

Co 对一种无铼镍基单晶高温合金组织和性能的影响

王梓龙^{1, 2}, 张 功^{2, 3}, 王 莉^{2, 3}, 李佳声^{2, 3}, 李先亮¹, 董加胜^{2, 3}

(1. 沈阳化工大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110142; 2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 辽宁沈阳 110016; 3. 辽宁省重型燃气轮机高温结构材料工程研究中心, 辽宁沈阳 110016)

摘要: 本研究以无铼镍基单晶高温合金为基体, 设计制备5Co、7Co和9Co三种不同钴含量的合金。采用光学显微镜(OM)、差示扫描量热(DSC)和扫描电子显微镜(SEM)等手段, 系统研究Co含量对合金铸态、固溶态及完全热处理态组织演变规律的影响, 并测试其980 °C高温拉伸性能与980 °C/248 MPa持久性能。结果表明: 当Co含量在5.0wt.%~9.0wt.%区间内时, 因Co元素扩散速率较快, 铸态组织中元素偏析程度略有加剧; 一次枝晶间距随Co含量升高呈先减小后增大趋势, 共晶含量则呈先升高后降低趋势。对比1 270 °C、1 280 °C、1 285 °C和1 290 °C固溶工艺, 1 280 °C固溶处理后三种合金的 γ' 相面积占比均达到最高。Co含量升高会降低 γ' 相溶解温度, 在相同完全热处理制度下, 5Co合金 γ' 相含量最高, 其980 °C拉伸抗拉强度与屈服强度优于7Co、9Co合金, 但伸长率相对较低。在980 °C/248 MPa持久测试条件下, 7Co合金因一次枝晶间距最小、元素偏析程度更低, 表现出最长的持久寿命。

关键词: 镍基单晶高温合金; 钴含量; 元素偏析; γ' 相; 微观组织演变; 高温力学性能; 持久寿命

中图分类号: TG132.3; TG115.5; TG111.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0481-11

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0065

Effect of Co on the Microstructure and Properties of a Re-Free Ni-Based Single Crystal Superalloy

WANG Zi-long^{1, 2}, ZHANG Gong^{2, 3}, WANG Li^{2, 3}, LI Jia-sheng^{2, 3}, LI Xian-liang¹, DONG Jia-sheng^{2, 3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, Liaoning, China; 2. Shi Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 3. Liaoning Heavy Gas Turbine High-Temperature Structural Materials Engineering Research Center, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: In this study, three alloys with different cobalt contents (5Co, 7Co and 9Co) were designed and fabricated based on a rhenium-free nickel-based single-crystal superalloy. The effects of Co content on the microstructural evolution rules of the alloys in as-cast, solution-treated and fully heat-treated conditions were systematically investigated by means of optical microscopy (OM), differential scanning calorimetry (DSC) and scanning electron microscopy (SEM). Meanwhile, the high temperature tensile properties at 980 °C and the stress-rupture properties at 980 °C/248 MPa were tested. The results show that when the Co content is in the range of 5.0wt.%-9.0wt.%, the relatively fast diffusion rate of Co slightly aggravates the elemental segregation in the as-cast microstructure; the primary dendrite arm spacing first decreases and then increases with increasing Co content, while the eutectic content shows an opposite trend. Comparing the solution treatments at 1 270 °C, 1 280 °C, 1 285 °C and 1 290 °C, the area fractions of the γ' phases in all three alloys reach the highest after solution treatment at 1 280 °C. Increasing Co content reduces the dissolution temperature of the γ' phase. Under the same full heat treatment regime, the 5Co alloy exhibits the highest γ' phase fraction. Its ultimate tensile strength and yield strength at 980 °C are superior to those of the 7Co and 9Co alloys, but the elongation is relatively lower. Under the stress-rupture test condition of 980 °C/248 MPa, the 7Co alloy possesses the longest stress-rupture life due to its minimum primary dendrite arm spacing and lower degree of elemental segregation.

Key words: nickel-based single-crystal superalloy; cobalt content; elemental segregation; γ' phase; microstructural evolution; high-temperature mechanical property; stress-rupture life

基金项目: 中国科学院 C 类先导专项 (XDC0160000); 新材料重大专项项目 (2025ZD0609300)。

收稿日期: 2025-12-29 收到初稿, 2026-02-25 收到修订稿。

作者简介: 王梓龙 (2000-), 男, 硕士, 研究方向为单晶高温合金组织与性能。E-mail: zlwang24h@imr.ac.cn

通信作者: 张功, 男, 高级工程师, 博士, 硕士生导师。E-mail: gzhang@imr.ac.cn

李先亮, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。E-mail: lixianliang@syuct.edu.cn

引用格式: 王梓龙, 张功, 王莉, 等. Co 对一种无铼镍基单晶高温合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (5): 481-491.

WANG Zilong, ZHANG Gong, WANG Li, et al. Effect of Co on the microstructure and properties of a Re-free Ni-based single crystal superalloy [J]. Foundry, 2026, 75 (5): 481-491.

镍基高温合金因其优异的抗氧化性和抗蠕变性,已成为航空航天工业的核心材料^[1-2]。发动机热端部件材料优越的力学性能来源于镍基高温合金 γ 基体中的 γ' 相^[3]。这两种相通过改变元素含量强化微观结构,以满足高温合金在不同条件下长期服役的需求。Co、Mo、W等元素能有效促进 γ 基体的固溶强化;Ta、Al、Ti等元素则会促进 γ' 相的沉淀强化。对性能的极限需求促使高温合金设计朝着多样化合金设计方向发展。然而,在实际应用中,需要考虑合金性能与成本之间的关系。Re和Ru元素的加入虽可增强固溶强化效果,提高合金力学性能,但Re元素是TCP相形成元素,在高温长期服役条件下会促使TCP相析出,影响合金组织稳定性。此外,稀有元素的高成本使得高温合金的设计趋向于低Re和无Re。Co元素因其低成本,在合金设计中受到了广泛关注。对第三代高温合金RenéN6^[4]和CMSX-10^[5]的研究发现,两种合金的TCP析出倾向不同,合金差异最大之处在于Co含量分别为12.5wt.%及3wt.%。Co元素既能降低成本,又能提升组织稳定性。

Co作为重要的 γ 基体形成元素,可以有效降低基体的层错能,减缓粗化速率,从而提升 γ' 相的稳定性。然而,Co具有较高的扩散系数,在1 200 °C时的扩散系数约为 $1.2 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$,明显高于Al、Ti等 γ' 相形成元素。扩散势的差异会导致微观偏析,进而影响 γ' 相的尺寸分布和体积分数,最终影响合金的性能^[6-9]。研究发现^[10-11],Co通过调整Re、W元素的偏析情况,优化 γ/γ' 相界面结构,抑制TCP相的析出,尤其是对抑制 μ 相的形成有积极作用。在高Al/Ti比的合金中,Co元素减缓金属碳化物的退化,抑制 η 相的析出^[12]。Co元素在低Re合金中与Ru、Mo等元素发生交互作用,降低 γ/γ' 的晶格错配度。在1 140 °C/137 MPa条件下,显著延长了第四代含Ru单晶高温合金的断裂寿命^[13]。研究^[14-15]认为,低温高应力条件有利于初始蠕变,从而提高了合金的抗蠕变、抗氧化、耐腐蚀性和抗硫化性。Co元素含量的增加会促进固溶处理的进程^[4, 16-21]。固溶处理的目的是实现合金成分的均匀化,并消除枝晶间区域的偏析。

综上所述,Co含量因其优异的扩散性能,能提升含Re和Ru镍基单晶高温合金的组织稳定性及力学性能。但目前,有关Co含量对无Re和Ru体系的镍基单晶高温合金组织及拉伸性能影响的相关研究略有不足。深入了解Co元素对无Re和Ru体系的镍基单晶高温合金的影响,具有重要意义。在无Re和Ru单晶高温合金的基础上优化Co含量,可以产出低成本、高强度的单晶合金,为低成本无镍单晶镍基高温合金成分优

化提供理论指导。

因此,本试验研究了Co含量对无镍镍基高温合金不同状态下组织演变、凝固特征温度、元素偏析及完全热处理后980 °C条件下拉伸性能的影响。该研究为无镍镍基单晶高温合金工程化应用提供数据支持。

1 试验材料与方法

本试验以一种无镍镍基单晶高温合金为基础,改变Co元素含量至5.0wt.%、7.0wt.%、9.0wt.%,在本文中分别将它们命名为5Co、7Co和9Co。三种不同Co含量无镍合金的名义成分如表1所示。采用螺旋选晶法,在高速凝固设备上制备了具有[001]取向的 $\Phi 16 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ 的上述三种合金单晶试棒。采用电子背散射衍射法测试取向,选取取向偏离度在 10° 以内的单晶棒备用。使用DSC 404C型差示热量扫描仪确定合金的相变温度,根据相变温度选取1 270 °C、1 280 °C、1 285 °C及1 290 °C四个固溶处理温度,通过金相显微镜观察三种合金在这四个不同温度下的残余共晶含量。通过金相法结合DSC结果,最终确定三种不同Co含量合金的热处理制度为:1 280 °C/8 h+空冷,1 100 °C/4 h+空冷,870 °C/24 h+空冷。

表1 三种不同Co含量合金的名义成分
Tab. 1 Nominal compositions of the three alloys with different Co contents

合金	C	B	Cr	Co	W+Mo+Ta+Hf	Al+Ti	Si	Ni
5Co	0.023	0.007	8.0	5.0	16.2	6.3	0.12	余量
7Co	0.023	0.007	8.0	7.0	16.2	6.3	0.12	余量
9Co	0.023	0.007	8.0	9.0	16.2	6.3	0.12	余量

将三种合金的铸态与不同热处理态的单晶棒,均从底端切出高度为3 mm的半圆柱,以观察其横截面组织。样品经打磨、抛光后,进行超声波振动清洗,然后使用由10 g CuSO_4 +50 mL HCl +100 mL H_2O 组成的腐蚀液对样品进行腐蚀。通过光学显微镜及扫描电子显微镜观察,得到铸态组织、固溶态组织及完全热处理态组织,并对铸态组织及固溶态组织进行电子探针显微分析,利用Image-pro plus软件测量 γ' 相尺寸、一次枝晶间距,并分析共晶含量。

将完全热处理后的试棒加工成标距段为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的拉伸性能试样。在980 °C条件下,使用电子万能试验机将试样拉伸至断裂。每种合金制备三个平行试样进行拉伸测试。断后样品经过超声波振动清洗,借助SEM进行断口形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 Co含量对铸态组织的影响

铸态合金中元素偏析如图1所示。采用EPMA定量分析了不同Co含量合金的枝晶干和枝晶间的化学成分。元素在枝晶间与枝晶干的偏析情况通过平衡分配系数 k 求得。平衡分配系数 k 是在凝固过程中，溶质元素在固相和液相中的浓度达到平衡时的比值：当 $k < 1$ 时，通常将其定义为正偏析元素，表示溶质在液相中更易富集，凝固时溶质被排挤到液相，最终富集在枝晶间；而当 $k > 1$ 时，则定义其为负偏析元素，即溶质在

固相中更易富集，凝固时优先进入固相，富集在枝晶干。通常用以下公式求得 k 值：

$$k = \frac{w_{dc}}{w_{id}} \quad (1)$$

式中： w_{dc} 和 w_{id} 分别为枝晶干和枝晶间中 i 元素的含量（质量分数）。

单晶高温合金在凝固过程中，高温梯度 and 快速凝固速率的耦合作用，导致固相与液相之间处于非平衡状态。溶质元素在凝固过程中进行再分配，致使枝晶干和枝晶间区域的成分分布不均匀，进而形成枝晶偏析^[20]。EPMA对铸态组织凝固系数的统计分析表明，Al、Ti和Ta主要聚集在镍基合金的枝晶间区。随着Co含量的增加，Co元素倾向于向枝晶干优先偏析。Co含量的增加会使铸态合金主要元素偏析轻微加剧。7Co合金及9Co合金元素的偏析情况，相较于5Co合金元素的偏析更为剧烈。

图2为三种合金的铸态组织，铸态组织主要由枝晶间、枝晶干与共晶构成。可以观察到：十字形结构的枝晶数量呈现先增多后减少的趋势；随着Co含量的增加，三次枝晶呈现先减少后增多的趋势。

图3为Co元素含量对合金一次枝晶间距和共晶含量的影响。Co含量在5.0wt.%~9.0wt.%范围内，一次枝晶间距随着Co元素含量的增加呈现先减小后增大的变化趋势；共晶含量随着Co元素含量的增加呈现先增加后

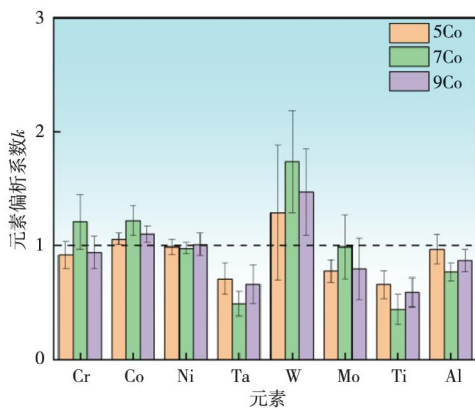
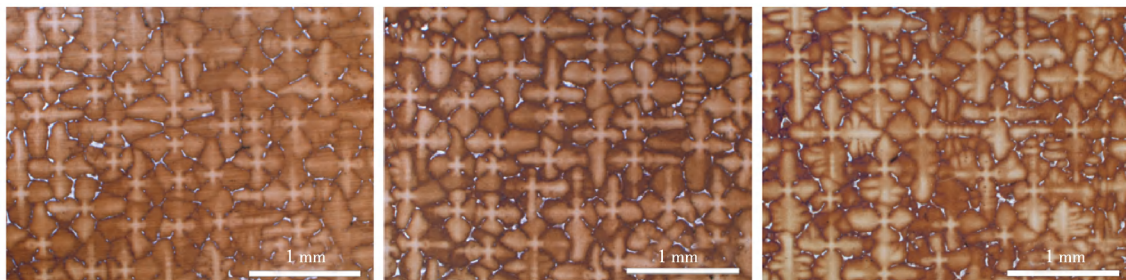


图1 三种合金偏析系数

Fig. 1 The segregation ratio of each element in three alloys



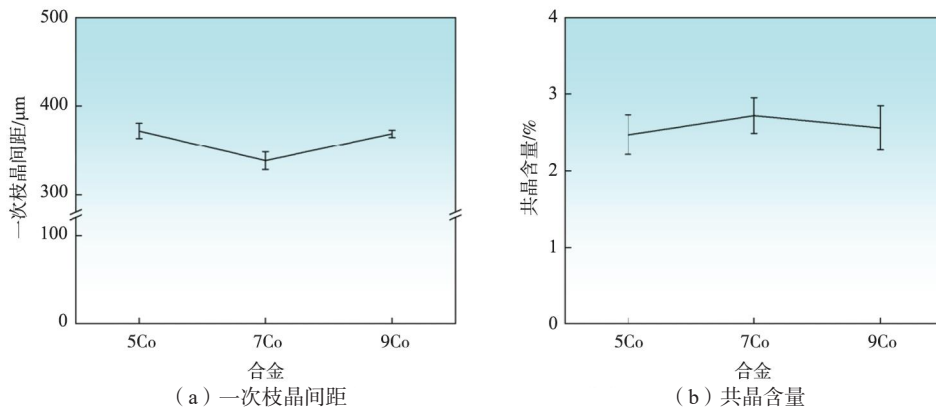
(a) 5Co合金

(b) 7Co合金

(c) 9Co合金

图2 三种合金铸态枝晶形貌

Fig. 2 The as-cast dendritic morphologies of three alloys



(a) 一次枝晶间距

(b) 共晶含量

图3 三种合金一次枝晶间距和共晶含量

Fig. 3 The PDAS and eutectic volume fractions of three alloys

减少的变化趋势。统计得到三种合金一次枝晶间距分别为： $(371.98 \pm 8.54) \mu\text{m}$ 、 $(338.29 \pm 9.87) \mu\text{m}$ 、 $(368.76 \pm 4.17) \mu\text{m}$ ，三种合金 $(\gamma + \gamma')$ 共晶含量（体积分数/%）分别为： $(2.47 \pm 0.26)\%$ 、 $(2.72 \pm 0.23)\%$ 、 $(2.56 \pm 0.29)\%$ 。当Co元素含量为7.0 wt.%时，一次枝晶间距最小，共晶含量最多。

随着Co元素含量的增加，一次枝晶干间距 (λ) 先减小后增大。这种现象通常用Kurz-Fisher (KF) 模型^[22]来模拟，该模型用以下公式表示：

$$\lambda = 4.3 \left(\frac{\Gamma D_L \Delta T_0}{k' V G^2} \right)^{0.25} \quad (2)$$

式中： Γ 是吉布斯-汤姆逊 (Gibbs-Thomson) 系数， D_L 是液相的扩散系数， ΔT_0 是结晶温度间隔， k' 是溶质的偏析系数， V 是晶体生长速率， G 为温度梯度。其中 k' 的计算公式为：

$$k' = \frac{T_{\text{Ni}} - T_L}{T_{\text{Ni}} - T_S} \quad (3)$$

式中： T_{Ni} 为镍的熔点， T_L 和 T_S 分别为液相线和固相线温度。

由于三种合金的浇注方式相同，主要影响枝晶干间距的因素为 D_L 、 T_S 和 ΔT_0 ，由于Co的扩散系数比其他 γ 基体形成元素更高，Co含量的变化会影响 D_L ，Co含量的增加会降低熔体的自扩散效率，减少 D_L ； k' 为溶质偏析系数，与元素偏析程度有关，当Co元素含量为7.0 wt.%时，铸态合金元素偏析情况最显著， k' 最大，会导致一次枝晶干间距最小。这说明当Co元素含量为7.0 wt.%时，一次枝晶干间距主要受到 k' 的影响。

随着Co元素含量的增加，共晶含量呈现出先增加后减少的趋势。共晶含量主要受到元素偏析情况的影响，前文通过EPMA分析发现7Co合金及9Co合金元素偏析程度比5Co合金更为剧烈，证明7Co合金及9Co合金共晶含量比5Co合金多。7Co合金的共晶含量分数最大，也证明7Co合金元素偏析最为显著。试验结果与刘静姝^[23]等人研究结果一致。

2.2 Co含量对合金相变温度的影响

三种合金的DSC降温凝固曲线如图4所示。采用差热分析法表征了不同Co含量合金的相变温度。固溶处理温度通常介于热处理窗口温度之间，主要涉及固相线温度以及 γ' 大量溶于基体的温度。在此温度区间内找到适宜的温度，这将决定后续的固溶处理制度。

合金的主要特征温度如表2所示，Co元素含量的增加能够降低 γ' 相的溶解度同时改变热处理窗口 (HTW, $T_S - T_{\gamma'}$)。首先是因为Co原子部分替代 γ 基体中的Ni位点，改变基体电子结构，降低Al、Ti等 γ' 相形成元素在 γ 基体中的固溶度，降低 γ' 相的形成焓。同时Co元素的增加也会使得Al、Ti需要克服更大的应变势能^[24]。其次是因为Co是 γ 基体形成元素，随着Co含量的增加， γ 基体会更加稳定。在相图中扩大了 γ 基体区的范围，从而缩小 γ' 相区。意味着 γ' 相在更低的温度下就开始溶解到 γ 基体中，从而降低了 γ' 相的体积分数。

合金的主要特征温度如表2所示。Co元素含量的增加能够降低 γ' 相的溶解度，同时改变热处理窗口。

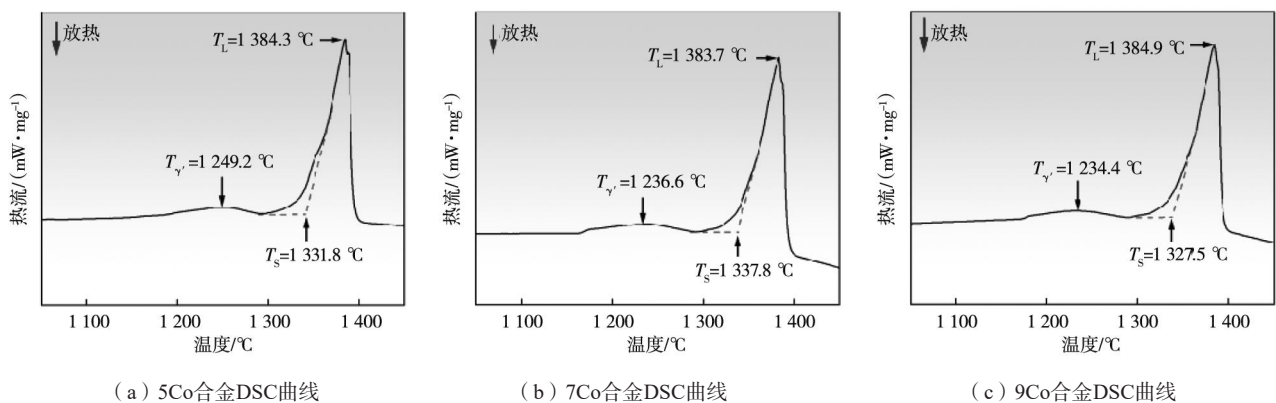


图4 三种合金的DSC曲线

Fig. 4 The DSC curves of three alloys

表2 DSC曲线特征温度

Tab. 2 The characteristic temperatures of DSC curves

合金	$T_L/^\circ\text{C}$	$T_S/^\circ\text{C}$	$T_{\gamma'}/^\circ\text{C}$	HTW/ $^\circ\text{C}$
5Co	1384.3	1331.8	1249.2	82.6
7Co	1383.7	1337.0	1236.6	100.4
9Co	1384.9	1327.5	1234.4	93.1

这首先是因为Co原子部分替代 γ 基体中的Ni位点，改变了基体的电子结构，降低了Al、Ti等 γ' 相形成元素在 γ 基体中的固溶度，进而降低了 γ' 相的形成焓。同时，Co元素的增加也会使Al、Ti需要克服更大的应变势能^[24]。其次，由于Co是 γ 基体形成元素，随着Co含量的增加， γ 基体会更加稳定。在相图中， γ 基体区

的范围扩大，从而缩小了 γ' 相区。这意味着 γ' 相在更低的温度下就开始溶解到 γ 基体中，进而降低了 γ' 相的体积分数。

2.3 Co 含量对固溶态组织形貌的影响

三种合金经 1 280 °C 固溶处理后的偏析情况如图 5 所示。固溶处理是改善镍基高温合金显微组织均匀性的关键工艺。固溶温度的升高显著加速了元素的扩散，特别是 W 等难熔元素，其偏析程度也显著降低。

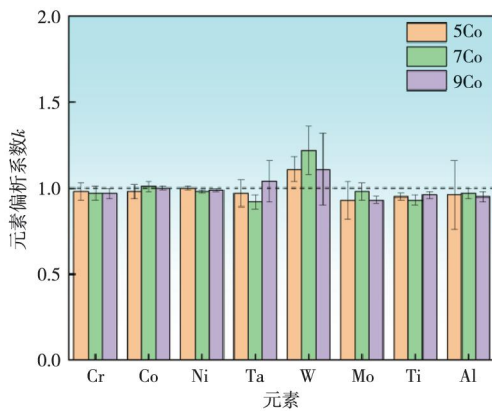


图5 三种合金经 1 280 °C 固溶处理的偏析系数
Fig. 5 The segregation ratios of three alloys through solution treated at 1 280 °C

随着温度的升高，元素偏析程度相对降低，元素分布更加均匀，这对合金的力学性能有益。

最新的 EPMA 试验结果和 Scheil 模拟^[25] 结果表明，Co 的偏析系数约为 1.11，表现出轻微的负偏析趋势。随着 Co 含量的增加，Co 在枝晶干和枝晶间的分布更加均匀。Co 含量的增加改善了 Al 和 Ti 等元素的偏析情况。凝固初期发生快速均匀化，固液界面处液相体积分数大，有利于均匀化，表现出较高的扩散速率。在这些元素中，Co 具有最高的扩散速率，从而减少了 Al、Ti 等元素在固相体积分数中的积累，进而减轻了它们的偏析。这一点在 Wang 等人^[26] 的研究中得到了证明。随着 Co 含量的增加，“扩散稀释”机制尤为明显。

共晶含量在镍基高温合金中往往会影响合金的铸造性能、热处理窗口、组织均匀性以及力学性能。共晶含量通常由凝固过程中的偏析和相选择所决定，并且其经常通过促进 γ' 相在凝固末期析出，从而可能改变最终组织中的共晶含量。

从图 6 可以看出，对铸态合金实施固溶热处理，可以减少共晶含量，进而提高合金的稳定性。但过高的温度会使合金出现初熔孔洞，从而对合金的力学性能不利。表 3 给出了不同温度下固溶处理后的残余共晶含量（体积分数）。

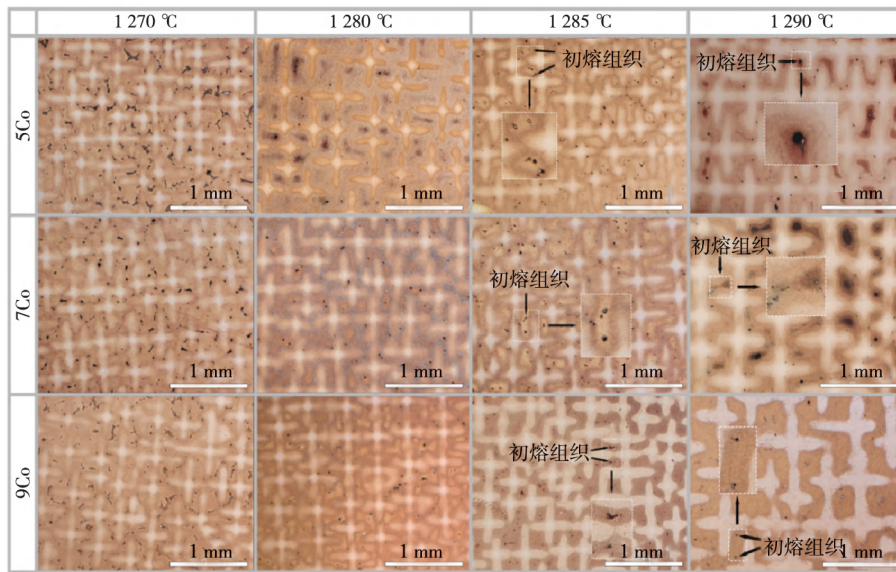


图6 三种合金经不同温度固溶处理后组织及残余共晶
Fig. 6 The microstructures and residual eutectics of three alloys after solution treating at different temperatures

表3 三种合金经不同温度固溶处理后残余共晶含量
Tab. 3 The residual eutectic contents of three alloys after solution treated at different temperatures 体积分数/%

合金	残余共晶 (1 270 °C)	残余共晶 (1 280 °C)	残余共晶 (1 285 °C)	残余共晶 (1 290 °C)
5Co	0.54 ± 0.24	0.11 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.01
7Co	0.25 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.04 ± 0.01
9Co	0.33 ± 0.16	0.14 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.01

从图6中可以看出,随着固溶温度逐渐升高,残余共晶含量逐渐降低,具体数值如表3所示。这一结果与Pan等人^[27]的研究结果一致。Co元素含量的增加并不会使残余共晶形貌发生明显变化,因为共晶主要以Al和Ti作为主导元素,而Co元素的平衡分配系数接近1,Co含量增加不会剧烈改变过冷度,所以共晶形貌得以保持。为了获得均匀的微观结构并减少共晶含量,根据DSC图像不断提高固溶温度。虽然得到了较少的残余共晶含量,但在某些区域出现了初熔孔洞,进而降低了合金的力学性能。因此,应选择使共晶含量较低且不出初熔孔洞的固溶处理温度。

初熔孔洞是成分偏析与临界温度控制失效共同作用的结果。B.S. Bokstein^[28]通过对均质化动力学进行建模发现,Al元素和Ti元素最先达到平衡,随后它们富集,引起孔洞增加。

2.4 Co含量对 γ' 相的影响

在铸态微观组织中,存在不均匀的 γ/γ' 微观组织、不规则的 γ' 相、共晶以及严重的凝固偏析,需要通过热处理进行调整或去除。

对三种合金进行完全热处理后,统计枝晶干处 γ' 相的体积分数。图7展示了三种合金在不同固溶热处理

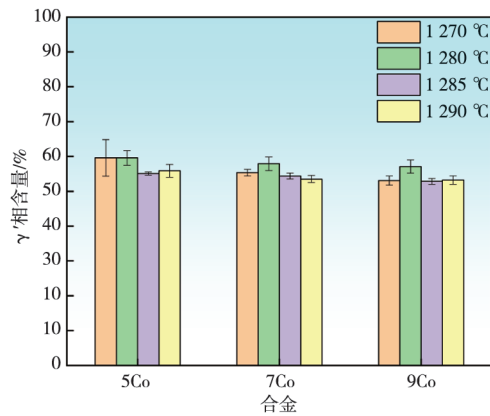


图7 三种合金经不同固溶温度完全热处理后 γ' 相含量
Fig. 7 The γ' phase fractions of three alloys after full heat treatment at different solution temperatures

制度下,保持相同时效制度时, γ' 相的体积分数随固溶温度升高而逐渐减小的情况。试验发现,当固溶处理温度为1280 °C时,三种合金 γ' 相的含量均达到最多。

从前文研究结果中,确定了三种合金的固溶处理温度为1280 °C。在保证最高温度介于初熔温度及 $T_{\gamma'}$ 之间,且确保元素均匀分布的前提下,防止合金出现初熔孔洞。图8展示了固溶温度为1280 °C的完全热处理后的微观组织结构。

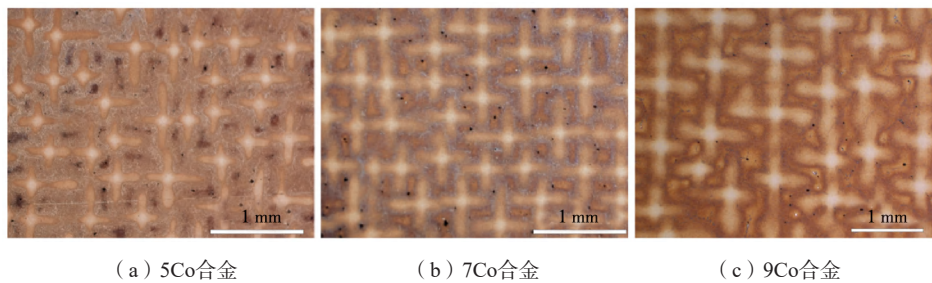


图8 三种合金经完全热处理(固溶温度1280 °C)后组织形貌
Fig. 8 Microstructure morphologies of the three alloys after complete heat treatment (solution heat treatment at 1280 °C)

图9展示了三种合金经完全热处理后枝晶干和枝晶间的组织形貌。对三种合金枝晶干处 γ' 相的体积分数进行统计,5Co合金 γ' 相体积分数为 $(59.59 \pm 2.11)\%$,7Co合金 γ' 相体积分数为 $(57.91 \pm 1.93)\%$,9Co合金 γ' 相体积分数为 $(57.11 \pm 1.90)\%$ 。试验发现,随着Co元素含量的增加, γ' 相体积分数逐渐减小,但 γ' 相体积分数的变化相对温和。 γ' 相体积分数逐渐减小主要由以下两个方面的因素决定:一是Co元素为 γ 基体形成元素,有利于 γ 基体的形成,这一发现与之前的研究^[29]得出了相同的结论;二是由于Co元素的增加会抑制 γ' 相中Al和Ta的偏析,成分分配的改变降低了形核驱动力,抑制了 γ' 相成核,减小了 γ' 相的尺寸,这一点在Wang等

人^[30]的研究结果中得到了证明。

2.5 Co含量对拉伸性能的影响

表4展示了不同Co含量经热处理后的拉伸性能测试结果。根据结果所示,随着Co含量提升,屈服强度和抗拉强度都在下降。7Co合金的屈服强度和抗拉强度相较于5Co合金分别下降2.6%和1.9%;9Co合金的屈服强度和抗拉强度相较于5Co合金分别下降6.6%和10.8%。然而随着Co含量的增加,三种合金的断后伸率先增加后降低,5Co合金断后伸长率为 $(15.8 \pm 5.6)\%$,7Co合金断后伸长率为 $(38.1 \pm 6.5)\%$,9Co合金断后伸长率为 $(30.08 \pm 5.1)\%$ 。

前文的研究表明,7Co合金及9Co合金的枝晶间距

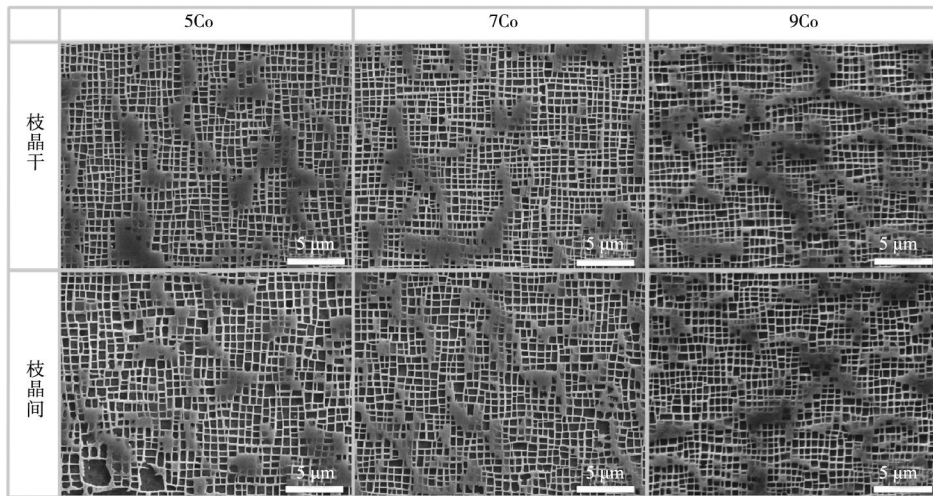


图9 三种合金经完全热处理（固溶温度1 280 ℃）后枝晶干和枝晶间的组织形貌

Fig. 9 The microstructure morphologies of three alloys in the dendrite trunks and interdendritic regions after full heat treatment (solution heat treatment at 1 280 ℃)

表4 三种合金的拉伸性能测试结果
Tab. 4 Tensile properties of 5Co, 7Co and 9Co alloys

合金	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
5Co	755.3 ± 16.1	464.0 ± 42.5	15.8 ± 5.6
7Co	735.3 ± 29.9	455.7 ± 17.3	38.1 ± 6.5
9Co	705.0 ± 7.1	414.7 ± 6.3	30.1 ± 5.1

相较于5Co合金的枝晶间距更小，但试验证明随着Co含量的增加，7Co合金和9Co合金的屈服强度及抗拉强度开始降低，主要由以下两个因素决定。

首先，对于镍基单晶高温合金，高温条件下性能与 γ' 相密切相关。Co元素增加，减少 γ' 相体积分数，从而降低合金的屈服强度及抗拉强度。在高温形变过程中，位错运动主要为绕过机制，通常由Orowan绕过机制控制^[31]，其公式为：

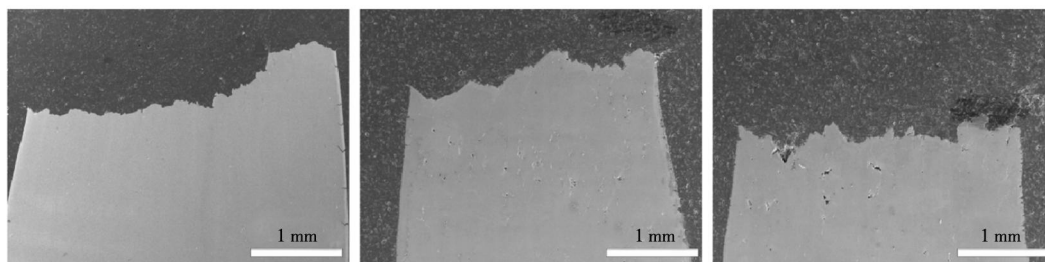
$$\tau_{\text{Orowan}} = \frac{Gb}{h} \quad (4)$$

式中： G 为剪切模量， b 为Burgers（伯格）矢量， h 为 γ 基体通道的宽度。

根据前文研究， γ' 相体积分数随着Co元素含量的增加而减少，公式（4）中 γ 基体通道的宽度 h 增加，导致位错所需的临界剪切应力下降。因此，7Co合金及9Co合金的屈服强度下降。

二是由于Co含量增加，减少了 γ 和 γ' 两相的错配度^[32]，导致位错网络间距扩大。稀疏的界面位错网络难以有效“钉扎”位错，对位错运动的阻碍能力或剪切的抵抗力较差。因此，尽管7Co合金及9Co合金的枝晶间距相较于5Co合金的枝晶间距更短，但 γ' 相体积分数及晶格错配度随着Co含量的增加而减小，导致5Co合金相对于7Co合金和9Co合金拥有更高的屈服强度及抗拉强度。这一发现与之前的研究^[33]得出了相同的结论。

图10所示为三种合金在980 ℃拉伸条件下断口纵截面形貌。从图中大致可以看出，断口位置处孔洞的数量随着Co元素含量的增加而增加，孔洞宽度也随之加宽。对断裂面进一步放大，如图11所示，在距断口处1 mm的位置，可以看出三种合金的裂纹主要起源于碳化物周围，裂纹易于沿着碳化物扩展，同时碳化物自



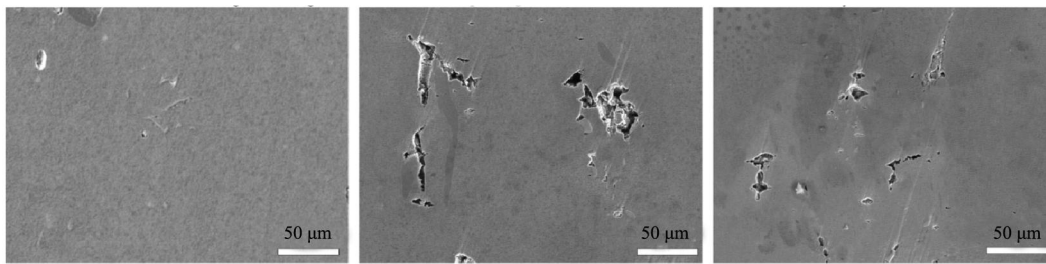
(a) 5Co合金断口纵截面全貌

(b) 7Co合金断口纵截面全貌

(c) 9Co合金断口纵截面全貌

图10 三种合金断口附近纵截面全貌

Fig. 10 Longitudinal section morphologies near the fracture surfaces of three alloys



(a) 5Co合金距离断口1 mm

(b) 7Co合金距离断口1 mm

(c) 9Co合金距离断口1 mm

图11 距离断口1 mm处组织形貌

Fig. 11 Morphologies at the areas of about 1 mm from the fracture surfaces

身也可能在高温拉伸中断裂，导致裂纹萌生。其次，碳化物周围的细小裂纹也会与较大裂纹连接，从而影响性能。由于Co元素增加会降低层错能，位错在高温变形过程中塞积于碳化物界面，局部应力集中促使碳化物断裂。而7Co合金因为其较小的枝晶间距，有效缓解了应力集中，获得了更加优良的高温塑性，这与试验中得到的7Co合金断后伸长率最长的结果一致。

图12所示为合金断口及断口处的局部放大图。5Co合金、7Co合金及9Co合金在断口处形貌均为圆形断口形貌，由于第二相颗粒形成的孔洞在应力作用下均匀长大所形成。合金断口局部放大图展示出三种合金均存在韧窝，韧窝的形成是微孔聚合断裂的主要特征，

属于典型的韧性断裂机制。5Co合金韧窝形貌相对于7Co合金及9Co合金呈现出浅而小的形貌，表明5Co合金塑性较低。而7Co合金及9Co合金呈现出深而大的韧窝形貌，7Co合金及9Co合金的塑性更加良好。7Co合金相对于9Co合金的枝晶间距最小，细化枝晶分散了应力集中，抑制裂纹源的产生，7Co合金承受的塑性应变更大，因此7Co合金具有最高的断后伸长率。这与之前的研究^[34]得到了相同的结论。

2.6 Co含量对持久性能的影响

表5展示了三种合金在980 °C/248 MPa条件下的持久性能测试结果。数据显示，随着Co含量从5wt.%增加

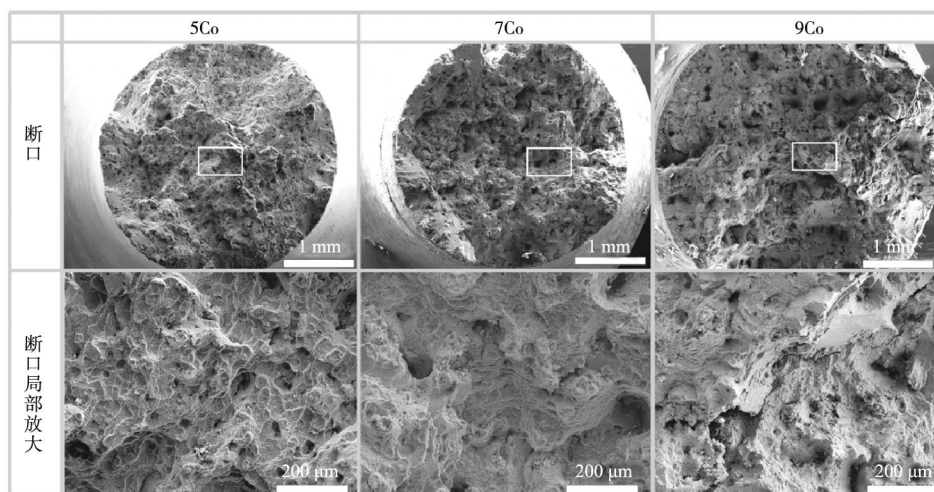


图12 三种合金拉伸断口形貌

Fig. 12 The tensile fracture morphologies of three alloys

至9wt.%，合金的持久寿命先增加后降低。其中，7Co合金表现出最优异的高温持久性能，其平均寿命达到 (96.2 ± 5.8) h。相较于5Co合金 (78.7 ± 7.4) h和9Co合金 (84.6 ± 4.9) h，7Co合金的持久寿命分别高出22.2%和13.7%，证实了适量的Co添加可有效改善合金的高温承温能力，但过量的Co反而对高温持久性能不利。

表5 三种合金的持久性能测试结果
Tab. 5 The stress-rupture property test results of three alloys

合金	持久寿命/h
5Co	78.7 ± 7.4
7Co	96.2 ± 5.8
9Co	84.6 ± 4.9

结果显示,枝晶间距的变化与合金在980 °C/248 MPa下的持久寿命表现出强对应关系。7Co合金的枝晶最小,这通常意味着更优异的组织均匀性,从而使其具有最长的持久寿命。

一般来说,镍基单晶高温合金的持久寿命受枝晶间距及位错的影响^[35-36]。从前文的研究结果可见,三种不同Co含量合金中,7Co合金具有最小的一次枝晶间距,这提高了 γ/γ' 微观组织的均匀性。5Co合金虽然 γ' 相体积分数最高,但三种合金中,5Co合金的枝晶间距最大。本文三种合金中,试验结果显示调控Co含量可减轻元素偏析从而细化枝晶组织,这对提升合金的高温持久性能具有重要作用。这与Pan^[37]等人的研究结

果一致。

图13所示为三种合金在980 °C/248 MPa条件下持久断口纵截面形貌。从图中看出:9Co合金近断口位置的蠕变孔洞数量较少,且孔洞尺寸较小。这说明Co元素的添加有效抑制了高温下孔洞的形核与生长。对断裂面进一步放大,如图14所示,在距断口约1 mm的位置,可看出5Co合金中的裂纹主要起源于碳化物周围,且易于沿碳化物扩展。其次裂纹倾向于沿碳化物分布路径扩展,并通过微裂纹的相互聚合加速失效。7Co合金及9Co合金裂纹主要起源于碳化物周围,裂纹沿着碳化物扩展时也与粗大的 γ 相相连接,形成穿晶或沿晶的断裂路径。

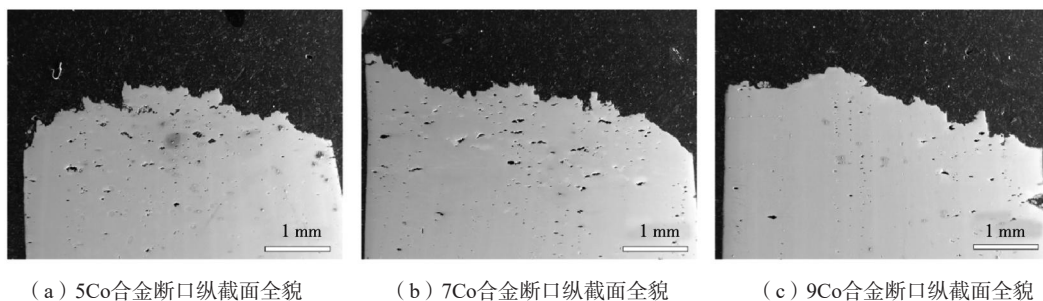


图13 三种合金在980 °C/248 MPa持久断裂后断口附近纵截面全貌

Fig. 13 Longitudinal section morphologies near the fracture surfaces of three alloys after sustained fracture at 980 °C/248 MPa

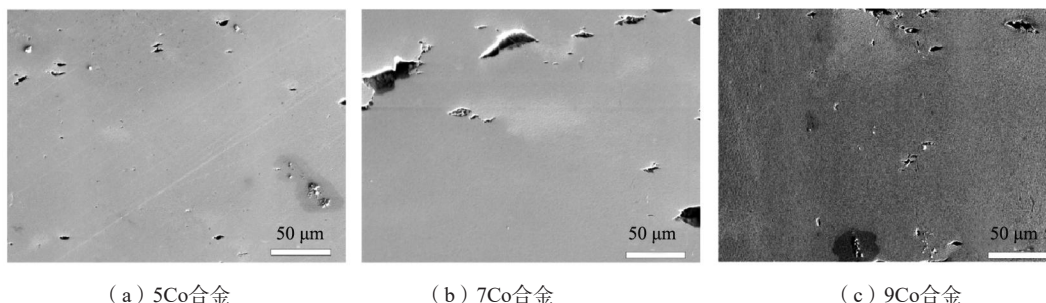


图14 三种合金在980 °C/248 MPa持久断裂后距离断口约1 mm处纵截面组织形貌

Fig. 14 Longitudinal section microstructure morphologies at the areas of about 1 mm from the fracture surfaces of three alloys after sustained fracture at 980 °C/248 MPa

图15所示为合金断口及断口处的局部放大图。可见,在高温条件下,与拉伸断口相同,持久断口呈圆形,可观察到韧窝,属于典型的韧性断裂机制。

3 结论

(1) 随着Co含量的增加,铸态下合金的主要元素偏析略有提高。7Co合金及9Co合金的元素偏析情况较5Co合金加重。Co含量在5.0wt.%~9.0wt.%范围内,合金一次枝晶间距随Co含量增加呈现先减小后增加的趋势,而共晶含量则呈现相反趋势。Co含量为7.0 wt.%时,合金的一次枝晶间距最小,为 (338.29 ± 9.87) μm,共

晶含量最高,为 (2.72 ± 0.23) %。

(2) Co含量的增加改变了 T_s 和 $T_{\gamma'}$,从而改变了热处理窗口。与7Co和9Co合金相比,5Co合金的热处理窗口范围最小。三种不同Co含量合金经固溶处理后,残余共晶含量明显减少,元素偏析减轻。经相同完全热处理制度后, γ' 相的体积分数随Co含量的增加而减小。

(3) 拉伸强度和屈服强度随着Co元素含量的增加逐渐降低,而塑性提高。相较于7Co合金及9Co合金,5Co合金具有更高的抗拉强度及屈服强度,但断后伸长率低于7Co合金及9Co合金。

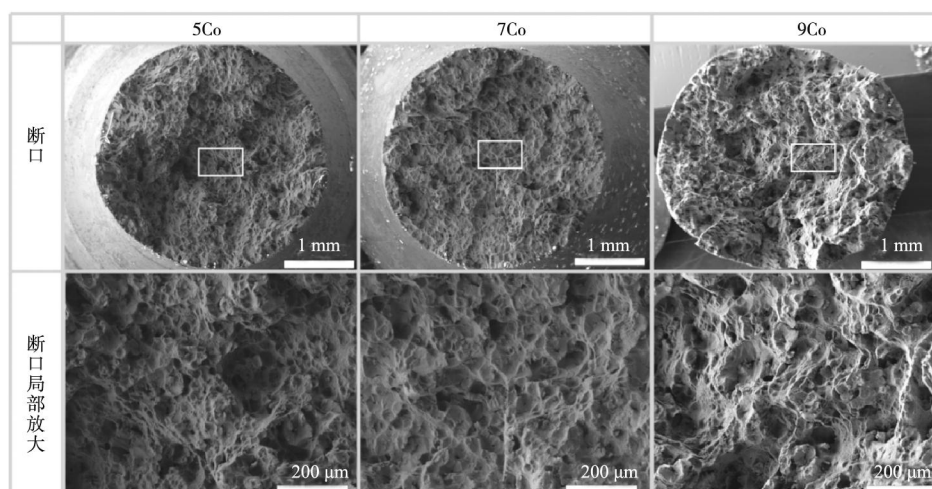


图15 三种合金在980 °C/248 MPa持久断裂后断口形貌

Fig. 15 Morphologies of the fracture surfaces of three alloys after sustained fracture at 980 °C/248 MPa

(4) 三种合金在980 °C/248 MPa下的持久寿命呈现显著的先增加后降低趋势；其中7Co合金的平均持久寿命达到96.2 h，相较于5Co及9Co合金分别提升了22.2%和13.7%。

(5) 综合对比三种合金在铸态组织演变、固溶特

性及高温力学行为方面的表现，7Co合金拥有最细小的枝晶组织和优异的组织均匀性，在保持较高强度的同时显著提升了高温持久寿命。因此，在本试验研究中，7Co合金性能最优。

参考文献:

- [1] SINGH J, HASHMI A W, KUMAR A, et al. Importance and alternate of Ni-based superalloys in aerospace applications: a review [J]. AIP Publishing, 2024, 3217 (1): 040012.
- [2] JIANG C P, MASRUOTIN A, WIBISONO W, et al. Enhancing internal cooling channel design in Inconel 718 turbine blades via laser powder bed fusion: a comprehensive review of surface topography enhancements [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2025, 26: 487-511.
- [3] LV P S, LIU L R, YANG Y H, et al. Role of microstructural stability and superdislocation shearing on creep behavior of two low-cost Ni-based single crystal superalloys at 1 100 °C/130 MPa [J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 888: 145796.
- [4] WALSTON W S, O'HARA K S O, ROSS E W, et al. Ren^e N6: third generation single crystal superalloy [C]// KISSINGER R D, DEYE D J, ANTON D L, et al. Superalloys 1996. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1996: 27-34.
- [5] ERICKSON G L. The development and application of CMSX-10 [C]// KISSINGER R D, DEYE D J, ANTON D L, et al. Superalloys 1996. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1996: 35-44.
- [6] PAN Q H, ZHAO X B, XIA W S, et al. Dual effects of Co on microstructure stability in a Ru-containing Ni-based single crystal superalloys [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2025 (2): 313-321.
- [7] PAN Q H, ZHAO X B, CHENG Y. Effects of Co on microstructure evolution of a 4th generation nickel-based single crystal superalloys [J]. Intermetallics, 2023, 153: 107798.
- [8] 来永军, 宁礼奎, 赵岭, 等. Ta、Co对新型高强抗热腐蚀单晶高温合金组织稳定性的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53 (3): 748-756.
- [9] LIU J L, ZHANG J, MENG J, et al. The effect of Co on the microstructure and stress rupture properties of a single crystal superalloy [J]. Materials Research Innovations, 2014, 18 (4): 414-420.
- [10] HUO J J, SHI Q Y, TIN S, et al. Improvement of creep resistance at 950 degrees C and 400 MPa in Ru-containing single-crystal superalloys with a high level of Co addition [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49: 5298-5308.
- [11] LI X X, OU M Q, WANG M, et al. Effect of Co on microstructure and stress rupture properties of K4750 alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32 (12): 1501-1510.
- [12] PAN Q H, ZHAO X B, YUE Q Z, et al. Homogenizing effects of Co on multi-scale elemental distribution in Ru-containing Ni-based single crystal superalloys [J]. Materials Letters, 2022, 328: 133145.
- [13] TAN Z H, WANG X G, CHENG Y, et al. Co content dependence on the microstructure characteristic and creep performance at elevated temperature in Ru-containing single crystal superalloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 825: 141906.
- [14] VOLZ N, ZENK C H, CHERUKURI R, et al. Thermophysical

- and mechanical properties of advanced single crystalline Co-base superalloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49 (9) : 4099–4109.
- [15] HUO J J, SHI Q Y, ZHENG Y R, et al. Microstructural nature and stability of Co-rich TCP phases in Ru-containing single crystal superalloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 715: 460–470.
- [16] 王万年, 曹国鑫, 朱煦, 等. 热处理对NiW中/重合金组织与性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53 (5) : 1378–1384.
- [17] 阳大云, 金涛, 赵乃仁, 等. 钴、钨和钛对镍基单晶高温合金铸态组织的影响 [J]. *航空材料学报*, 2003, 23 (S1) : 17–20.
- [18] 阳大云, 张炫, 金涛, 等. 钴、钨和钛对镍基单晶高温合金持久性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34 (8) : 1295–1298.
- [19] WANG W Z, JIN T, ZHAO N R, et al. Effect of cobalt on chemical segregation and solution process in Re-containing single crystal superalloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16 (A03) : 1978–1981.
- [20] 陈博文, 曾强, 李钢, 等. 固溶温度对DD416镍基单晶高温合金组织及拉伸性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2024, 49 (1) : 119–125.
- [21] SHI Q, DING X, WANG M, et al. Co Effect on as-cast and heat-treated microstructures in Ru-containing single-crystal superalloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, 45 (4) : 1833–1843.
- [22] KURZ W, FISHER D J, RAPPAPAZ M. *Fundamentals of solidification* [M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1998.
- [23] 刘静姝, 王磊, 刘杨, 等. Co含量对一种新型高温合金铸态及热处理组织的影响 [J]. *材料与冶金学报*, 2023, 22 (4) : 351–360.
- [24] LIU S, LIU C, GE L, et al. Effect of interactions between elements on the diffusion of solutes in Ni X Y systems and γ' -coarsening in model Ni-based superalloys [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 138: 100–104.
- [25] 庄晓黎, 吴红宇, 方姣, 等. 无铈镍基单晶高温合金的显微组织表征 [J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26 (8) : 1246–1254.
- [26] WANG F, MA D, BUHRIG-POLACZEK A. Microsegregation behavior of alloying elements in single-crystal nickel-based superalloys with emphasis on dendritic structure [J]. *Materials Characterization*, 2017, 127: 311–316.
- [27] PAN Q H, ZHAO X B, YUE Q Z, et al. Effects of Cobalt on solidification characteristics and as-cast microstructure of an advanced nickel-based single crystal superalloys [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 3074–3082.
- [28] BOKSTEIN B S, EPISHIN A I, LINK T, et al. Model for the porosity growth in single-crystal nickel-base superalloys during homogenization [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57 (9) : 801–804.
- [29] 靳晓磊, 赵菲, 郝宪朝, 等. Co对铸造镍基高温合金影响研究进展 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43 (8) : 1029–1035.
- [30] WANG B, ZHANG J, HUANG T, et al. Effect of Co on microstructural stability of the third generation Ni-based single crystal superalloys [J]. *Journal of Materials Research*, 2016, 31 (9) : 1328–1337.
- [31] 舒德龙, 田素贵, 梁爽, 等. 一种4.5% Re镍基单晶合金在980 °C蠕变期间的变形与损伤机制 [J]. *材料工程*, 2017, 45 (1) : 93–100.
- [32] 石倩颖. 多组元作用对第四代镍基单晶高温合金组织和高温低应力蠕变行为的影响 [D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [33] 杨楠, 刘杨, 王磊, 等. Co含量对一种新型四代单晶高温合金组织及高温拉伸性能的影响 [J]. *特钢技术*, 2021, 27 (3) : 6–11.
- [34] 李红梅, 白亚冠, 郭伟, 等. 超超临界转子用Inconel 617合金的热塑性 [J]. *金属热处理*, 2024, 49 (1) : 103–107.
- [35] SUN H Y, MA D X, ZHAO Y X, et al. Dendrite structure refinement and mechanical property improvement of a single-crystal superalloy [J]. *Metals*, 2025, 15 (3) : 295
- [36] XU J C, DUAN H C, ZHAO X B, et al. High-temperature creep response of a nickel-based single crystal superalloy with varying initial microstructures [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2025, 944: 148881.
- [37] PAN Q H, ZHAO X B, XIA W S, et al. Homogenization effects by Co additions to high temperature and low stress creep performance of a 4th-generation Ni-based single crystal superalloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2024, 898: 146373.