

# 低应力热膨胀系数测试方法开发及 CoCrFeNiAl<sub>x</sub> (x = 0, 0.5, 1) 热膨胀系数测定

韦家仁<sup>1</sup>, 聂洪波<sup>1\*</sup>, 罗传<sup>1</sup>, 陈德勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>百色学院材料科学与工程学院, 广西 百色

<sup>2</sup>广西梧州港德硬质合金制造有限公司, 广西 梧州

收稿日期: 2024年3月6日; 录用日期: 2024年4月16日; 发布日期: 2024年4月24日

## 摘要

利用放电等离子烧结炉, 开发了一种在真空和低应力下测试材料线热膨胀系数的方法, 并测试了高熵合金CoCrFeNiAl<sub>x</sub> (x = 0, 0.5, 1) 30~800°C的平均线热膨胀系数。将圆柱形高熵合金样品放入放电等离子烧结炉的上、下压头之间, 压头与试样之间的接触压强为3.1 MPa, 匀速升温样品并记录系统位移, 采用已知线热膨胀系数的石墨样品对单位温度内的系统位移测试值进行校正, 然后计算材料的线热膨胀系数。结果表明: 新开发的测试方法可以精确计算出高熵合金的平均线热膨胀系数; CoCrFeNiAl<sub>x</sub> (x = 0, 0.5, 1)的线热膨胀系数介于10.0~18.9 × 10<sup>-6</sup>°C<sup>-1</sup>之间, 主要取决于化学成份, 并且随着Al含量的增加而减小。

## 关键词

热膨胀系数, 高熵合金, 测试方法, 放电等离子烧结

# Development of Low Stress Thermal Expansion Coefficient Testing Method and Determination of CoCrFeNiAl<sub>x</sub> (x = 0, 0.5, 1) Thermal Expansion Coefficient

Jiaren Wei<sup>1</sup>, Hongbo Nie<sup>1\*</sup>, Chuan Luo<sup>1</sup>, Deyong Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science & Engineering, Baise University, Baise Guangxi

<sup>2</sup>Guangxi Wuzhou Gangde Cemented Carbide Manufacture Co., Ltd., Wuzhou Guangxi

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 16<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 24<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 韦家仁, 聂洪波, 罗传, 陈德勇. 低应力热膨胀系数测试方法开发及 CoCrFeNiAl<sub>x</sub> (x = 0, 0.5, 1) 热膨胀系数测定[J]. 材料科学, 2024, 14(4): 406-414. DOI: 10.12677/ms.2024.144047

## Abstract

A method for testing the linear thermal expansion coefficient of materials under vacuum and low stress was developed using a Spark Plasma Sintering furnace, and the average linear thermal expansion coefficient of high entropy alloy  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) was tested at 30~800°C. The cylindrical samples of high entropy alloy were placed between the upper and lower pressure heads in the Spark Plasma Sintering furnace, and then the samples were invariably pressed by the pressure heads with 3.1 MPa pressure and heated at constant heating speed and the system displacements were recorded. A graphite sample with known linear thermal expansion coefficient was used to correct the system displacement test values within unit temperature, and then the linear thermal expansion coefficients of the materials could be calculated. The results show that the linear thermal expansion coefficients of the high entropy alloys were accurately calculated with the newly developed testing method; the expansion coefficients of  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) range from 10.0 to  $18.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , mainly depending on their chemical composition, and decrease with the increase of Al content.

## Keywords

Thermal Expansion Coefficient, High Entropy Alloys, Testing Method, Spark Plasma Sintering

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

材料在使用过程中会受到温度的影响, 形状和尺寸因而发生改变, 产生所谓的“热胀冷缩”, 这种自然界普遍存在的现象有时会导致系统无法稳定运行, 造成失效或故障的不良影响[1] [2]。通常用热膨胀系数来表征材料的这种“热胀冷缩”性能, 也就是表示材料在温度变化时的尺寸稳定性[3]。材料热膨胀系数的精确获取具有重要的理论研究与应用价值, 目前测量材料热膨胀系数通常采用顶杆法、激光绝对法、瞬态法、干涉法和光学图像法, 其中顶杆法应用最广[4] [5]。

顶杆法通常是在空气或者惰性气体中进行膨胀系数测试, 采用符合最新国家标准的测试装置, 在 25~400°C 温度范围内, 部分材料线热膨胀 95% 置信水平检测的精度能达到 4% [5]。但当样品放置在真空中, 测量热膨胀系数时的测量精度最高[6]。本文利用放电等离子烧结炉, 采用类似顶杆法的原理, 开发了一种在真空和低应力下测试材料线热膨胀系数的方法, 并以高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 这种新型结构材料[7] [8]为测试对象, 测试了这种材料的热膨胀系数。

## 2. 实验

### 2.1. 试样准备

以三种高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 3D 打印粉末为原料, 在放电等离子烧结炉中制备成高度约为 10.0 mm 的圆柱形样品, 烧结温度为 1150°C 和 1200°C。放电等离子烧结炉产品型号为 SPS-3T-3MIN(H), 厂商是上海晨华科技股份有限公司。该设备加热温度为 2300°C, 起步压力为 0.1 吨力(Tons), 最大压力为 3.0 Tons, 最大位移为 60 mm, 位移分辨率 < 1  $\mu\text{m}$ 。三种高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 3D 打印粉末

粒径规格均为 15~53  $\mu\text{m}$ ，化学纯度为 99.5%，由北京研邦新材料科技有限公司(研邦)和北京中科言诺新材料科技有限公司(中科言诺)生产。具体试样的信息见表 1。

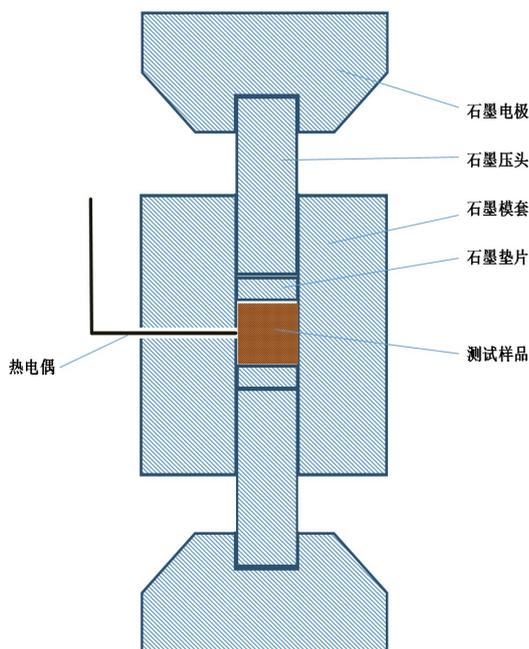
**Table 1.** Test sample information

**表 1.** 实验样品信息

试样	化学成份	原料厂商	烧结温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温时间 /min	直径/mm	长度/mm	重量/g	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
1#	CoCrFeNiAl <sub>0</sub>	研邦	1150	19.76	19.76	9.96	24.28	7.95
2#	CoCrFeNiAl <sub>0</sub>	中科言诺	1200	19.80	19.80	9.60	23.63	7.99
3#	CoCrFeNiAl <sub>0.5</sub>	中科言诺	1200	19.72	19.72	10.00	23.00	7.53
4#	CoCrFeNiAl <sub>1.0</sub>	中科言诺	1200	19.76	19.76	10.00	21.62	7.05
石墨样品	高纯石墨	华夏九九	-	-	20.00	10.00	5.75	1.83

对高熵合金 CoCrFeNiAl<sub>x</sub> ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 试样进行表面研磨处理。先用 180 目碳化硅干湿两用金相砂纸磨去除试样表面的毛刺和突起，再用 400、800、1200 和 2000 目砂纸进行逐级打磨。试样表面无划痕之后，选用 W1.5 金刚石抛光膏抛光，使其表面平整光滑。采用 4% 硝酸酒精溶液对金相面腐蚀[9]，然后在 SDPTOP CX40M 金相显微镜下观察。

## 2.2. 实验过程



**Figure 1.** Experimental assembly diagram

**图 1.** 实验装配示意图

热膨胀实验也在 SPS-3T-3MIN(H)放电等离子烧结炉中进行。将圆柱形高熵合金试样放入石墨模具内，再将石墨模具置于放电等离子烧结炉的炉腔中，试样在石墨模具中的装配示意图如图 1 所示。提前将石墨模具侧壁中部的测温孔打穿，将热电偶插入测温孔，使其可以直接接触到试样并将其固定好，确保测温准确。

然后把炉门关闭,对高熵合金试样进行预压以确保开启加热程序时脉冲电流能够从试样上有效通过,预压压力为 0.1 Tons,相当于  $\phi 20.0$  mm 试样两端承受的压强约为 3.1 MPa。拧紧炉锁,打开机械真空泵和上阀门。在炉内真空度降至小于 15 Pa 的情况下,把下阀门打开,启动分子泵。当分子泵的转速达到要求时,再将上阀门关闭并打开主阀门。等到炉内真空度降至低于 0.01 Pa 后,开启升温工艺,以 10 °C/分钟的升温速率升高到实验目标温度,利用程序的自动数据保存功能,保存相关温度和压头位移数据,用于后期试样温度 - 位移曲线的计算、绘制和分析。具体实验流程见图 2。在整个试验过程中,压头施加的压力保持恒定不变。

在进行高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 的热膨胀位移测定实验时,包括高熵合金样品、石墨垫片、石墨压柱和锥形石墨电极在内的整个系统都会不同程度的受热膨胀,因此需要扣除升温过程中系统的热膨胀。方法是将已知热膨胀系数的圆柱形高纯石墨样品替代等高的高熵合金样品,按照相同的升温工艺进行加热并记录相关温度和压头位移数据,用以试验系统的位移校正。圆柱形高纯石墨样品尺寸约为  $\phi 20 \times 10$  mm,密度为  $1.83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,由北京华夏九九陶瓷有限公司(华夏九九)生产,具体也见表 1。

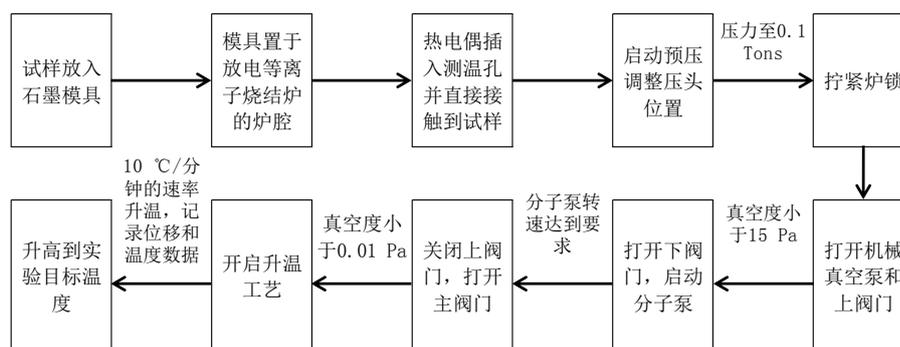
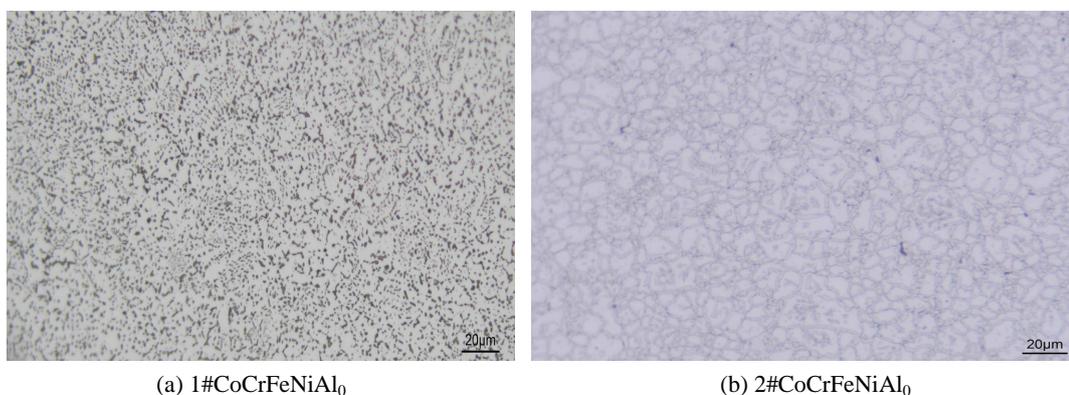


Figure 2. Experimental flowchart for testing temperature-displacement data  
图 2. 测试温度 - 位移数据的实验流程图

### 3. 结果与分析

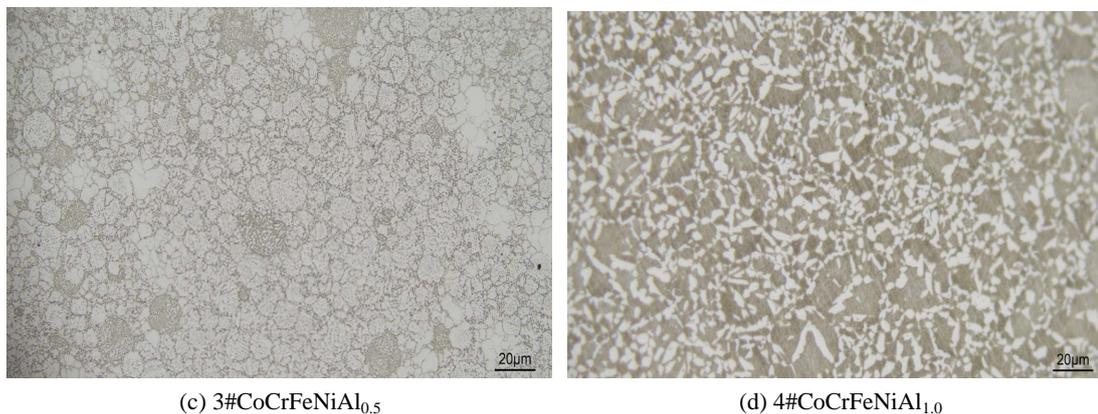
#### 3.1. 金相结构

高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 试样的金相照片见图 3,放大倍率为 500 $\times$ 。从图 3 可以看出,四种高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 试样的结构致密均匀,无明显的烧结孔洞缺陷。在 3# $\text{CoCrFeNiAl}_{0.5}$  和 4# $\text{CoCrFeNiAl}_{1.0}$  试样中,有观察到相分离现象,这可能是 Yang T [10]所报道的随着 Al 含量的增加,高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 会出现部分相转变和混晶结构。



(a) 1# $\text{CoCrFeNiAl}_0$

(b) 2# $\text{CoCrFeNiAl}_{0.5}$



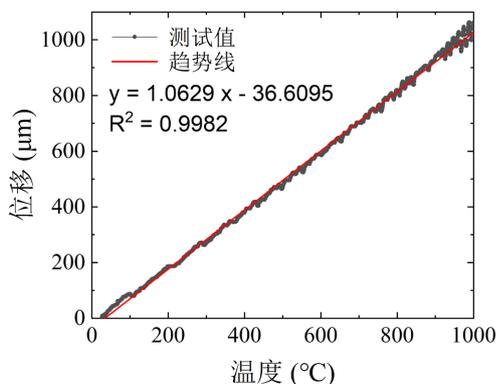
**Figure 3.** Metallographic photos of  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) high entropy alloy  
**图 3.** 高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 试样的金相照片

### 3.2. 高熵合金升温过程中压头位移变化

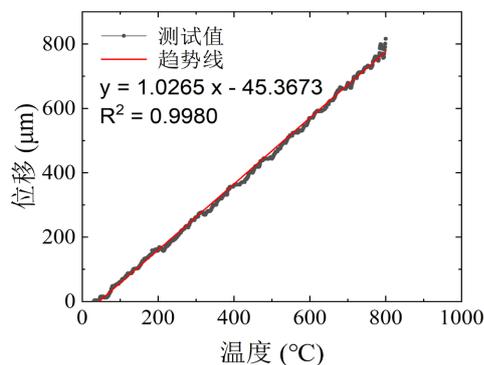
**Table 2.** The fitting trend line equations,  $R^2$  and  $K$  values of the test data  
**表 2.** 测试数据的拟合趋势线方程、 $R^2$ 和  $K$  值

试样名称	趋势线方程	$R^2$	$K/\mu\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$
1#	$y = 1.0629x - 36.6095$	0.9982	1.0629
2#	$y = 1.0265x - 45.3673$	0.9980	1.0265
3#	$y = 1.0288x - 28.0877$	0.9985	1.0288
4#	$y = 0.9795x - 37.1803$	0.9984	0.9795
石墨试样	$y = 0.9358x - 28.4780$	0.9987	0.9358

在整个升温过程中，试样始终在承受石墨垫片和压头施加的约 3.1 MPa 压力下发生热膨胀，压应力恒定不变。升温 800℃ 测试后取出试样，观察到圆柱形试样受压端面光亮，试样没有与石墨垫片发生明显反应；但在 1000℃ 测试后，取出试样的受压端面与石墨垫片存在明显粘连现象，试样与石墨垫片在高温和压力的作用下开始出现扩散反应。因此，只有试样高纯石墨试样和 1# $\text{CoCrFeNiAl}_{0.0}$  测试了 30~1000℃ 加热过程的热膨胀数据，其余 3 种试样仅测试了 30~800℃ 的热膨胀数据。

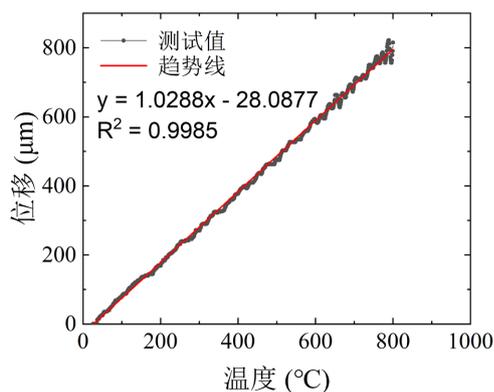


**Figure 4.** Temperature-displacement curve of press head for testing 1# $\text{CoCrFeNiAl}_0$   
**图 4.** 1# $\text{CoCrFeNiAl}_0$  的温度 - 压头位移曲线



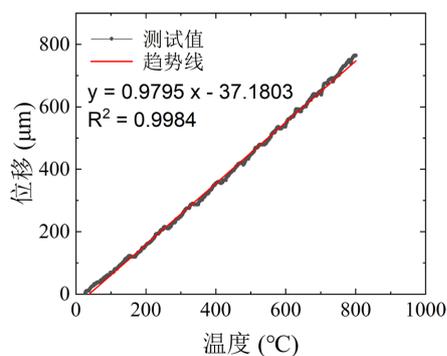
**Figure 5.** Temperature-displacement curve of press head for testing 2#CoCrFeNiAl<sub>0</sub>

**图 5.** 2#CoCrFeNiAl<sub>0</sub> 的温度 - 压头位移曲线



**Figure 6.** Temperature-displacement curve of press head for testing 3#CoCrFeNiAl<sub>0.5</sub>

**图 6.** 3#CoCrFeNiAl<sub>0.5</sub> 的温度 - 压头位移曲线



**Figure 7.** Temperature-displacement curve of press head for testing 4#CoCrFeNiAl<sub>1.0</sub>

**图 7.** 4#CoCrFeNiAl<sub>1.0</sub> 的温度 - 压头位移曲线

图 4~图 7 给出了在升温过程中 4 个高熵合金试样上压头的温度 - 位移曲线。在整个试样过程中，下压头固定不动；上压头为了使系统的压力保持不变，会随着加热过程中试样、石墨垫片和石墨压头的热膨胀而不断缓慢上升。从这 4 个压头的温度 - 位移曲线图可以看出，随着温度的升高，压头呈现出比较匀速的上升趋势。对 4 条曲线进行拟合，拟合趋势直线的斜率( $K$ )为  $\Delta L_{\text{总}1}/\Delta T$ ，其中  $\Delta T$  是温度变化， $\Delta L_{\text{总}1}$  是测试高熵合金试样时系统随温度变化的总热膨胀变化。表 2 列出了趋势线方程、拟合程度  $R^2$  值和  $K$

值。可以看出 4 个趋势线方程的  $R^2$  均不小于 0.9980，说明拟合直线方程具有极高的置信度，可以可靠地反映升温过程中包括试样在内的系统尺寸随着温度的变化。

### 3.3. 石墨试样升温过程中压头位移变化

图 4~图 7 给出的压头位移变化不仅仅是升温过程中高熵合金试样的热膨胀，还包括位于 SPS 烧结炉的上下铜电极之间石墨压头、垫片的系统热膨胀变化。图 8 是将高熵合金试样替换为等高的石墨试样，测试获得的 30~1000℃ 升温过程中系统热膨胀变化。从图 8 可以看出，随着温度升高，压头也是呈现上升的趋势。对温度 - 压头位移曲线进行拟合，拟合趋势线方程、拟合程度  $R^2$  值和斜率  $\Delta L_{总2}/\Delta T$  值也列于表 2 中， $\Delta L_{总2}$  是测试高纯石墨试样时系统随温度变化的总热膨胀变化。石墨试样温度 - 压头位移曲线的拟合趋势线方程  $R^2$  等于 0.9987，该直线方程具有极高的置信度，能够可靠地反映升温过程中石墨试样的热膨胀变化。

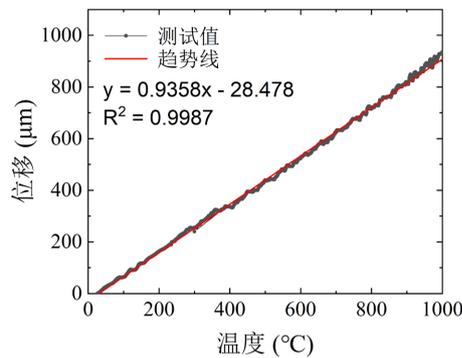


Figure 8. Temperature-displacement curve of press head for testing graphite sample  
图 8. 石墨试样的压头位移曲线

### 3.4. 高熵合金 $\text{CoCrFeNiAl}_x$ ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 的热膨胀系数计算

对表 2 中高熵合金和石墨试样的  $\Delta L_{总}/\Delta T$  值做对照，石墨试样的  $\Delta L_{总2}/\Delta T$  值是  $0.9358 \mu\text{m}\cdot\text{C}^{-1}$ ，高熵合金试样的  $\Delta L_{总1}/\Delta T$  值最大是  $1.0629 \mu\text{m}\cdot\text{C}^{-1}$ ，最小是  $0.9795 \mu\text{m}\cdot\text{C}^{-1}$ ，说明在测试高熵合金试样的热膨胀过程中，大部分的压头位移来自包括石墨垫片和石墨压头在内的系统热膨胀，而高熵合金试样自身的热膨胀只占小部分。要准确计算出高熵合金试样的热膨胀系数，就要对上述数据进行校正，减去包括石墨垫片和石墨压头在内的系统热膨胀带来的位移影响。

常用来计算平均线膨胀系数  $a$  的公式见式(1) [11]，

$$\alpha = \Delta L / (L_0 \times \Delta T) \tag{1}$$

其中， $\Delta T$  是温度的变化， $L_0$  是被测试样原始长度， $\Delta L$  是试样长度的变化。 $\Delta L$  应该是升温过程中系统总热膨胀变化扣除石墨垫片和石墨压头等部件的热膨胀变化，计算公式见式(2)，

$$\Delta L = \Delta L_{总1} - \Delta L_{总2} + (\alpha_{石墨} \times L_{石墨} \times \Delta T) \tag{2}$$

其中， $\alpha_{石墨}$  是高纯石墨试样的线热膨胀系数， $L_{石墨}$  是高纯石墨试样的长度。将式(2)带入式(1)，就能够得到计算高熵合金试样的平均线热膨胀系数的公式，见式(3)，

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta L_{总1} / (L_0 \times \Delta T) - \Delta L_{总2} / (L_0 \times \Delta T) + (\alpha_{石墨} \times L_{石墨} \times \Delta T) / (L_0 \times \Delta T) \\ &= [\Delta L_{总1} / \Delta T - \Delta L_{总2} / \Delta T + (\alpha_{石墨} \times L_{石墨})] / L_0 \end{aligned} \tag{3}$$

在式(3)中,高纯石墨试样的原始长度  $L_{\text{石墨}}$  和高熵合金测试试样的原始长度  $L_0$  已经列于表 1,  $\Delta L_{\text{总}1}/\Delta T$  和  $\Delta L_{\text{总}2}/\Delta T$  列于表 2,  $a_{\text{石墨}}$  根据供应商的提供为  $5.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 因此可以计算出高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ ) 的平均线热膨胀系数, 见表 3。从表 3 中可以看出, 1#和 2#样品的制备工艺有所不同, 烧结温度分别是  $1150^\circ\text{C}$  和  $1200^\circ\text{C}$ , 但二者的测试值差异并不显著。但  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ ) 的线热膨胀系数随着 Al 含量的增加而大幅减小, 由  $18.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  之间降低到  $10.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 说明线热膨胀系数的测试值主要与成份有关。Yang T [10]和 Yang Y [12]认为随着 Al 含量的增加, 高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ ) 会出现部分相转变和混晶结构, 由原子堆垛最为紧密的 FCC 结构逐渐演变为 FCC+BCC 的混晶结构以及原子堆垛不太紧密的 BCC + B2 结构, 这可能是 Al 含量增加引起  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ ) 线热膨胀系数减小的原因, 其中的明确关系有待进一步实验验证。

**Table 3.** Average linear thermal expansion coefficients of high entropy alloy  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ )

**表 3.** 高熵合金  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ ) 的平均线热膨胀系数

试样	化学成份	平均线热膨胀系数 $a$ ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
1#	$\text{CoCrFeNiAl}_0$	18.7
2#	$\text{CoCrFeNiAl}_0$	18.9
3#	$\text{CoCrFeNiAl}_{0.5}$	14.9
4#	$\text{CoCrFeNiAl}_{1.0}$	10.0

## 4. 结论

综上所述, 可以得出以下结论:

1) 利用放电等离子烧结炉, 开发了一种在真空和低应力下测试材料线热膨胀系数的新方法, 并测试了  $30\sim 800^\circ\text{C}$  高熵  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ ) 的平均线热膨胀系数。

2) 升温过程中, 位移测试值的拟合趋势方程拟合程度  $R^2 \geq 0.9980$ , 利用这些测试值计算的平均热膨胀系数有比较高的可信度。

3)  $\text{CoCrFeNiAl}_x$  ( $x=0, 0.5, 1$ ) 的平均线热膨胀系数介于  $10.0\sim 18.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  之间, 主要与成份有关, 并且随着 Al 含量的增加而大幅减小。

## 基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目“高熵  $\text{CoCrFeNi}/7075\text{Al}$  复合材料的制备研究”(项目编号: 202210609016); 百色市科学研究与技术开发计划项目“芯-壳结构高熵  $\text{CoCrFeNi}/7075\text{Al}$  复合材料的制备研究”(项目编号: 百科 20221477); 百色学院校级一流课程(课程思政示范课程)建设项目“金属材料工程专业导论”(项目编号: 2022KC78)。

## 参考文献

- [1] 崔剑秋, 郭斯宜, 任国营, 位恒政, 裴丽梅, 高同岭, 郑庆国. 激光绝对法测量材料热膨胀系数[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(11): 20-26.
- [2] Monroe, J.A., Gehring, D., Karaman, I., Arroyave, R., Brown, D.W. and Clausen, B. (2016) Tailored Thermal Expansion Alloys. *Acta Materialia*, **102**, 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.09.012>
- [3] Mendes, S.S., Filho, J.C.A.D., Melo, A.R.A. and Nunes, L.C.S. (2020) Determination of Thermal Expansion Coefficient of a Monofilament Polyamide Fiber Using Digital Image Correlation. *Polymer Testing*, **87**, Article ID: 106540. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106540>
- [4] 张红菊, 肖新蕊, 王煜, 金雨佳, 张恒磊. 顶杆法热膨胀系数测试在材料性能研究中的应用[J]. 理化检验(物理

- 分册), 2020, 50(5): 31-35.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4339-2008 金属材料热膨胀特征参数的测定[S]. 北京: 标准出版社, 2009.
- [6] James, J.D., Spittle, J.A., Brown, S.R. and Evans, R.W. (2001) A Review of Measurement Techniques for the Thermal Expansion Coefficient of Metals and Alloys at Elevated Temperatures. *Measurement Science and Technology*, **12**, R1-R15. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/3/201>
- [7] Lyu, P., Gao, Q., Peng, T., Yuan, H., Guan, Q., Cai, J., Liu, H., and Liu, X. (2022) Microstructure and Properties of CoCrFeNiAl<sub>x</sub> (x = 0.1, 0.5, 1) High-Entropy Alloys Enhanced by Laser Surface Remelting. *Materials Characterization*, **185**, Article ID: 111717. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111717>
- [8] Rogachev, A.S., Kovalev, D.Y., Kochetov, N.A., Shchukin, A.S. and Vadchenko, S.G. (2021) Evolution of Crystal Structure in High-Entropy AlCoCrFeNi Alloy: An *in Situ* High-Temperature X-Ray Diffraction Study. *Journal of Alloys and Compounds*, **861**, Article ID: 158562. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158562>
- [9] 闫晗. 电火花沉积 FeCoNiCrCuAl<sub>x</sub> 高熵合金涂层的结构与性能[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- [10] Yang, T., Xia, S., Liu, S., Wang, C., Liu, S., Zhang, Y., Xue, J., Yan, S. and Wang, Y. (2015) Effects of Al Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi High-Entropy Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **648**, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.034>
- [11] 李佳, 王海峰, 孙国华. 热膨胀系数准确测量方法及其标准物质研究[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(10): 46-51.
- [12] Yang, Y., Luo, X., Ma, T., Wen, L., Hu, L. and Hu, M. (2021) Effect of Al on Characterization and Properties of Al<sub>x</sub>-CoCrFeNi High Entropy Alloy Prepared via Electro-Deoxidization of the Metal Oxides and Vacuum Hot Pressing Sintering Process. *Journal of Alloys and Compounds*, **864**, Article ID: 158717. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158717>