

回转水纺丝及其在贵金属合金丝制备中的潜在应用

李 强, 于 浩, 卢绍平, 孔建稳, 姚 亮, 陈家林*, 武海军, 崔 浩, 刘 毅
(昆明贵金属研究所, 贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 回转水纺丝法用快冷技术将熔融金属直接制备成细丝, 可用于制备具有很高连续性和圆整度的丝材, 并且能够改善合金的微观组织, 提高材料性能。对该方法中喷嘴孔径、喷射速度和喷射距离等工艺影响因素, 以及其对丝材性能的影响机制进行了综述分析。结合常见贵金属丝材的特点, 由于回转水纺丝法可减轻常规凝固过程中的偏析, 在多元合金丝材的制备中有潜在应用前景。据此用自制设备进行了初步实验, 并提出了技术改进设想。

关键词: 金属材料; 回转水纺丝; 贵金属; 细丝

中图分类号: TG146.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)02-0085-06

In-Rotating-Water-Spinning Process and Its Potential Application in the Preparation of Precious Metals Alloy Wire

LI Qiang, YU Hao, LU Shaoping, KONG Jianwen, YAO Liang, CHEN Jialin*, WU Haijun, CUI Hao, LIU Yi
(Kunming Institute of Precious Metals, State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-Platinum Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: In-Rotating-Water-Spinning (IRWS) method is a rapid solidification process, which can produce thin wires straight from molten state, offering many advantages over the conventional wire drawing process. Wires of high continuity and roundness can be obtained by using this method. Moreover, It can improve microstructure and advance performance of the resulting wires. The factors influencing the properties of wires during the solidification are reviewed. These factors mainly include the orifice diameter, the ejection velocity and distance. As RWS can reduce the segregation during the solidification and considering some characteristics of precious metals, we will find its potential application in the manufacture of multi-element alloy wires. Preliminary experiments have been carried out on the self-made device and future improvement on the process was proposed.

Key words: metal materials; in rotating water spinning method; precious metals; thin wire

贵金属及其合金具有优良的抗腐蚀性、稳定的热电性、高温抗氧化性以及良好的催化性能, 在工业上被广泛应用。贵金属及其合金按照加工成型后的状态可分为片材、带材、丝材、管材以及棒材等。

贵金属丝材一直以来是军工行业中相当重要的一类材料, 主要用于制造航空和航天仪器精密仪表、控制、遥测、电子装置以及武器系统传感器的信号

传输、电控等关键部位材料。在工业领域, PtRh/Pt 丝材作为热电偶核心材料, 高纯铂丝可用以制作电阻温度计, 银及银合金丝材为电工电器方面优良的触点材料, 铂钯铑三元合金丝材网用作合成硝酸的催化合成。在日常生活中, PrIr 丝用于高级防风打火机, 用于手机、电脑中的键合金丝为高纯金熔炼拉制而成, 金、银、铂、钯及其合金拉成丝材以后,

收稿日期: 2016-09-09

基金项目: 云南省应用基础研究重大项目(2016FC006)、稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室开放课题(SKI-SPM-201514)、华南理工大学开放课题(2015013)。

第一作者: 李 强, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 贵金属精密合金。E-mail: qiali@ipm.com.cn

*通讯作者: 陈家林, 男, 教授, 研究方向: 贵金属合金材料。E-mail: jcl@ipm.com.cn

可制成各种不同形状的首饰。

贵金属丝材传统制备方法大都是从熔炼铸造开始。贵金属合金熔铸后得到铸坯(一般为圆柱体)经锻造开坯、轧制、拉拔等塑性加工过程而成不同丝径的丝材。近年来,金属熔铸技术不断创新,多种从熔融金属液直接制成金属丝材的技术相继问世,如回转水纺丝法(又称内圆水纺丝法, In Rotating Water Spinning Method)、传送带法(Belt Conveyer Method)、玻璃包覆拉丝法(Taylor-Ulitovsky Method)、成流铸造法(Shape Flow Casting Method)和合金液注入液体冷却法(Kavesh method)。

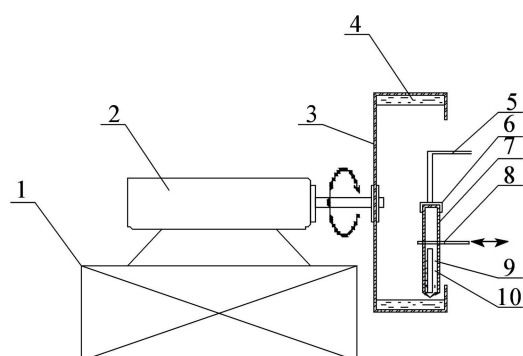
其中,回转水纺丝法是大阪大学大中逸雄^[1]教授于 1978 年发明的直接由液态金属激冷制备合金丝的方法。该方法属于快速凝固成型工艺的一种,快速凝固可以细化晶粒,提高固溶度,抑制偏析,易形成非晶相。由此获得的凝固组织(可以控制得到好的结晶取向或者特殊组织)不同于传统工艺生产的组织,可提高材料的强度、延展性和抗腐蚀能力,使材料具有优良的磁学性能等。日本 Unitika 公司^[2]实现了该方法的商业化,生产出千米级直径在 0.1 至 0.25 mm 的铁基非晶细丝。

回转水纺丝工艺在多种合金丝材制备中已有应用。本文基于对该工艺的综合评述,分析探讨其在贵金属合金丝材制备中的潜在应用,并进行初步实验探索。

1 回转水纺丝工艺概述

1.1 工艺流程和应用实例

图 1 所示为回转水纺丝原理示意图。



1. 台座(Pedestal); 2. 变频电机(VFC Motor); 3. 回转轮(Rotating Wheel); 4. 冷却介质(Coolant); 5. 进气管(Inlet Connection); 6. 封头(Sealing Head); 7. 双层水冷筒体(Cooled Barrel); 8. 移动导杆(Guide-bar); 9. 感应线圈(Induction Coil); 10. 熔炼坩埚(Crucible)

图 1 回转水纺丝示意图^[1]

Fig.1 Scheme of In-Rotating-Water-Spinning method^[1]

图 1 中,回转轮由变频电机驱动,到达一定转速后将冷却液注入,冷却液会在离心力的作用下在回转轮内壁形成一定厚度的液层。合金料置于特制喷嘴的石英坩埚内,通过感应加热,熔化合金锭。待熔融后,通过进气管通入保护性气体,在一定压力下熔融合金会从喷嘴处射入回转的冷却液内,由于激冷形成细丝。

回转水纺丝工艺采用加压喷射得到连续且稳定的合金液流,液流以一定角度射入到回转轮内冷却液层内得到激冷快速凝固;同时,冷却液流将凝固的丝材迅速带走实现连续加工。整个过程中,初期合金液流的形成以及稳定射入冷却液层激冷,在丝材成形、圆整度以及连续性起着决定性作用。而这与喷嘴的直径、喷嘴与冷却液之间的距离、喷射角度、喷射压力相关,此外回转轮转速、冷却液厚度等也会影响到丝材的加工过程。

目前研究人员利用此方法已经制备很多种不同合金类型、连续性和高圆整度的丝材。例如, Tuncer 等^[3]制备了 Cu 基记忆合金。王建民等^[4]及 Ochin 等人^[5]也制备了 Cu-Al-Ni 和 Cu-Al-Ni-Ti-Cr 直径从 100 到 250 μm 的形状记忆合金。Amirabadizadeh 等制备了 Co 基巨磁合金^[6-7]。Inoue 等^[8]制备了 Fe-Ni-Cr-Si-C 丝和 Ni-Al-X(X=Cr, Mn, Fe, Co, Si)合金丝。Inoue 等^[2, 8-9]制备了 Mn-Al-C 和 Fe-Ni-Cr-Al 非晶态细丝。Masumoto 等^[10]、黄炳醒等^[11]、廖中尧等^[12]和俞志中等^[13]分别制备了 Pd 基非晶态合金。

1.2 工艺影响因素

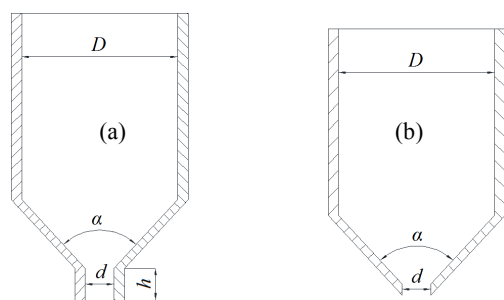
1.2.1 喷嘴喷头

Weber 等在 Rayleigh 关于扰动波假设的基础上给出了用来描述在真空状态下处于层流状态的粘性液体断裂的公式^[14]:

$$L/d=R_e(3Oh^2+Oh)\ln(d/2\delta_0) \quad (1)$$

式中: L 为断裂长度; d 为射流直径; R_e 为雷诺系数($R_e=pvd/\mu$); δ_0 为初始扰动振幅; Oh 为奥内佐格数($Oh=\mu/(\rho\sigma d)^{1/2}$), 其中 μ 为熔体粘度, ρ 为熔体密度, σ 为熔体表面张力, v 为运动粘度。

从式(1)中可以看出,除合金本身性质外,断裂长度主要取决于射流直径 d 。即为了保证合金液由石英管喷射出进入冷却液仍然保持层流状态,除了喷射距离尽量短之外,很大程度上取决于喷嘴。喷嘴的形状主要受以下 4 个因素影响:1) 喷嘴直径 d ; 2) 收缩比(喷嘴直径 d /管径 D); 3) 收缩角 α ; 4) 纵横比(喷嘴端长度 h /喷嘴直径 d), 如图 2 所示。



(a) 理论喷嘴(Theoretical Nozzle); (b) 实际用喷嘴(Actual Nozzle)

图2 喷嘴示意图^[14]

Fig.2 Geometrical drawing of a nozzle^[14]

王建民等^[15]研究了喷嘴直径 d 对细丝成形的影响, 对比了 Fe-Si-B 和 Pb-Sn 在不同喷嘴直径下的成丝程度。研究表明合金的表面张力越大, 对喷嘴直径 d 的敏感程度越小; 不同合金只有在喷嘴直径在一定范围内才能得到光滑连续的细丝; d 过小喷射过程无法完成, 过大丝的圆整度降低直至无法成型。金澜等^[14, 16]参考了 Carthy 关于喷嘴设计的基本原理, 详细的叙述了喷嘴直径、收缩比、收缩角以及纵横比等主要因素对射流状态的影响, 最终采用如图 2(b)所示喷嘴成功制备了 Al-Si 合金丝。

1.2.2 喷射速度

喷射速度主要由喷射压力和保护气进气流量来控制。王建民等^[17]研究了喷射速度对 Fe-Si-B 合金成丝性的影响。结果表明喷射速度过小时, 只能得到缩颈状丝或者粉状颗粒; 当喷射速度与水流速度之比大于 1.19 时, 也只能得到弯曲状细丝; 当速度比小于 1.06 时, 得到短丝; 当速度比介于 1.11~1.16 之间时, 才能得到连续、光滑的细丝。

1.2.3 冷却液的运动

制备光滑圆整连续的细丝, 除了上述因素外, 还与冷却液在回转轮内的状态相关。首先要保证回转轮内的冷却液处于稳定状态, 在此基础上, 通过调整其它影响因素才能制备获得细丝。王建民等的研究^[17-19]从不同角度证明了这一点。

除了以上影响因素, 还与合金的喷射温度、喷射角度等因素有关。回转水纺丝过程是一个多因素影响的复杂成型过程, 只有协调好这些工艺参数才能获得连续、光滑的细丝。

1.3 对丝材性能的影响

回转水纺丝工艺涉及快速凝固过程, 对流传热

占主导地位。凝固阶段的凝固速率被定义为:

$$T=(T_m-T_s)/(t_s-t_m) \quad (2)$$

式(2)中, T_m 为合金液相线温度, T_s 为合金凝固完成时的温度, t_m 为合金在液相线温度的时刻, t_s 为凝固完成时的时刻。通过凝固组织分析以及结合传热过程的数值模拟, 可以推算出回转水纺丝工艺凝固速率大约在 $10^4 \sim 10^5$ K/s 之间^[14]。

回转水纺丝工艺的主要特征在于^[16]: 1) 降低偏析倾向, 即在高的冷却速率下($10^4 \sim 10^5$ K/s), 溶质分配因数 k_0 将偏离平衡, 并且随着冷却速率的增大不断趋近 1, 偏析倾向减小。2) 细化凝固组织。快速凝固合金在组织上的一个重要特征便是超细晶粒。高的冷却速率不仅可以细化枝晶, 而且由于形核速率的增大使晶粒细化。并且随着冷却速率的增大, 晶粒尺寸不断减小, 可以获得微晶甚至纳米晶。3) 形成非平衡相。快速凝固抑制了平衡相的析出, 致使非平衡的亚稳定相析出。4) 形成非晶态。当冷却速率极高时, 形核过程被抑制可以获得非晶态。

正是由于这些特征, 使得回转水纺丝制备得到的细丝可以获得更好的结晶取向或者特殊组织, 通过精拉之后还可以进一步提高材料的力学性能。如 Inoue 等^[8]制备的 Fe-Ni-Cr-Si-C 丝, 经过冷拉后的合金丝材抗拉强度可达 4.24 GPa; Ni-Al-X ($X=Cr, Mn, Fe, Co, Si$) 合金具有很好的延展性和很高的强度, 经过冷拉后其屈服强度和抗拉强度分别为 2.45 GPa 和 2.48 GPa。

除了力学性能上的改进, 通过回转水纺丝工艺获得的非晶丝还具有优良的磁学性能, 最具代表性的 Fe-Si-B 非晶合金^[20], 经过晶化处理得到尺寸为 10~20 nm 的晶粒, 获得更好的高频软磁性能。

2 贵金属细丝及其制备

2.1 常见贵金属细丝

表 1 列出了常用贵金属丝材。贵金属细丝可分为纯金属丝和合金细丝 2 大类, 其中一部分为多元合金。多元化是贵金属材料的一个发展方向, 通过适当添加元素, 可以得到不同力学性能、电学性能的贵金属材料。如添加 Fe、Cr、Co、Zr、Ni 等可以增强材料的机械性能, 添加 Fe、Cr、Co、Mn、V 等可以提高电阻率, 添加 Al、Ti、In、RE 等元素可以起到脱氧、除气以及进一步改性的作用。

表 1 贵金属丝材规格及其性能

Tab.1 Specifications and performance of precious metal wires

材料名称	Φ/mm	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (g/cm^3)	电阻率/ $(\mu\Omega\cdot\text{cm})$	Hv
Ag	0.2~5.0	961	10.5	1.6	85
AgCu _{x(x=2~13)}	0.2~5.0	780	10.2	1.9~2.1	125~140
AgCu ₁₀ V _{0.2}	0.2~1	779	10.3	2.5	150
AgCu ₂₀ Ni ₂	0.5~3.0	—	—	2.7	145
AgPd ₂₀	0.3~1.0	1150	10.7	10.2	120
AgCe _{0.5}	0.2~5.0	960	10.45	1.80	105
ASCM	0.2~5.0	950	10.41	5.2	116
AgNi ₁₀	0.2~5.0	1	10.24	1.96	94
Au	—	1064	19.3	2.4	60
AuNi ₉	0.15~1.0	950~990	17.2	19~30	240~290
AuNi ₅ Cr ₁	0.01~0.08	—	—	75~650	—
AuAg ₃₅ Cu ₅	0.03~0.08	950	>14.2	21~182	200
Pt	0.3~3.2	1772	21.4	10.5	110
PtIr _{x(x=5~25)}	0.02~4.0	1780~1840	21.5~21.7	24.5~33	44~870
PtRh ₁₀	0.8~2.0	1800	20.0	19.2	153
PdIr _{x(x=10~18)}	0.1~5.0	1555	12.6~13.25	27.5~37	105~125
AuAg ₃₀ Pd ₃₅ Pt ₁₀ Cu ₁	0.1~0.8	—	—	32	270~300
AuCu ₁₄ Pt ₁₀ Pd ₁₀ Rh ₁ Ni ₁	0.1~0.2	—	—	—	360~400

2.2 传统细丝制备工艺

传统拉丝工艺流程如图 3 所示。

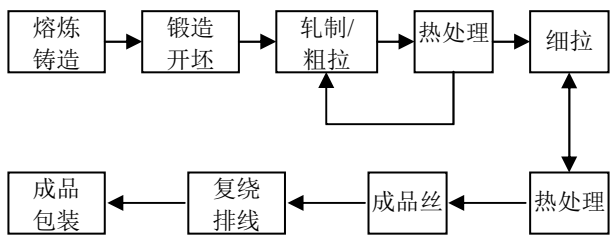


图 3 传统拉丝工艺流程图

Fig.3 Flow chart for traditional drawing process

金、银、铂、钯等具有良好的机械物理性能，延展性优越，经铸造、锻造后，容易拉制成各种规格的丝材。金、银、铂、钯无需进行中间退火，便可以从直径 0.6 cm 一直拉到 0.01 cm；采用沃拉斯顿法镀银后，可以冷拉至 0.001 mm。铑不能进行冷加工，但加热后具有很大的延伸性能；铑锭在 1350℃进行模锻，终锻温度不低于 1100℃，热锻总加工率在 75%以上；通过控制后续热轧及热拉工艺能够加工出 0.02 mm 的铑丝。铱在室温下硬而脆，

同样不能冷加工，且其热加工性能比铑还差；在高温下，控制道次加工率 5%以内可以制备 0.15~2 mm 的铱丝。钨和钨是密排六方结构，即使在高温下也几乎不能加工，也无法拉制成丝材。

传统贵金属及其合金细丝生产工艺采用熔炼、铸锭、锻造开坯、轧制、拉丝，效率低，过程损耗较大。影响传统拉丝工艺的因素较多，尤其是合金凝固过程中的偏析对多元合金材料制备影响较大。

2.3 回转水纺丝工艺探索

图 4 为回转水纺丝工艺流程。

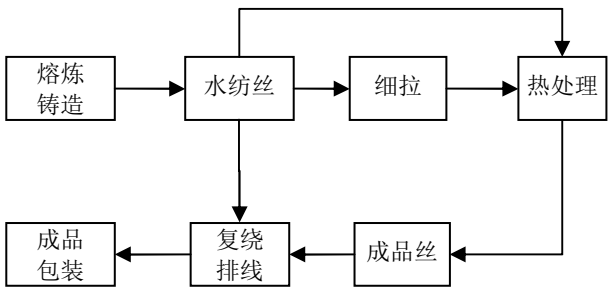


图 4 回转水纺丝工艺流程图

Fig.4 Flow chart for In-Rotating-Water Spinning process

相对于传统丝材制备工艺, 回转水纺丝流程相对简洁。回转水纺丝装置简单, 操作方面, 可以实现连续生产。通过水纺丝制备的材料既可以直接复绕排线进行产品包装又可以通过热处理进行调制后再进行复绕排线进行产品包装; 对于特殊规格的产品, 可以进行细拉得到相应的产品。对比图3和图4可以看出, 回转水纺丝工艺流程短, 可降低材料损耗、提高效率。在实际应用中主要的不足在于: 受石英坩埚的限制, 无法实现熔点较高的合金(熔点温度 $>1200^{\circ}\text{C}$)的拉丝。

回转水纺丝技术的突出优势在于, 对多元化贵金属合金, 能够降低合金在常规凝固过程中出现的偏析。在贵金属材料的制备中, 考虑到节约贵金属、多元合金化研究、开发新型材料的要求, 回转水纺丝这一先进加工技术可实现短流程、低成本以及材料制备加工技术的规范化, 具有潜在应用前景。基于对该技术的分析, 本文研制了专用设备, 并尝试进行金基合金丝的制备。初步实验制备的金基合金丝不连续, 丝径为0.3 mm, 长度约10 mm, 表面存在竹节状结节。需进一步对工艺条件进行完善。

3 结语与展望

回转水纺丝工艺流程短, 可降低损耗、提高效率, 可以获得更好的结晶取向或者特殊组织, 从而使材料具有更好的性能, 在贵金属多元合金丝材制备中具有很好的应用前景。

将该技术应用于贵金属丝材制备中, 首先需对现有设备进行改进, 使其更适应贵金属丝材制备的需要; 同时, 研究孔径、喷射温度、喷射角度、冷却介质、回转速度等诸多工艺参数对丝材成型性以及微观组织形态的影响, 通过工艺优化获得最优的丝材; 进一步研究丝材的后续处理工艺, 获得尺寸精度更高, 性能均匀、稳定的优质丝材。

参考文献:

- [1] OHNAKA I, FUKUSAKO T, OHMICH T. Production of metal filament by in rotating water spinning method[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1981, 45(7): 751-758
- [2] INOUE A, TOMIOKA H, MASUMOTO T. Microstructure and mechanical properties of metastable fcc phase wires in MnAlC system manufactured by in rotating water spinning method[J]. Metallurgical transactions A, 1983, 14(11): 2319-2327.
- [3] TUNCER N, SCHUH C A. Melt-cast microfibers of Cu-based shape memory alloy adopt a favorable texture for superelasticity[J]. Scripta materialia, 2016, 117(5): 46-50.
- [4] 王建民, 陈翌庆, 许云祥, 等. 用回转水纺丝法制备 Cu-Al-Ni 形状记忆合金细丝[J]. 新技术新工艺, 1995(5): 24-25.
WANG J M, CHEN Y Q, XU Y X, et al. Cu-Al-Ni shape memory thin round wires produced by in rotating water spinning method[J]. New technology & new process, 1995(5): 24-25.
- [5] OCHIN P, DEZELLUS A, PLAINDOUX P, et al. Shape memory thin round wires produced by the in rotating water melt-spinning technique[J]. Acta materialia, 2006, 54(7): 1877-1885.
- [6] AMIRABADIZADEH A, LOTFOLLAHI Z, ZELATI A. Giant magnetoimpedance effect of $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorphous wire in the presence of magnetite ferrofluid[J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2016, 415(10): 102-105.
- [7] AMIRABADIZADEH A, RASOULI M R, SARHADDI R, et al. The effect of crossed configuration on giant magneto-impedance properties of cobalt-based amorphous wires[J]. Journal of superconductivity and novel magnetism, 2016, 29(6): 1-8.
- [8] INOUE A, TOMIOKA H, MASUMOTO T. Microstructure and mechanical properties of Fe-Ni-Cr-Al steel wires produced by in-rotating-water spinning method[J]. Metallurgical transactions A, 1985, 16(2): 215-226.
- [9] INOUE A, CHEN H S, KRAUSE J T. Young's modulus of Fe-, Co-, Pd- and Pt-based amorphous wires produced by the in-rotating-water spinning method[J]. Journal of materials science, 1983, 18(9): 2743-2751.
- [10] MASUMOTO T, OHNAKA I, INOUE A, et al. Production of Pd-Cu-Si amorphous wires by melt spinning method using rotating water[J]. Scripta metallurgica, 1981, 15(3): 293-296.
- [11] 黄炳醒, 邓德国, 于建. 淬火速度及冷加工与 Pd-Si-Cu 金属玻璃结构弛豫谱之关系[J]. 贵金属, 1986, 7(4): 31-37.
HUANG B X, DENG D G, YU J. The relation of quenching velocity and cold working to structural relaxation spectrum of Pd-Si-Cu metal glass[J]. Precious metals, 1986, 7(4): 31-37.
- [12] 廖中尧, 郑福前. Pd-Si 系非晶态合金的性能与应用[J].

- 贵金属, 1983, 4(1): 19-22.
- LIAO Z R, ZHENG F Q. Properties and applications of Pd-Si amorphous alloys[J]. Precious metals, 1983, 4(1): 19-22.
- [13] 俞志中, 冯本政, 冯平义, 等. 非晶态 Pd-Si 和 Pd-Ni-Si 合金的电子结构[J]. 贵金属, 1984, 5(3): 20-24.
- YU Z Z, FENG B Z, FENG P Y, et al. The electronic structure of amorphous alloys Pd-Si and Pd-Ni-Si[J]. Precious metals, 1984, 5(3): 20-24.
- [14] 金澜. 回转水纺丝工艺及其在铝合金线材制备中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- JIN L. In rotating liquid spinning process and its application to Al alloy wire preparation[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.
- [15] 王建民, 陈翌庆, 许云祥, 等. 孔径对回转水纺丝法直接成形细丝的影响[J]. 铸造技术, 1994(6): 35-38.
- WANG J M, CHEN L Q, XU Y X, et al. Effect of the orifice diameter on thin wires cast directly by in rotating water spinning method[J]. Foundry technology, 1994(6): 35-38.
- [16] 金澜, 疏达, 王俊, 等. 回转水纺丝工艺研究与应用[J]. 材料导报. 2006, 20(2): 70-73.
- JIN L, SHU D, WANG J, et al. Review of in rotating water spinning process[J]. Materials review, 2006, 20(2): 70-73.
- [17] 王建民, 陈翌庆, 许云翔, 等. 喷射速度对回转水纺丝法制备 Fe-Si-B 合金细丝成丝性的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1995, 18(1): 106-110.
- WANG J M, CHEN Y Q, XU Y X, et al. Effects of the ejection velocity on the forming ability of wires of Fe-Si-B alloys by in rotating water spinning method[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 1995, 18(1): 106-110.
- [18] 王建民. 入射角对回转水纺丝法直接成形细丝的影响[J]. 铸造技术, 1996(6): 33-35.
- WANG J M. Effect of the incidence angle on the thin wires cast directly by in-rotating-water-spinning method[J]. Foundry technology, 1996(6): 33-35.
- [19] 许云翔, 王建民, 陈翌庆. 喷射距离对回转水纺丝法取 Fe-Si-B 合金细丝成丝性的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1993, 16(2): 68-72.
- XU Y X, WANG J M, CHEN Y Q. The ejection distance effects on the ability to form wires of Fe-Si-B alloy by in-rotating-water spinning method[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 1993, 16(2): 68-72.
- [20] HAGIWARA M, INOUE A, MASUMOTO T. Mechanical properties of Fe-Si-B amorphous wires produced by in rotating water spinning method[J]. Metallurgical transations A, 1982, 13(3): 373-382.

《贵金属》(Precious Metals) 期刊简介

《贵金属》创刊于 1980 年, 为中国有色金属学会和昆明贵金属研究所共同主办的、国内外公开发行的学术季刊。其学风严谨, 视野远阔, 是中国乃至全球唯一的全面报道贵金属 8 个元素科技成果的学术刊物。

《贵金属》期刊主要报道内容包括贵金属 (Pt、Pd、Rh、Ir、Os、Ru、Au、Ag) 在冶金、材料、化学、分析测试等科技领域的研究论文、综合评述。

《贵金属》期刊被中国知网、万方、维普等主要检索数据库全文收录, 是美国化学文摘 (CA)、英美金属学会金属文摘 (MA)、美国剑桥科技文摘 (CSA) 等的文献源期刊。

《贵金属》为中文核心期刊 (PKU)、中国科技核心期刊 (ISTIC)、中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊。

《贵金属》影响因子一直位于国内同类期刊前列 (见附表), 是国内外贵金属科技人员的重要参考资料来源。

附表: 2010-2015 年《贵金属》期刊主要评价指标

评价年份	总被引频次	影响因子	影响因子排名	他引率	基金论文比
2015	313	0.608	10	0.66	0.73
2014	352	0.872	3	0.69	0.59
2013	360	0.508	8	0.71	0.65
2012	315	0.420	10	0.59	0.61
2011	317	0.762	3	0.75	0.57
2010	296	0.681	6	0.79	0.55

[数据来源: 中国科学技术信息研究所 《中国科技期刊引证报告(核心版)》2011~2016 年版]

[影响因子排名: 在材料科学类/金属材料类期刊中的排名]