1s 时刻对流换热系数

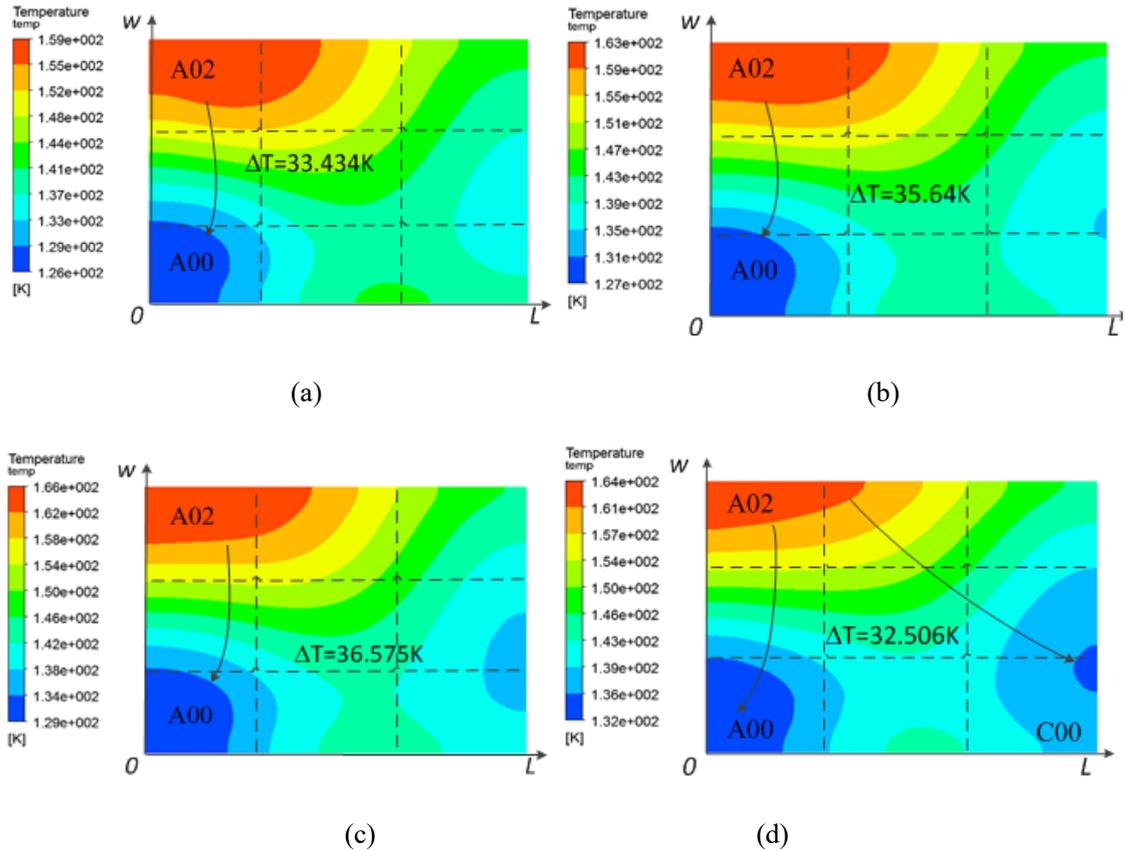


图 8 不同壁厚下 0.1s 时内壁面温度分布。(a)  $Z=0.5\text{mm}$  时内壁面温度分布；(b)  $Z=1\text{mm}$  时内壁面温度分布；(c)  $Z=1.5\text{mm}$  时内壁面温度分布；(d)  $Z=2\text{mm}$  时内壁面温度分布

图 7 展示的是内壁面平均降温速率和 0.1s 时刻对流换热系数与壁厚关系，由图可知，随着壁厚的减小，降温速率不断提升，对流换热系数也由  $24446\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  增加至  $26914.7\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 。而由图 8 则可以看到，当  $Z$  的由  $2\text{mm}$  减小至  $0.5\text{mm}$  时，最大温差一直保持在  $34\pm 3^\circ\text{C}$  水平，温度梯度方向也无显著变化。这说明装置设计时， $Z$  值越小越好。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

由 3 仿真结果可知，综合考虑降温速率和温度分布均匀性， $H$  和  $n$  均具有一个最优值，即  $H=10$  与  $n=7$ ，而  $Z$  则越小越好，考虑到加工工艺以及聚四氟乙烯材料特性的限制，取  $Z=1\text{mm}$ 。样品载体芯片规格  $L=30\text{mm}$ ，宽  $W=28.5\text{mm}$ ，样品层（甘油氯化钠溶液）厚度  $d=0.5\text{mm}$ ，对应着的样品载量为  $220\mu\text{L}$ 。由此设计的面向玻璃化保存的微通道射流降复温装置如图 9 所示，装置由外架盖板、两个入射水嘴、两个密封垫片、微通道射流芯片、外架底座构成。

微通道射流芯片的设计如图 10 所示，由微通道芯片和射流阵列面板组成。其中微通道芯片由上下两片微通道片、中间的垫片和样品溶液构成。微通道片一侧通过线切割工艺加工制作整列微通道，单个微通道宽度和肋板宽度均为  $0.5\text{mm}$ ，通道高度为  $1\text{mm}$ ，另外在微通道片两侧边缘分别加工了槽和小孔用于整个微通道芯片的夹紧密封，夹紧密封类似于订书机原理，采用的是两根 C 型针来实现。微通道芯片装载在上下射流阵列面板内，射流阵列面板上的小孔直径为  $0.5\text{mm}$ ，正对微通道芯片流道。由入口水嘴进入的降复温工质到达射流阵列面板上的分流腔，在分流腔实现对工质流量分配，然后从射流小孔阵列喷入微通道内，再由微通道两侧出口流出。

\*基金项目：面向玻璃化保存的微尺度传热机理和强化方法研究(51676030)；

作者简介：陈春，(1992- )，男，硕士研究生，机械工程

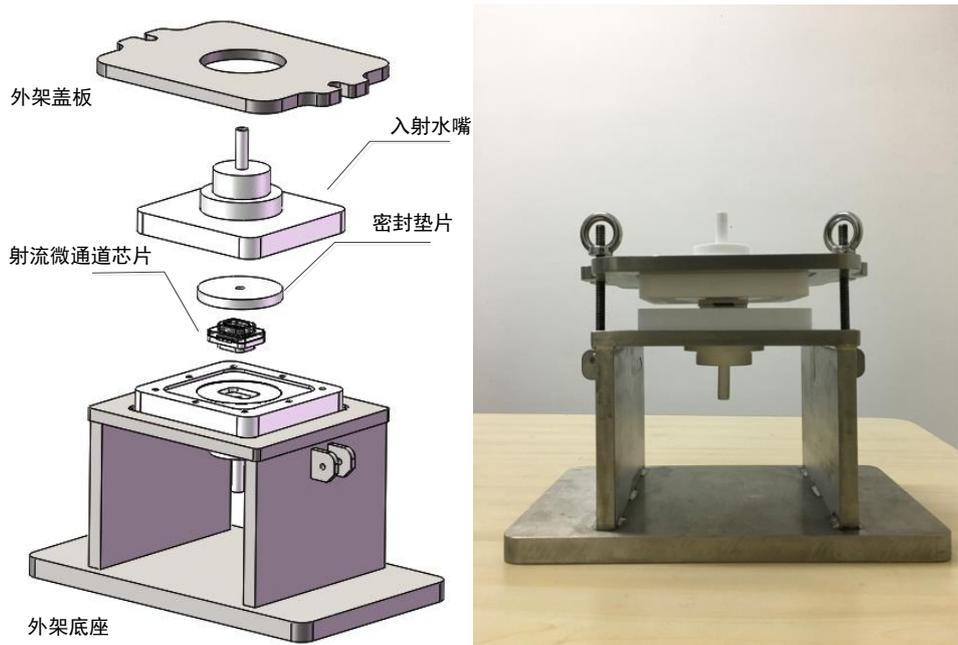


图 9 微通道射流降复温装置

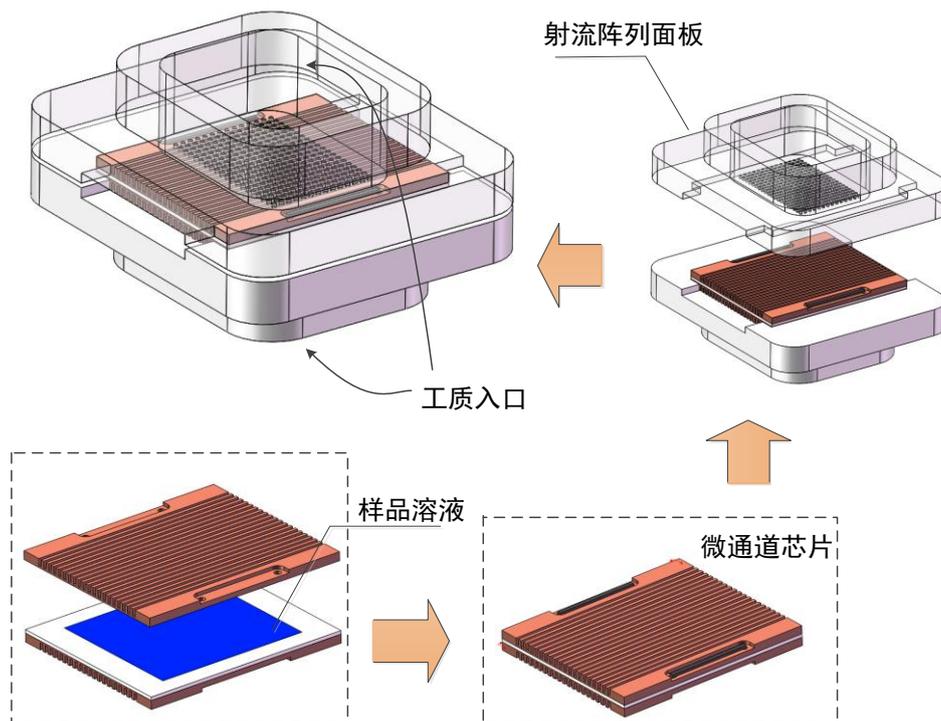


图 10 微通道射流芯片示意图

## 2.2 实验方法

玻璃化保存需要跨越易出现冰晶生长的危险温度区域 DTR，DTR 的范围为 0 至-130℃，因此实验中记录分析样品各处跨越 DTR 的温度数据，并根据跨越 DTR 的时间计算算术平均值，从而评价装置的换热效率。其次，计算降复温过程中样品各处的降复温速率标准差，以评价装置的换热均匀性。

为了对装置在降复温过程中的换热特性进行研究，预先在平直微通道芯片的样品层布置热电偶进行温度数据采集。由于射流平直微通道式降复温装置在微通道芯片长度、宽度方向均具有重复对称性，因此只

需布置 4 根热电偶，芯片内部温度传感器的分布方式如图 11 所示。实验降（复）温工质为液氮（75%乙醇 42℃），由高压气体驱动。

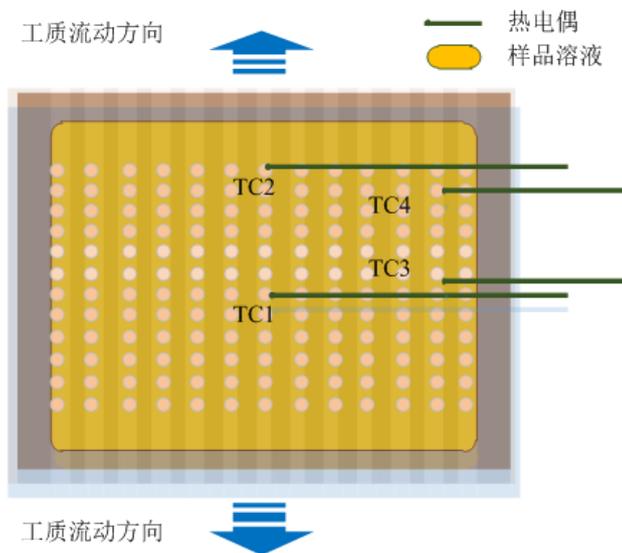


图 11 热电偶布置

### 2.3 实验结果

在样品层厚度 0.5mm，操作压强 0.5Mpa 的条件下进行降温实验，由热电偶记录的降温过程如图 12(a) 所示，跨越 DTR 区域，四个位置平均降温速率分别为 9512℃/min、8814℃/min、8667℃/min、8525℃/min，温度分布较均匀，在此样品层厚度 0.5mm 下，将压强提升至 0.7Mpa 进行多次重复实验，得到样品的平均降温速率达到  $13270 \pm 986$ ℃/min；操作压强 0.5Mpa 的条件下进行复温实验，由热电偶记录的复温过程如图 12 (b) 所示，跨越 DTR 区域，四个位置平均复温速率分别为 15758℃/min、15600℃/min、14182℃/min、13565℃/min，复温过程温度分布较均匀，而当压强达到为 0.7Mpa 时，复温速率高达  $17021 \pm 1176$ ℃/min。

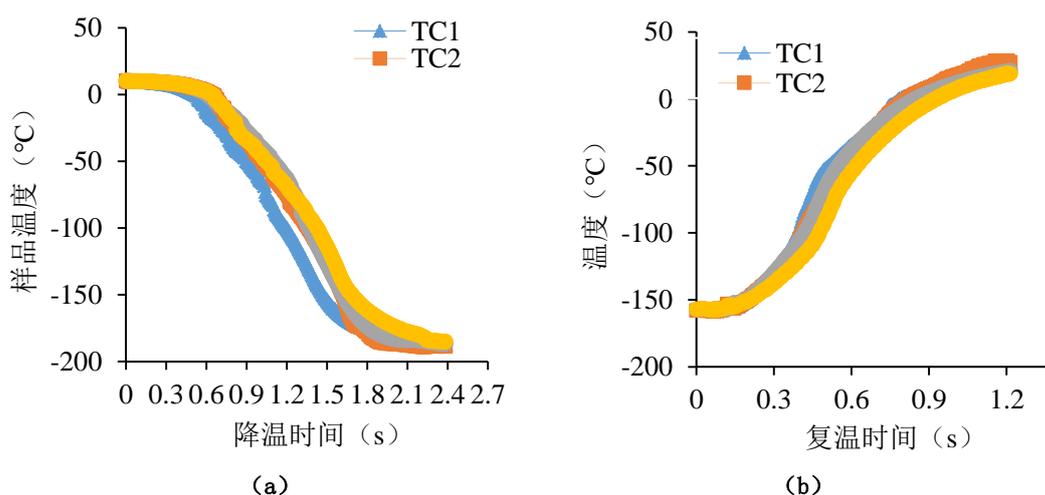


图 12 一组典型降复温曲线图 (a) 降温曲线图 (b) 复温曲线图

## 3 结论

本文从微通道射流的原理出发，面向玻璃化保存的特点和需求，首先运用数值仿真的方法研究了分流

\*基金项目：面向玻璃化保存的微尺度传热机理和强化方法研究(51676030)；

作者简介：陈春，(1992- )，男，硕士研究生，机械工程

室高度  $H$ 、射流孔沿流道数目  $n$ 、射流阵列壁厚  $z$  对微通道射流换热特性的影响规律。随后通过数值仿真的结果来指导了面向玻璃化保存的微通道射流装置设计, 并通过实验对装置的换热特性进行了研究和分析, 得到以下结论:

- (1) 面向玻璃化保存微通道射流装置集合了微通道和微射流装置的特点, 获得了较高的降温速率 ( $13270\pm 986^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) 和复温速率 ( $17021\pm 1176^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), 是一种新型玻璃化保存降复温方法;
- (2) 由于降复温工质从微通道上方进入, 相对于微通道装置而言温度均匀性更好;
- (3) 操作压强的调节能够实现降复温速率的大范围调节, 并且有一定规律, 操作压强的增加能够提升装置的换热效率。

## 参考文献

- [1] B. Wowk. Thermodynamic aspects of vitrification[J]. *Cryobiology*, 2010, 60:11-22
- [2] Jaeseon Lee, Issam Mudawar. Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part I—pressure drop characteristics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 48, Issue 5, February 2005, Pages 928-940.
- [3] Barrau, J.; Riera, S.; Leveille, E. Nozzle to plate optimization of the jet impingement inlet of a tailored-width microchannel heat exchanger[C]. 5th International conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (HTFFM-V). Marseilles, FRANCE. APR 22-25, 2014.
- [4] 徐向华,刘明艳,梁新刚. 带射流微小通道热沉的数值模拟及优化[J]. *工程热物理学报*. 2011 年 12 期.
- [5] 桂金乐. 基于微小通道与冲击射流的电子器件冷却机理研究[D]. 湖北武汉: 华中科技大学. 2015.
- [6] Sung M K. Single-phase and Two-phase Heat Transfer Characteristics of Low Temperature Hybrid Micro-channel/Micro-jet impingement Cooling Module[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(15-16): 3882-3895.
- [7] Sung M K. CHF Determination for High-heat Flux Phase Change Cooling System Incorporating Both Micro-channel Flow and Jet Impingement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(3-4): 610-619.
- [8] 刘明艳. 微小通道与射流相结合的高热流密度热沉结构的数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2010.