

铸态 $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ ($n = 1, 2, 3, 4$)高熵合金的力学性能和拉伸断口研究

裴国梁

北京工业大学材料科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年6月4日; 发布日期: 2025年6月12日

摘要

本研究围绕铸态 $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ ($n = 1, 2, 3, 4$, at %)高熵合金展开, 着重探究钇(Y)含量对其力学性能及拉伸断口形貌的影响规律。研究结果显示, Y-1和Y-2的应力极限相等, 不过Y-1的断裂伸长率更优; Y-3和Y-4的屈服强度相对较高, 但塑性近乎消失。借助扫描电子显微镜(SEM)对拉伸断口进行分析, 揭示了断口微观特征与宏观力学性能之间的内在关联, 为高熵合金成分优化和性能提升提供了关键数据支持与理论依据。

关键词

高熵合金, 力学性能, 拉伸断口, 扫描电子显微镜

Mechanical Properties and Tensile Fracture Study of Cast $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ ($n = 1, 2, 3, 4$) High Entropy Alloys

Guoliang Pei

College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: Jun. 4th, 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

The present study centers on cast $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ ($n = 1, 2, 3, 4$, at %) high entropy alloys, focusing on the influence law of yttrium (Y) content on their mechanical properties and tensile fracture morphology. The results show that the stress limits of Y-1 and Y-2 are equal, but the elongation at break of Y-1 is better; the yield strengths of Y-3 and Y-4 are relatively high, but the plasticity nearly

disappears. The analysis of the tensile fracture with the aid of scanning electron microscope (SEM) reveals the intrinsic correlation between the fracture microscopic characteristics and the macroscopic mechanical properties, which provides key data support and theoretical basis for the optimization of the composition and performance enhancement of the high entropy alloys.

Keywords

High Entropy Alloys, Mechanical Properties, Tensile Fracture, Scanning Electron Microscopy

Copyright © 2025 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

在材料科学不断演进的当下，高熵合金凭借其新颖的成分设计和卓越的性能，成为材料领域的研究焦点[1]。传统合金通常由一种或两种主要元素主导，而高熵合金打破这一常规，由多种主元以等原子比或近等原子比构成[2] [3]。这种独特的成分组合赋予高熵合金一系列特殊效应，如高熵效应能够稳定固溶体结构、迟滞扩散效应阻碍原子扩散、晶格畸变效应增强原子间结合力、鸡尾酒效应协同提升合金性能，进而使高熵合金具备优异的综合性能，涵盖高强度、良好塑性、出色的耐腐蚀性以及抗氧化性等[4] [5]。

在众多高熵合金体系里，(CoCrNi)基高熵合金因具备简单的面心立方(FCC)结构和优良的综合性能脱颖而出[6]。其 FCC 结构赋予合金良好的塑性变形能力，使其在众多工程领域展现出巨大的应用潜力。钇(Y)作为稀土元素中的重要一员，在合金领域具有独特的作用[7] [8]。在多种合金体系中，Y 的添加能够细化晶粒，使晶粒尺寸减小，晶界面积增加，从而阻碍位错运动，提升合金强度；同时，Y 可以净化晶界，减少杂质元素在晶界的偏聚，降低晶界脆性，提高合金的韧性和高温性能；此外，Y 还能增强合金的抗氧化性能，在合金表面形成致密的氧化膜，有效阻止氧气等介质的侵蚀。

鉴于此，将 Y 引入(CoCrNi)基高熵合金，有望通过 Y 与其他元素的相互作用，进一步优化合金的组织结构和性能。然而，目前针对 Y 含量对(CoCrNi)基高熵合金力学性能和拉伸断口形貌影响的研究还不够全面和深入。深入开展这方面的研究，不仅有助于揭示高熵合金的强化与断裂机制，还能为高熵合金在航空航天、汽车制造、能源等关键领域的广泛应用提供有力的理论支撑。

2. 实验设计

2.1. 合金制备

实验采用真空感应熔炼炉来制备(CoCrNi)_{100-n}Y_n (n = 1, 2, 3, 4, at %)高熵合金。选用纯度不低于 99.9% 的 Co、Cr、Ni 和 Y 金属作为原料，这是确保合金成分精准和性能稳定的基础。在配料环节，依据设计成分进行高精度称量，利用电子天平精确称取各元素，保证称量误差控制在极小范围内。

将称量好的原料放入熔炼炉的坩埚中，随后在高纯氩气保护氛围下进行熔炼。高纯氩气的作用是隔绝空气，防止金属在熔炼过程中被氧化，确保合金成分的准确性和纯净度。熔炼过程中，对熔炼温度和时间进行严格把控。通过热电偶实时监测温度，将熔炼温度控制在合适区间，确保金属充分熔化且成分均匀混合；同时，精确设定熔炼时间，避免熔炼时间过长导致元素烧损或成分偏析，以及熔炼时间过短造成成分混合不充分。熔炼完成后，将均匀的合金液浇铸到铜模中，借助铜模良好的导热性，使合金液快速冷却凝固，从而获得铸态合金试样。为便于区分和研究，分别对四个成分样品进行了命名。将

(CoCrNi)₉₉Y₁ 命名为 Y-1, (CoCrNi)₉₈Y₂ 命名为 Y-2, (CoCrNi)₉₇Y₃ 命名为 Y-3, (CoCrNi)₉₆Y₄ 命名为 Y-4。通过这样的命名方式,在后续研究中能够清晰地指代不同成分的合金样品,方便对其力学性能、拉伸断口形貌以及其他相关特性进行对比和分析。

2.2. 力学性能测试

使用电子万能试验机对铸态合金试样进行室温拉伸试验。拉伸试样的尺寸按照相关标准加工,拉伸速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。通过拉伸试验,测定合金的屈服强度、抗拉强度和断裂伸长率等力学性能指标。每个成分的合金试样测试 3 次,取平均值作为最终结果,以保证数据的准确性和可靠性。

2.3. 拉伸断口表征

拉伸试验结束后,对断口进行扫描电子显微镜(SEM)观察。首先,将断口样品置于超声波清洗器中,利用合适的清洗剂去除表面的氧化层、油污和其他杂质,保证断口表面的清洁度,避免杂质对观察结果产生干扰。

然后,将清洗后的样品固定在 SEM 样品台上,在不同放大倍数下对断口进行观察。先在低倍下观察断口的宏观形貌,了解断口的整体特征、断裂源位置以及裂纹扩展方向等信息;再切换至高倍,详细分析断口的微观特征,包括韧窝的分布情况、大小尺寸、密集程度以及韧窝内析出相颗粒的数量、尺寸和形态等。通过对断口微观特征的深入分析,结合合金的力学性能数据,探讨合金的断裂机制,揭示断口形貌与力学性能之间的内在联系。

3. 实验结果与分析

3.1. 力学性能结果

通过室温拉伸试验,获得了(CoCrNi)_{100-n}Y_n ($n = 1, 2, 3, 4$)高熵合金的各项力学性能数据,具体如表 1 所示。从表中数据可以清晰地看出,Y-1 和 Y-2 合金的应力极限相近,分别为 556.8 MPa 和 554.2 MPa,但 Y-1 合金的断裂伸长率达到了 68.2%,显著高于 Y-2 合金的 53.6%。这表明在较低 Y 含量范围内,虽然合金的强度未出现明显差异,但塑性却因 Y 含量的不同而有所变化。

而 Y-3 和 Y-4 合金则呈现出截然不同的力学性能特征。Y-3 合金的屈服强度提升至 245.9 MPa, Y-4 合金更是高达 281.2 MPa,相比 Y-1 和 Y-2 合金有了大幅提高。然而,它们的断裂伸长率却急剧下降,Y-4 合金仅为 1.4%, Y-3 合金几乎趋近于 0,塑性几乎完全丧失。这充分说明随着 Y 含量的进一步增加,合金的强度得到显著提升,但塑性却受到极大的负面影响。

Table 1. Tensile test result data

表 1. 拉伸实验结果数据

合金编号	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	断裂伸长率(%)
Y-1	222.7	556.8	68.2
Y-2	229.3	544.1	53.6
Y-3	245.9	261.9	0.4
Y-4	281.2	317.4	1.4

3.2. 拉伸曲线分析

图 1 展示了(CoCrNi)_{100-n}Y_n 高熵合金的拉伸曲线。从曲线中可以直观地观察到不同合金在拉伸过程中的应力-应变变化情况。Y-1 和 Y-2 合金的拉伸曲线在弹性阶段基本重合,表明它们的弹性模量相近。

但进入塑性变形阶段后，Y-1 合金的曲线斜率下降较为缓慢，说明其在塑性变形过程中能够承受更大的应变，这与 Y-1 合金较高的断裂伸长率相对应。

Y-3 和 Y-4 合金的拉伸曲线则呈现出明显的高起始屈服应力特征，曲线在弹性阶段后迅速上升至较高的应力水平，随后几乎没有明显的塑性变形阶段就发生断裂，这与它们极低的断裂伸长率一致。这种曲线特征的差异，进一步验证了 Y 含量对合金力学性能的显著影响。

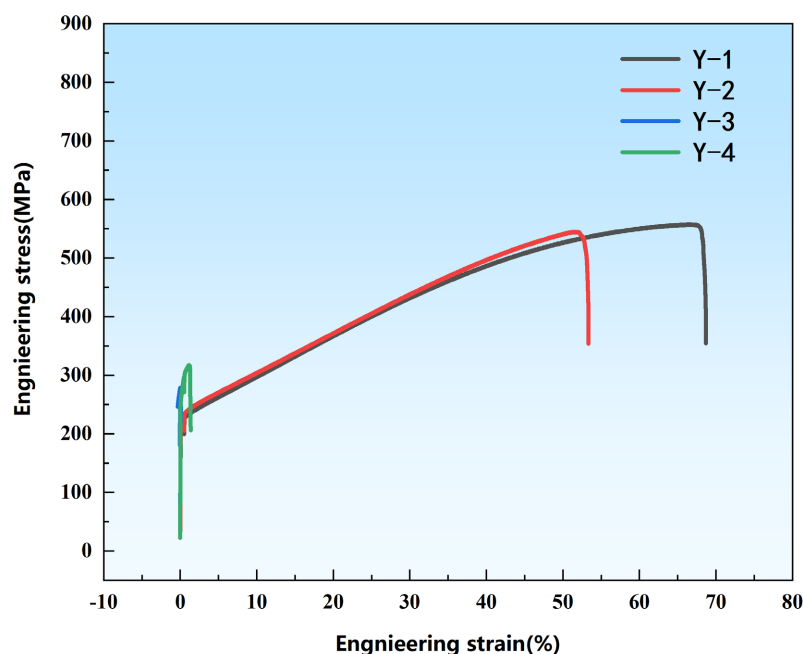


Figure 1. Tensile curves of $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ high entropy alloys

图 1. $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ 高熵合金的拉伸曲线

3.3. 拉伸断口形貌分析

图 2 和图 3 分别为 Y-1 和 Y-2 合金拉伸断口的 SEM 图像。在 Y-1 合金的断口上(图 2)，可以观察到大量分布均匀的韧窝，这是典型的韧性断裂特征。而且，在韧窝内部还存在许多细小的析出相颗粒。这些韧窝的存在表明 Y-1 合金在拉伸过程中发生了明显的塑性变形，而析出相颗粒则可能通过弥散强化机制对合金的强度起到一定的增强作用。

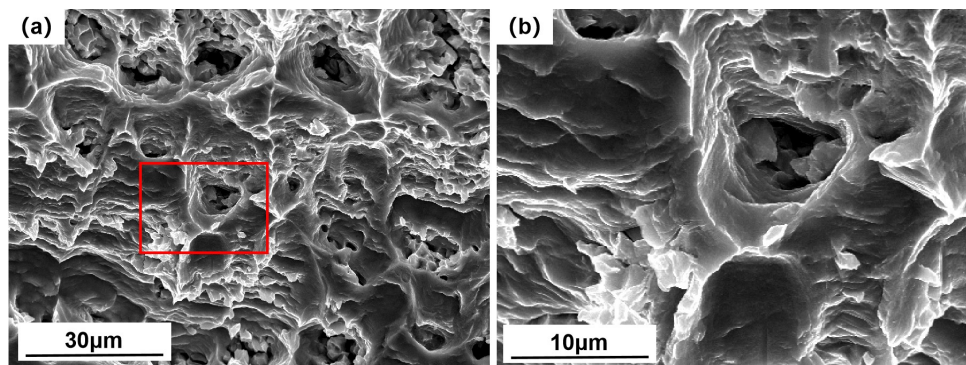


Figure 2. Y-1 alloy tensile fracture and enlarged view

图 2. Y-1 合金拉伸断裂断口及放大图

相比之下, Y-2 合金的断口(图 3)中, 韧窝的密集程度明显低于 Y-1 合金, 韧窝内的析出相颗粒数量也较少。这种微观结构的差异, 直接导致了 Y-2 合金在拉伸过程中的塑性变形能力不如 Y-1 合金, 进而使其断裂伸长率较低。

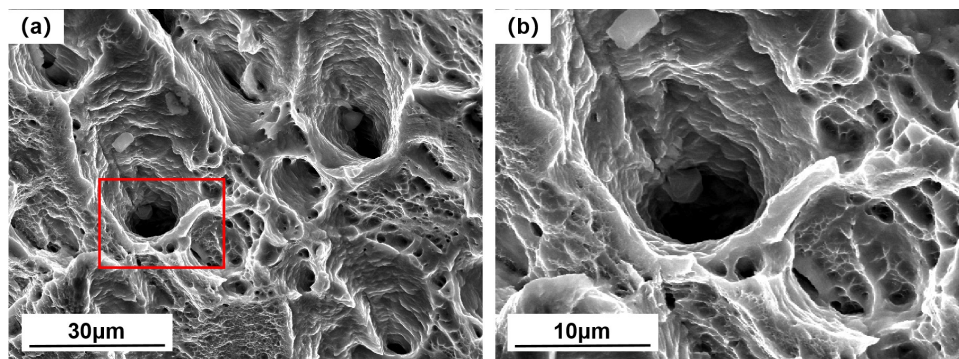


Figure 3. Y-2 alloy tensile fracture and enlarged view

图 3. Y-2 合金拉伸断裂断口及放大图

综合以上力学性能测试、拉伸曲线分析以及拉伸断口形貌观察结果, 可以得出 Y 含量对 $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ 高熵合金的组织结构和性能有着至关重要的影响。适量的 Y 添加可以在一定程度上改善合金的塑性, 而过高的 Y 含量则会使合金的塑性严重恶化, 同时显著提高合金的屈服强度。

3.4. EBSD 分析

鉴于 Y-1 合金在 $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ 高熵合金体系中展现出最佳的综合性能, 为深入剖析其微观结构特征, 采用电子背散射衍射(EBSD)技术对 Y-1 合金进行了细致表征。

从 Y-1 合金的 EBSD 晶粒取向成像图(图 4)中, 可以直观观察到其晶粒形态与分布特点。Y-1 合金的晶粒尺寸呈现出相对均匀的状态, 平均晶粒尺寸为 $100\mu\text{m}$ 。较大尺寸的晶粒内部位错滑移路径较为顺畅, 在拉伸变形过程中, 位错能够在晶内充分运动和协调, 这为合金发生较大程度的塑性变形提供了有利条件, 与 Y-1 合金高达 68.2% 的断裂伸长率密切相关。

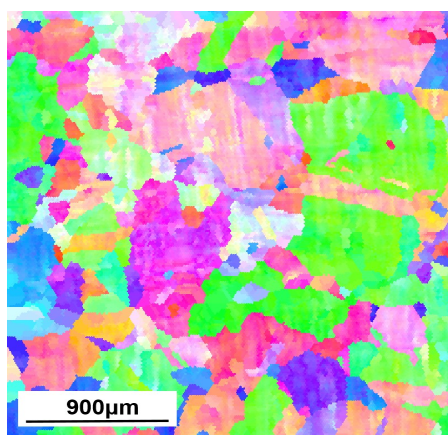


Figure 4. Y-1 alloy electron backscatter diffraction characterization results

图 4. Y-1 合金电子背散射衍射表征结果

进一步分析晶界特征, Y-1 合金中大角度晶界占比较高, 大角度晶界具有较高的能量和结构无序性。

在塑性变形时，大角度晶界能够容纳更多的位错堆积，并且可以促进位错在不同晶粒间的传递，使得合金在拉伸过程中变形协调性更好。当材料受到外力作用时，位错在晶内滑移，遇到大角度晶界后，能够通过晶界的调节作用转移到相邻晶粒继续滑移，从而有效避免了局部应力集中，保证了合金整体的塑性变形能力。

同时，EBSD 分析还显示 Y-1 合金的晶粒取向呈现出一定的随机性，没有明显的择优取向。这种随机的晶粒取向分布使得合金在各个方向上的力学性能更加均匀，在承受拉伸载荷时，各个晶粒能够协同变形，共同承担外力，进一步提升了合金的塑性。

结合前文的力学性能测试、拉伸曲线以及拉伸断口形貌分析结果，Y-1 合金通过这种均匀的大晶粒尺寸、高比例大角度晶界以及随机的晶粒取向分布，形成了有利于塑性变形的微观结构，实现了良好的强度与塑性的平衡。这不仅揭示了 Y-1 合金优异性能的微观本质，也为后续优化 CoCrNi 基高熵合金成分设计和工艺调控提供了重要的微观结构参考依据。

4. 结论

本研究系统地研究了铸态 $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ ($n = 1, 2, 3, 4, \text{at } \%$)高熵合金的力学性能和拉伸断口形貌，得出以下主要结论：

1) 力学性能差异显著：在不同 Y 含量的合金中，Y-1 和 Y-2 呈现出相同的应力极限，但 Y-1 的断裂伸长率明显更高。这表明在 Y 含量较低的范围内($n = 1, 2$)，Y 的添加对合金强度的提升作用不明显，但对塑性有积极影响，能够提高合金的变形能力。而当 Y 含量增加到 $n = 3, 4$ 时，Y-3 和 Y-4 表现出相对更高的屈服强度，然而塑性几乎完全丧失。这说明过高的 Y 含量会严重损害合金的塑性，同时显著提高屈服强度，导致合金呈现出脆性断裂的特征。

2) 断口形貌与性能关联紧密：从拉伸断口形貌来看，Y-1 样品断口存在大量韧窝，且韧窝内有较多析出相颗粒。韧窝的大量存在是材料发生塑性变形的典型特征，表明 Y-1 合金具有良好的塑性；而韧窝内的析出相颗粒可能通过弥散强化机制对合金强度有一定贡献。相比之下，Y-2 样品的韧窝密集程度较低，韧窝内析出相颗粒也较少。这种微观结构的差异与它们的力学性能相对应，Y-2 样品较低的韧窝密集程度和较少的析出相颗粒，使其在拉伸过程中塑性变形能力受限，进而导致断裂伸长率较低。

3) EBSD 表征揭示微观本质：对性能最佳的 Y-1 合金进行 EBSD 表征发现，其均匀的大晶粒尺寸、高比例大角度晶界以及随机的晶粒取向分布，共同构成了有利于塑性变形的微观结构。大晶粒便于位错滑移，大角度晶界促进位错传递和协调变形，随机晶粒取向保证各向性能均匀，实现了强度与塑性的良好平衡。这为理解(CoCrNi)基高熵合金性能机制提供了微观依据，也为合金成分和工艺优化提供了参考方向。

4) Y 含量的关键作用及研究展望：综合研究结果可知，Y 含量对 $(\text{CoCrNi})_{100-n}\text{Y}_n$ 高熵合金的力学性能和拉伸断口形貌有着显著影响。在实际的合金设计和性能优化过程中，必须合理控制 Y 的添加量，在追求高强度的同时，兼顾合金的塑性，以满足不同工程应用对材料综合性能的要求。未来的研究可以从微观层面深入探究 Y 在高熵合金中的作用机制，例如通过原子探针断层扫描(APT)等先进技术，研究 Y 原子在合金中的分布状态以及与其他元素的相互作用；此外，还可以探索 Y 与其他合金元素的协同效应，进一步优化高熵合金的成分设计，为高熵合金的发展开辟更广阔的空间。

参考文献

- [1] Babić, E., Drobac, Đ., Figueroa, I.A., Laurent-Brocq, M., Marohnić, Ž., Mikšić Trontl, V., et al. (2021) Transition from High-Entropy to Conventional Alloys: Which Are Better? *Materials*, **14**, Article 5824. <https://doi.org/10.3390/ma14195824>

-
- [2] Savage, N. (2021) New Complex Alloys Push the Limits of Materials. *ACS Central Science*, **7**, 1463-1466. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.1c01060>
- [3] Yeh, J.-W., Chen, S.-K., Lin, S.-J., Gan, J.-Y., Chin, T.-S., Shun, T.-T., *et al.* (2004) Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, **6**, 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- [4] Cantor, B., Chang, I.T.H., Knight, P. and Vincent, A.J.B. (2004) Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **375**, 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- [5] Zhang, Y., Yang, X. and Liaw, P.K. (2012) Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys. *JOM*, **64**, 830-838. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5>
- [6] Zhang, H., Zhao, M.Y., Zhang, J.F., Zhao, X.L., Fang, F. and Jia, N. (2022) Ultrahigh Strength Induced by Multiple Heterostructures in a FeMnCoCrN High-Entropy Alloy Fabricated by Powder Metallurgy Technique. *Materials Science and Engineering: A*, **846**, Article 143304. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143304>
- [7] Zhang, L.J., Zhang, M.D., Zhou, Z., Fan, J.T., Cui, P., Yu, P.F., *et al.* (2018) Effects of Rare-Earth Element, Y, Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of CoCrFeNi High Entropy Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **725**, 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.058>
- [8] He, M.Y., Shen, Y.F., Jia, N. and Liaw, P.K. (2021) C and N Doping in High-Entropy Alloys: A Pathway to Achieve Desired Strength-Ductility Synergy. *Applied Materials Today*, **25**, Article 101162. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101162>