无容器微重力条件下Mo-Ni合金熔体的快速凝固与物理性能研究

赵晓蕾, 王伟丽, 沙莎, 燕鹏旭, 魏炳波*

西北工业大学物理科学与技术学院, 西安 710072

* E-mail: bbwei@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-14; 接受日期: 2021-05-17; 网络版发表日期: 2021-08-23

国家自然科学基金(批准号: 52088101)资助项目

摘要 本文采用自由落体技术模拟空间环境条件, 实现了液滴直径144~1530 μm 的Mo-48%Ni合金的微重力快速凝固与组织调控. 理论计算表明, 液态合金的冷却速率和过冷度均随液滴直径减小而指数增大, 分别可达 $2.41 \times 10^4 \text{ K s}^{-1}$ 和322 K (0.19 T_L). 实验发现, 快速凝固组织由初生NiMo枝晶和(Ni+NiMo)共晶构成, 急冷条件抑制了后续固态相变. 随着液滴冷速和过冷度增大, 粗大的NiMo枝晶逐渐细化, 溶质Ni含量呈现先减小再增大的变化趋势; 共晶形貌由规则层片转变为非规则组织, 其中溶质Mo的含量先增大再减小. 初生相和共晶组织的弹性模量均单调递减; 初生相显微硬度先缓慢增大后减小, 共晶组织显微硬度整体呈现出递减的规律. 同时, 合金磁化强度减小, 但其矫顽力增大, 耐温性能得到显著提升.

关键词 深过冷, 快速凝固, 难熔合金, 力学性能, 磁学性能

1 引言

航天技术的发展为利用空间环境研究和合成制备新型材料开辟了一条独特的途径, 如空间微重力环境下无容器悬浮加工条件易于实现合金熔体深过冷快速凝固过程研究. 合金熔体中固相形核机制、生长方式和组织演化均显著不同于常规平衡凝固. 这种复杂的相变过程不仅有助于扩展非平衡凝固理论, 更为金属材料性能优化提供了可能^[1,2]. 因此, 在空间环境中探索合金材料的凝固机理和物化性能已成为空间材料科学领域的研究热点.

由于空间实验的高成本与高难度, 采用自由落体技术模拟外层空间的“微重力、无容器、高真空”环境成为研究合金熔体深过冷与快速凝固的重要方法之一^[3~7]. 落管技术有效避免了微小合金液滴与容器壁的接触, 进而消除异质形核, 可以获得深过冷状态, 并伴随快速冷却效应, 已广泛应用于金属材料的仿空间快速凝固研究^[8~11].

Mo-Ni合金的弹性模量高, 热膨胀系数低, 并且抗热疲劳能力强, 因而在航空航天和热能工程等方面具有良好的应用前景^[12~14]. 目前关于此合金体系的研究主要集中于组织结构与物化性质^[15~17], 对其深过冷能

引用格式: 赵晓蕾, 王伟丽, 沙莎, 等. 无容器微重力条件下Mo-Ni合金熔体的快速凝固与物理性能研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1127–1134
Zhao X L, Wang W L, Sha S, et al. Rapid solidification and physical properties of a refractory Mo-Ni alloy under containerless microgravity condition (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1127–1134, doi: [10.1360/SST-2021-0161](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0161)

力和快速凝固机制的研究仍不充分. 本文选取二元Mo-48%Ni合金作为研究对象, 采用自由落体技术实现仿空间条件下的深过冷与快速凝固, 探索枝晶和共晶组织演变机理, 并分析凝固动力学与其力学和磁学性能的相关规律.

2 实验

二元Mo-48%Ni母合金由高纯Mo (99.99%)和Ni (99.99%)在超高真空电弧炉内熔配而成, 每个样品质量约为1.0 g. 在自由落体实验中, 母合金放入底部开有 Φ 0.3 mm喷嘴、尺寸为16 mm $\times$ 150 mm的石英试管内, 并固定于3 m落管装置顶部的感应线圈中央. 随后, 先抽真空至 2.0×10^{-4} Pa, 再反充He (99.999%)和Ar (99.999%)的混合气体($V_{\text{He}}:V_{\text{Ar}}=4:1$)达 1.0×10^5 Pa. 利用高频感应装置将样品加热至液相线温度以上约200 K, 并保温约30 s. 待母合金熔化均匀后, 向石英试管中通入高压Ar气, 液态合金快速通过试管底部的喷嘴雾化成不同尺寸的微小液滴, 在自由下落过程中完成深过冷与快速凝固过程.

实验结束后, 按照粒径大小收集快速凝固的合金样品, 进行分组和镶嵌, 并做抛光处理. 最后用10 mL饱和氨溶液与10 mL 3%过氧化氢溶液和10 mL蒸馏水的混合溶液腐蚀样品约30 s. 合金快速凝固组织由FEI Sirion型扫描电子显微镜进行分析, 并分别采用Oxford INCA Energy 3000型能谱仪及TI980型高精度纳米力学测试系统和振动样品磁强计(vibrating sample mag-

netometer, VSM)对合金的微区溶质分布及显微硬度和磁学性能进行测定.

3 结果与讨论

二元Mo-Ni合金相图^[18]如图1(a)所示, Mo-48%Ni合金成分点位于包晶点与共晶点之间, 属于过包晶和亚共晶型合金, 其液相线温度为1680 K. 分析合金的平衡凝固路径可知, 当液相温度冷却至1680 K时初生(Mo)固溶体相开始析出, 并在温度降至1635 K时发生 $L+(\text{Mo}) \rightarrow \text{NiMo}$ 包晶反应. 随着初生(Mo)固溶体相反应耗尽, 剩余液相中直接析出NiMo相. 此后温度降至1590 K时, 发生 $L \rightarrow \text{NiMo}+(\text{Ni})$ 共晶反应. 随着合金温度的进一步下降, 固态包析相变 $\text{NiMo}+(\text{Ni}) \rightarrow \text{Ni}_3\text{Mo}$ 有可能发生, 最终的室温凝固组织主要由NiMo和 Ni_3Mo 相构成. 对图2(a)所示的微观组织结构分析可知, 初生NiMo相在过冷熔体中直接析出, 并生长为粗大的树状枝晶, 随后剩余液体凝固成(Ni)固溶体相和NiMo相, 填充在枝晶间隙, 形成共晶组织. 图1(b)中的XRD衍射分析结果同时表明, 合金的微观组织由NiMo和(Ni)相组成.

3.1 快速凝固组织形成机制

自由落体实验过程中, 二元Mo-48%Ni合金液滴直径分布在144~1530 μm 之间, 快速凝固组织形貌如图2所示. 可以看出, 其物相构成和反应路径与电弧熔炼条件下基本一致, 固态相变同样被显著抑制. 由于合金液

图1 (网络版彩图)二元Mo-48%Ni合金的组成特征. (a) 相图^[18]中位置; (b) XRD分析图谱

Figure 1 (Color online) Constitutional features of binary Mo-48%Ni alloy. (a) Location in phase diagram [18]; (b) XRD patterns.

图 2 (网络版彩图)二元Mo-48%Ni合金凝固组织与液滴直径关系. (a) 母合金; (b) $D=1530\ \mu\text{m}$; (c) $D=586\ \mu\text{m}$; (d) $D=144\ \mu\text{m}$
 Figure 2 (Color online) Solidification microstructures of Mo-48%Ni alloy versus droplet diameter. (a) Master alloy; (b) $D=1530\ \mu\text{m}$; (c) $D=586\ \mu\text{m}$; (d) $D=144\ \mu\text{m}$.

滴内部冷却速率的差异较小, 同时又受到微重力的作用, 因而使得初生NiMo枝晶分布更为均匀.

图2(b)~(d)分别是直径为1530, 586和144 μm 的合金液滴凝固组织的微观形貌变化特征. 由图可知, 当液滴直径 $D=1530\ \mu\text{m}$ 时, 合金由粗大的NiMo枝晶以及层片状(Ni+NiMo)共晶组织组成. 随着液滴直径减小, 凝固组织中NiMo枝晶长度逐渐减小, 表明熔体深过冷可以实现凝固组织的显著细化. 与此同时, 枝晶间的共晶组织明显减少. 图2(c)中液滴直径 $D=586\ \mu\text{m}$, 合金液滴直径的减小使得过冷度和冷速增大, 凝固过程加快, NiMo枝晶发生重熔碎断并显著细化, 层片共晶组织开始向非规则共晶结构转变. 当液滴直径达到最小 $D=144\ \mu\text{m}$ 时, 微观组织仅由非规则共晶和NiMo枝晶组成.

对合金液滴中形成的初生NiMo相的体积分数 f_p 进行统计分析, 同时对其最大长度 L_p 进行测量, 得到二者与液滴直径 D 的变化关系如图3(a)所示. 其函数关系可以拟合为

$$f_p = 57.2 + 8.07 \times 10^{-3}D - 6.48D^2, \quad (1)$$

$$L_p = 20.4 + 7.92 \times 10^{-2}D. \quad (2)$$

当合金液滴直径 D 越来越小时, 凝固驱动力不断增强, 使得熔体中初生NiMo相体积分数 f_p 呈现出先增大的变化趋势. 随 D 进一步减小, 熔体过冷至共生区范围, 此时 f_p 呈现减小的变化规律. 实验测得 f_p 最大值为60.1%, NiMo枝晶的最大长度 L_p 呈现单调递减的变化规律. 直径为1530 μm 合金液滴的NiMo枝晶最大长度为142.2 μm . 而对于直径144 μm 的小液滴, 枝晶最大长度仅为28.4 μm , 分枝间距尺寸减小约5倍. 从图2中可以清晰地看到, 在NiMo枝晶的间隙中形成的是共晶组织. 随液滴直径的减小, 形核率增大以及大量潜热释放导致重熔碎断, 引起NiMo枝晶发生显著的组织细化. 因此, 初生NiMo枝晶组织 L_p 的减小是由自由落体过程中深过冷快速凝固引起的.

自由落体条件下, 合金液滴的尺寸在微米量级, 直接准确测定其实时冷却速率难度极大^[19~22]. 在充满He+Ar环境气氛中, 液滴冷却速率主要取决于其尺寸大小, 根据经典牛顿传热模型^[23], 可推导出自由下落合金液滴的冷却速率 R_c 为

$$R_c = 1.36 \times 10^3 + 8.39 \times 10^4 \exp(-9.23 \times 10^{-3}D). \quad (3)$$

图3 (网络版彩图)二元Mo-48%Ni合金初生相尺度和过冷度的变化规律. (a) 初生NiMo晶粒尺寸与体积分数和液滴直径的相关性; (b) 合金熔体过冷度与冷却速率和液滴直径的相关性

Figure 3 (Color online) The variation of primary phase size and undercooling of binary Mo-48%Ni alloy. (a) The correlation among grain size, volume fraction and droplet diameter of primary NiMo phase; (b) the correlation among undercooling extent, cooling rate and droplet diameter of alloy melt.

根据Lee和Ahn^[24]建立并改进的传热模型,自由下落合金液滴的过冷度 ΔT 与其直径 D 的关系可归纳为

$$\Delta T = 28.9 + 4.0 \times 10^2 \exp(-2.59 \times 10^{-3} D). \quad (4)$$

利用式(3)与(4),将过冷度 ΔT 以及冷却速率 R_c 与液滴直径 D 建立关系,呈现如图3(b)中曲线。

根据计算结果,在液滴直径144~1530 μm范围内,随液滴直径减小,冷却速率与过冷度均呈指数型上升。其中,冷却速率由 7.64×10^2 K s $^{-1}$ 提升到 2.41×10^4 K s $^{-1}$,过冷度由18 K增大到322 K。当实验获得合金液滴直径 $D=144$ μm时,达到最大过冷度和最大冷却速率。

3.2 快速凝固合金的物理性能

3.2.1 纳米压痕分析

弹性模量是工程材料的重要力学性能参数,可视为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标。其值越大,材料发生一定弹性变形的应力也越大,即材料刚度越大。而硬度是影响材料耐磨性能的重要因素,反映了材料抵抗残余变形的能力。准静态纳米压痕测试可同时获得试样的弹性模量与硬度,为综合分析其力学性能提供关键性指标。图4(a)是自由落体条件下Mo-48%Ni合金微观组织弹性模量 E_r 随液滴直径变化关系。可以看出,随着液滴直径减小,初生NiMo相和(Ni+NiMo)共晶组织的弹性模量均逐渐减小,但并不是简单的线性关系,分别从212.5减小到139.3 GPa和从244.1减小到148.5 GPa。对比发现,同一液滴直径下共晶组织的 E_r 值均大于NiMo相的 E_r 值,且二者的差值越

来越小。

图4(b)是硬度 H_v 随液滴直径变化关系。由于合金液滴直径减小时不仅微观组织结构发生了明显的变化,而且各组成相中溶质含量发生变化,如图5所示。共晶组织的硬度呈现出随液滴直径减小而下降的变化规律,从14.1下降至8.7 GPa。但在液滴直径586 μm前后,其减小幅度不同。这是由于在共晶组织中,虽然溶质Mo的含量变化较小,远没有凝固组织形貌特征变化对合金硬度的影响大。当直径小于586 μm时,形成了非规则共晶组织,导致硬度变化幅度增大。初生NiMo相的硬度在合金液滴直径大于586 μm时随液滴直径减小而缓慢增大,由8.0提升至8.5 GPa。在直径小于586 μm时,随液滴直径减小而下降至5.4 GPa,变化规律与NiMo相中溶质Ni含量变化相反。其原因是NiMo相中溶质Ni含量整体低于40%,溶剂Mo则占主导地位,而金属Mo硬度远大于金属Ni硬度。因此初生NiMo相的硬度变化规律与溶质含量变化相反。

3.2.2 磁学性能分析

合金的磁学特性与其微观组织存在密切关系。快速凝固条件下合金的微观组织和结构都与常规凝固制备的合金有较大差异,这将进一步影响合金的磁学性能。在Mo-48%Ni合金中,磁性相为(Ni)相。作为共晶组织的基底相,其微观形貌的变化会导致合金磁性发生显著改变。在快速凝固过程中,当液滴直径较大时,层片共晶中的(Ni)相主要呈大片相连的团状分布。随液滴直径的不断减小,共晶组织形貌演化为非规则共晶,

图 4 (网络版彩图)快速凝固Mo-48%Ni合金的力学性能随液滴直径的变化关系. (a) 弹性模量(E_t); (b) 硬度(H_v)

Figure 4 (Color online) Variation of mechanical properties of rapidly solidified Mo-48%Ni alloy with droplet diameter. (a) Elastic modulus (E_t); (b) hardness (H_v).

图 5 (网络版彩图)快速凝固Mo-48%Ni合金中组成相溶质含量随液滴直径变化关系. (a) 初生NiMo; (b) 共晶组织

Figure 5 (Color online) The solute content versus droplet diameter in rapid solidification microstructures of Mo-48%Ni alloy. (a) Primary NiMo phase; (b) eutectic structure.

其形态特征为充分碎断的NiMo金属间化合物均匀弥散于(Ni)基底中. 这种被非磁性相分割开的更为细化的(Ni)相在外部磁场的影响下, 难以被充分磁化进而引起磁化强度的连续减小. 与此同时, 对磁场强度的响应速率变慢, 呈现出软磁性能.

自由落体条件下二元Mo-48%Ni合金的磁化强度随磁场强度的变化率如图6(a)所示, 图中 dM/dH 值在远离零点处基本趋于稳定, 且其包围的面积极小; 在零点附近, dM/dH 峰值整体随液滴直径 D 的减小而变小, 磁化强度的变化幅度逐渐减小. 其中, 饱和磁化强度 M_s 、剩余磁化强度 M_r 和矫顽力 H_c 分别如图6(b)~(d)所

示, 与合金液滴直径 D 满足下列关系:

$$M_s = 5.49 + 1.21 \times 10^{-2}D, \quad (5)$$

$$M_r = 1.83 + 4.85 \times 10^{-3} \exp(7.38 \times 10^{-3}D), \quad (6)$$

$$H_c = 39.7 - 9.51 \times 10^{-2}D + 1.37 \times 10^{-4}D^2 - 6.99 \times 10^{-8}D^3. \quad (7)$$

从图6(b)和(c)可以直观看到, 该合金的饱和磁化强度 M_s 随液滴直径 D 减小而线性下降. 当 $D=1000 \mu\text{m}$ 时, 合金对应 M_s 为 $18.1 \times 10^{-3} \text{emu g}^{-1}$. 当 $D=200 \mu\text{m}$ 时, 对应 M_s 减小到 $8.49 \times 10^{-3} \text{emu g}^{-1}$. 同时, 剩余磁化强度 M_r 随液滴直径 D 减小而指数变小, 从 9.70×10^{-5} 减小到

图6 (网络版彩图)Mo-48%Ni合金的磁学性能与液滴直径关系。(a) 磁化强度随磁场强度的变化梯度; (b) 最大磁感应强度; (c) 剩余磁感应强度; (d) 矫顽力

Figure 6 (Color online) The magnetic properties of Mo-48%Ni alloy versus droplet diameter. (a) The gradient of magnetization on magnetic field intensity; (b) maximum magnetic induction intensity; (c) remanent magnetic induction; (d) coercivity.

$1.40 \times 10^{-5} \text{ emu g}^{-1}$. 图6(d)展现了矫顽力 H_c 随液滴直径 D 的变化规律。矫顽力 H_c 代表磁性材料抵抗退磁的能力, 组织形态、晶粒尺寸、杂质含量和内应力等的变化都会对 H_c 值产生影响。图6(d)中, 随Mo-48%Ni合金液滴直径 D 减小, (Ni)相出现细化, 矫顽力 H_c 由11.8增大到了 25.7 A m^{-1} 。此外, 液滴直径为 $586 \mu\text{m}$ 时发生的层片共晶至非规则共晶的结构转变会对合金的剩余磁感应强度和矫顽力同时产生较大影响。

4 结论

本文采用自由落体实验方法探究了Mo-48%Ni合金深过冷快速凝固规律及其物理性能特征, 得到以下结论。

(1) 在仿空间微重力环境条件下, 合金液滴直径范

围为 $144 \sim 1530 \mu\text{m}$ 。随液滴直径的逐渐减小, Mo-48%Ni合金的冷却速率由 7.64×10^2 上升至 $2.41 \times 10^4 \text{ K s}^{-1}$, 过冷度由18增大到 322 K ($0.19 T_L$)。高冷速显著抑制了合金的固态相变, 其微观组织均由初生NiMo枝晶和(Ni+NiMo)共晶组织构成。

(2) 当合金液滴过冷度较小时, NiMo相优先形核并生长为粗大的枝晶, 随后剩余液体发生共晶反应形成规则的(Ni+NiMo)共晶组织。当液滴直径减小到 $586 \mu\text{m}$ 以下时, 非规则共晶形貌被诱发。此时, 初生NiMo枝晶的体积分数达到最大。

(3) 静态纳米压痕测定表明, 随过冷度及冷却速率的增大, 初生NiMo相与共晶组织的弹性模量均逐渐变小。共晶组织的硬度呈现单调递减的变化规律, 而初生NiMo相的硬度则先缓慢增大后减小。

(4) Mo-48%Ni合金共晶组织中(Ni)固溶体相的生长形态显著影响合金的磁学特性. 随着合金液滴直径的减小, 饱和磁化强度及剩余磁化强度均减小. 合金

的矫顽力随直径的减小而增大, 表明合金组织细化后会产生耐温性能提高的效应. 并且, 规则至非规则共晶转变对合金的磁学性能影响并不明显.

参考文献

- 1 Ruan Y, Hu L, Yan N, et al. Recent advances and future perspectives of space materials science (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 603–649 [阮莹, 胡亮, 闫娜, 等. 空间材料科学研究进展与未来趋势. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 603–649]
- 2 Pueblo C E, Sun M, Kelton K F. Strength of the repulsive part of the interatomic potential determines fragility in metallic liquids. *Nat Mater*, 2017, 16: 792–796
- 3 Bathula V, Liu C, Zwiack K, et al. Interface velocity dependent solute trapping and phase selection during rapid solidification of laser melted hypo-eutectic Al-11at.%Cu alloy. *Acta Mater*, 2020, 195: 341–357
- 4 Wang X, Yang J, Hu R, et al. An ultra-refining microstructure in rapidly solidified Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) alloy after an isothermal heat treatment. *J Alloys Compd*, 2020, 827: 154283
- 5 Yan P X, Wang W L, Yan N, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of rapidly solidified Ni-Ge alloys (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1042–1054 [燕鹏旭, 王伟丽, 闫娜, 等. 快速凝固Ni-Ge合金的组织演化与力学性能研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1042–1054]
- 6 Souza N D, Feitosa L M, West G D, et al. Effects of solute trapping on solidification path in Ta-rich Ta-Al-Fe ternary alloys under rapid freezing. *J Alloys Compd*, 2017, 698: 375–383
- 7 Aversano F, Branz S, Bassani E, et al. Effect of rapid solidification on the synthesis and thermoelectric properties of Yb-filled Co₄Sb₁₂ skutterudite. *J Alloys Compd*, 2019, 796: 33–41
- 8 Gogebakan M, Kursun C, Gunduz K O, et al. Microstructural and mechanical properties of binary Ni-Si eutectic alloys. *J Alloys Compd*, 2015, 643: S219–S225
- 9 Sha S, Wang W L, Wu Y H, et al. Dendrite growth and Vickers microhardness of Co₇Mo₆ intermetallic compound under large undercooling condition (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2018, 4: 199–208 [沙莎, 王伟丽, 吴宇昊, 等. 深过冷条件下Co₇Mo₆金属间化合物的枝晶生长和维氏硬度研究. 物理学报, 2018, 4: 199–208]
- 10 Yang B, Gao Y, Zou C, et al. Cooling rate dependence of undercooling of pure Sn single drop by fast scanning calorimetry. *Appl Phys A*, 2011, 104: 189–196
- 11 Keller T, Lindwall G, Ghosh S, et al. Application of finite element, phase-field, and CALPHAD-based methods to additive manufacturing of Ni-based superalloys. *Acta Mater*, 2017, 139: 244–253
- 12 Clayton J D, Becker R. Elastic-plastic behavior of cyclotrimethylene trinitramine single crystals under spherical indentation: Modeling and Simulation. *J Appl Phys*, 2012, 111: 063512
- 13 Makineni S K, Kini A R, Jägle E A, et al. Synthesis and stabilization of a new phase regime in a Mo-Si-B based alloy by laser-based additive manufacturing. *Acta Mater*, 2018, 151: 31–40
- 14 Tewari S N. Effect of undercooling on the microstructure of Ni-35 at.% Mo (eutectic) and Ni-38 at.% Mo (hypereutectic) alloys. *Metall Mater Trans A*, 1987, 18: 525–542
- 15 Hu J, Li J X, Shi Y N. Suppression of grain boundary migration at cryogenic temperature in an extremely fine nanogained Ni-Mo alloy. *J Mater Sci Tech*, 2020, 57: 65–69
- 16 Shi Z, Yu Y, Wang Y, et al. Effect of nickel content on the processing and microstructure evolution of Co-Cr-Mo-Ni alloys. *Mater Sci Eng-A*, 2019, 759: 195–202
- 17 Ma W Y, Han Y F, Li S S, et al. Effect of Mo content on the microstructure and stress rupture of a Ni-base single crystal superalloy (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2006, 42: 1191–1196 [马文有, 韩雅芳, 李树索, 等. Mo含量对一种镍基单晶高温合金显微组织和持久性能的影响. 金属学报, 2006, 42: 1191–1196]
- 18 Masslaski T B, Singleton M F, Nash P. Mo-Ni (Molybdenum-Nickel). In: Binary Alloy Phase Diagrams. 2nd ed. Ohio: ASM International, 1990. 3: 2635–2637

- 19 Kim S U, Koo Y M. Nucleation modes of the drop tube processed Nd70Fe20Al10 droplets. *Mater Lett*, 2004, 58: 975–979
- 20 Liu W, Yan N, Wang H P. Dendritic morphology evolution and microhardness enhancement of rapidly solidified Ni-based superalloys. *Sci China Tech Sci*, 2019, 62: 1976–1986
- 21 Fransaer J, Wagner A V, Spaepen F. Solidification of Ga–Mg–Zn in a gas-filled drop tube: Experiments and modeling. *J Appl Phys*, 2000, 87: 1801–1818
- 22 Zhang P, Li S X, Zhang Z F. General relationship between strength and hardness. *Mater Sci Eng-A*, 2011, 529: 62–73
- 23 Aziz M J. Model for solute redistribution during rapid solidification. *J Appl Phys*, 1982, 53: 1158–1168
- 24 Lee E S, Ahn S. Solidification progress and heat transfer analysis of gas-atomized alloy droplets during spray forming. *Acta Metall Mater*, 1994, 42: 3231–3243
- 25 Liu G, Zhang Z, Dang F, et al. Formation and characterization of magnetic barium ferrite hollow fibers with low coercivity via co-electrospun. *J Magn Magn Mater*, 2016, 412: 55–62
- 26 Kwon S, Kim S, Yim H, et al. High saturation magnetic flux density of Novel nanocrystalline core annealed under magnetic field. *J Alloys Compd*, 2020, 826: 154136

Rapid solidification and physical properties of a refractory Mo-Ni alloy under containerless microgravity condition

ZHAO XiaoLei, WANG WeiLi, SHA Sha, YAN PengXu & WEI BingBo

School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

The solidification kinetics and physical properties of Mo-48%Ni alloy were studied using the free fall technique. The cooling rate and undercooling of this alloy both increased exponentially as the droplet diameter decreased, and they could reach $2.41 \times 10^4 \text{ K s}^{-1}$ and 322 K ($0.19 T_L$), respectively. The high cooling rate significantly suppressed the subsequent solid state transformation process. The primary NiMo phase exhibited a morphological transition from coarse dendrite to a remarkably refined structure, and the regular lamellar (Ni+NiMo) eutectics changed into anomalous eutectic. The maximum length of the primary NiMo phase fell from 142.2 to 28.4 μm , whereas its volume fraction initially rose and then fell, with a maximum of 60.1%. Moreover, the variation in the Mo content of the primary phase coincided well with that of the eutectic structure. As regards mechanical properties, the nanoindentation measurements indicated that the elastic moduli of the primary phase and the eutectic structure both showed a downward trend along with the microstructure evolution. The eutectic hardness decreased monotonously from 14.1 to 8.7 GPa, whereas the primary phase hardness increased slightly from 8.0 to 8.5 GPa and finally fell to 5.4 GPa. In addition, the growth morphology of the (Ni) solid solution within the eutectic structure was shown to have an obvious effect on the magnetic properties of the Mo-48%Ni alloy. As the rate of cooling increased, the saturation magnetization and residual magnetization diminished. The alloy's coercivity increased from 11.8 to 25.7 A m^{-1} , indicating enhancement of the temperature resistance induced by microstructure refinement. The rapid solidification under space simulation conditions affected the mechanical and magnetic properties of the Mo-48%Ni alloy to a certain degree.

high undercooling, rapid solidification, refractory alloy, mechanical property, magnetic property

doi: [10.1360/SST-2021-0161](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0161)