

氢等离子体电弧熔炼技术在难熔金属提纯中的应用

李国玲^{1,3}, 田 丰², 李 里³, 田文怀¹, 李星国³

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 北京有色金属研究院, 北京 100088)

(3. 北京大学, 北京 100871)

摘 要: 本文主要对氢等离子体电弧熔炼技术在难熔金属提纯方面的应用进行了综述。介绍了等离子体电弧炉的原理与结构, 重点讨论氢等离子体电弧熔炼技术在难熔金属提纯方面的优势, 最后阐述了 H₂ 在熔炼提纯中发挥的作用和机理。

关键词: 氢等离子体电弧熔炼; 金属; 提纯

中图分类号: TF841

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)03-0775-06

高纯金属主要用于电子化工材料和特殊合金材料。随着大规模集成电路的发展及航空航天工业的迅速腾飞, 对高强高导高纯金属需求量大幅增加, 性能和质量要求越来越高。高纯、超高纯金属的制备在现代材料科学和工程中变得越来越重要, 已成为制约特定材料应用领域发展的关键技术^[1,2]。

超高纯金属的制备方法主要包括真空蒸馏法、电弧熔炼法、电子束熔炼、电迁移法、区域熔炼法和电解精炼法等^[3-7]。每种方法各有长短, 在具体应用中需选择合适的提纯技术。例如真空蒸馏法局限较大, 只用于提纯熔点附近蒸气压较高的金属^[8]; 电子束熔炼法提纯效果较好, 但是真空熔炼过程中样品挥发较大, 回收率低; 电迁移法和熔盐电解精炼法工艺流程长, 提纯过程中金属被污染的风险大^[9-12]。等离子体电弧熔炼技术是单质提纯和脱气的有效方法^[13], 步骤简单, 在材料合成与提纯中有广泛的应用。为获得高纯金属, 有效除去难以分离的杂质, 有时需要添加辅助方法配合使用。氢等离子体电弧熔炼技术(hydrogen plasma arc melting, HPAM)的基本原理是在等离子体气氛中加入少量 H₂, 利用氢气较高的还原性来增强提纯效果, 该方法近年来已被用来提纯钛、铜、钨、钼、钎等金属和合金。本文在论述等离子体电弧炉的工作原理与结构的基础上, 重点对比氢等离子体电弧熔炼技术的提纯优势, 最后论证 H₂ 在熔炼提纯过程中发挥的重要作用。

1 等离子体电弧炉的基本原理与结构

收稿日期: 2014-03-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”计划(2012CBA01207)

作者简介: 李国玲, 女, 1989年生, 博士生, 北京科技大学材料物理与化学系, 北京 100083, 电话: 010-62333934, E-mail: liguoling77@163.com

等离子体电弧熔炼炉(plasma arc melting furnace)于 20 世纪 60 年代发展起来^[14]。它是利用气体电离所产生的等离子体的能量进行加热的一种电炉, 可以用来熔炼钛、钨、钼等难熔金属和合金, 在航空、军工、能源、化工等领域的材料研发中起着重要作用。

等离子体电弧熔炼炉的基本原理是利用电极和原料之间产生集中和可控稳定化的等离子弧作为热源来熔化和精炼金属。等离子体是不同于气体、液体、固体的物质第四态, 是分布于中性粒子气体中的电子与离子的混合物^[15]。它具有高的导电性、热容量和导热性。等离子弧是一种压缩弧, 能量集中, 弧柱细长, 温度通常为 2000~5000 K。等离子熔炼可以有效地控制炉内气氛, 最常用的惰性气体是氩气, 根据不同的需要可更换炉内气氛以实现特殊金属或合金的熔炼。

等离子体电弧熔炼炉主要结构分为炉体、主电源、真空系统、水冷系统等, 如图 1 所示。熔炼的基本过程包括: (1) 样品准备与腔室抽真空; (2) 氩气作电离气体产生等离子体; (3) 样品熔炼和合金化; (4) 水冷铜坩埚中凝固。

2 氢等离子体电弧熔炼炉在金属提纯中的应用

等离子体电弧熔炼技术作为一种实用有效的熔炼方法, 被广泛应用于金属提纯和合金化^[16-19]。在很多研究中, Ar (>99.9995%)作为电离气体产生等离子体,

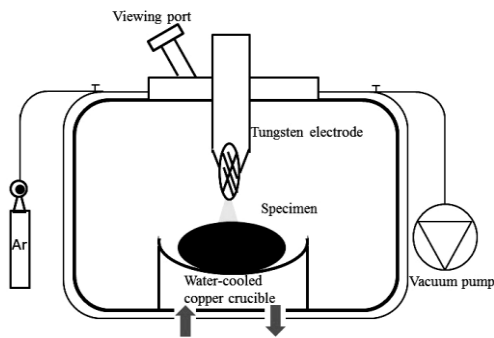


图 1 等离子体电弧熔炼炉结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of plasma arc melting furnace

但是并没有产生明显的提纯效果^[20,21], 然而在氩气等离子体气氛中加入 H₂ (>99.9999%)之后, 金属中的杂质含量大幅降低, 提纯效果有明显改善。据报道 Ar-H₂ 电弧熔炼技术可以降低 Cu、Fe 和 Mo 中的非金属杂质含量^[22-24], 并且能去除 Zr、Ti、Hf 和 Ta 中的金属杂质^[20,21,25-28]。根据现阶段研究进展, 本文主要对钛、锆、钽、铬、钼的提纯效果进行论述。

样品的提纯效果以杂质元素的去除率来表示, 用下式(1)计算:

$$RD(\%) = 100(C_i - C_f) / C_i \quad (1)$$

式中, C_i 和 C_f 分别表示该杂质元素起初和最终的成分含量。为了进一步研究等离子体熔炼对提纯的影响, 可以计算样品中多种杂质元素 RD(%)的平均值, 如下式所示

$$RD_{av}(\%) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m RD \quad (2)$$

式中, m 是杂质元素的数量, 金属元素采用辉光放电质谱法(glow discharge mass spectrometry, GDMS)进行

定量分析, 非金属元素可采用惰气脉冲热导红外法进行分析。

2.1 HPAM 制备高纯钛金属

钛是一种综合性能优异的金属, 工业海绵钛的纯度一般高于 99.7%, 主要杂质为 Fe、Al、Si、Ni。为了比较 PAM 和 HPAM 对海绵钛不同的提纯效果, 实验过程中采用相同的功率和熔炼时间。在 Kouji Mimura 的实验中, 电弧功率设为 4.3 kW, 熔炼 40 min, 提纯结果如表 1 所示^[21]。数据显示, 在纯 Ar 等离子体气氛中熔炼后, 样品纯度最高可达 99.98%, 杂质平均去除率 RD_{av}(%)为 51.1%; 在 Ar+20%H₂ 中熔炼相同时间, 样品最终纯度为 99.9938%, 杂质平均去除率 RD_{av}(%)为 84.8%。等离子体电弧熔炼技术对钛有一定的提纯作用, 尤其在等离子体气氛中加入 H₂ 后除杂率明显提高, 样品纯度也更高。

氢等离子体电弧熔炼对钛合金中的氧也有明显的去除效果。Ti-6Al-4V 合金在不同氢气含量的等离子体氛围中熔炼, 最终氧含量如表 2 所示^[29]。从数据中可以判断, H₂ 对 Ti 合金起到一定的除氧作用, 并且在 H₂ 含量为 10%时效果最优。

V. Vassileva 采用电子束熔炼(electron beam melting, EBM)的方法, 可获得 99.9%的钛金属单质, 其中 Al 含量 0.05%, 氧含量 0.04%, 杂质含量远高于 HPAM 的熔炼效果^[30]; K. Vutova 也曾通过理论计算结合实验的数据得出电子束熔炼的最优工艺参数, 杂质金属 Fe 和 Al 含量均大于 0.03%, 氧含量最低为 0.03%, 并且发现氧元素主要以杂质金属氧化物和基体氧化物的形式挥发出去, 除氧效果随熔炼时间的增加而提高, 但同时材料损失也会增大, 给提纯工作带来困扰^[31]。针对此类问题, 电弧熔炼的方法在氩

表 1 熔炼前后钛中的金属杂质含量

Table 1 Concentration changes of metallic impurities in the Ti samples undergoing HPAM (× 10⁻⁶)^[21]

Refining method	Fe	Al	Cl	Mn	Si	Cu	Ni	As	V	Cr	Cd	S	Pb	Zn	Sn	Sum	RD _{av} /%	Purity/%
Starting Ti	210	77	63	35	7	5	3	2	2	2	1	1	0.8	0.5	0.5	409.8		99.9590
PAM(Ar)	124	50	2	12	3	3	2	0.2	2	0.8	0.2	0.2	0.7	0.4	0.02	200.5	51.1	99.9800
HPAM(Ar+20%H ₂)	26	26	0.8	0.8	2	1.4	1	0.2	2	0.8	0.2	0.8	0.2	0.15	0.06	62.4	84.8	99.9938

表 2 不同 H₂ 含量的等离子体 Ar 气中熔炼的 Ti-6Al-4V 合金的氧含量变化

Table 2 Variation of oxygen content in the Ti-6Al-4V alloy remelted in Ar with different H₂ contents^[29]

H ₂ content in Ar/%	Oxygen content, ω/%
As received alloy	0.12
Remelted in H ₂ (1%)/Ar gaseous	0.099
Remelted in H ₂ (10%)/Ar gaseous	0.028
Remelted in H ₂ (20%)/Ar gaseous	0.045
Remelted in H ₂ (30%)/Ar gaseous	0.043

气氛围中操作, 能有效的抑制挥发; 并且加入少量氢气效果更明显, 主要杂质元素铁和铝均降到 0.0026%左右^[21], 最终获得高纯钛金属。

2.2 HPAM 制备高纯锆金属

锆纳米薄膜领域对材料的成分含量要求极高, 杂质会影响到材料的性质和稳定性, 因此除杂成为重要的制备阶段。Seong-Whan Lee 曾使用电子束熔炼的方法从锆锡废料合金中提纯锆金属单质, 最终有 0.18%

的 Sn 残留在锆中，Fe 和 Ni 等杂质含量 >0.01%^[32]。Kouji Mimura 利用 HPAM 进一步提纯锆，最终 Sn 含量为 0.0093%，Fe 和 Ni 含量 <0.0005%^[20]。通过研究锆合金中杂质的迁移机制，发现含氢量增加时，杂质去除速度加快，最终杂质含量越低。随着实验参数进一步优化，目前 HPAM 可制得超高纯度的锆，一般 99.9% 的锆金属在熔炼 60 min 后纯度可高于 99.99%，杂质平均去除率 88%。主要杂质的去除效果如图 2^[33]。

由图 2 可看出，在 Ar 氛围中杂质的去除速率缓慢，在等离子气氛中加入 H₂ 后杂质含量明显下降，并且通入 H₂ 量增大时，除杂效果更好。锆金属在 6 kW 熔炼 60 min 后主要杂质含量分析结果如表 3^[34]。

从 GDMS 测量数据显示，在 Ar 和 H₂ 混合气体中熔炼后的金属除杂率比纯 Ar 中高，并且蒸汽压高的金属杂质更容易除去，其中 Mg、Mn、Cu 最终的含量小于 0.01 × 10⁻⁶，Al 和 Fe 含量低于检测极限。

2.3 HPAM 制备高纯钽金属

钽金属具有极高的抗腐蚀性，目前被广泛地应用在集成电路等高科技领域，纯度要求很高，尤其是 Na、Fe、U 含量需降至 ×10⁻⁶ 级以下以确保在应用中的高性能。

真空电子束熔炼对钽金属有一定提纯作用，除杂的

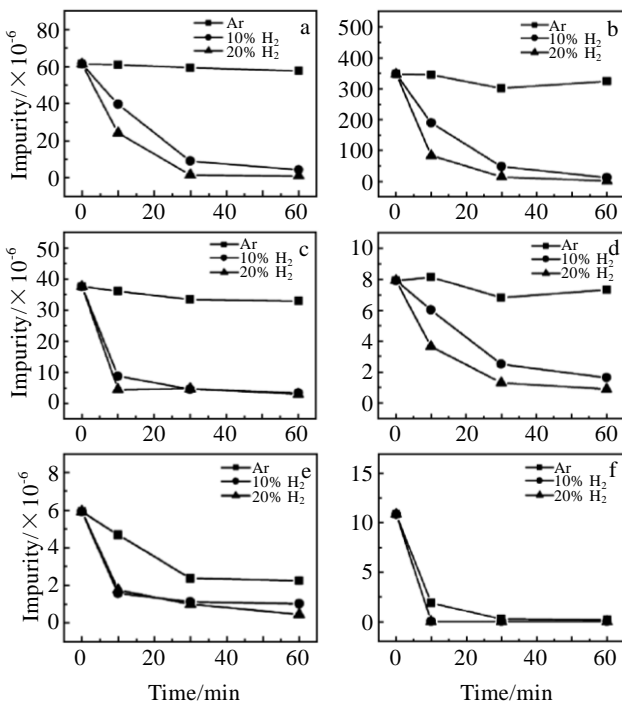


图 2 在不同氢含量的等离子体气氛中锆的主要杂质含量随时间的变化图

Fig.2 Melting time dependence of main impurity concentrations in Zr metal under different H₂ contents in the plasma gas: (a) Al, (b) Fe, (c) Cr, (d) Ni, (e) Cu, and (f) Mn^[33]

表 3 熔炼前后锆中的金属杂质含量及平均去除率
Table 3 Concentration changes of metallic impurities in the Zr samples before and after HPAM and the average removal degrees of the impurities^[39]

Element	Initial / ×10 ⁻⁶	After melting/ ×10 ⁻⁶	
		Ar	Ar+20% H ₂
Mg	0.897	0.006	0.002
Al	69.0	-	-
Si	5.86	4.1	2.79
Ti	7.03	4.97	0.939
Cr	38.4	25.1	1.53
Mn	5.09	1.41	0.002
Fe	305	156	-
Ni	6.85	3.8	2.73
Cu	2.75	1.74	0.0042
<i>RD_{av}</i> / %		49.5	87.9

Note: “-” means the value was lower than detection limit

机理是利用杂质元素与基体的蒸气压不同，在熔炼过程中通过挥发去除，这样难免造成样品的损失，而且熔炼过程操作复杂，杂质偏析没有规律性^[31]。Good-Sun Choi 曾用电子束熔炼的方法获得最纯的 Ta 为 99.9991%，然而提纯过程中由于样品挥发严重，失重率高达 16%^[35]。与电子束熔炼相比，等离子体电弧熔炼技术最大的优点是主体金属的蒸发损失小^[3]。Jae-Won Lim 用纯度为 99.9664% 的原材料在 Ar-PAM 中熔炼 60 min，获得纯度为 99.9995% 的 Ta；在 Ar+20% H₂ 中熔炼同样时间得到 Ta 纯度为 99.99972%^[36]，氢等离子体电弧表现出更优的提纯效果。从图 6 中可看出大部分的金属杂质的蒸气压比 Ta 高，因此电弧熔炼对钽提纯效果非常显著^[28]，Na、Al、Fe、Ti、Th、U 等杂质的含量均小于 0.1 × 10⁻⁶，更有少部分杂质含量达到 ×10⁻⁹ 级。

Ar 氛围中加入 H₂ 同时有效地降低了钽中氧的含量，如图 3 所示^[36]。样品中的初始 O 含量为 789 × 10⁻⁶，熔炼 60 min，在 Ar 中熔炼后检测为 300 × 10⁻⁶；在 Ar+10% H₂ 和 Ar+20% H₂ 中分别为 11.9 × 10⁻⁶ 和 3.8 × 10⁻⁶。Good-Sun Choi 用电子束熔炼的方法得到氧含量为 25 × 10⁻⁶。EBM 中脱氧反应如化学式 (3) 所示，氧元素以气态氧化物形式去除^[35]，样品损失较严重。相比较而言，HPAM 中除氧反应如化学式 (4) 所示，脱氧过程更容易进行，样品基本无损失，效果明显。



2.4 HPAM 在提纯非金属杂质中的应用

商业用的高纯金属材料一般会附有质量分析报告，但是气体杂质的含量通常不包含在内。许多高纯金属作为真空溅射的源材料以及真空腔室的脱气剂，气体杂质含量高会严重影响其性能，因此如何有效地降低

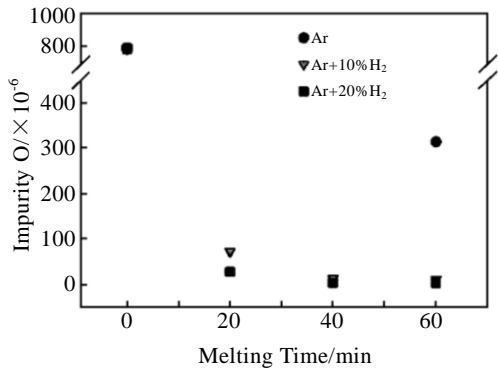
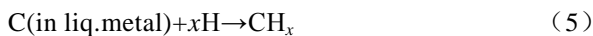


图 3 不同 HPAM 熔炼条件下 Ta 金属中 O 含量随熔炼时间的变化

Fig.3 Concentration change of impurity O in Ta metals refined by Ar/Ar-H₂ PAM as a function of melting time^[36]

金属内气体杂质含量非常重要。HPAM 对 Mo、Cu、Fe 和 Co 都表现出良好的脱气作用^[24,27,37,38]。Kouji Mimura 在氩等离子体电弧熔炼中通入少量的 H₂，提高了氧元素在铁和钴中的迁移率，氧杂质含量分别降至 2×10⁻⁶ 和 5×10⁻⁶ 以下^[38]。对纯度为 99.999% 的商业用铁进行二次离子质谱(secondary ion mass spectrometry, SIMS)分析，结果如图 4 所示。由图 4 可知，在氢等离子体熔炼之后，与 O、N 有关的峰的数量和强度都明显减少^[27]。Jae-Won Lim 将这种方法应用到提纯 Mo 金属中，也取得了较好的效果，图 5 给出了不同含氢量情况下 C、N、O 含量的变化曲线^[24]。如图所示，杂质含量随着 H₂ 含量的增加而降低。初始 C、N、O 含量分别为 13.5, 4.7 和 21.7×10⁻⁶，在纯 Ar 氛围中熔炼 20 min 后含量分别为 10.3, 2.5 和 17.6×10⁻⁶；在 Ar+20%H₂ 氛围中分别降为 3.1, 2.1 和 2.2×10⁻⁶。HPAM 优越的除气效果可用 H₂ 的还原反应(4-6)来解释。



此后 Kouji Mimura 根据杂质元素在基体中的平衡分配系数的不同，利用区域熔炼的方法使非金属杂质在材料中发生偏析达到分离的目的，例如稀土金属铈、镧，在区域熔炼之后，铈中的 O、N、C、S 聚集在金属棒的始端，镧中的 O、N 也主要分布在始端^[39]，铬中 C、N、O 则偏聚尾端^[40]。

G. M. Lalev 以 99.99% 的铜金属为原材料，杂质总含量为 18.685×10⁻⁶，经氩等离子体区域熔炼之后始端杂质含量降到 5.424×10⁻⁶，主要杂质元素发生偏析聚集到末端^[41]。将少量的氢通入到氩气氛围的反应腔室中，发现提纯效果更明显，非金属杂质总含量 4.2×10⁻⁶，C、O、S 偏聚到铜棒的尾端，与氢原子发生反应，最

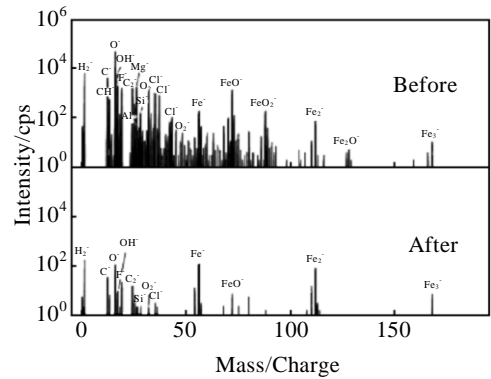


图 4 纯铁在熔炼前与熔炼后的 SIMS 图谱

Fig.4 Negative SIMS spectra of pure iron before and after melting^[27]

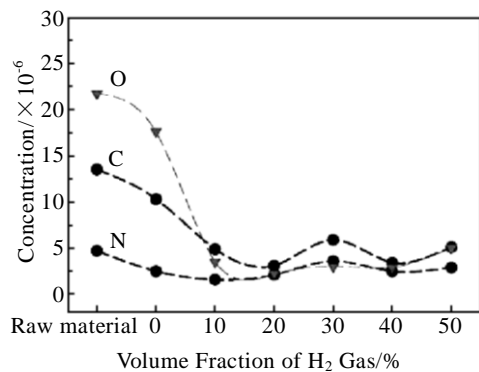


图 5 Mo 金属中气体杂质含量变化

Fig.5 Concentration change of gaseous impurities in the Mo Metals^[24]

终以 CH₄、H₂O、H₂S 的形式挥发^[37,42]，杂质在整个样品中的平均含量下降。

3 金属纯化原理分析与讨论

HPAM 显著的提纯效果究其原因可分为两大部分：1) 氢气的加入在熔炼中发挥了重要作用；2) 杂质元素本身的性质不同，去除率各不相同。

根据式(7)：



在高温(5000 K)时 H₂ 的分解率为 95%，氢以原子态存在，分解和激化了的氢原子在提纯熔融的金属过程中发挥着尤为重要作用^[19,43]。首先氢原子具有极高的还原性，可以与杂质在金属表面发生化学反应，对难熔金属的提纯具有良好的脱氧和脱氮效果，见反应式(4)、(6)。其次氢等离子体热导率高，提高了熔融金属表面温度^[44,45]，纯物质中的过饱和杂质通过热力学传输在液相中发生迁移^[46]。此外，在等离子气体相-熔融金属界面的气体相界层，熔融金属表面飞溅出的

高蒸气压杂质与活性氢瞬间结合, 加快了杂质从相界面层向气体相的移动, 从而达到提纯金属的效果^[4]。

金属元素具有不同的蒸气压, 如图6所示。蒸气压高的杂质元素在电弧熔炼的过程中更容易挥发, 率先与氢原子发生动力学交互作用进入气体相, 达到提纯的目的。杂质元素蒸气压比主体金属蒸气压越高, 去除率相对越大, 该类杂质最终含量也越低, 例如Mo中的Mn含量可降至 0.001×10^{-6} ^[24], 高纯Ta中的Ca含量约 0.056×10^{-6} ^[28]。

此外, 由于电弧温度极高(>2000 K), 金属氢化物在主体金属熔点前已完全分解, 例如TiH₂分解温度680 °C^[47,48], ZrH₂分解温度800 °C^[49], 因此在氢等离子体熔炼中, 氢可以过饱和地溶入熔融金属内, 又容易从熔融金属释放, 不会对主体金属产生二次污染, 并且通过氢的这种过饱和溶解-释放可获得促进搅拌的效果。

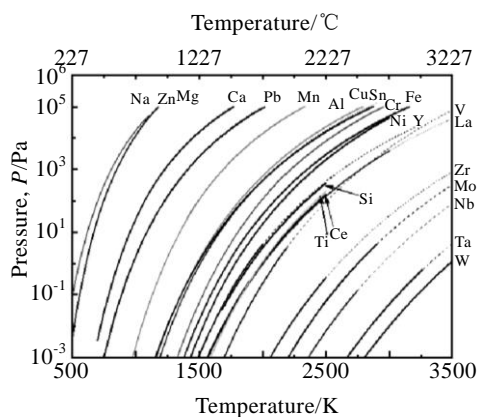


图6 不同物质蒸气压随温度的变化曲线

Fig.6 Vapor pressures of different metals as a function of Temperature^[24,28]

4 结 语

等离子体电弧熔炼技术对Ti、Zr、Ta、Mo等金属具有较好的纯化作用, 并且在氩气氛围中通入适量氢气后, 提纯效果更加显著, 同时体现出较好的脱氧、脱碳及脱氮效果。氢等离子体电弧熔炼技术的主要优点包括: (1) 熔炼过程中气体电离所产生的等离子体具有极高的能量, 能迅速融化主体金属; (2) 分解了的氢原子反应活性强, 对金属纯化起到促进作用; (3) 熔炼过程在保护气氛中进行, 减少了样品氧化和挥发带来的损失。氢等离子体电弧熔炼技术有望在更多的金属提纯工艺中得到广泛的应用。

参考文献 References

- [1] Yang Hexiang(杨合湘). *China Economic and Trade Herald*(中国经贸导刊)[J], 2004, 4: 31
- [2] Zheng Xin(郑欣), Bai Run(白润), Wang Donghui(王东辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(10): 1871
- [3] Winkler O. *Vacuum Metallurgy*(真空冶金学)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 1982: 350
- [4] Guo Xueyi(郭学益), Tian Qinghua(田庆华). *High-Pure Metallic Materials*(高纯金属材料)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 18
- [5] Shi Jie(石洁), Lou Chao(罗超), Zhang Xinjian(张新建) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(4): 833
- [6] Shi Jie(石洁), Luo Chao(罗超), Wang Huaisheng(王怀胜) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(S1): 418
- [7] Wang Bin(王斌), Liu Kuiren(刘奎仁), Chen Jianshe(陈建设). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(11): 2014
- [8] Zhang Xiaoqin(张小琴), Jiang Yinju(姜银举), Dai Qing(代清). *Science and Technology of Baotou Steel (Group) Corporation*(包钢科技)[J], 2007, 33(3): 17
- [9] Suzuki R O, Aizawa M, Ono K *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 1999, 288(1): 173
- [10] Suzuki R O, Inoue S. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*[J], 2003, 34(3): 277
- [11] Li Qingyu(李晴宇), Du Jihong(杜继红), Xi Zhengping(奚正平). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(S3): 390
- [12] Zhang Changzai(张常在), Li Guodong(李国栋), Yun Yuehou(云月厚). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(5): 736
- [13] Wang Daolong(王道隆). *Rare Metals Handbook*(稀有金属手册)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 927
- [14] Fu Jie(傅杰). *Iron and Steel*(钢铁)[J], 2003, 38(6): 70
- [15] Zhou Candong(周灿栋), Jiang Guochang(蒋国昌). *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报)[J], 2000, 18: 356
- [16] Uchikoshi M, Imai K, Mimura K *et al. Journal of Materials Science*[J], 2008, 43(16): 5430
- [17] Lim J W, Kim M S, Munirathnam N R *et al. Materials Transactions*[J], 2008, 49(8): 1826
- [18] Godfrey B, Loretto M H. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 266(1-2): 115

- [19] Hirose A, Hasegawa M, Kobayashi K F. *Materials Science and Engineering A*[J], 1997, 240: 46
- [20] Mimura K, Lee S W, Isshiki M. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 1995, 221: 267
- [21] Mimura K, Lim J W, Oh J M *et al.* *Materials Letters*[J], 2010, 64: 411
- [22] Lalev G M, Lim J W, Munirathnam N R *et al.* *Materials Characterization*[J], 2009, 60(1): 60
- [23] Elanski D, Lim J W, Mimura K *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2006, 421(1-2): 209
- [24] Lim J W, Mimura K, Miyawaki D *et al.* *Materials Letters*[J], 2010, 64 (21): 2290
- [25] Bae J W, Lim J W, Mimura K *et al.* *Materials Letters*[J], 2006, 60(21-22): 2604
- [26] Mimura K, Matsumoto K, Isshiki M. *Materials Transactions* [J], 2011, 52(2): 159
- [27] Isshiki M, Mimura K, Uchikoshi M. *Thin Solid Films*[J], 2011, 519(24): 8451
- [28] Elanski D, Mimura K, Ito T *et al.* *Materials Letters*[J], 1997, 30(1): 1
- [29] Su Y, Wang L, Luo L *et al.* *International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2009, 34(21): 8958
- [30] Vassileva V, Mladenov G, Vutova K *et al.* *Vacuum*[J], 2005, 77(4): 429
- [31] Vutova K, Vassileva V, Koleva E *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(8): 1089
- [32] Lee S W. *Material Resources Institute*[C]. Tokyo: Tohoku University, 1990: 48
- [33] Lim J W, Mimura K, Isshiki M *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2005, 40(15): 4109
- [34] Elanski D, Lim J W, Mimura K *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2006, 413(1-2): 251
- [35] Choi G S, Lim J W, Munirathnam N R *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 469(1-2): 298
- [36] Lim J W, Choi G S, Mimura K *et al.* *Metals and Materials International*[J], 2008, 14(4): 539
- [37] Lalev G M, Lim J W, Munirathnam N R *et al.* *Materials Transactions*[J], 2009, 50 (3): 618
- [38] Mimura K, Saito K, Isshiki M. *Journal of the Japan Institute of Metals*[J], 1999, 63(9): 1181
- [39] Mimura K, Sato T, Isshiki M. *Journal of Materials Science*[J], 2008, 43 (8): 2721
- [40] Mimura K, Komukai T, Isshiki M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 403(1-2): 11
- [41] Lalev G M, Lim J W, Munirathnam N R *et al.* *Metals and Materials International*[J], 2009, 15(5): 753
- [42] Zhu Y F, Mimura K, Ishikawa Y *et al.* *Materials Transactions* [J], 2002, 43(11): 2802
- [43] Waseda Y, Isshiki M. *Purification Process and Characterization of Ultra High Purity Metals*[M]. Berlin: Springer, 2002: 182
- [44] Elanski D, Lim J W, Mimura K *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2007, 439(1-2): 210
- [45] Elanski D, Mimura K, Isshiki M. *Vacuum*[J], 1996, 47(6-8): 845
- [46] Barin O, Wilhelmi H, Barin I. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*[J], 1991, 11(40): 545
- [47] Hong Yan(洪 艳), Qu Tao(曲 涛), Shen Huasen(沈化森) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2007, 31(3): 311
- [48] Cui Changjun(崔昌军), Peng Qiao(彭 乔). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(12): 1011
- [49] Zhang Heng(张 恒), Shen Huasen(沈化森), Che Xiaokui(车小奎) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2011, 35(3): 417

Application of Hydrogen Plasma Arc Melting Technique on Refining Refractory Metals

Li Guoling^{1,3}, Tian Feng², Li Li³, Tian Wenhui¹, Li Xingguo³

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. General Research Institute of Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

(3. Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The refining effect of hydrogen plasma arc melting (HPAM) on refractory metals has been summarized. The structure and principle of a plasma arc melting furnace were introduced and the advantages of HPAM on refining of refractory metals were also discussed. At last H₂ involved in the plasma arc melting are considered to play an important role in the melting process.

Key words: hydrogen plasma arc melting; metal; purification

Corresponding author: Tian Wenhui, Ph. D., Professor, Department of Materials Physics and Chemistry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62333934, E-mail: wenhuaitian@ustb.edu.cn