

引用格式: 刘博宇, 黄鑫垚, 马欣金, 等. 基于熔体控速滴铸法制备分米级高纯镁单晶的工艺探索[J]. 中国材料进展, 2024, 43(11): 981-987.

LIU B Y, HUANG X Y, MA X J, *et al.* Exploration of Decimeter-Sized High-Purity Magnesium Single Crystal Preparation Based on Melt Controlled-Speed Drop Casting[J]. Materials China, 2024, 43(11): 981-987.

特约专栏

基于熔体控速滴铸法制备分米级 高纯镁单晶的工艺探索

刘博宇^{1,2,3}, 黄鑫垚^{1,2,3}, 马欣金^{1,2,3}, 郑芮^{1,2,3}, 李峣峰^{1,2,3},
李玖章^{1,2,3}, 肖鹏^{1,2,3}, 单智伟^{1,2,3}

- (1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)
- (2. 西安交通大学陕西省镁基新材料工程研究中心, 陕西 西安 710049)
- (3. 西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 金属镁具有密排六方晶体结构, 其力学性能和物理化学性能具有明显的各向异性。高纯镁单晶是研究镁沿不同晶向的力学性能、腐蚀行为及导电导热等物理化学性能的理想材料。目前, 高纯镁单晶常需进口, 其价格昂贵, 购买手续繁琐, 且所能购置的单晶尺寸一般为厘米级甚至更小, 难以满足批量化的力学和物理性能测试需求。提出了一种基于熔体控速滴铸法的高纯镁单晶生长方法, 并探索了原料纯度、结晶坩埚结构及温度设置等因素对晶体生长的影响规律。应用该方法及装置, 成功制备了纯度为 99.99% (质量分数) 的分米级尺寸高纯镁单晶体。

关键词: 高纯镁; 单晶; 熔体控速滴铸法; 晶体生长

中图分类号: TG146.22; TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)11-0981-07

Exploration of Decimeter-Sized High-Purity Magnesium Single Crystal Preparation Based on Melt Controlled-Speed Drop Casting

LIU Boyu^{1,2,3}, HUANG Xinyao^{1,2,3}, MA Xinjin^{1,2,3}, ZHENG Rui^{1,2,3}, LI Yaofeng^{1,2,3},
LI Jiuzhang^{1,2,3}, XIAO Peng^{1,2,3}, SHAN Zhiwei^{1,2,3}

- (1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)
- (2. Shaanxi Province Engineering Research Center for Magnesium-Based New Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)
- (3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Magnesium has a hexagonal close-packed (hcp) crystal structure, thus its mechanical and physical/chemical properties exhibit significant anisotropy along variant crystallographic orientations. High-purity magnesium single crystal is an ideal material for studying the mechanical properties, corrosion resistance, electrical and thermal conductivity, and other physical/chemical properties of magnesium along different crystallographic orientations. However, high-purity magnesium single crystals often need to be imported, which are expensive, and the purchase procedures are complicated and time-consuming. Moreover, the size of magnesium single crystal produced by current methods is generally with centimeter or even smaller. The present paper proposes

收稿日期: 2024-04-12 修回日期: 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3709300); 国家自然科学基金资助项目(52371121, 52031011, 523B2001)

第一作者: 刘博宇, 男, 1987 年生, 教授, 博士生导师

通讯作者: 单智伟, 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师,

Email: zwshan@xjtu.edu.cn

刘博宇, 男, 1987 年生, 教授, 博士生导师,

Email: boyuliu@xjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202404016

a method for growing high-purity magnesium single crystals based on melt controlled-speed drop casting method. The effects such as raw material purity, crucible configuration, and temperature setting on crystal growth are studied. Using the proposed method, decimeter-sized high-purity magnesium single crystals with a purity of 99.99wt% are successfully produced.

Key words: high-purity magnesium; single crystal; melt controlled-speed drop casting; crystal growth

1 前言

镁及镁合金具有密度低、比强度和比刚度高、电磁屏蔽效果好、抗震减震能力强等优点,在航空航天、国防军工、交通运输、生物医用及电子通讯等领域中具有广泛的应用前景^[1-7]。作为一种具有典型的密排六方晶体结构的金属,镁的力学性能和物理化学性能的各向异性十分明显^[8-15]。Kelley 和 Hosford 对纯镁单晶特定取向进行了平面应变压缩测试,发现沿不同晶向的压缩强度最大相差近两倍^[10]。Yoshinaga 等报道了基面滑移的临界分切应力与非基面的相差超一个数量级^[11]。Hagihara 等测试了纯镁不同晶面的腐蚀速率,发现 $\{10\bar{1}2\}$ 晶面的腐蚀速率是 $\{0001\}$ 晶面的 3 倍以上^[15]。因此,研究并揭示镁单晶沿不同晶向的力学、物理、化学等各项性能,对更好地理解镁及镁合金的力学和物理化学性能及内在机制十分重要。此外,镁的性能对杂质十分敏感,ppm 级含量的杂质即可对镁的性能,特别是腐蚀性能产生显著影响^[16, 17]。因此,在研究镁沿各晶向的性能时,应尽量采用高纯镁单晶(如纯度高于 99.95%,质量分数),以最大限度避免杂质的影响。

目前,高纯镁单晶常需进口,其价格昂贵,购买手续繁琐,购买周期长,需要签订非军事用途等保证协议^[17],且所能购置的单晶尺寸一般为厘米级甚至更小,难以满足批量化的力学和物理化学性能测试需求。因此,亟须开发一种低成本、高效率制备大尺寸、高纯镁单晶的方法。本团队在前期发展出了一种基于熔体控速滴铸法的镁及镁合金熔铸方法(后文简称为滴铸法)^[18],用该方法可制备出高纯净且致密的纯镁铸锭,在部分实验条件下得到的晶粒尺寸能够达到数厘米级别,有望制备出高纯镁单晶。本工作旨在通过原理探索和工艺参数优化,研究基于滴铸法的大尺寸高纯镁单晶制备方法。

2 实验方法

2.1 滴铸法及装置简介

团队前期开发的滴铸法是一种基于熔体控速滴铸的熔铸方法^[18],主要装置的结构如图 1 所示。该装置主要分为熔化区和结晶区,中间由控流滤杂板分隔。结晶区底部有唯一的水冷结构作为冷源,目的是使结晶区产生沿竖直方向的温度梯度,即热量由滴落至镁锭上表面的熔体向下方的结晶镁锭传导。熔化区和结晶区加热元件的温度控制

相互独立,使原料的熔化和晶体的生长同步进行。熔铸过程中,熔化区的温度设置为高于镁的熔点,使镁原料受热熔化,未熔化的高熔点杂质(如氧化物等)被控流滤杂板阻拦。镁熔体经过滤后,滴落至下方结晶区的坩埚中凝固,形成结晶镁锭。镁锭随着熔体的持续滴落、凝固而逐渐长大。为避免引入额外杂质,所用坩埚材质为与镁不互溶的高纯石墨(纯度>99.995%,质量分数)。

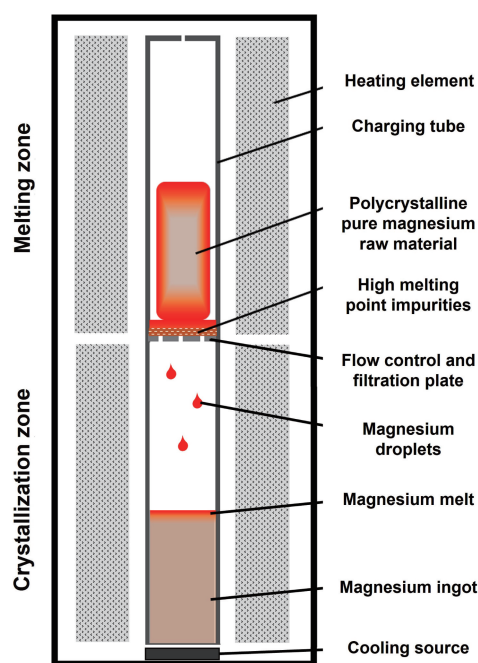


图 1 滴铸法装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the melt controlled-speed drop casting device structure

2.2 实验材料

实验所用镁原料分别为 1N、2N、3N、4N 级镁(N 是英文数字 nine 的首字母,4N 代表%前面有 4 个连续的 9,即 99.99%级),其成分采用电火花直读光谱仪(GNR-S5)检测,具体成分见表 1。

表 1 镁原料化学成分

Table 1 Chemical composition of magnesium raw materials ($w/\%$)

	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Fe
1N	97.4562	0.0040	0.0005	0.0022	0.0025	2.5346
2N	99.8429	0.0278	0.0075	0.0729	0.0454	0.0035
3N	99.9716	0.0169	0.0039	0.0025	0.0029	0.0022
4N	99.9938	0.0005	0.0043	0.0004	0.0005	0.0005

2.3 实验过程

将镁原料和坩埚经过干燥处理后，放入多段控温立式炉中，并设置控温程序。控温程序主要分为 3 个阶段：第 1 阶段，加热镁原料，且使结晶区坩埚达到镁结晶所需温度；第 2 阶段，镁原料在熔化区受热熔化，并逐滴滴落至结晶区的坩埚中形成镁铸锭；第 3 阶段，镁晶体生长结束后，缓慢冷却至室温并取出。随后，采用金相显微镜对所得镁铸锭进行组织观察，用 X 射线衍射仪 (XRD, Bruker D8 Advance) 和电子背散射衍射 (EBSD, Helios Nanolab 600 (FEI)) 对镁铸锭晶粒取向进行测试。在本试验中，采用上述装置和方法制备纯镁铸锭约需 5 h。

本文系统研究了原料纯度、坩埚构型及结晶区温度设置等工艺参数对镁晶体形核及长大的影响，随后通过金相显微镜、XRD 和 EBSD 表征验证是否得到了单晶体，并表征晶体学取向。

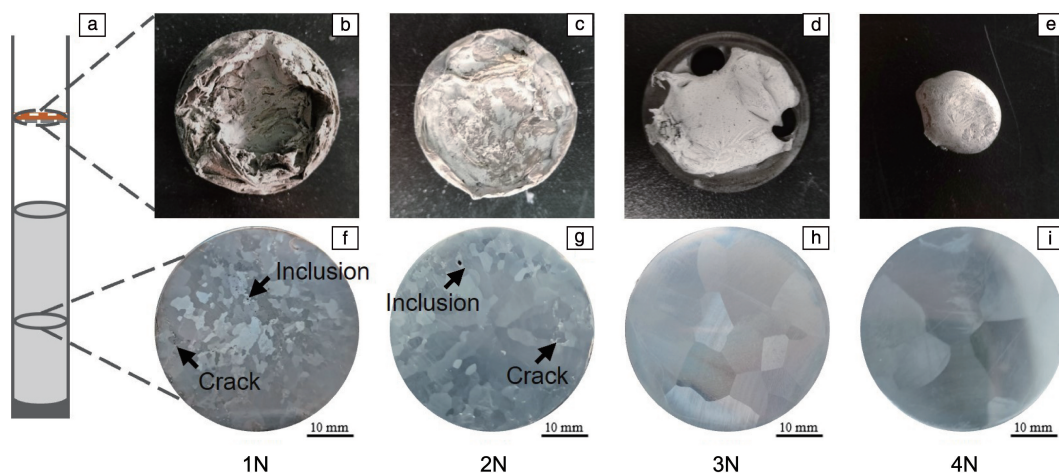


图 2 使用不同纯度原料制备镁铸锭：(a) 置料管示意图，(b~e) 控流滤杂板上的残留物，(f~i) 铸锭中部横截面金相照片

Fig. 2 Magnesium ingots produced using raw materials with different purity levels: (a) schematic diagram of the charging tube, (b~e) the residue materials on the flow control and filtration plate, (f~i) metallographs of the cross-section of the ingot middle part

当使用的原料纯度较低时(如 1N 级和 2N 级)，尽管控流滤杂板可过滤部分杂质和夹杂物，但仍有杂质随熔体滴落(如图 2f 和 2g 所示)，增加结晶过程中的异质形核质点，促进晶粒形核，不利于得到单晶。当使用的原料纯度达 3N 级及以上时，由于纯度提高，减少了结晶过程中的异质形核质点(如图 2h 和 2i 所示)，为纯镁单晶的生长创造了有利条件。此外，使用 4N 级原料镁所制得的铸锭晶粒尺寸与 3N 级的相比增大并不明显，因此单纯提升原料纯度并不能保证在该装置中制备出镁单晶。根据以上实验结果可知，采用本装置和方法制备大晶粒或单晶镁铸锭时，至少应采用纯度为 3N 级及以上的高纯原材料。

3.2 坩埚构型对镁铸锭晶粒尺寸的影响

团队前期研发的滴铸法制备纯镁铸锭工艺中，通常

3 结果与讨论

3.1 原料纯度对镁铸锭晶粒尺寸的影响

本工作首先采用表 1 所示的 1N、2N、3N 和 4N 4 种原料进行滴铸实验，所使用的装置及温控参数相同，以对比原料纯度对镁铸锭晶粒尺寸的影响。实验结果如图 2 所示。4 组实验均发现在控流滤杂板上有明显的残留物(图 2b~2e)，表明滴铸法可有效过滤镁熔体中的夹杂物，且随着镁原料纯度的提高，残留物明显减少。图 2f~2i 为 4 组实验制得的镁铸锭的横截面金相照片。对比发现，镁原材料纯度为 1N 级和 2N 级时，铸锭的晶粒尺寸为毫米级，且内部存在明显夹杂和裂纹，如图 2f 和 2g 所示；当纯度提升至 3N 级和 4N 级时，晶粒尺寸明显增大，个别晶粒尺寸可达厘米级别，且未观察到明显夹杂和裂纹，如图 2h 和 2i 所示。

选用平底坩埚。镁熔体在坩埚中结晶和生长的过程如图 3a 所示。滴铸初期，熔体会滴落在坩埚底部的不同位置，此时各熔体相互独立，形成多个镁单晶体，由于坩埚内温度梯度方向(散热方向)为竖直方向，因此铸锭易形成粗大的柱状多晶组织。为了使滴铸初期仅有一个结晶位置，团队将坩埚底部设计为锥形，同时抛光内壁，使滴落在锥壁的熔体滑落至锥尖处聚集，如图 3c 所示，这一锥底坩埚设计将有利于单一晶核的形核与长大。

以 4N 级纯镁为原料，使用相同的温控参数，分别采用平底坩埚和锥底坩埚进行滴铸实验，铸锭及金相照片如图 3b 和 3d 所示。使用平底坩埚制得的镁铸锭为柱状多晶体，而锥底坩埚得到单晶体，即锥底坩埚更易于单晶体生长。需要指出的是，尽管在锥底坩埚处得到了单晶镁铸锭，但实验发现，继续滴铸时，在锥形单晶的上

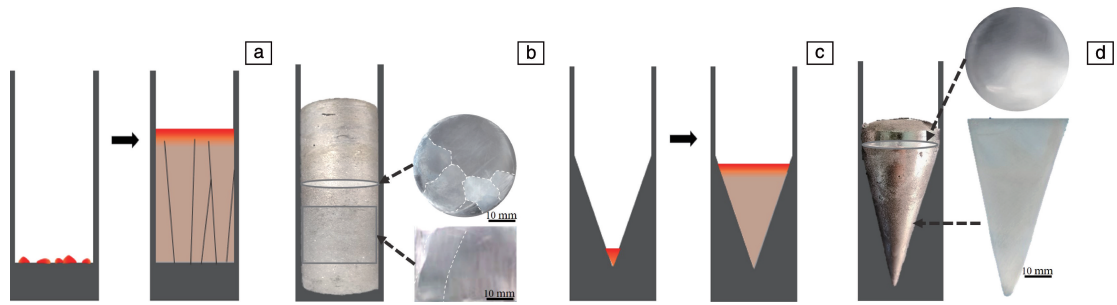


图 3 不同构型的坩埚生长铸锭的示意图及铸锭实物: (a) 采用平底坩埚制备镁铸锭示意图, (b) 平底坩埚所制得铸锭的照片和金相组织, (c) 采用锥底坩埚制备镁铸锭示意图, (d) 锥底坩埚所制得铸锭的照片和金相组织

Fig. 3 Schematic diagrams and photographs of ingots grown in crucibles with different configurations: (a) schematic diagram of crystallization in a flat-bottom crucible and (b) photograph and metallographs of produced ingot, (c) schematic diagram of crystallization in a conical crucible and (d) photograph and metallographs of produced ingot

方形成了多晶, 如图 4e 所示。因此, 还需要精确设置结晶区温控参数, 保持单晶的持续生长, 详见下节。

3.3 结晶区温度对镁铸锭晶粒尺寸的影响

理论上, 纯镁的临界过冷度为 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$, 纯镁的凝固温度为 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此结晶区温度(图 1 结晶区加热元件所设置的温度)至少需设置到高于 $465\text{ }^{\circ}\text{C}$ 才能抑制均质形核。但实际上, 熔体中不可避免地存在杂质或夹杂物, 使其形核过程所需过冷度减小, 因此, 结晶区温度应设置为高于 $465\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度。本实验设置了 3 种结晶区温度, 分别为 550 , 575 , $625\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以探究采用滴铸法生长镁单晶的最佳结晶区温度。所制得的各铸锭表面和剖面照片如图 4 所示。

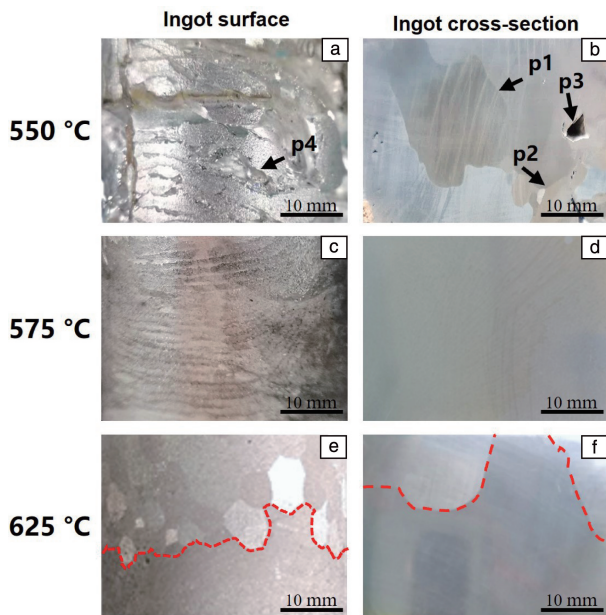


图 4 采用不同结晶区温度得到的铸锭的表面和剖面照片

Fig. 4 Surface and cross-section photographs of ingots obtained at different crystallization zone temperatures

结晶区温度为 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 如图 4a 和 4b 所示, 铸锭中心形成了厘米级晶粒(p_1), 但在其周围也形成了毫米级晶粒(p_2), 且铸锭内部有明显孔洞(p_3), 铸锭表面有明显凹坑(p_4), 即结晶不致密, 充型不足。结晶区温度为 $575\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 所得铸锭未观察到晶界、夹杂及坑孔, 铸锭内部致密(图 4d), 但在表面可观察到逐层纹路(图 4c), 间距约 $1\sim 2\text{ mm}$ 。结晶区温度为 $625\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 铸锭表面及内部可明显观察到单晶区与多晶区的分界线(图 4e 和 4f 中红色虚线所示), 此分界线下部为无晶界的单晶, 即前文提到的锥形镁锭部分, 上部为多晶。

通过分析上述结果绘制了结晶过程示意图(图 5)。当结晶区温度为 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 结晶区温度过低, 熔体在进入坩埚后, 其热量由相对较冷的坩埚快速带走, 熔体温度迅速下降, 靠近坩埚壁的熔体的过冷度较大, 促进了形核, 从而形成大量晶核(图 5a~5d)。同时, 由于熔体温度下降迅速, 其粘度提高, 影响其充型能力, 最终在铸锭表面和内部形成凹坑和孔洞(图 5b~5d)。

当结晶区温度为 $575\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 熔体与坩埚之间温差减小, 实际过冷度小于纯镁临界过冷度, 熔体的均质形核受到抑制, 形核速率小, 有利于单一晶核的形核与生长(图 5e~5h)。另外, 在该温度下, 熔体滴落在已凝固的镁晶体上方形成液相薄层(图 5e 和 5f 中红色薄层所示), 随后凝固, 使镁晶体长大; 随着熔滴的持续滴落, 镁晶体自下而上逐层生长(图 5e~5h 中虚线所示), 形成致密的单晶体, 因此出现了图 4c 中的逐层纹路。关于具体的逐层凝固过程和调控机制, 有待进一步深入研究。此外, 团队也开展了结晶区温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的滴铸试验, 结果与在 $575\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时类似, 也形成了致密的单晶体。因此, 推测认为 $575\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是较为理想的使用滴铸法制备镁单晶体的结晶区温度。

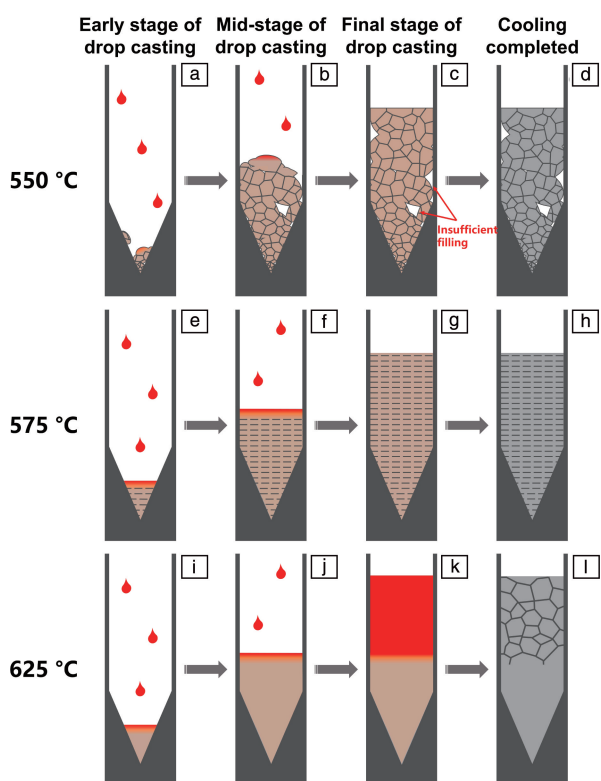


图 5 采用不同结晶区温度的镁结晶过程示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of the magnesium crystallization process at different temperatures of the crystallization zone

当结晶区温度为 625 °C 时，尽管熔体在滴铸初期仍可在锥底处实现单一晶核的形核与生长(图 5i 和 5j)，但随着熔体的不断滴落，其携带的热量和结晶潜热使坩埚温度持续上升，坩埚散热能力变差，熔体热量难以及时导出，因而难以到达过冷状态，使得新滴落的熔体无法及时凝固，在已凝固的单晶体上方大量堆积(图 5k)。在控温程序的第 3 阶段，即冷却阶段，这些堆积的熔体随炉体一同降温，大量形核并长大，形成等轴晶组织(图 5l)。因此形成了如图 4e 和 4f 所示的明显的单晶区与多晶区。

综上，采用当前滴铸法和装置制备纯镁单晶的理想结晶区温度应在 575 ~ 600 °C。此温度下熔体过冷度较小，可以抑制滴铸初期均质形核，并得到稳定的液相薄层，实现单晶体连续、高质量生长。结晶区温度过低将导致熔体迅速降温至过冷状态从而大量形核，不利于单晶体的生长，且熔体不能完全充型，易形成凹坑和孔洞；结晶区温度过高将使滴落的镁熔体在坩埚中堆积，在降温过程中形成等轴晶组织。

3.4 镁单晶铸锭的成分、形貌和晶体学取向分析

采用上述实验所得的最佳工艺参数制备的纯镁铸锭

如图 6a 所示，其轴向高度约 142 mm，最大直径约 40 mm，质量约 198.5 g，表面光洁，未观测到明显裂纹、缩孔等缺陷。在铸锭的锥形部分、圆柱部分及其交界处分别取横截面样品，其金相照片如图 6b~6d 所示，未发现晶界、夹杂及孔洞，晶体质量良好。此外，对该铸锭各个区域进行了大量表征，均未发现晶界，典型照片如图 6e 所示。使用电火花直读光谱仪对此铸锭进行了成分分析，结果如表 2，此纯镁铸锭的纯度达到了 99.99% 级。

表 2 纯镁铸锭化学成分

Table 2 Chemical composition of the obtained pure magnesium ingot (w / %)

Element	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Fe
Content	99.9933	0.0007	0.0050	0.0004	0.0002	0.0004

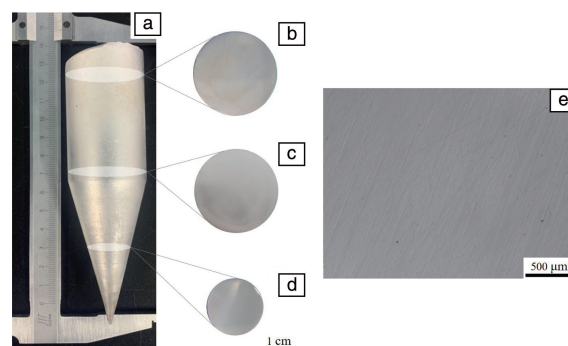


图 6 滴铸法生长的纯镁铸锭外观及金相照片：(a) 外观形貌及尺寸，(b~d) 圆柱部分、交界处、锥形部分横截面金相照片，(e) 放大倍数为 50 倍的金相照片

Fig. 6 Appearance and metallographic images of pure magnesium ingot grown by melt controlled-speed drop casting method: (a) the appearance and dimension, (b~d) cross-section metallographic photographs of the cylindrical section, the junction, and the conical section, (e) a magnified metallographic photograph

对图 3b 对应的多晶铸锭和图 6a 对应的铸锭进行了 XRD 分析，结果如图 7 所示。多晶铸锭的 XRD 图谱中有 (10 $\bar{1}0$)、(10 $\bar{1}1$) 等多个晶面的衍射峰(图 7a)。图 6a 对应铸锭的 XRD 图谱有且仅有 (10 $\bar{1}1$) 晶面的衍射峰(图 7b)，表明该样品为单晶体或至少为取向一致的多晶体。此外，该衍射峰强度高、形状尖锐，表明晶体微观缺陷少。对图 6a 对应铸锭的多个区域分别取样(采样位置如图 8a 所示)进行 EBSD 分析，其结果如图 8b~8e 所示。该样品所测试的各区域均为 (12 $\bar{3}4$) 晶面，表现出单一的晶体学取向，且未发现晶界。综合上述金相表征、XRD 分析、EBSD 分析结果，判定该纯镁铸锭应为单晶体且晶体质量良好。

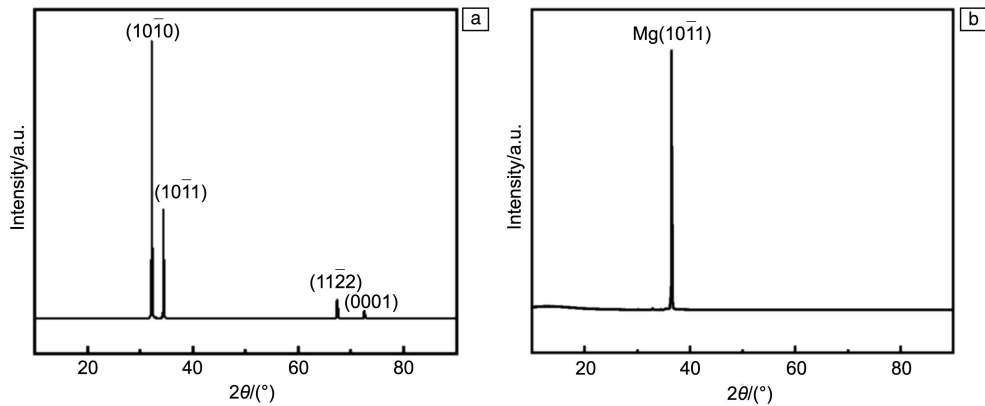


图 7 熔体控速滴铸法生长的纯镁铸锭的 XRD 图谱: (a) 多晶铸锭, (b) 单晶铸锭

Fig. 7 XRD patterns of pure magnesium ingots grown by melt controlled-speed drop casting method: (a) polycrystalline ingot, (b) single crystal ingot

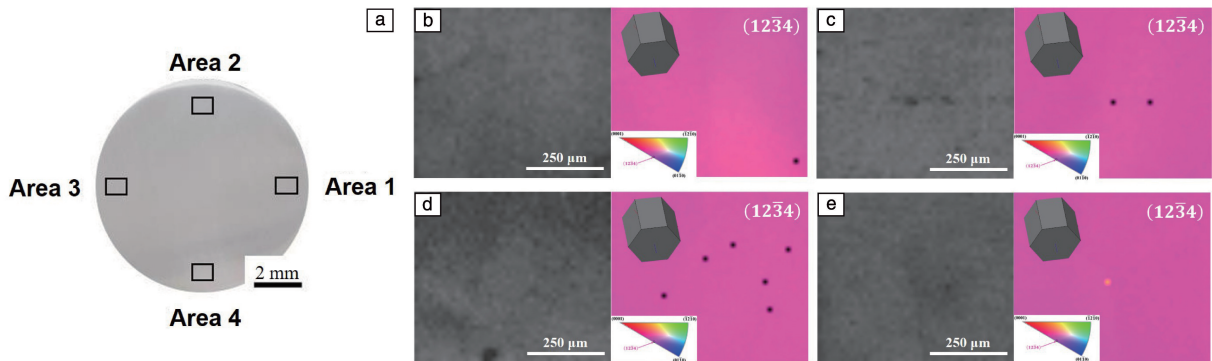


图 8 滴铸法生长的纯镁铸锭的 EBSD 分析取样位置示意图(a)和区域 1~区域 4 的 SEM 照片及反极图(b~e)

Fig. 8 Schematic diagram of sampling from the pure magnesium ingot for EBSD characterizations (a) and SEM images and inverse pole figures of areas 1 to 4 (b~e)

4 结 论

本研究探索了使用熔体控速滴铸法制备镁单晶的可行性和最佳工艺参数,最终成功制备了高质量、大尺寸的高纯镁单晶铸锭,所得镁单晶铸锭径向尺寸约 40 mm,轴向尺寸可达 100 mm 以上,纯度达 99.99% (质量分数)。

(1) 原料纯度对镁铸锭晶粒尺寸影响显著。通过提高原料纯度可有效减少杂质和夹杂物等,从而减少形核数量,增大晶粒尺寸,并减少铸锭中的夹杂和裂纹等缺陷。

(2) 锥底坩埚结构可以有效控制滴铸初期的形核过程,有利于单一晶核的形核与长大,为纯镁单晶的生长创造有利条件。

(3) 在本滴铸法实验装置下,镁单晶生长的最佳结晶区温度为 575~600 °C,此温度下,镁熔体在锥底处首先形成单一晶核,随着熔滴的不断滴落,连续形成液相薄层,单晶体逐层生长,得到高纯度、高致密度的完整单晶体。

在本研究的基础上,今后可继续探索通过在坩埚底部放置籽晶来实现特定取向的纯镁单晶或镁合金单晶的制备,并开发更大尺寸、更高效率的镁单晶制备工艺和装置。此外,应用该方法除了可制备单晶体,还可探索特定的熔化区和结晶区温控参数等,以制备出夹杂少、冶金缺陷少且致密的纯镁或镁合金多晶体,为高品质镁基材料的制备提供了新思路。

致谢 感谢西安交通大学的郭朝维、李雁淮、王安等老师和同学在数据采集处理和文章修改等方面提供的帮助。

参考文献 References

- [1] 宋江凤,潘复生. 现代交通与冶金材料[J], 2022, 2(6): 1-5.
SONG J F, PAN F S. Modern Transportation and Metallurgical Materials[J], 2022, 2(6): 1-5.
- [2] 谭军,王芳磊,蒋斌,等. 自然杂志[J], 2023, 45(2): 93-105.
TAN J, WANG F L, JIANG B, et al. Chinese Journal of Nature[J], 2023, 45(2): 93-105.
- [3] 丁文江,吴国华,李中权,等. 上海航天[J], 2019, 36(2): 1-8.
DING W J, WU G H, LI Z Q, et al. Aerospace Shanghai[J], 2019,

- 36(2): 1-8.
- [4] 尹林, 黄华, 袁广银, 等. 中国材料进展[J], 2019, 38(2): 126-137.
YIN L, HUANG H, YUAN G Y, *et al.* Materials China[J], 2019, 38(2): 126-137.
- [5] 吴雨宽, 白浪, 刘妍兰, 等. 中国修复重建外科杂志[J], 2024, 38(3): 380-386.
WU Y K, BAI L, LIU Y L, *et al.* Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery[J], 2024, 38(3): 380-386.
- [6] 吴加鳌, 邹勇进, 孙立贤. 中国材料进展[J], 2023, 42(2): 105-113.
WU J A, ZOU Y J, SUN L X. Materials China[J], 2023, 42(2): 105-113.
- [7] SHE J, CHEN J, XIONG X M, *et al.* Journal of Magnesium and Alloys[J], 2024, 12(9): 3441-3475.
- [8] BOHLEN J, NÜRNBERG M R, SENN J W, *et al.* Acta Materialia [J], 2007, 55(6): 2101-2112.
- [9] MOLODOV K D, AL-SAMMAN T, MOLODOV D A. Acta Materialia [J], 2022, 240: 118312.
- [10] KELLEY E W, HOSFORD W. Transactions of the Metallurgical Society of AIME[J], 1968, 242(1): 5-13.
- [11] YOSHINAGA H, HORIUCHI R. Transactions of the Japan Institute of Metals[J], 1963, 4(1): 1-8.
- [12] YUAN J, ZHANG K, LI T, *et al.* Materials & Design[J], 2012, 40: 257-261.
- [13] WANG B, XU D, DONG J, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2016, 32(7): 646-652.
- [14] WANG B, XU K, XU D, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2020, 53: 102-111.
- [15] HAGIHARA K, OKUBO M, YAMASAKI M, *et al.* Corrosion Science [J], 2016, 109: 68-85.
- [16] YANG L, XU W, HE S, *et al.* Corrosion Science [J], 2022, 201: 110258.
- [17] 杨博, 刘博宇, 杨灏, 等. 中国材料进展[J], 2020, 39(7/8): 576-584.
YANG B, LIU B Y, YANG H, *et al.* Materials China[J], 2020, 39(7/8): 576-584.
- [18] 单智伟, 郑芮, 杨博, 等. 一种基于熔体控速滴铸的镁及镁合金熔铸装置和方法: CN202111674500. X[P]. 2024-04-09.
SHAN Z W, ZHENG R, YANG B, *et al.* A Device and Method for Melting and Casting of Magnesium and Magnesium Alloys Based on Melt-Controlled Drop Casting : CN202111674500. X [P]. 2024-04-09.

(编辑 惠 琼)