

[文章编号] 1003-4684(2022)05-0098-06

# 基于 Fluent 大型液氮深冷处理设备仿真分析

张 晋, 顾志聪, 李 扬, 崇银鹏

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 随着航天、机械等领域的飞速发展, 超大尺寸工件的深冷处理需求日益突出, 为弥补超大型液氮深冷处理设备在设计计算方面的空白, 基于流体仿真软件 Fluent 对超大型液氮深冷设备进行仿真设计与分析。将深冷设备箱体、风扇、工件等整体建模, 采用离散相模型模拟液氮喷雾和汽化过程, 通过组分输运模型模拟气体热交换过程, 通过流固热耦合分析模拟气体与工件的对流传热过程。基于上述分析方法, 对在研的大型深冷设备开展分析, 结果表明: 设备内流场和温度场分布合理, 低温氮气能够稳定覆盖整个箱体, 箱内环境温度均匀, 工件温度下降速率稳定, 箱体设计较为合理。本文提出的分析方法可为液氮深冷及其他相关领域设备的研发设计提供有效参考。

**[关键词]** 超大型液氮深冷设备; 流体仿真; 流固热耦合; 对流传热

**[中图分类号]** TH128 **[文献标识码]** A

液氮深冷处理是指利用液氮(LN<sub>2</sub>)作为冷却介质, 常常以液体氮气或者气体氮气的方式对金属材料进行降温, 使之温度控制在 $-173^{\circ}\text{C}$ 或 $-153^{\circ}\text{C}$ 以下, 进而提高金属力学性能的一种加工工艺<sup>[1-4]</sup>。其作用机理是通过超低温作用, 促进金属生产过程中形成的残余柔软奥氏体组织转变为坚硬的马氏体组织, 减少金属材料不稳定程度, 提高其强度和硬度以及耐磨性能<sup>[5-8]</sup>。深冷处理工艺不但可用于机械加工行业当中的高强度工具钢, 轴承用钢处理, 此外也用于航空航天领域当中高性能特种钢与有色稀有金属钢材处理当中。液氮深冷处理工艺的优越性也充分地表明深冷处理具有相当的发展前景。

随着液氮处理工艺在各个领域的广泛应用, 为了能够更加有效进行深冷加工处理, 对于液氮深冷设备的设计分析则至关重要。相关专家学者对于超低温液氮深冷领域的相关设备的设计与分析也进行了不少研究, 李娟等<sup>[9]</sup>针对 LNG 天然气存储罐材料的杂质净化处理, 设计液氮净化处理设备并分析其性能; 此外顾开选等<sup>[10]</sup>与宋宝敬等<sup>[11]</sup>对于传统规格液氮深冷设备内部装置进行优化设计与分析; 承磊<sup>[12]</sup>针对太空中低温环境的模拟出发, 仿真设计了中小型的双介质液氮/液氮模拟试验箱; 夏雨亮<sup>[13]</sup>设计并研发了规格较小的低温阀门的液氮深冷处理设备。由于近年来我国在航空航天以及机械制造和材料加工等领域飞速发展, 不仅对金属工件性能的要求越来越高, 同时对工件尺寸规模需求也

不断提高, 但是目前的中小型液氮深冷处理设备不能满足这样的需求, 亟需研发超大型液氮深冷设备来解决这一矛盾。然而, 目前国内外对于超大型液氮深冷设备设计与开发的相关研究较少。因此, 本文基于大型通用流体技术软件 Fluent, 研究超大型液氮深冷设备的仿真分析方法, 弥补超大型金属工件深冷加工领域的技术空白。

## 1 超大型液氮深冷设备设计

### 1.1 设备组成布置

所谓的深冷处理, 是指以液氮为制冷剂, 在低于 $-196^{\circ}\text{C}$ 的温度环境对工件进行处理的方式, 使工件的强度与硬度均不降低的情况下, 提高工件韧性。本文介绍的深冷设备在鄂州深冷项目中有实际投用, 现场实际图片如图 1 所示。深冷设备总体分为箱体结构和降温系统两部分: 深冷箱箱体采用整体式组合结构, 外形尺寸设为 $14\text{ m}\times 7\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ , 内部空间尺寸则考虑设置为 $12\text{ m}\times 6\text{ m}\times 2\text{ m}$ 。其他构件具体尺寸如图 1 所示。根据计算得空间可利用体积为 $168\text{ m}^3$ , 基本能够满足大型金属零部件深冷处理的需要。设备箱体下部采用底座槽钢, 其材质选取为 A3 钢材; 而设备外箱体采用 304 不锈钢发纹板, 厚度设置 $5\text{ mm}$ , 另一方面内箱体采用 304 不锈钢发纹板, 厚度设置 $10\text{ mm}$ 。材料选取为厚度为 $5\text{ mm}$ 和 $10\text{ mm}$ 厚不锈钢发纹板材; 在内外壁之间充填保温材料, 采用耐低温泡沫玻璃, 厚度设置为

[收稿日期] 2021-07-06

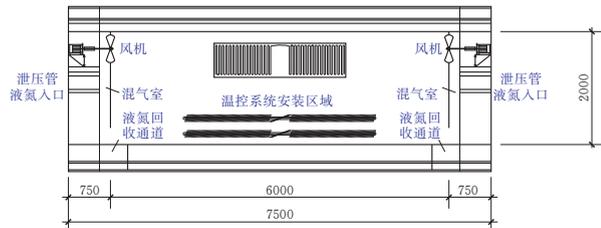
[第一作者] 张 晋(1985-), 男, 山东潍坊人, 工学博士, 湖北工业大学讲师, 研究方向为结构数值模拟和结构健康监测

[通信作者] 顾志聪(1997-), 男, 湖北咸宁人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为结构数值模拟和结构健康监测

200 mm, 加层用耐低温聚氨酯发泡填充, 主要目的是起保温隔热和支撑被加工金属件的作用; 此外整个设备主要由风道循环系统、液氮雾化系统、电路控制系统等组成, 选用德国西门子控制系统设备实现上述功能。

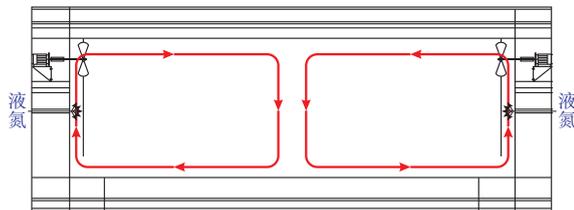
对于风机和液氮入口的数量和位置设计, 考虑到箱内空间长达 12 m, 宽 6 m, 若在长度 12 m 方向设置喷头和风机, 则会导致送风路径太长, 并造成空气循环不充分, 箱体中部降温不彻底以及箱内温差偏大等不利情况。针对上述问题, 课题组开展了周密的研究和论证, 提出可将风机于沿宽度即 6 m 方向布置, 其位置见图 1 中正视图与侧视图, 并在箱体两侧通过液氮入口同步喷射液氮和送风, 此外在液氮入口设计采用电磁阀控制装置, 该装置内置于液氮入口当中, 将电磁阀装置与外部降温装置连接, 从而通过外部控制装置实现对箱内液氮进气速度的控制, 这样可以最大限度地缩短空气循环路径。

此外, 为了对箱内气体流动状态的有效控制, 并且在最大程度上对整个内部空间实现降温的同时提高温度均匀性, 在设备箱体中配置了混气室。如图 1 中侧视图所示, 液氮经过特制喷头喷入混气室内, 迅速汽化为低温氮气, 并与混气室内气体混合, 由风机送入箱内, 与金属工件热交换后, 再返回混气室, 这一过程循环往复。通过变换两壁风机送风方向, 如图 2 所示, 可以实现两种气体流动模式, 并且还可以根据金属工件外形构造选择合适的模式。混气室能够阻挡液氮直接喷射到工件上, 故能有效防止局部温度过低对工件造成不利影响。

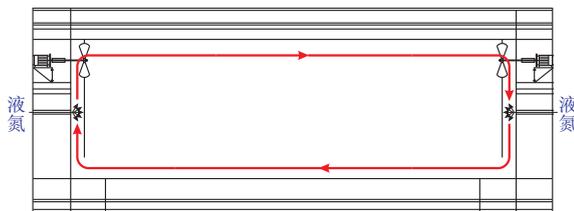


(c) 侧视

图 1 大型深冷处理设备示意图



(a) 两侧风机对向送风



(b) 两侧风机同向送风

图 2 深冷设备测试气体循环侧向示意图

### 1.2 工作原理

超大型液氮深冷设备的深冷工艺采用风冷与液冷组合的处理方式, 在各个降温阶段中环境温度所涉及到的热力学方程分别如下所示:

1) 风冷降温阶段 在该阶段, 外界输入  $-196^{\circ}\text{C}$  的液氮经进液氮入口的气孔进入箱体, 从特制的雾化喷嘴喷出, 迅速汽化为接近  $-196^{\circ}\text{C}$  的低温氮气, 由液相转变气相的过程当中要吸收汽化潜热, 此后低温氮气箱内气体混合, 通过定压过程进一步吸收热量, 上述过程可用式(1)描述:

$$Q_{\text{氮}} = H_{\text{氮}} + c_{\text{氮}}(T_{\text{气}} + 196) \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{氮}}$  为液氮单位制冷量,  $\text{kJ/kg}$ ;  $H_{\text{氮}}$  为液氮汽化潜热,  $199.2 \text{ kJ/kg}$ ;  $c_{\text{氮}}$  为氮气的定压比热容,  $1.04 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $T_{\text{氮}}$  为低温氮气与箱内气体混合后温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

随着液氮的通入, 箱内气体温度不断下降, 与工件和箱壁间产生温差, 箱内气体和工件与内箱壁间通过对流换热, 基于牛顿冷却定律<sup>[14]</sup>, 热交换流量为:

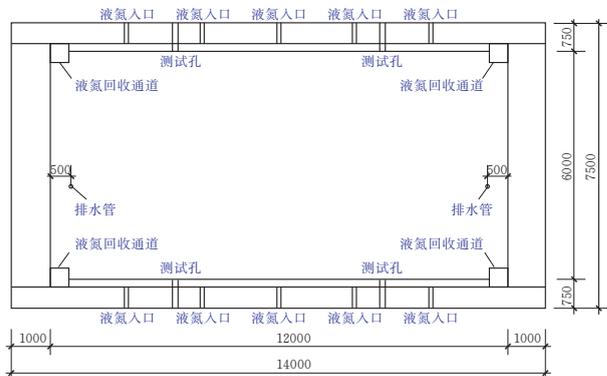
$$q_{\text{工}} = h_{\text{工}}(T_{\text{工}} - T_{\text{气}}) \quad (2)$$

$$q_{\text{内壁}} = h_{\text{内壁}}(T_{\text{内壁}} - T_{\text{气}}) \quad (3)$$

式中:  $q_{\text{工}}$  为金属工件的热流密度,  $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $q_{\text{内壁}}$  为箱内壁的热流密度,  $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $h_{\text{工}}$  为工件的对流换热系数,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $h_{\text{内壁}}$  为箱内壁表面的对流换



(a) 正视



(b) 俯视

热系数,  $J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$ ;  $T_{\text{工}}$  为金属工件表面温度,  $^\circ C$ ;  $T_{\text{内壁}}$  为箱内壁表面温度,  $^\circ C$ 。

通过对流换热方式,使金属工件与箱壁温度下降,从而达到降温的目的。此外式(2)也表明,工件表面的对流换热系数决定了工件降温的速率,并且在没有额外辅助的情况下,自然对流的换热系数很低,工件降温的时间也将非常漫长。通过箱体中设置的风机对箱内空气进行搅动,以强制对流方式提高工件表面换热系数,从而加速箱内气体和工件的热交换速率,提高降温效果。与此同时箱内空气循环的加强,还有助于提高箱内温度均匀性,取得更加优秀的降温效果。

此外,箱外壁与外界也存在对流换热过程:

$$q_{\text{外壁}} = h_{\text{外壁}} (T_{\text{环境}} - T_{\text{外壁}}) \quad (4)$$

由于箱壁内外存在温差,箱壁中也存在热量的传递,此外根据傅立叶定律<sup>[15]</sup>,热量传导满足如下关系:

$$q_{\text{传}} = kA \frac{T_{\text{外壁}} - T_{\text{内壁}}}{d} \quad (5)$$

式中:  $q_{\text{传}}$  为热传导速率,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $k$  为箱壁材料的热传导系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $A$  为箱壁表面积,  $m^2$ ;  $d$  为箱体厚度,  $m$ 。

从式(4)和(5)可以看出,箱壁从外界吸收热量并传入箱内,如果不能妥善控制传热量,将会浪费大量液氮,增加深冷处理成本。因此需要采用导热系数较低的材料,减少箱壁中的热量传递,减小外壁与环境的温差,提高箱体保温性能。本深冷装置采用双层不锈钢板夹 200 mm 耐低温泡沫玻璃的保温方案,泡沫玻璃导热系数很低,一般在  $0.058 W/(m \cdot ^\circ C)$ ,通过足够厚度的保温层,尽最大限度减少箱内外热交换问题。

2) 浸泡降温阶段 在风冷降温达到临界温度时,喷射液氮已无法有效降低金属工件的温度,此时通过智能温控系统转换制冷模式,通过专用泵机迅速在箱内灌注大量液氮,将工件浸没在液氮中,金属工件与液氮直接进行换热,可以较为迅速的达到  $-196 ^\circ C$  的低温。

另外此实验中气冷涵盖了大部分过程,在降温至  $-170 ^\circ C$  以下才转为液冷,液冷的主要目的是继续降温至  $-196 ^\circ C$  和保温,故猜测数值模拟分析未涉及液冷。

## 2 超大型液氮深冷设备仿真分析方法

### 2.1 几何建模与网格划分

基于通用流体仿真软件 Fluent 对于超大型液氮深冷设备进行流体动力学仿真分析与流固耦合仿

真分析。通过建立数值仿真模型并仿真分析,可得到箱内降温速率,液氮流场以及温度均匀性等情况。为更加真实反映设备运行情况,参照设计尺寸一并考虑大型金属件进行几何建模,模型情况如图 3 所示。在几何建模完成之后对其进行网格划分,可得到如图 4 所示的模型网格,通过 Fluent 软件自动统计数据功能得到整个网格共计 974 734 节点,498 904 单元,其数量能够保证对于超大型深冷设备仿真分析的计算精度。

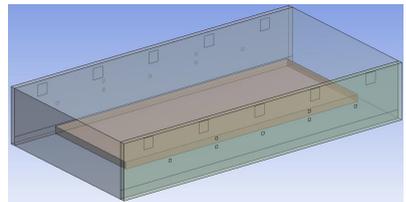


图 3 分析几何建模

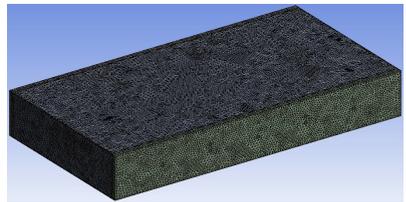


图 4 模型网格

### 2.2 建立仿真计算模型

采用 Fluent 中的压力基 (Pressure-Based) 求解器,并以紊流模型 (Realizable k-epsilon) 为主;考虑到导入液氮于设备内,进行降温过程存在气液两相变化问题,结合离散相模型 (简称 DPM),通过使用离散颗粒模拟液氮喷雾这一过程。此外利用离散液滴法 (简称 DDM) 来计算液氮粒子经液氮入口喷射于箱体后的一系列运动轨迹、汽化过程以及动量、热量和质量的传递;基于离散相模型,进一步采用组分运输模型 (Species Transport),来模拟氮气和空气的混合热交换过程。

氮气、液氮和钢材等材料参数的选取采用 Fluent 材料库中相对应的材料类型,另一方面针对箱体导热实际状况,考虑到实际箱体保温性能可能很难达到理想情况,保守起见则导热系数在  $0.058 W/(m \cdot ^\circ C)$  的理论值基础上增加一倍,取  $0.116 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

模型边界条件设置如图 5 所示,其中 inlet 为液氮入口,设置为离散颗粒入口,通过编写 UDF 程序来近似模拟温控系统对于液氮进入量的控制,实时调整入口质量流量,确保箱内环境降温速率接近  $0.5 ^\circ C/min$ ; outlet 为泄压口,设置为压力出口 (Pressure-outlet) 边界,出口压力设置为 0; fan 为风机出风口,采用 Fluent 提供的风扇 (fan) 边界条件模拟;

plate 为混气室的挡板,设置为壁面(wall)边界;模型整个外表面为壁面(wall)边界,利用壳层传导(Shell Conduction)功能设置好三层壁面厚度及材料;此外对于热边界设置,工件和流场之间采用耦合边界,外表面采用对流边界,环境温度设为 30 °C,对流换热系数取 30 W/(m<sup>2</sup>·°C)。箱内初始介质为空气,并且初始温度设置为 30 °C。

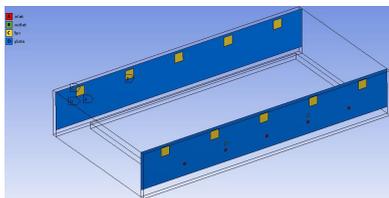


图 5 边界条件设置

### 2.3 仿真结果

对于上述建立的 Fluent 相关模型进行求解计算,则可以模拟出在整个降温全过程箱内气体流动状态以及内部环境温度以及工件温度变化情况。在图 6 和图 7 中分别给出了某一典型时刻箱内气体流动的流线和流速矢量图,表明在整个降温过程当中液氮与空气的混合气体流动与速度整体比较均衡,能够保证在在超大尺寸空间中覆盖至离入口较远的边角位置。

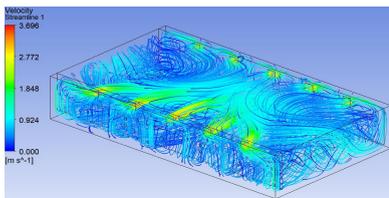


图 6 箱内气体流线

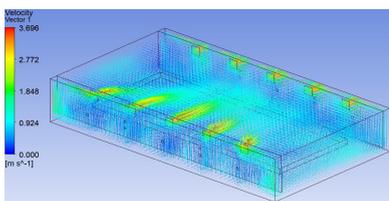
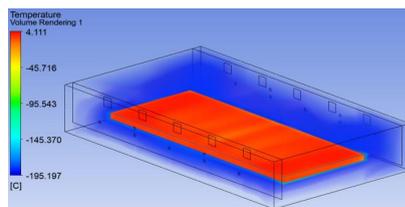


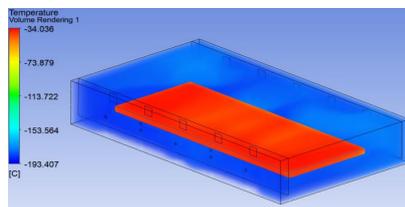
图 7 箱内气体流速矢量

在图 8 当中给出了箱内 280 min、460 min、1000 min、1300 min 时刻的内部环境以及金属工件的温度分布状态图,随着环境温度的不断降低,箱内环境温度以及金属件的温度也在不断的降低,最终在第 1300 min 时基本降低到 -196 °C 左右。此外所选取四个时刻的金属工件温度均较为均衡,表明温度差异产生的温度应力能够得到有效避免。图 9 给出了箱内环境和工件平均温度随时间变化。对于金属工件而言,由于并没有直接与液氮进行热交换,金属工件温度稳定下降的主要原因是金属工件中的热量传递给了液氮汽化的低温氮气和空气的混合介

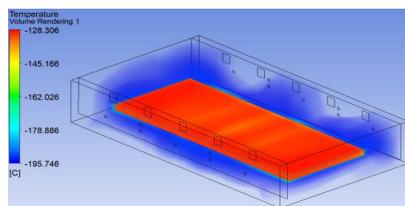
质中,且降温速度保持 0.3 °C/min。就金属工件而言,刚开始的时候其内部环境温度下降十分迅速,其速率为 0.8 °C/min,到第 300 min 时刻则降温速度大幅度放缓,这表明在风冷降温阶段,液氮快速汽化产生的低温氮气与空气相互混合进行热交换,此外通过引气室与风机的配合作用,由点及面,低温范围不断扩大,致使内部环境温度迅速下降并接近于氮气液点 -196 °C,但由于汽化形成的氮气温度始终要高于液氮温度,那么在第 300 min 时刻出现风冷降温速率的极限,此时通入液氮进行浸泡才能够继续降温,完成深冷处理过程。



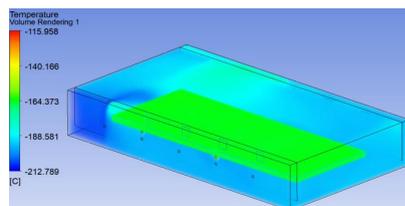
(a) 280 min



(b) 460 min



(c) 1000 min



(d) 1300 min

图 8 箱内各时刻温度分布状态

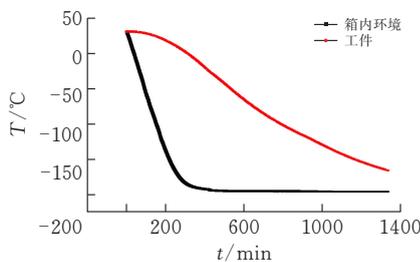


图 9 箱内环境和工件平均温度随时间变化图  
为了能够更加客观分析内部温度均匀程度,如

图 10 所示,在箱内随机选取了 15 个温度测点,针对每个测点,提取 350 min 时间段其温度随时间变化的数据,如图 11 所示。由于自 350 min 后箱内温度已经基本稳定在  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,图中只给出了前 350 min 的温度变化。从图中可以看出,在整个降温过程设备箱体内部各点温度都在不断的下降,且不同测点间温差不得超过  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,表明偏差值较小,箱内空气循环流畅,温度分布均匀,箱体设计方案合理,可以为实际超大型液氮深冷箱体设计提供参考。

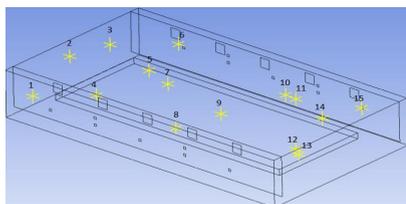


图 10 箱内随机温度测点布置

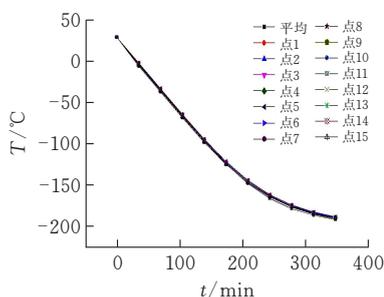


图 11 箱内温度随时间变化曲线

## 2.4 现场实验效果

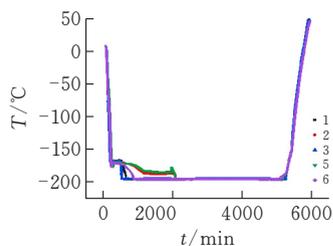
湖北工业大学极端温度环境研究中心在鄂州深冷项目实验中使用到了该深冷设备。

从图 12—图 13 可以看出,针对该箱体中的工件,在降温阶段,工件首先进入气冷状态,随后通入液氮,箱底部的测点(如测点 1、测点 6)降温速率较快,较高位置的测点前期降温速率较慢(如测点 3);在 300 min 以内所有工件表面温度均达到  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且各测点被液氮完全浸泡后的时间超过 30 min,满足技术要求。自降温  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  并维持 30 min 之后开始回温。

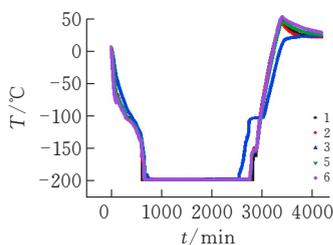
综合试验数据结果表明:在本次深冷操作过程中,降温速度、深冷保温时间、回温速度等各项指标,均符合深冷处理工艺规定要求,达到预期深冷处理目标。



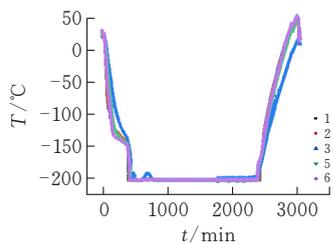
图 12 鄂州深冷实验设备



(a) 第一轮



(b) 第二轮



(c) 第三轮

图 13 深冷箱工件三轮温度-时间曲线

## 3 结论

1) 在超大型深冷设备设计时需要考虑超大尺寸下空间温度变化的均匀不足的问题,通过设置混气室并结合鼓风机等装置,形成循环风道,并使得超低温氮气能够充分与空气混合,从而实现对工件的逐渐降温。参照内部流场状态仿真分析可知,这一措施能够有效解决上述问题。

2) 基于流体仿真软件 Fluent,开展流体力学和流固热耦合分析。通过建立数值仿真模型,计算得到气体流场,流速以及箱内降温速率和降温均匀性等分析结果,分析表明内部气体流场和流速矢量较平稳,基本能够覆盖到整个箱体,并没有出现气流紊乱的情况。此外箱内和工件的温度分布和温度下降速率也较为均衡,这一状态能够有效避免温度不均产生温度应力。

3) 为了更好的达到使用单位的特殊试验要求,在后期实际建设中,应当与使用单位进行沟通并且结合实地考察的结果来讨论确定最终参数及设备功能要求。该项目将涉及到机械,航空航天以及建材等领域,可以将这些领域的零部件及材料进行极端温度试验,从而能够满足各种国标、军标要求。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] SHOKRANI A, DHOKIA V, MUÑOZ-ESCALONA P, et al. State-of-the-art cryogenic machining and processing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(7): 616-648.
- [2] 李平. 深冷技术在航空发动机特型刀具上的应用[J]. 金属加工(热加工), 2013(7): 10-11.
- [3] 彭维祥. 深冷处理对钢铁材料微观组织和摩擦学性能的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [4] 张贺佳. 深冷处理对两种刀具材料组织和性能影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [5] 王显方, 姚海伟, 尹勇. 钢领液氮深冷处理工艺研究[J]. 棉纺织技术, 2016, 44(10): 73-75.
- [6] 王鑫, 徐洪兵, 孟晓磊. 液氮在材料热处理中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2020(16): 88-90.
- [7] 姚春臣. 浅谈液氮在材料热处理中的应用[J]. 机械工人, 2005(9): 47-48.
- [8] 单亚男. 大型液氮制冷式深冷处理设备控制策略的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2011.
- [9] 李娟, 石玉美, 孙志高. 液氮净化系统仿真设计与性能测试实验研究[J]. 低温工程, 2017(5): 23-28.
- [10] 顾开选, 郭嘉, 薛小代, 等. 带有氮气回收深冷处理设备的设计[J]. 热处理技术与装备, 2012, 33(3): 41-43, 47.
- [11] 宋宝敬, 邢志松, 赵晓丽, 等. 钢的深冷处理设备的开发与应用[J]. 热处理, 2011, 26(5): 55-59.
- [12] 承磊. 液氮/冷氦气双冷源高低温箱试验和模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [13] 夏雨亮. 低温阀门冷态试验过程传热模拟及深冷处理设备研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [14] 郭文传. 牛顿冷却定律及其实际应用[J]. 中国新通信, 2019, 21(15): 244.
- [15] 王栋. 基于傅里叶定律对热传导的分析[J]. 科学技术创新, 2019(13): 45-46.

## Simulation Design and Analysis of Super Large Liquid Nitrogen Cryogenic Treatment Equipment Based on Fluent

ZHANG Jin, GU Zhicong, LI Yang, CHONG YinPeng

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** With the rapid development of aerospace, machinery and other fields, the demand for cryogenic treatment of ultra large workpiece is increasingly prominent. In order to make up for the blank of design and calculation of ultra large liquid nitrogen cryogenic treatment equipment, this paper carries out simulation design and analysis of ultra large liquid nitrogen cryogenic equipment based on fluid simulation software FLUENT. Modeling the cryogenic equipment box, fan, workpiece and so on, discrete phase model is used to simulate liquid nitrogen spray and vaporization process. The gas exchange process is simulated by the component transport model, and the convection heat transfer process of gas and workpiece is simulated by the fluid solid heat coupling analysis. Based on the above analysis method, the large-scale cryogenic equipment under research is analyzed. The results show that the distribution of flow field and temperature field in the equipment is reasonable, the low temperature nitrogen can cover the whole box stably, the ambient temperature in the box is uniform, the temperature drop rate of workpiece is stable, and the box design is more reasonable. The analysis method proposed in this paper can provide an effective reference for the development and design of cryogenic equipment in liquid nitrogen and other related fields.

**Keywords:** super large liquid nitrogen cryogenic equipment; fluid simulation; fluid solid thermal coupling; convective heat transfe

[责任编辑: 裴 琴]