工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

低成本铁基中熵合金的强韧化机制与宽温域力学性能研究进展

张正阳　刘薇　毛新萌　周钟皓　朱晓旭　李娜
南通理工学院 机械工程学院

DOI：10.32629/ems.v8i10.22595

[摘　要] 铁基中熵合金以 Fe 为主元，减少了 Co、Ni 等贵重元素用量，兼具良好强塑性与突出低温性能，有望用于深空探测、液化天然气储运等极端服役环境。本文介绍了 Fe-MEAs 的成分设计与相结构调控，讨论了析出相强化、相变诱导塑性（TRIP）效应和异质结构强化的作用规律及温度依赖性，归纳了合金在 77K~973K 的力学性能和低成本设计思路。低温下 TRIP 和孪生诱导塑性（TWIP）效应被激活并主导强化；温度升高后层错能增大，这些机制逐渐失效，宽温域性能不够稳定。目前仍存在成分—工艺—性能关系不明确、高温强度不足、制备技术不成熟等问题，未来可在 CALPHAD 和机器学习辅助设计、宽温域变形机制研究和规模化制备方面继续努力。

[关键词] 铁基中熵合金；强韧化机制；相变诱导塑性；异质变形强化；宽温域力学性能；低成本设计

1 引言

传统合金一般以一种或两种金属元素为主，再加入少量其他元素调整性能[1]。随着服役环境越来越苛刻，问题逐渐显现：强度和塑性难以兼顾，成分设计空间有限，一些贵重元素还带来成本和资源压力[1]。2004 年，Yeh 等[2]和 Cantor 等[3]先后提出了高熵合金的概念。后来发现各元素不一定等原子比，含义更宽的多主元合金逐渐成为常用说法[1]。

在众多多主元合金中，以 CoCrFeMnNi（Cantor 合金）为代表的面心立方结构高熵合金低温韧性好、强度高，受到广泛关注[4]。但这类合金含大量 Co 和 Ni，原料价格贵，铸态屈服强度一般不到 300MPa，难以大规模应用[5-6]。为此，研究者把 Fe 含量提高到 55at.%以上，得到铁基中熵合金，典型成分如 Fe_x(CoNi90-xCr10)、Fe_x(CoCrNi)100-x 等[6]。这类合金便宜，低温变形时还能发生 TRIP 效应，把强度和塑性同时提上去，应用前景很好[7]。

不过，已有结果分散在不同体系和工艺路线中，成分—工艺—性能关系、不同温度下的主导强化机制以及降成本与保性能的平衡，还缺少系统梳理。为此，本文介绍 Fe-MEAs 的成分设计、强韧化机制、宽温域力学性能和低成本策略，并提出展望。

2 铁基中熵合金的成分设计与相结构调控

2.1 合金体系与成分设计原则

Fe-MEAs 一般以 Fe 为主（超过 50at.%），搭配 Co、Ni、Cr、Mn 等 3d 过渡族元素，有时加入 Al、Si、Ti、Cu、C 等元素调整组织。相结构可用价电子浓度（VEC）、原子尺寸差（δ）、混合焓等经验判据预估[1]：VEC≥8.0 时倾向形成 FCC 相，VEC≤6.87 时倾向形成体心立方（BCC）相，介于两者之间则为 FCC+BCC 双相组织[1]。

研究较多的体系有三类。①Fe-Co-Ni-Cr 系：代表成分 Fe_x(CoCrNi)100-x，Fe 含量从 55at.%增到 70at.%以上时，组织由单相 FCC 经双相过渡到单相 BCC，双相组织可通过调整两相比例兼顾强塑性[6,10]。②Fe-Ni-Cr-Si-Al 系：靠 Si 和 Al 调整层错能和相稳定性，是利用 TRIP 效应的典型体系[9-10]。③Fe-Cr-Ni-Al-Ti 系：靠 Ni_3 (Al,Ti)型 $L1_2$ 有序相强化[11]。

2.2 相结构调控策略

相结构调控是强韧化的基础，思路主要有两条：调成分和调工艺。

从成分看，Ni、Co、Cu 能稳定 FCC 相，Al、Si、Cr 则促进 BCC 相形成。韩成府[9]发现，Fe-Ni-Cr-Si-Al 合金中 Ni 含量从 18at.%降到 12at.%后，组织由 FCC+BCC 双相变为以 BCC 为主；再加入 0.25at.%的 C，组织回到双相，并析出 $Cr_{23}C_6$ 碳化物。冯石林[10]用 Fe、Cr 替换部分 Co 并引入 Cu，开发出成本更低的 Fe-Cu-Ni-Cr-Si-Al 合金。

工艺上，冷轧、深冷轧制、退火和时效等热机械处理是

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

调整组织的主要手段。代春朵等[8]用大变形冷轧加中温时效得到未完全回复的细晶组织和多尺度析出相；刘士磊[7]把深冷轧制和退火结合，利用深冷变形特有的马氏体相变，在 HCP-TRIP 和 BCC-TRIP 型合金中构筑出异质结构，强度和塑性同时提升。

3 铁基中熵合金的强韧化机制

3.1 析出相强化

析出相强化是提高强度的常用手段，常见析出相有 $L1_2$ 有序相、$L2_1$ 型 Heusler 相、B2 有序相和碳化物等。$L1_2$ 相（如 Ni_3 (Al,Ti)）与 FCC 基体共格，能有效阻挡位错。丁飞等[11]的分子动力学模拟显示，$L1_2$ /FCC 相界面应力集中，对位错和层错滑移阻碍明显；温度升高后，Lomer-Cottrell（L-C）锁、层错和位错密度减少，加工硬化能力随之变差。

$L2_1$ 型 Heusler 相强化效果也很突出。代春朵等[8]设计了两种 $L2_1$ 相比例超过 15%的合金，冷轧时效后抗拉强度分别达 1592MPa 和 1682MPa，伸长率分别为 17.5%和 13.5%；Heusler 相与基体错配度小，不易萌生微裂纹，塑性得以保持。含 Al 体系中还常见 B2 相强化：韩成府[9]在低 Ni 合金 BCC 基体中观察到大量 NiAl 析出相，与超细晶、C 固溶及 TRIP 效应配合强化。$Cr_{23}C_6$ 碳化物也能强化，但损害低温冲击韧性，C 含量要控制得当[9]。

3.2TRIP 效应

TRIP 效应是 Fe-MEAs 实现强塑性结合的关键：亚稳 FCC 基体变形时发生马氏体相变，体积膨胀和切应变缓解应力集中、推迟颈缩，新生的硬质马氏体又提高加工硬化能力，强塑性同时受益[7,10]。按马氏体结构分为 HCP-TRIP 和 BCC-TRIP 两类：深冷轧制促进两类形变马氏体形成；退火时 HCP 马氏体逆相变长成较粗晶粒，BCC 马氏体则易经逆相变和再结晶得到超细晶[7]。

韩成府[9]发现，双相合金在高应变速率压缩和冲击载荷下都有明显的 TRIP 效应，77K 下更突出；双相合金的冲击吸收功明显高于单相合金，说明 TRIP 效应改善了冲击韧性。但 TRIP 效应对温度很敏感：温度一高，层错能上升，TRIP 效应就会减弱甚至消失，优异性能往往只在较窄温区内有效[11]。怎样在宽温域内保住稳定的 TRIP 效应，是当前的重要课题。

3.3 异质结构强化

异质结构指组织内同时存在软硬相、粗细晶或层状等性能不同的区域。变形时软硬区变形不协调，产生几何必须位错，引起异质变形强化（hetero-deformation induced, HDI）效应，提高应变硬化能力，从而兼顾强度和塑性[6-7]。

刘士磊[7]用深冷轧制加退火在 HCP-TRIP 型合金中得到三种尺寸晶粒组成的 FCC 异质结构，屈服强度从 389MPa 提高到 477MPa，延伸率没有损失；再用两阶段轧制退火做出层状异质结构，配合深冷预应变，屈服强度从粗晶的 353MPa 提高到 1182MPa，断裂延伸率还有 8.4%。张啸凡等[6]用直接激光沉积制备叠层 $Fe_{75}(CoCrNi)_{25}/Fe_{60}(CoCrNi)_{40}$ 合金，层厚越薄强度越高，伸长率损失不大，强度和伸长率都超过混合法则估算值，源于 HDI 强化与 TRIP 效应的共同作用。

3.4 其他强化机制

细晶强化、固溶强化和位错强化等传统手段同样起作用：大变形冷轧加时效的细晶组织与析出相强化叠加后效果明显[8]；C 的间隙固溶效果显著，0.25at.%的 C 使合金 77K 屈服强度从 1424MPa 提高到 1550MPa[9]。

4 宽温域力学性能研究进展

4.1 低温力学性能

传统合金低温下往往变脆，而 FCC 基的 Fe-MEAs 低温下强度升高、塑性不降反升，主要靠低层错能下被激活的相变/孪生诱导塑性效应[7,9-10]。韩成府[9]报道，Ni 含量 12at.%的合金经热机械处理后，77K 屈服强度和抗拉强度分别达 1424MPa 和 1814MPa，均匀延伸率高达 36%；加入 0.25at.%的 C 后，三个指标分别为 1550MPa、1926MPa 和 25%。

刘士磊[7]考察了 BCC-TRIP 型合金的深冷性能：深冷轧制加短时退火后，深冷屈服强度提高约 70%（513MPa→889MPa），均匀延伸率只从 39.5%降到 35.6%；深冷拉伸时还出现利于提高延伸率的屈服平台。

4.2 室温及高温力学性能

室温下铸态单相 FCC 合金屈服强度一般只有 300~500MPa，延伸率能超过 40%；经析出强化、异质结构调控或大变形后，屈服强度可升到 1000MPa 以上[6,8-10]。高温数据则少得多：分子动力学模拟表明，$Fe_{50}Cr_{13}Ni_{28}Al_6Ti_3$ 合金在 973K 下抗拉强度比室温明显下降[11]。提高高温强度主要靠更稳定的高温析出相和难熔元素强化，这方面工作刚起步。

4.3 温度对变形机制的影响

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

温度改变时主导变形机制随之变化：低温下层错能低，易形成层错和孪晶，位错滑移、TWIP 和 TRIP 共同作用，合金又强又韧；高温下层错能升高，TRIP/TWIP 被抑制，仅靠位错滑移难以支撑强度，加工硬化能力下降[11]。韩成府[9]发现，准静态加载下合金对应变速率不敏感，但在高应变速率（1500~6000s^{-1}）下屈服强度明显提高。刘士磊[7]在 77K 下观察到源于局部马氏体相变的不连续屈服，室温下没有，说明低温变形机制与室温不同。

5 低成本设计策略

低成本是 Fe-MEAs 相对 CoCrNi 基高熵合金最大的优势，也是它能否走向工程应用的关键。目前主要有四类做法：一是少用贵重元素，用 Fe、Cr 等便宜元素替换 Co、Nb、Ta[10]；二是调低 Ni 含量，比如从 18at.%降到 11~12at.%，省钱的同时性能也保得住[9]；三是开发无 Co 合金，无 Co 的 Fe-Cu-Ni-Cr-Si-Al 合金 77K 屈服强度 1175MPa、均匀延伸率 41%[10]；四是简化工艺，如直接激光沉积一次成形叠层合金[6]。

6 结论与展望

6.1 结论

(1)Fe-MEAs 以 Fe 为基，可先用 VEC、δ、Ω等经验参数判断相结构，再通过成分调整和热机械处理来优化组织，其中 FCC+BCC 双相组织最容易兼顾强度和塑性。

(2)强韧化靠多种机制配合：析出相（$L1_2$、$L2_1$、B2 相等）负责提高强度，TRIP 效应靠马氏体相变兼顾强塑性，异质结构借助 HDI 效应提高应变硬化能力，细晶、固溶和位错强化也各有贡献。

(3)少用贵重元素、调低 Ni 含量、开发无 Co 体系和简化工艺都能降成本，一些低成本合金的性能已经不输甚至超过含 Co 合金。

6.2 展望

(1)把 CALPHAD（相图计算）、机器学习和高通量实验结合起来，建立成分—工艺—组织—性能的定量关系，减少靠经验试错的做法。

(2)开发高温下更稳定的析出相，尝试难熔元素微合金化和多尺度异质结构设计，在保持低成本的前提下把高温强度提上去。

(3)发展增材制造、热轧制等规模化制备技术，解决大尺寸构件的组织均匀性和性能稳定性问题，同时兼顾耐蚀性，推动合金从实验室走向工程应用。

[参考文献]

[1]李旭，袁嘉驰，鲁凯举，等. 多主元合金的设计、力学性能与耐蚀性研究进展[J]. 铸造技术，2025，46(8)：748-764.

[2]YEH J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.

[3]CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375-377: 213-218.

[4]GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, CATOOR D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications[J]. Science, 2014, 345(6201): 1153-1158.

[5]李远威，朱德智，柳俊晨，等. 热处理对微合金化 $CoCrNiFe_2$ 高熵合金组织和性能影响[J]. 特种铸造及有色合金，2025，45(5)：792-797.

[6]张啸凡，李传维，廖瑜，等. 层厚对叠层铁基中熵合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报，2025，46(7)：143-150.

[7]刘士磊. 深冷轧制铁基中熵合金的异质结构及力学性能调控研究[D]. 长沙：中南大学，2025.

[8]代春朵，李江文，郭呈宇，等. 高强耐蚀铁基中熵合金的组织与性能[J]. 金属热处理，2025，50(1)：12-21.

[9]韩成府. 铁基中熵合金强韧化设计及其动态力学行为研究[D]. 郑州：郑州大学，2025.

[10]冯石林. 铁基中熵合金的成分优化及其强塑性和耐蚀性研究[D]. 郑州：郑州大学，2024.

[11]丁飞，贾利军，杨草原，等. 温度对 $L1_2$ 相强化铁基中熵合金拉伸性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2026，46(9)：1407-1413.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.