

引用格式: 刘慧鑫, 马亚芬, 荣义, 等. P元素对GH4738合金高温性能影响的机理[J]. 航空材料学报, 2025, 45(2): 37-44.  
LIU Huixin, MA Yafen, RONG Yi, et al. Mechanisms of effect of element P on properties at high temperatures of GH4738 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(2): 37-44.

## P元素对GH4738合金高温性能影响的机理

刘慧鑫<sup>1</sup>, 马亚芬<sup>1</sup>, 荣义<sup>2</sup>, 罗志强<sup>2</sup>, 曲敬龙<sup>2</sup>, 张麦仓<sup>1\*</sup>

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 以不同P元素含量的GH4738合金为研究对象, 利用扫描电镜、透射电镜、EBSD技术以及分子动力学模拟研究高温持久载荷下不同P含量对GH4738合金持久性能的影响机理。持久实验表明, P添加量从0.004%(质量分数, 下同)增加至0.0091%时, 合金的持久寿命增加; 继续添加P元素, 合金持久性能下降。微观分析及分子动力学模拟结果表明, P倾向偏聚于晶界, 可以增加晶界的内聚力及结合能, 同时与晶界碳化物共同影响GH4738合金的持久性能。P元素含量从0.004%增加至0.0091%时, 晶界析出的 $M_{23}C_6$ 碳化物由少量且离散分布的状态逐渐增加并呈不连续链状分布, 持久变形时晶界碳化物对位错的钉扎作用增强, 能有效地抑制位错运动, 此时合金的持久性能较高。但当P含量进一步增加至0.019%时, 晶界 $M_{23}C_6$ 碳化物有连接成片的趋势, 合金持久性能降低。

**关键词:** P元素; GH4738合金; 持久性能

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000112

中图分类号: V252.2; TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)02-0037-08

## Mechanisms of effect of element P on properties at high temperatures of GH4738 alloy

LIU Huixin<sup>1</sup>, MA Yafen<sup>1</sup>, RONG Yi<sup>2</sup>, LUO Zhiqiang<sup>2</sup>, QU Jinglong<sup>2</sup>, ZHANG Maicang<sup>1\*</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing GAONA Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** An investigation is conducted into the mechanisms by which varying levels of phosphorus (P) affect the high-temperature properties, particularly the stress rupture properties, of GH4738 alloy. This is achieved through the use of scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), electron backscatter diffraction (EBSD) analysis, and molecular dynamics simulations. Stress rupture experiments reveals that the optimal stress rupture properties of GH4738 alloy are obtained when the phosphorus content is increased from 0.004% (mass fraction) to 0.0091%. Beyond this range, an increase in phosphorus content lead to a decline in stress rupture properties. Further microstructural analysis and molecular dynamics simulations demonstrates that phosphorus tends to segregate at grain boundaries, enhancing the cohesion force and bonding energy of these boundaries. Additionally, phosphorus interacts with carbides at grain boundaries to influence stress rupture properties. Specifically, as the phosphorus content increases from 0.004% to 0.0091%,  $M_{23}C_6$  carbides at grain boundaries gradually transition from a small, discrete distribution to a discontinuous chain-like distribution. This enhances the pinning effect on dislocations, effectively suppressing their movement and resulting in improved stress rupture properties. However, when the phosphorus content reaches a certain threshold, such as 0.019%, the morphology of  $M_{23}C_6$  carbides at grain boundaries changes to a plate-like shape, leading to a decrease in stress rupture properties.

**Key words:** element P; GH4738 alloy; stress rupture property

GH4738合金是一种典型的镍基时效强化型高温合金,服役温度可达700℃,具有高强度、高耐磨性、良好的强韧化匹配性及高温稳定性等特点,广泛应用于航空航天领域的涡轮盘和叶片等部件<sup>[1-8]</sup>。近年来,随着航空航天领域对部件要求的提高,科研人员进行各种工艺的研究以改善高温合金的性能<sup>[9-10]</sup>。微量元素在高温合金中含量较低,但可以对合金的组织 and 性能产生显著影响,P元素作为高温合金中常见的晶界元素,倾向于在晶界偏聚并影响合金性能<sup>[11-14]</sup>。

于晶界偏聚的P,可降低晶界界面能,对晶界析出相的形核与长大产生影响,改变晶界析出相的形貌会影响高温合金的力学性能。在IN718合金中,添加适量的P可以改善晶界 $\delta$ 相的分布状态,并使其尺寸更加细小,从而提高持久和蠕变性能<sup>[15]</sup>。肖璇等<sup>[16]</sup>研究发现在GH984合金加入P后促进了细小 $M_{23}C_6$ 型碳化物的析出,并在晶界均匀弥散分布。现有研究表明,微量P元素可以改善镍基高温合金晶界析出相分布、提高晶界结合力、延缓晶界氧原子扩散以及影响 $\gamma'$ 强化相等;且在不同的合金中,P的综合影响有所不同。杨树林等<sup>[17]</sup>研究了P对GH761合金力学性能的影响,发现P可以阻碍合金中氧原子的沿晶扩散,显著提高合金的持久寿命。Yu等<sup>[18]</sup>在研究P对低热膨胀高温合金显微组织和应力断裂性能影响时发现,P促进了 $\beta$ -NiAl相晶间析出,而晶间 $\beta$ -NiAl相显著提高了晶间抗氧化性。Zhang等<sup>[19]</sup>认为由于P在 $\gamma$ 基体中的固溶度会随着温度的升高而增加,所以可能会影响 $\gamma'$ 相在不同温度下的沉淀,在研究P含量对IN706合金微观结构和力学性能的影响时发现,P通过减少 $\gamma$ 和 $\gamma'$ 相之间的晶格错配度,促进 $\gamma'$ 相的析出。宋洪伟等<sup>[20]</sup>研究表明,添加0.02%(质量分数,下同)的P可以延长合金持久寿命,增加蠕变激活能。Sun等<sup>[21]</sup>认为,微量P元素可以显著提高变形镍基合金In718的持久寿命,原因在于P元素在晶界处的偏聚提高了晶界抗氧化性,抑制了氧原子沿晶界的扩散,保护晶界免受脱附和氧化,磷和氧的相互作用在决定In718合金持久断裂寿命方面起着关键作用。当磷含量过高时,会降低晶界强度,缩短In718合金的应力断裂寿命。Yang等<sup>[22]</sup>研究了P对GH761合金力学性能的影响,随P含量的增加,持久寿命呈先增加后降低的趋势,当P含量达到0.023%时达到峰值。Guan等<sup>[23]</sup>研究发现随P含量增加,HT700合金的持久寿命显著增加,P含量为0.027%时的持久寿命是对照试

样的3倍。主要原因在于,P元素的晶界偏聚影响了晶间析出相的形态和数量。

近年来,随着算法及模型的逐步完善,计算材料学逐渐成为材料分析及研究的重要手段。作为在纳秒级时间尺度和纳米级空间尺度的重要算法,分子动力学模拟(molecular dynamics, MD)已在材料的纳米尺度研究中获得重要应用。分子动力学模拟<sup>[24]</sup>作为一种理论计算方法,源于20世纪60年代Alder等<sup>[25]</sup>的“硬球模型”理论,其核心在于将热力学第二定律与牛顿第二定律相结合,通过数值方法精确求解经典力学中的牛顿方程,从而模拟大量粒子集合体系的运动。模型经过不断的改进,分子动力学方法逐渐发展成为一种适用于大部分物质物理变化过程研究的重要工具。不仅能够预测纳米层次材料的动力学和热力学特性,还在材料学、生物学以及药物设计等多个研究领域得到广泛的应用。

目前,镍基合金冶炼加工过程中,加入及利用返回料可大大降低原材料成本,而返回料的加入可能导致微量元素P的含量波动,因此,系统研究微量元素P对变形镍基合金组织性能的影响机理及合理范围对返回料的选用具有重要意义。本工作进行不同P元素含量的GH4738合金持久性能实验,结合微观分析,研究P元素含量变化对合金高温持久性能的影响机理。进而,利用分子动力学建模,在Ni特征晶界掺杂不同含量P元素,分析计算P在不同特征Ni晶界上的偏聚行为,从分子动力学的角度分析P元素在Ni晶界偏聚对晶界能、内聚力等的影响,并探讨其与实验结果的关联性。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 持久性能实验

采用真空感应冶炼的方法炼制GH4738母合金,母合金的成分如表1所示。之后向其中分别加入0.004%、0.0091%和0.019%的P元素,研究P元素对GH4738合金组织与持久性能的影响。对不同P含量的GH4738合金铸锭进行均匀化热处理(1150℃/24h+1200℃/70h,空冷)、开坯锻造

表1 GH4738合金母合金化学成分(质量分数/%)  
Table 1 GH4738 alloy master alloy chemical composition(mass fraction/%)

Al	Ti	Cr	Co	Mo	C	Fe	Ni
1.37	3.22	19.82	13.28	4.39	0.045	0.025	Bal.

(开始温度 1160 °C, 最后成形的一火次在 1080 °C, 随后在 1100 °C 进行轧制)及亚固溶热处理(800 °C/1 h+1020 °C/4 h, 空冷)。

利用 SUPRA55 扫描电子显微镜对标准热处理后的试样进行观察, 切取 TEM 试样并通过 Titan ETEM G2 透射电子显微镜进行观察, 分析不同 P 含量的晶界析出相的形貌。将经标准亚固溶热处理后的合金按照图 1 所示的试样图进行加工。持久实验在 GNCJ 系列电子式持久蠕变试验机上进行。持久参数为 730 °C/500 MPa 和 730 °C/550 MPa。为了进一步研究 P 元素对 GH4738 合金持久性能的影响机理, 使用 OXFORD 牛津电子背散射衍射仪观察断口附近的晶界特征, 分析其与 GH4738 合金的持久性能的关联性。

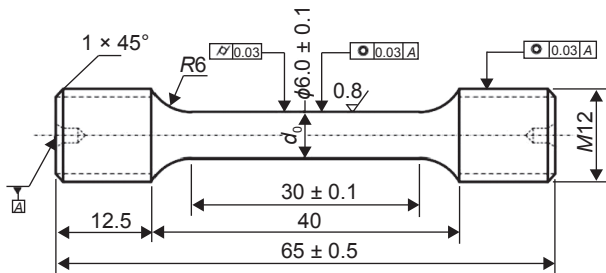


图 1 持久试样加工图

Fig. 1 Schematic diagram of the processing of rupture specimens

### 1.2 分子动力学模拟

使用 AtomsK 软件构建  $\Sigma 3[110](111)$ 、 $\Sigma 5[001](210)$ 、 $\Sigma 9[110](221)$  和  $\Sigma 13[001](320)$  4 种 Ni 的对称倾斜模型, 如图 2 所示。计算出模拟盒子在 3 个方向上的晶体取向, 其中 Ni $\Sigma 3[110](111)$ 、Ni $\Sigma 5[001](210)$ 、Ni $\Sigma 9[110](221)$  和 Ni $\Sigma 13[001](320)$  晶界模型的晶体学取向分别为  $X=[\bar{1}11]$ 、 $Y=[1\bar{1}2]$ 、 $Z=[110]$ ,  $X=[001]$ 、 $Y=[1\bar{2}0]$ 、

$Z=[210]$ ,  $X=[114]$ 、 $Y=[1\bar{1}0]$ 、 $Z=[2\bar{2}\bar{1}]$  和  $X=[\bar{2}30]$ 、 $Y=[001]$ 、 $Z=[320]$ , 点阵盒子矢量必须相互正交且符合右手法则, 接着使用 AtomsK 软件在三个空间方向上增加原子建立晶界的一半盒子, 然后, 以 XOY 平面为对称平面, 将所得到的另一半盒子进行镜像处理得到另一半晶界盒子, 最后, 将两个盒子沿特定方向对接在一起, 得到 Ni 的双晶模型。为确保模型结构的合理化, 使用共轭梯度算法 (conjugate gradient, CG) 对双晶模型进行能量最小化处理, 以优化模型结构并提升计算结果的可靠性。利用 ovito 可视化软件中的位错分析模块 (dislocation extraction analysis, DXA) 分别对 4 种 Ni 特征晶界优化模型进行分析处理。

使用 AtomsK 软件构建 Ni 的双晶模型后, 在开源的 LAMMPS 软件中进行计算模拟。模型采用周期性边界条件, 步长定位 1fs; 势函数采用 NEP 势函数进行计算<sup>[26]</sup>; 温度控制方面采用 NPT 系综; 建模及模拟结果的可视化分析借助 ovito 完成。0.19% 的 P 原子以间隙原子的方式被随机添加到模型原子间的间隙位置。最后对晶界能量进行计算, 包括晶界能、偏析能和内聚力。

## 2 结果与分析

### 2.1 P 元素对 GH4738 合金晶界组织的影响

图 3 为 GH4738 合金晶界处 P 元素分布。由图 3 可知, P 元素主要分布在晶界, 并对合金的晶界组织产生影响。图 4 为不同 P 元素含量的 GH4738 合金经标准热处理后晶界析出相的形貌。从图中可以看出, 经标准热处理后, 不同 P 元素含量 GH4738 合金的晶界处均有析出相, 为了明确析出相的类型, 借助 TEM 对合金晶界析出相进行分析 (图 5 所示)。经衍射斑点标定, 确定析出相为

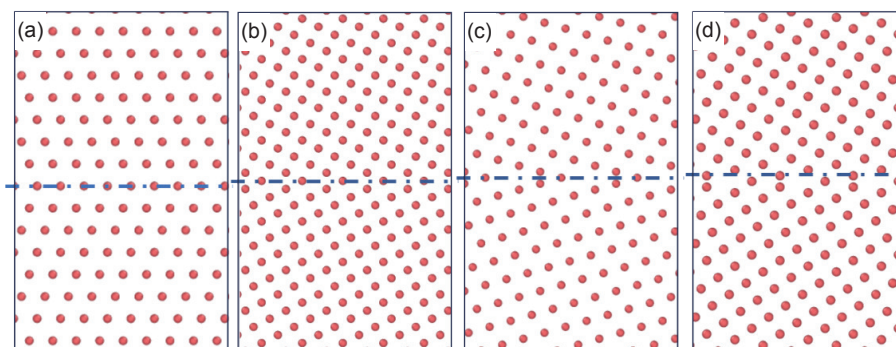


图 2 4 种晶界模型的原子结构示意图 (a) $\Sigma 3[110](111)$ ; (b) $\Sigma 5[001](210)$ ; (c) $\Sigma 9[110](221)$ ; (d) $\Sigma 13[001](320)$

Fig. 2 Schematic atomic structure of four grain boundary models (a) $\Sigma 3[110](111)$ ; (b) $\Sigma 5[001](210)$ ; (c) $\Sigma 9[110](221)$ ; (d) $\Sigma 13[001](320)$

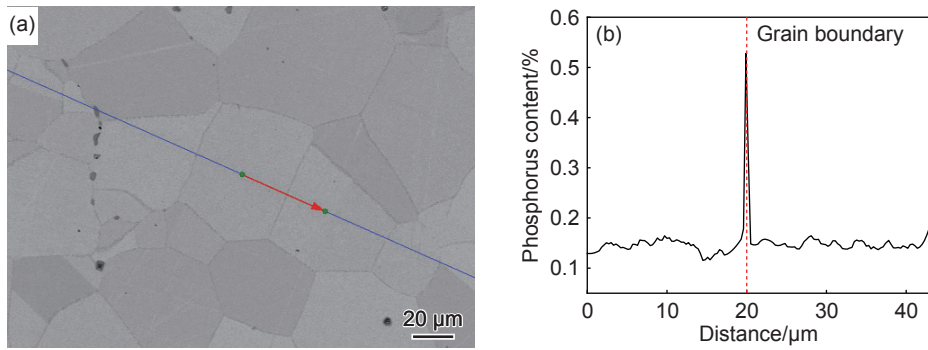


图 3 GH4738 合金晶界处 P 元素分布 (a)线扫描;(b)P 元素含量的变化

Fig. 3 Distribution of element P at grain boundary of GH4738 alloy (a)line scanning; (b)mass fraction of P

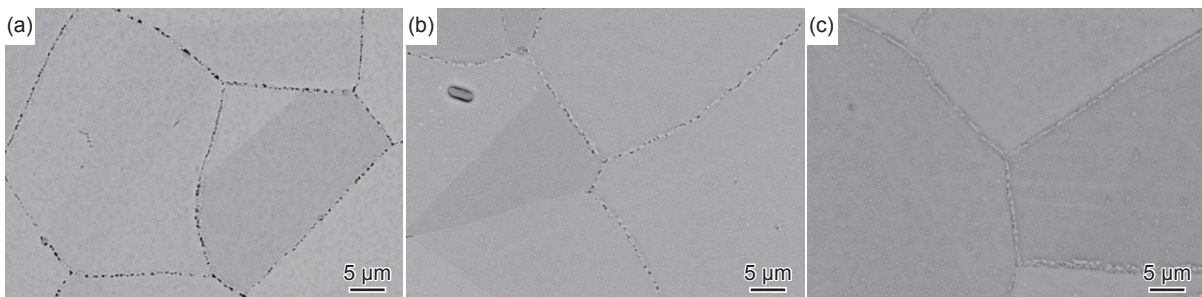


图 4 不同 P 含量热处理态合金中的晶界碳化物形貌 (a)0.004%; (b)0.0091%; (c)0.019%

Fig. 4 Morphology of carbides at grain boundary of as-heat-treated GH4738 alloy with different P contents (a)0.004%; (b)0.0091%; (c)0.019%

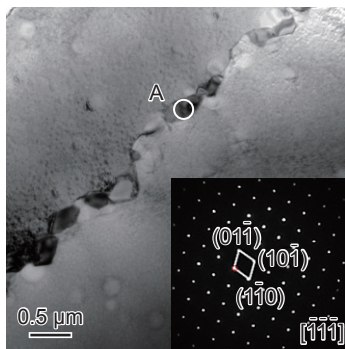


图 5 GH4738 合金晶界析出相

Fig. 5 Precipitates at grain boundary of GH4738 alloy

$M_{23}C_6$  型碳化物。而且,经标准热处理后  $M_{23}C_6$  在晶界上的析出行为随着合金中 P 元素含量的变化而变化。当 P 元素含量较低时,晶界析出的  $M_{23}C_6$  含量较少且  $M_{23}C_6$  颗粒离散分布,存在大量无析出相的晶界;随着 P 元素含量的逐渐增加,晶界析出的  $M_{23}C_6$  的相对含量逐渐增加且呈现出连续分布的趋势,晶界覆盖率显著增强。特别是当 P 元素含量达到 0.0091% 时,在 GH4738 合金部分晶界处可观察到  $M_{23}C_6$  碳化物成链状析出。这一现象表明 P 元素的添加显著促进了  $M_{23}C_6$  在晶界处的形核和生长。这种促进作用的机制可能是由于 P 原子降低了  $\gamma$  基体和  $M_{23}C_6$  碳化物之间的错配度,从而

加速了晶界处  $M_{23}C_6$  的析出和长大速率。

## 2.2 P 元素对合金持久性能的影响

图 6 为不同 P 含量合金在 730 °C/500 MPa、730 °C/550 MPa 下的持久寿命及持久塑性。可以看出,730 °C/500 MPa 时,随 P 含量的变化, GH4738 合金的持久寿命先增大后减小。P 元素的添加量为 0.0091% 时,持久寿命增加了 27%;当含量增加至 0.019%,持久寿命降低,持久塑性也下降。730 °C/550 MPa 时,变化规律与 730 °C/500 MPa 时类似。P 元素的添加量为 0.0091% 时持久寿命最高,增加了 4%,但其断面收缩率呈先增加后减小的趋势。

图 7 为不同 P 含量的 GH4738 合金在 730 °C/500 MPa 下持久断口附近的 EBSD 特征图,从左到右分别为 KAM 图、CSL 图、IPF 图。材料中的位错密度可以反映塑性变形的均匀化程度,由 KAM 图可知,当 P 含量在 0.004% 和 0.0091% 时,位错分布在晶内和晶间,位错密度较高,说明此时塑性变形协调性好,因此具有较高的持久塑性。当 P 含量增加到 0.019% 时,晶内的位错密度减少,晶界强度降低,合金的持久性能随之降低。由 CSL 图可知,当 P 含量在 0.004% 和 0.0091% 时,小角度晶界占比较高,此时各晶粒之间的取向差较小,受到应力时晶粒的应变场分布比较平和,各晶粒变形可以协

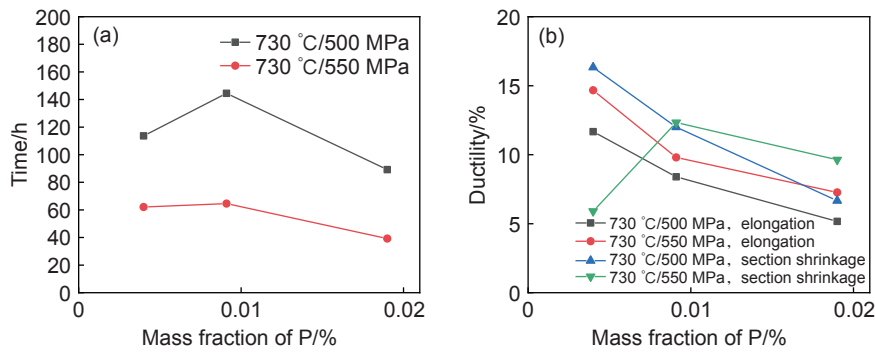


图 6 不同 P 含量合金在 730 °C/500 MPa、730 °C/550 MPa 下的持久性能 (a)持久寿命; (b)持久塑性  
Fig. 6 Stress rupture properties of alloys with different P contents at 730 °C/500 MPa or 730 °C/550 MPa  
(a) creep rupture time; (b) rupture ductility

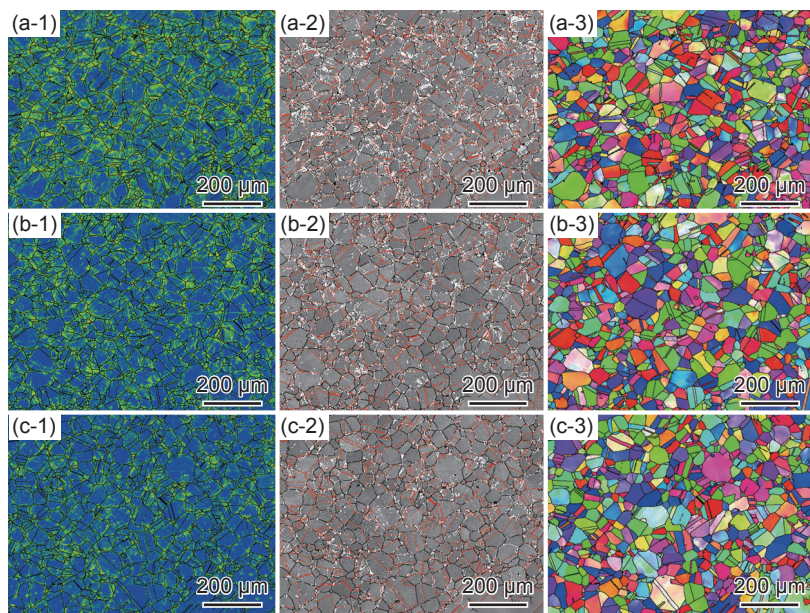


图 7 不同 P 含量合金 730 °C/500 MPa 持久断口附近纵截面的 EBSD 图 (a)0.004%; (b)0.0091%; (c)0.019%;  
(1)KAM 图; (2)CSL 图; (3)IPF 图

Fig. 7 EBSD plots of longitudinal sections near the 730 °C/500 MPa persistent fracture for alloys with different P contents  
(a)0.004%; (b)0.0091%; (c)0.019%; (1)KAM; (2)CSL; (3)IPF

调,表现出较高的塑性;当 P 含量增加到 0.019% 时,小角度晶界明显减少,塑性降低。由 IPF 图可知,不同 P 含量的合金晶粒均呈等轴状,基本无择优取向。

### 2.3 分子动力学模拟结果分析

在研究合金元素偏析时,合金元素在晶界处偏析倾向的大小通常用偏析能来评估,它是表示合金元素从晶粒内部扩散到晶界上所需的能量。因此偏析能在计算过程中可以被定义为合金元素偏析到晶界后,体系总能量与偏析前体系总能量之差,偏析能计算公式为:

$$E_{\text{seg}} = E_{\text{GBP}} - E_{\text{GB+P}} \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{GBP}}$  表示 P 原子在晶界附近时体系的总能量;  $E_{\text{GB+P}}$  表示 P 原子在远离晶界的晶内时体系的总

能。偏析能的正值和负值分别意味着 P 原子在能量上更倾向于偏聚在晶内还是晶界,且其绝对值越大这种倾向越强。

P 元素在晶界的偏析程度由 P 在 4 种 Ni 晶界处的偏析能表征,如表 2 所示。由表 2 可知, P 元素在 4 种 Ni 晶界上偏析能力大小为: Ni  $\Sigma 5[001](210) > \text{Ni } \Sigma 13[001](320) > \text{Ni } \Sigma 9[110](221) > \text{Ni } \Sigma 3[110](111)$ , 这种差异产生的原因与不同晶界自

表 2 P 在不同 Ni 晶界处的  $E_{\text{seg}}$  偏析能统计(eV/atom)  
Table 2  $E_{\text{seg}}$  segregation energy statistics of P on different Ni grain boundaries(eV/atom)

$\Sigma 3[110]$ (111)	$\Sigma 5[001]$ (210)	$\Sigma 9[110]$ (221)	$\Sigma 13[001]$ (320)
-0.005	-2.15	-0.888	-1.802

由体积大小有关。自由体积是具有低电子密度的原子间区域,有助于相邻原子的迁移,在偏析过程中可以充当溶质的偏析位点。自由体积越大,P在Ni晶界的偏聚趋势越大。

晶界能是衡量一个晶界热力学稳定性的重要参量,晶界能越高,其晶界的热力学稳定性越差;相反晶界能越低,其晶界的热力学稳定性越好。晶界能在计算过程中被定义为具有相同原子数和尺寸的晶界模型与体相模型总能量之差,并除以晶界模型的界面面积。因此,晶界能的计算公式见式(2):

$$\gamma_{GB} = (E_{GB} - E_{bulk})/S \quad (2)$$

式中:  $E_{GB}$  为计算所用晶界模型的总能量;  $E_{bulk}$  为与晶界模型有着相同原子数和尺寸的体相模型的总能量;  $S$  为晶界模型的横截面积。为了方便计算对比,在晶界模型和体相模型结构优化过程中,晶界模型与体相模型的尺寸固定不变,使横截面积保持不变。

P元素对晶界结合力的影响由P掺杂前后双晶模型中原子能量变化表征,如图8所示。其中  $E$  代表双晶模型中每个原子的平均能量,  $E_{Ni}$  代表体系中镍原子的平均能量,  $E_{Ni-GB}$  代表晶界处镍原

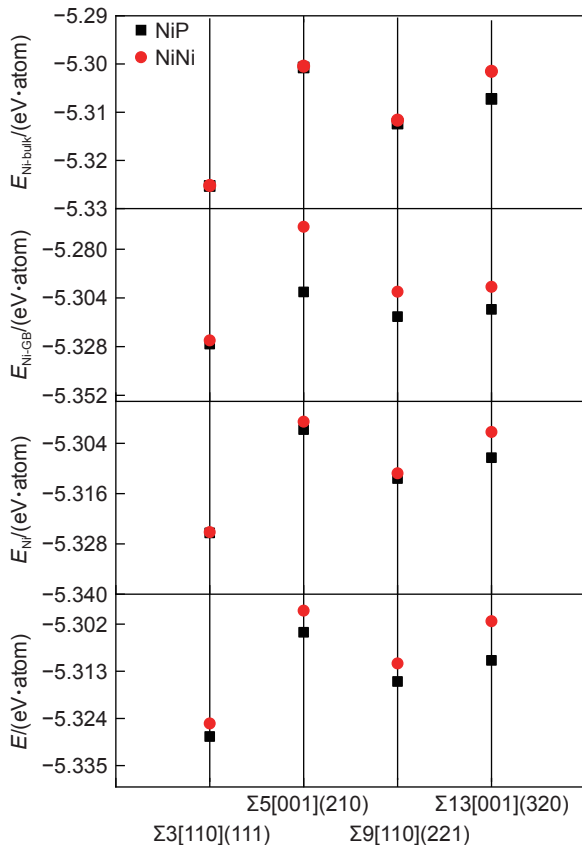


图8 P偏聚对晶界结合力的影响

Fig. 8 The effect of P-biased segregation on grain boundary bonding

子的平均能量,  $E_{Ni-bulk}$  代表体相中镍原子的平均能量。对于未掺杂P的晶界模型,晶界处原子能量高于晶内原子能量。P原子的添加使得4种晶界处Ni原子的能量均有所降低,表明P在这4种晶界的偏聚均增加了Ni原子在晶界处的结合能,尤其对NiΣ5[001](210)晶界的影响最为显著。另外可以看到,P在晶界处的偏聚使得晶界处Ni原子的能量略低于基体相中Ni原子的能量,表明P在晶界偏聚一定程度上会增强Ni晶界的内聚力。

晶界内聚力是晶界强度的一种表示方法,在计算中可以使用断裂功来表征合金晶界的内聚力大小。断裂功被定义为将晶界模型沿晶界面断开至无限远处形成2个自由表面的过程所需要的能量,这一过程中的能量也可视为断裂强度或晶间结合能。理论上,断裂功的数值越高,晶界内聚力就越大;反之断裂功数值较低则表示晶界内聚力较小。断裂功计算公式见式(3):

$$W_{sep} = (E_{FS} - E_{GB})/S \quad (3)$$

式中:  $E_{FS}$  为生成的两个自由表面的总能,在结构弛豫过程中,晶界模型的尺寸同样保持不变。

P元素对晶界内聚力的影响由P掺杂前后晶界的断裂功变化表征,如表3所示。对于未掺杂P元素的晶界,内聚能强度由强到弱可排列为:Σ3[110](111) > Σ9[110](221) > Σ13[001](320) > Σ5[001](210)。P在晶界的偏聚在一定程度上提高了晶界的断裂强度,其中P在晶界的偏聚对NiΣ5[001](210)晶界内聚能的影响最大,而对NiΣ13[001](320)晶界的影响最小。

综上,通过对偏析能的计算表明P在Ni的4种晶界的双晶模型中都表现出一定的偏析能力,但偏析的强弱性质不同;P在晶界的偏聚一定程度上可以增加晶界结合力和内聚力,但对不同晶界影响效果不同。

表3 P掺杂对不同Ni晶界内聚力的影响( $J/m^2$ )

Table 3 Effect of P doping on the cohesion of different Ni grain boundaries( $J/m^2$ )

Grain boundary	Σ3[110](111)	Σ5[001](210)	Σ9[110](221)	Σ13[001](320)
Ni-Ni	3.71	2.29	3.43	2.99
Ni-P	4.03	2.63	3.67	3.15

结合实验分析及分子动力学模拟结果可以发现,P倾向偏聚在晶界,从而影响合金的晶界结合能,同时与晶界碳化物共同影响GH4738合金的持

久性能。P元素含量低于0.0091%时,晶界析出的 $M_{23}C_6$ 碳化物由少量且离散分布的状态逐渐增加并呈不连续链状分布,使得碳化物在晶界覆盖率增加,持久变形时晶界碳化物对位错的钉扎作用增强,能有效地抑制位错运动,此时合金的持久性能较高。但当P含量进一步增加至0.019%时,晶界 $M_{23}C_6$ 碳化物有连接成片的趋势(图4(c)),合金持久性能降低。

### 3 结论

(1)持久实验表明,P元素添加量为0.004%~0.0091%时,合金的持久性能较高,P元素添加量超过0.0091%时,持久性能显著下降,持久寿命与持久塑性均降低。

(2)分子动力学模拟结果表明,P元素在不同特征的Ni晶界中的偏析能力为:Ni  $\Sigma 5$ [001](210) > Ni  $\Sigma 13$ [001](320) > Ni  $\Sigma 9$ [110](221) > Ni  $\Sigma 3$ [110](111),且对不同特征Ni晶界的晶界结合力和内聚力均起到强化作用。

(3)前期实验及分子动力学综合分析表明,P元素含量低于0.0091%时,晶界析出的 $M_{23}C_6$ 碳化物由少量且离散分布的状态逐渐增加并呈不连续链状分布,使得碳化物在晶界覆盖率增加,持久变形时晶界碳化物对位错的钉扎作用增强,能有效地抑制位错运动,此时合金的持久性能较高。但当P含量进一步增加至0.019%时,晶界 $M_{23}C_6$ 碳化物有连接成片的趋势,合金持久性能降低。

#### 参考文献:

- [1] 杨飞. B、Al和Ti对K325合金组织和性能的影响[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.  
YANG F. Effect of B, Al and Ti on microstructure and properties of K325 alloy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [2] NING Y, YAO Z, LIANG X, et al. Flow behavior and constitutive model for Ni-20.0Cr-2.5Ti-1.5Nb-1.0Al superalloy compressed below  $\gamma'$ -transus temperature[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 551: 7-12.
- [3] WEN D X, LIN Y C, LI H B, et al. Hot deformation behavior and processing map of a typical Ni-based superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 591: 183-192.
- [4] WU J, LI C, LIU Y, et al. Effect of annealing treatment on microstructure evolution and creep behavior of a multiphase Ni<sub>3</sub>Al-based superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 743: 623-635.
- [5] GUO Q, LI D, GUO S, et al. The effect of deformation temperature on the microstructure evolution of Inconel 625 superalloy[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 414(3): 440-450.
- [6] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 361-374.
- [7] 王会阳,安云岐,李承宇,等.镍基高温合金材料的研究进展[J].材料导报,2011,25(2):482-486.  
WANG H Y, AN Y Q, LI C Y, et al. Research progress of Ni-based superalloys[J]. *Materials Reports*, 2011, 25(2): 482-486.
- [8] HU Y, LIU D, ZHU X, et al. Effect of rolling passes on thermal parameters and microstructure evolution via ring-rolling process of GH4738 superalloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(4): 1165-1174.
- [9] 王琨,罗学昆,宋尽霞,等.喷丸对DD412单晶高温合金表面完整性和疲劳性能的影响[J].材料工程,2024,52(7):152-161.  
WANG K, LUO X K, SONG J X, et al. Effects of shot peening on surface integrity and fatigue properties of DD412 single crystal superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(7): 152-161.
- [10] 张雷雷,陈晶阳,任晓冬,等.固溶参数对镍基高温合金K439B显微组织及力学性能的影响[J].材料工程,2024,52(4):120-126.  
ZHANG L L, CHEN J Y, REN X D, et al. Effect of solution parameters on microstructures and mechanical properties of K439B nickel-based superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(4): 120-126.
- [11] NETTLESHIP D J, WILD R K. Segregation to grain boundaries in nimonic PE16 superalloy[J]. *Surface and Interface Analysis*, 1990, 16(1/12): 552-558.
- [12] 胡壮麒,孙文儒,郭守仁,等.微量元素磷在铁镍基变形高温合金中的作用[J].中国有色金属学报,2001,11(6):947-959.  
HU Z Q, SUN W R, GUO S R, et al. Effect of trace P on Fe-Ni based wrought superalloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(6): 947-959.
- [13] 郑磊,董建新,张麦仓,等. Inconel 600及Inconel 718合金晶界偏聚研究进展[J].材料导报,2009,23(19):67-74.  
ZHENG L, DONG J X, ZHANG M C, et al. Research progress in grain boundary segregation of solute atoms in Inconel 600 and Inconel 718 superalloys[J]. *Materials Reports*, 2009, 23(19): 67-74.
- [14] ZHANG X, WANG C, WU Y, et al. Effect of phosphorus segregation on carbides and creep damage of Ni-Fe-

- based GH984G alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19: 2018-2030.
- [15] 宋洪伟, 郭守仁, 卢德忠, 等. 磷含量对 IN718 合金持久和蠕变性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(3): 301-305.
- SONG H W, GUO S R, LU D Z, et al. Effects of phosphorus content on stress-rupture and creep properties of IN718[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(3): 301-305.
- [16] 肖旋, 赵海强, 王常帅, 等. B 和 P 对 GH984 合金组织和力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2013, 49(4): 421-427.
- XIAO X, ZHAO H Q, WANG C S, et al. Effect of B and P on microstructure and mechanical properties of GH984 alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(4): 421-427.
- [17] 杨树林, 孙文儒, 郭守仁, 等. 磷对 GH761 合金力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2005, 41(12): 1249-1255.
- YANG S L, SUN W R, GUO S R, et al. Effect of phosphorus on mechanical properties of GH761 alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41(12): 1249-1255.
- [18] YU L X, SUN Y R, SUN W R, et al. The influence of phosphorus on the microstructure and stress-rupture properties in a low thermal expansion superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(4/5): 911-916.
- [19] ZHANG S, XIN X, YU L, et al. Effect of phosphorus on the grain boundary cohesion and gamma' precipitation in IN706 alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47(8): 4092-4103.
- [20] 宋洪伟, 郭守仁, 胡壮麒. 磷在变形 IN718 合金中的作用[J]. *金属学报*, 1999, 35(4): 387-391.
- SONG H W, GUO S R, HU Z Q, et al. Effect of phosphorus in rolled IN718 alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(4): 387-391.
- [21] SUN W R, GUO S R, LEE J H, et al. Effects of phosphorus on the  $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb phase precipitation and the stress rupture properties in alloy 718[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 247(1/2): 173-179.
- [22] YANG S L, SUN W R, WANG J X, et al. Effect of phosphorus on mechanical properties and thermal stability of fine-grained GH761 alloy[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2011, 27(6): 539-545.
- [23] GUAN S, CUI C, YUAN Y, et al. The role of phosphorus in a newly developed Ni-Fe-Cr-based wrought superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 662: 275-282.
- [24] BINDER K, HORBACH J, KOB W, et al. Molecular dynamics simulations[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2004, 16(5): 42-50.
- [25] ALDER B J, WAINWRIGHT T E. Phase transition for a hard sphere system[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1957, 27(5): 1208-1209.
- [26] ZHAO R, WANG S, KONG Z, et al. Development of a neuroevolution machine learning potential of Pd-Cu-Ni-P alloys[J]. *Materials & Design*, 2023, 231: 11-29.

收稿日期: 2024-07-15; 录用日期: 2024-08-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3700403)

通讯作者: 张麦仓(1967—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为镍基高温合金加工与性能优化, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学材料科学与工程学院(100083), Email: mczhang@ustb.edu.cn

(本文责编: 王俊丽)