

Simulation Analysis of Deformation in Deep Cryogenic Space Freezing Racks

Lei Chen

Basepoint Biotechnology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

This paper focuses on the low-temperature deformation study of a key component in automated sample storage systems under cryogenic conditions (typically below -80°C)—the stainless steel welded cryogenic rack. For complex welded structures, relying solely on the linear thermal expansion coefficient from manuals is insufficient to meet the precision requirements of practical engineering design. Through a combination of experimental measurements and finite element simulation (SolidWorks Simulation), the study systematically measured and analyzed the linear contraction and layer bending deformation of the cryogenic rack. Experiments directly measured the coordinate deformation at critical positions of the rack body using a three-coordinate measuring instrument at different temperatures (room temperature, -20°C , -40°C , -80°C), with detailed comparisons made against simulation data under identical conditions. The results indicate that within this temperature range, the low-temperature deformation of complex welded structures follows linear thermal expansion patterns. Additionally, differences were observed in the contraction coefficients between the transverse (Y-axis) and longitudinal (Z-axis) directions, which may be related to material anisotropy and manufacturing processes. The study validates the effectiveness of finite element simulation in analyzing such issues, providing important theoretical foundations and practical guidance for optimizing subsequent similar structures' simulation and manufacturing processes.

Keywords

Deep low temperature, Deformation, Finite element simulation, Material anisotropy

深低温空间冻存架的形变量仿真分析

陈雷

基点生物科技(上海)有限公司, 中国·上海 200000

摘要

本文聚焦于深低温(通常低于 -80°C)环境下自动化样本存储系统中关键组件——不锈钢焊接冻存架的低温形变问题研究。针对复杂焊接结构,仅依靠手册中的材料线膨胀系数计算热收缩量已无法满足实际工程设计精度要求。研究通过实测与有限元仿真(SolidWorks Simulation)相结合的方法,对冻存架的线性收缩与层板弯曲变形进行了系统性测量与分析。实验采用三坐标测量仪在不同温度(常温、 -20°C 、 -40°C 、 -80°C)下直接测量了架体关键位置的坐标形变,并与同等条件下的仿真数据进行了详细对比。结果表明:在此温度区间内,复杂焊接结构的低温形变遵循线性热膨胀规律;同时发现横向(Y向)与纵向(Z向)的收缩系数存在差异,这可能与材料各向异性及制造工艺有关。研究验证了有限元仿真在该类问题分析中的有效性,为优化后续相似结构的仿真与制造工艺提供了重要的理论依据与实践指导。

关键词

深低温; 形变; 有限元仿真; 材料各向异性

1 引言

在生物样本库的开发工作中,深低温环境(通常指低于 -80°C)的应用极为关键。与常温环境相比,深低温条件下设备的设计面临诸多挑战。常温环境下,选材、加工、测量、组装、调试及运行过程中的温差极小,通常可忽略不计。然而,深低温设备的制造与使用环境温度温差高达 100°C ,这一显著的温差对设备性能有着不可忽视的影响。这些影响

主要包括低温形变、材料硬脆^[1]、运动润滑、霜冻以及防锈等问题。鉴于此,本文聚焦于深低温条件下结构件的低温形变问题,通过有限元分析与实测相结合的方法,深入探究其形变规律,旨在为相关设计工作提供科学依据。

2 问题提出

2.1 研究对象

冰箱式自动化样本存储系统的核心组件是冻存架和运动机构。冻存架由不锈钢板材通过焊接搭建而成,类似于小型货架结构,分为多层和多列,每个单元格为一个储位,用于存放冻存盒。每个冰箱配备4个冻存架。如图2-1所示。

层高(H)和列宽(W)是冻存架的重要指标,如图2-2

【作者简介】陈雷(1980—),男,中国江苏徐州人,硕士,工程师,从事深低温自动化研究。

所示。

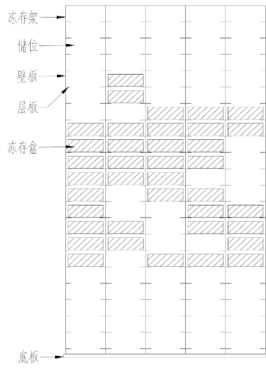


图 2-1

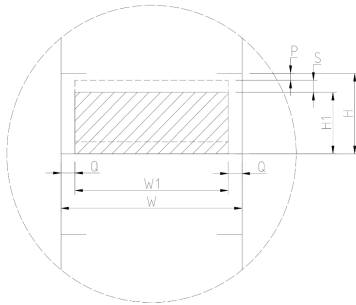


图 2-2

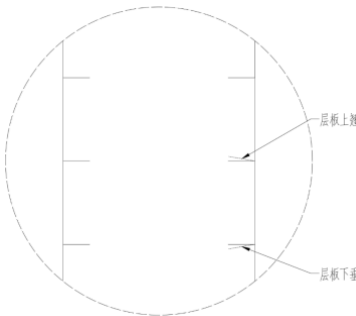


图 2-3

层高和列宽的计算公式如下：

$$H=H1+S+P \quad (\text{式 (2-1)})$$

$$W=W1+2Q \quad (\text{式 (2-2)})$$

其中, $H1$ 为冻存盒的高度, S 为运动距离, P 为安全余量; $W1$ 为冻存盒的宽度, Q 为安全余量。

为了提高存储密度, 冻存架的层高和列宽都要被设计得尽可能小。在设计中, 除了控制必要的运动距离外, 重点是控制安全余量。安全余量的大小取决于机构的重复定位精度、冻存架的制造精度和冻存架的低温形变量。在机构的定位精度和冻存架的制造精度一定的情况下, 本文重点研究低温形变量, 主要包括线性收缩和低温引起的弯曲变形。图 2-3 展示了层高方向上低温弯曲变形的主要形态。

2.2 任务分解

对于较复杂的结构, 仅通过查询材料的线膨胀系数来

计算低温收缩量是不够的, 因为实际使用的材料与手册存在差异。通过分析发现, 导致弯曲变形的因素很多, 包括材料、板厚、焊点位置^[2]和焊接方式等。这些因素都需要通过实测来确定结构的真实变化量, 并与有限元分析结果进行比较, 从而总结规律, 为相似结构的有限元计算提供理论依据, 并对结构的制造工艺提供指导意见。

通过以上分析, 本文的主要任务如下表所示:

表 2-1

控制目标	控制因子	影响因素	任务目标
层高 (H), 列宽 (W)	安全余量 P, Q	整体收缩	1. 通过有限元仿真和实测, 确定同等材料下同类结构的纵向线膨胀系数;
		层板上 / 下翘	2. 通过有限元仿真和实测, 确定层板最大翘曲量, 以及仿真修正系数;

实现上述任务目标的路径如下:

- 1) 选取真实的冻存架, 在不同温度下进行实际测量, 记录层高及各目标位置的形变数据, 并同时记录测量点的温度数据。
- 2) 使用 SolidWorks 仿真模块对冻存架进行力学仿真, 施加不同温度, 记录仿真形变数据。
- 3) 对比形变实测值与仿真值, 得出修正系数, 用于预测低温形变量。
- 4) 对不同型号的冻存架进行有限元仿真预测, 并与实测值进行对比, 验证仿真设置及修正数据的有效性。

3 冻存架的形变测量

已知测量环境温度最低可达 -80°C , 常规测量仪器无法正常工作, 人也无法进入其内长时间工作, 讨论出直接和间接测量两种方案:

- 1) 直接测量: 通过放置在常温下的三坐标测量仪^[3], 对低温冻透的结构件, 在其升温前进行快速测量。
- 2) 间接测量: 通过在冰箱内布置可在低温下工作的激光测距传感器, 测量结构件的尺寸数据。

以下是两种测量方案的对比,

表 3-1

方案	优点	缺点
直接测量	测量仪器精度高; 量程大, 多点测量时基准固定不变;	被测件会快速升温, 需要多次使其降温, 进行多轮测量;
间接测量	封闭测量, 无需多次拉低温; 测量精度够用;	量程小只有 280mm; 每次只能测一个点, 变换测量点需要移动传感器, 并重新固定, 导致基准变化;

3.1 收缩量测量

选取一款常用的冻存架做为测量目标。该冻存架理论总高 1303mm, 理论总宽 654mm。

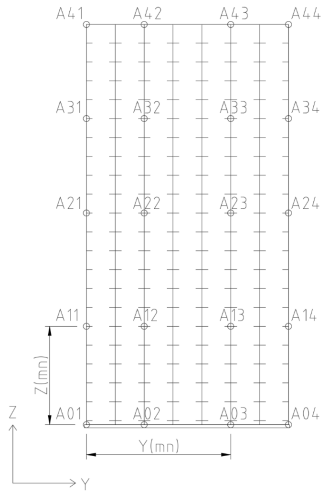


图 3-1

确定测量点，如图 3-1 所示，圆圈表示测量点。每个点用 A(mn) 表示，m 代表测量点层号，从 0 到 4，一共 5 层；n 代表测量点列号，从 1 到 4，共 4 列。某个测量点的 Y 坐标记为 Y(mn)，用于计算列宽数据；Z 坐标记为 Z(mn)，用于计算层高数据。

测量量程需要覆盖整个架体高度，因此只能采用前文所述的直接测量方案：

测量工具：基恩士三坐标测量仪器。

测量步骤：

- 1) 将冻存架放入深低温冰箱，底面固定；
- 2) 安装图 3-1 的位置，找出测量点；
- 3) 在测量点附近布置温度探头；
- 4) 开启冰箱，降温至 $-80 \pm 3^\circ\text{C}$ ，保温 24 小时，确保架体温度均一且稳定；
- 5) 测量仪器准备就绪，打开冰箱门，迅速用三坐标测量仪测量基准面和各个点的坐标数据，并同时记录测量点的温度；
- 6) 分别测量 -80°C 、 -40°C 、 -20°C 、常温共 4 个温度下的坐标数据，分别计入表格。
- 7) 待被测对象升温超出测量温度 3°C 后，转入其它温区的测量，直至被测对象恢复到常温。
- 8) 多次降温，直至所有测量点在所有温区的高度数据测量完成。

直接测量方式，是在温度监控中直接测量即时值，具有较高的可信度。缺点是需要多次拉低温，测量过程较长。注意：在每次恢复到常温后，需要用热风机将架体和箱内的冷凝水吹干，避免下次降温时结冰，影响测量结果。记录数据的表格形式如下：

Y 坐标测量值：

Y 坐标 (-80°C)	列 1	列 2	列 3	列 4
行 0	Y(01)	Y(02)	Y(03)	Y(04)
行 1	Y(11)	Y(12)	Y(13)	Y(14)
行 2	Y(21)	Y(22)	Y(23)	Y(24)
行 3	Y(31)	Y(32)	Y(33)	Y(34)
行 4	Y(41)	Y(42)	Y(43)	Y(44)

Z 坐标测量值：

Z 坐标 (-80°C)	列 1	列 2	列 3	列 4
行 0	Z(01)	Z(02)	Z(03)	Z(04)
行 1	Z(11)	Z(12)	Z(13)	Z(14)
行 2	Z(21)	Z(22)	Z(23)	Z(24)
行 3	Z(31)	Z(32)	Z(33)	Z(34)
行 4	Z(41)	Z(42)	Z(43)	Z(44)

3.2 弯曲变形测量

选取上述同款冻存架做为测量目标。

确定测量点，如图 3-2 所示。每个储位选择 2 个层板的端点（图中圆圈处），用 B(mn) 表示，m 代表测量点层号，从 1 到 4，一共 4 层；n 代表测量点列号，从 1 到 8，共 8 列。记录 B 测量点的 Z 坐标，数据记为 Z(mn)，用于计算层板的翘曲量。特别地，为了排除制造加工、外力影响导致的实物形变影响，测量数据需要处理，取常温 and 测定温度下测量值之间的差值作为形变量。

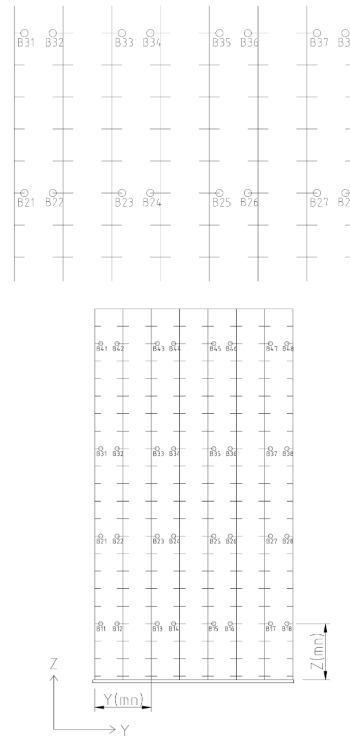


图 3-2

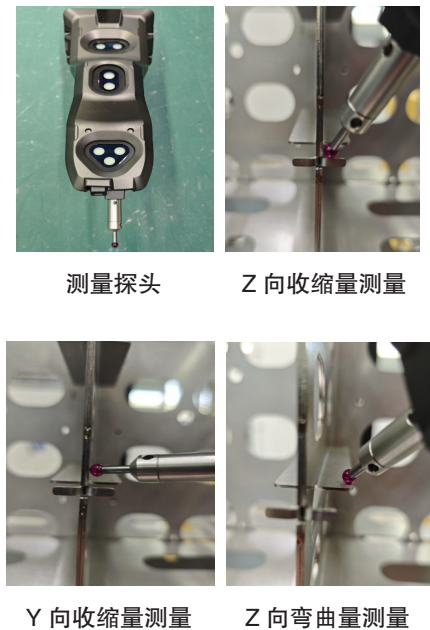
为实现大量程和基准一致性，仍采用直接测量方案。具体步骤可参考 3.1 节，此处略。

记录数据的表格形式如下：

弯曲量测量值：

Z 坐标 (-80°C)	列 1	列 2	列 3	列 4	列 5	列 6	列 7	列 8
行 1	Z(11)	Z(12)	Z(13)	Z(14)	Z(15)	Z(16)	Z(17)	Z(18)
行 2	Z(21)	Z(22)	Z(23)	Z(24)	Z(25)	Z(26)	Z(27)	Z(28)
行 3	Z(31)	Z(32)	Z(33)	Z(34)	Z(35)	Z(36)	Z(37)	Z(38)
行 4	Z(41)	Z(42)	Z(43)	Z(44)	Z(45)	Z(46)	Z(47)	Z(48)

三坐标测量：



图解类型: 静态位移 位移2
结果类型: UY

节	数值 (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	零部件
387625	6.28E-04	0	0.55	0	P-003-1
111092	-1.96E-01	0	187.85	0	P-001-4
221353	-7.14E-01	0	466.05	0	P-001-6
397759	-1.06E+00	0	653.9	0	P-005-1
387606	2.05E-02	-33	0.55	319.5	P-003-1
111074	-2.15E-01	-33	187.85	319.5	P-001-4
221449	-7.56E-01	-33	464.5	317.95	P-001-6
391747	-1.11E+00	-33	653.35	319.5	P-003-2
387582	-1.01E-01	-33	0.55	685.5	P-003-1
111050	-2.55E-01	-33	187.85	685.5	P-001-4
221395	-7.98E-01	-33	466.05	685.5	P-001-6
391723	-1.14E+00	-33	653.35	685.5	P-003-2
10238	-1.67E-01	0	1.65	992.9777	P-001-1
111030	-3.14E-01	-33	187.85	990.5	P-001-4
221471	-8.38E-01	-33	464.5	988.95	P-001-6
391703	-1.13E+00	-33	653.35	990.5	P-003-2
387628	-3.87E-02	-6	0.55	1300	P-003-1
111094	-3.72E-01	-6	187.85	1300	P-001-4
221351	-8.82E-01	-6	466.05	1300	P-001-6
395894	-1.22E+00	-6	653.9	1301	P-004-1

图 4-3

4 有限元仿真

4.1 收缩量仿真

使用 SolidWorks 建立冻存架的三维模型，并通过其 Simulation 模块进行有限元仿真分析。设置如图 4-1。

1) 运行算例。2) 使用探测器，探测各个测量点的 Y 向形变量和 Z 向形变量，如图 4-2。3) 导出探测数据(如图 4-3)，并整理(如图 4-4)。4) 用同样的方法探测出其它数据，并分别记录。5) 用同样的方法模拟 -40°C、-20°C、常温下的形变量，探测并输出数据表。

探测点	探测位置横向位置Y	探测位置高度Z	模拟数值 (mm)
Y01	0.55000001	0	6.28E-04
Y02	187.8500061	0	-1.96E-01
Y03	466.0499878	0	-7.14E-01
Y04	653.9000244	0	-1.06E+00
Y11	0.55000001	319.5	2.05E-02
Y12	187.8500061	319.5	-2.15E-01
Y13	464.5	317.9500122	-7.56E-01
Y14	653.3499756	319.5	-1.11E+00
Y21	0.55000001	685.5	-1.01E-01
Y22	187.8500061	685.5	-2.55E-01
Y23	466.0499878	685.5	-7.98E-01
Y24	653.3499756	685.5	-1.14E+00
Y31	1.64999998	992.976611	-1.67E-01
Y32	187.8500061	990.5	-3.14E-01
Y33	464.5	988.9500122	-8.38E-01
Y34	653.3499756	990.5	-1.13E+00
Y41	0.55000001	1300	-3.87E-02
Y42	187.8500061	1300	-3.72E-01
Y43	466.0499878	1300	-8.82E-01
Y44	653.9000244	1301	-1.22E+00

图 4-4

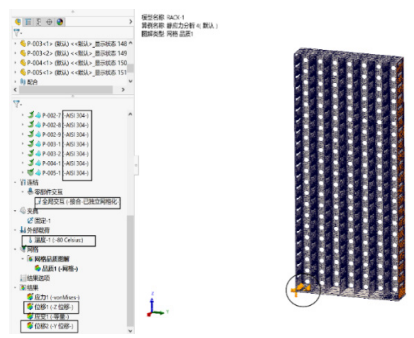


图 4-1

4.2 层板的弯曲变形仿真

使用 SolidWorks 建立冻存架的三维模型，并通过其 Simulation 模块进行有限元仿真分析。

通过仿真结果的的变形量分布情况(图 4-5)，可以判定层板的弯曲变形量小于 0.1mm，在整个变形总量里占比很小，且与三坐标测量仪的测量误差处在同一精度等级。因此，在本例中，层板的弯曲变形量对整体形变的影响可以忽略不计。然而，从图 4-6 中的弯曲方向来看，层板的弯曲趋势符合实际工况，即中间拱起，两端低垂。

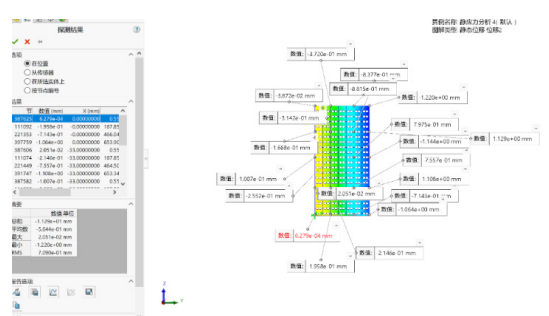


图 4-2

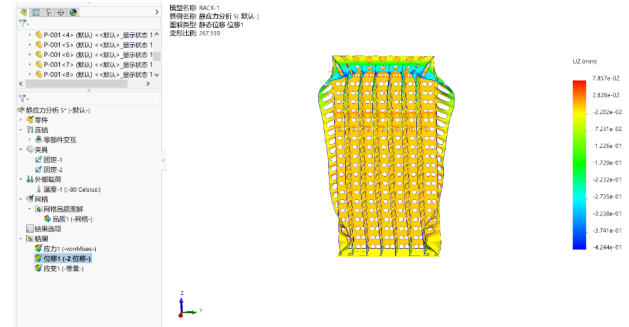


图 45

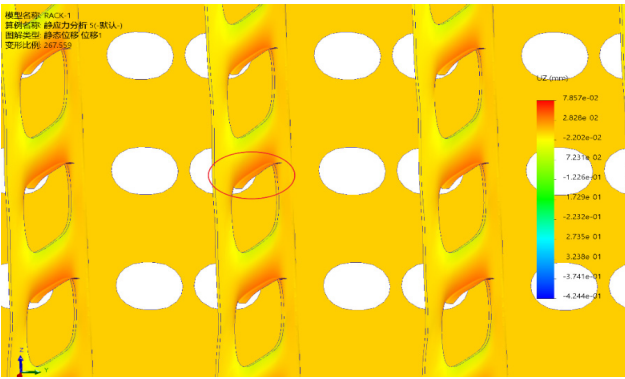


图 46

5 数据对比及规律总结

5.1 仿真数据和测量数据的可信性检查

将探测数据填入记录表，并利用表格生成折线图。通过观察同一高度下的不同横向位置的探测点变形曲线，以及同一横向位置下不同高度的探测点变形曲线，发现低温收缩量的仿真数据符合材料线性膨胀的规律，说明仿真数据有效（如图 5-1 所示）。

Y 向形变仿真数据	横向位置 0.6	横向位置 187.9	横向位置 466	横向位置 653.9
探测高度 0	6.28E-04	-1.96E-01	-7.14E-01	-1.06E+00
探测高度 320	2.05E-02	-2.15E-01	-7.56E-01	-1.11E+00
探测高度 685	-1.01E-01	-2.55E-01	-7.98E-01	-1.14E+00
探测高度 990	-1.67E-01	-3.14E-01	-8.38E-01	-1.13E+00
探测高度 1300	-3.87E-02	-3.72E-01	-8.82E-01	-1.22E+00

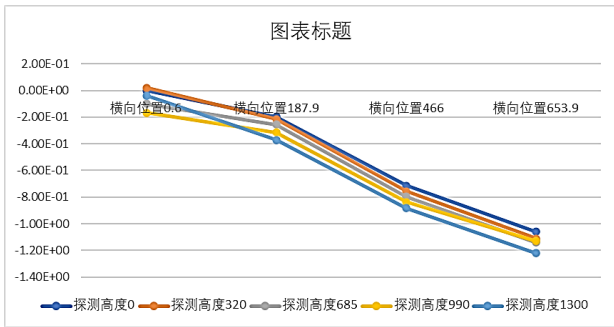


图 5-1

同样地，观察测量数据，发现测量数据也符合线性规律，说明测量数据有效（如图 5-2 所示）。

Y 向形变测量数据	横向位置 0.6	横向位置 187.9	横向位置 466	横向位置 653.9
探测高度 0	-0.03	-0.22	-0.75	-1.12
探测高度 320	-0.15	-0.20	-0.92	-1.43
探测高度 685	-0.17	-0.35	-1.18	-1.51
探测高度 990	-0.33	-0.36	-0.96	-1.37
探测高度 1300	-0.45	-0.48	-1.22	-1.66

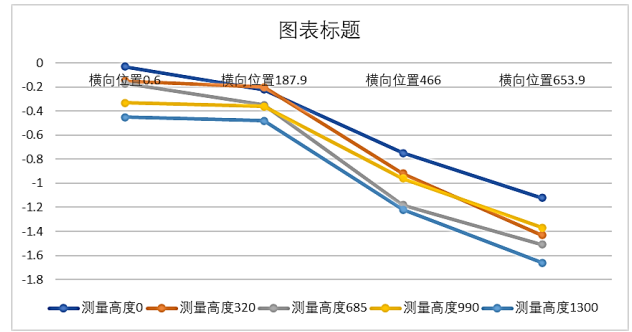


图 5-2

5.2 仿真数据和测量数据之间的关系计算

Y 向收缩量测量值与仿真值关系计算：

取两组数据，一组是仿真数据，记作 $X(x_1, x_2, x_3, x_4)$ ；

另一组是测量数据，记作 $Y(y_1, y_2, y_3, y_4)$ 。

命题：找出 X, Y 之间的函数关系，即 $y=f(x)$ 。

首先判断两个变量之间是否存在线性相关性，通常采用 Pearson 相关系数来衡量两个变量之间线性关系的强度和方向。计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

r 取值范围为 $[-1, 1]$ 。若 r 接近 1，表示 X 与 Y 某变量间呈强正线性相关；接近 -1，呈强负线性相关；接近 0，则线性相关性弱。

本例中，取探测高度 685mm 层的 4 个位置的仿真收缩量为 X 组数据，记为 $X(-0.101, -0.255, -0.798, -1.14)$ 。取相同位置的测量数据，记为 $Y(-0.17, -0.35, -1.18, -1.51)$ 。

使用 Python 的 NumPy 库计算两组数据的 Pearson 相关系数编程计算，得出 $r=0.9963$ 。这表明两组数据呈强线性相关性。

在得出两组数据呈强线性相关性后，使用 `np.polyfit()` 函数拟合一次多项式（即线性回归），计算出斜率 k 和截距 b ，并输出近似关系式 $Y=k_1X+b_1$ 。得出 $k_1=1.334$ ， $b_1=-0.0374$ 。

Z 向收缩量测量值与仿真值关系计算：

使用相同的方法，取探测高度 685mm 层的 4 个位置的 Z 向收缩量为计算数据，记为 $X(-1.30, -1.28, -1.26, -1.25)$ ，测量数据记为 $Y(-1.91, -1.66, -1.72, -2.05)$ 。

找出 Z 方向的收缩量真值与仿真值的关系： $Y=k_2X+b_2$ ，其中 $k_2=-1.7966$ ， $b_2=-4.1212$ 。

可以发现，Y 向和 Z 向的斜率 k_1, k_2 有差异，这可能与材料的各向异性或测量误差有关，需要进一步研究。

5.3 结果验证

使用得出的公式，结合仿真数据，计算 -40°C 和 -20°C 下的理论真实形变，与测量值进行比较。比较的方法是：用理论真实形变与测量值求差值，观察差值是否满足正态

分布。

表 5-1 Y 向形变仿真数据 (-20℃)

Y 向形变仿真数据 (-20℃)	横向位置 0.6	横向位置 187.9	横向位置 466	横向位置 653.9
探测高度 0	0.00E+00	-8.37E-02	-3.06E-01	-4.54E-01
探测高度 320	8.77E-03	-9.06E-02	-3.07E-01	-4.73E-01
探测高度 685	-4.31E-02	-1.09E-01	-3.41E-01	-4.89E-01
探测高度 990	-6.07E-02	-1.18E-01	-3.60E-01	-4.83E-01
探测高度 1300	-1.44E-02	-1.59E-01	-3.77E-01	-5.20E-01

通过公式 $Y = 1.334 * X - 0.0374$ ，得出形变计算数据如下表：

表 5-2 Y 向形变计算数据 (-20℃)

Y 向形变计算数据 (-20℃)	横向位置 0.6	横向位置 187.9	横向位置 466	横向位置 653.9
探测高度 0	-3.74E-02	-1.49E-01	-4.45E-01	-6.43E-01
探测高度 320	-2.57E-02	-1.58E-01	-4.46E-01	-6.68E-01
探测高度 685	-9.49E-02	-1.83E-01	-4.92E-01	-6.90E-01
探测高度 990	-1.18E-01	-1.95E-01	-5.17E-01	-6.81E-01
探测高度 1300	-5.66E-02	-2.50E-01	-5.40E-01	-7.30E-01

Y 向形变测量数据如下表：

表 5-3 Y 向形变测量数据 (-20℃)

Y 向形变测量数据 (-20℃)	横向位置 0.6	横向位置 187.9	横向位置 466	横向位置 653.9
测量高度 0	-3.76E-02	-1.39E-01	-4.33E-01	-6.38E-01
测量高度 320	-2.66E-02	-1.67E-01	-4.29E-01	-6.57E-01
测量高度 685	-9.32E-02	-1.88E-01	-4.92E-01	-7.02E-01
测量高度 990	-1.26E-01	-2.06E-01	-5.11E-01	-6.93E-01
测量高度 1300	-5.91E-02	-2.71E-01	-5.55E-01	-7.50E-01

计算值与测量值的差值依次如图 5-3 所示：

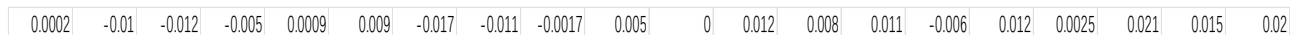


图 5-3

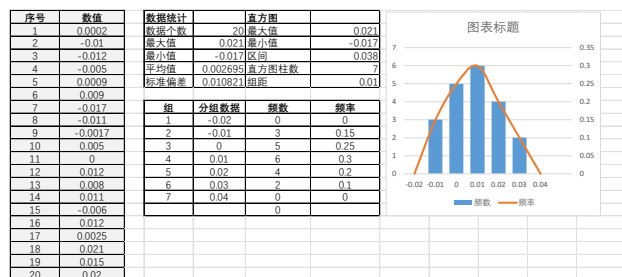


图 5-4

总之，深低温环境下焊接结构的力学行为是一个涉及材料科学、力学、传热学及制造工艺等多学科交叉的复杂问题。本文利用现有试验条件，通过直观对比、有限元分析等手段，结合大量试验和检验数据，试图发现规律，从而对研

使用数据分析和图标公式，生成如图 5-4，经观察，差值符合正态分布规律。

6 结语

冻存架的层高是影响存储密度的关键数据，通过有限元仿真和线性公式预测冻存架层高在深低温冰箱内的收缩量，对精准设置安全余量，提高存储密度有重要参考价值。

本文通过仿真和实测以及数据对比分析，得出如下结论：1) 证实冻存架这种复杂且较精密的焊接结构，在 -80℃ 至常温的温度区间内，遵循线性热膨胀规律。这一点对于分析其它形状的焊接结构的低温收缩形变有参考价值。如焊接立柱、焊接底板等。2) 横向收缩和纵向收缩的系数不同，经初步分析，可能跟板材的各向异性^[4]以及制造工艺相关，需要进一步研究。3) 水平层板向上或向下的低温弯曲仿真变形量非常小，低于测量误差水平，无法通过仿真建立公式。这可能因为仿真过程未考虑折弯应力。4) Solidworks 仿真模块在分析低温收缩形变中能起到足够准确且稳定的数据支持，可以作为计算热膨胀变形的辅助手段。

鉴于以上结论，结合实际工作需要，对未来的研究工作提出以下展望和要求：1) 基于材料的各向异性，分析冻存架的制造变形是否与板材的折弯和组配方向有关，找出控制制造变形的办法。2) 分析不同厚度的不锈钢板材，低温膨胀系数是否有差异。3) 分析不同材料，如不锈钢、铝件、塑料是否同样遵循线性膨胀规律。4) 用“焊缝”取代“全局交互”后，分析焊接件的低温形变趋势，以及焊点位置的影响。^[5]5) 研究反复降温-复温的影响，如是否产生局部塑性变形，焊缝是否开裂等。6) 研究可否通过线性膨胀系数判断材料属性，甚至辅助辨别材料真伪。7) 优化仿真关键参数，优化仿真流程，提高仿真环境与真实环境的一致性，建立标准化仿真模型和流程。

发和制造有建设性的指导，达到缩短研发周期，提高制造质量的目标。

参考文献

- [1] 李明, 张华. 深低温环境下材料力学性能研究进展[J]. 低温工程, 2021(3): 1-7.
- [2] 闫景玉, 马俊飞, 陈龙, 等. EBM成形零件后处理工艺研究[J]. 教练机, 2016
- [3] 陈雷, 王璇, 张旭, 等. 非正交测量机下REVO测量系统控制与应用研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016
- [4] P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia. 焊接组织与性能的预测[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(4): 355-365.
- [5] 王珂, 刘文辉, 陈静, 等. 结构焊接残余应力的仿真计算与实验研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(8): 5-9.