

高纯铁的制备技术研究进展

刘铭阳, 梁精龙*

(华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘要:综述了国内外生产制备高纯铁的制备工艺,如溶液萃取法、离子交换法、熔盐电解法、电磁悬浮熔炼法和直接熔炼还原法等,并对未来生产高纯铁的趋势和挑战进行了讨论,旨在寻找一种经济、环保的高纯铁生产路线。

关键词:高纯铁;火法冶金;湿法冶金;电化学冶金

中图分类号:TF591

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)05-0032-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.006

Research progress on preparation technology of high-purity iron

LIU Ming-yang, LIANG Jing-long*

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: This paper summarizes existing domestic and international processes for producing high-purity iron, such as solution extraction, ion exchange, molten salt electrolysis, electromagnetic suspension melting, and direct smelting reduction methods, and discusses future trends and challenges in its production. The aim is to identify an economical and environmentally friendly production route for high purity iron.

Key words: high-purity iron; pyrometallurgy; hydrometallurgy; electrometallurgy

高纯铁是指纯度高于 99.9% 的铁。20 世纪初以来,高纯铁成为世界广泛关注的课题^[1]。究其原因,随着高纯铁纯度的提高,其表现出出色的延展性和软磁特性^[2]。高纯铁被广泛应用于航空航天、电磁材料和军工材料等^[3]。

通常使用大写字母 N 来表示铁的纯度,例如 2N5 表示纯度为 99.5%。一般地,工业纯铁的纯度为 2N5-3N,高纯铁的纯度为 $\geq 3N$,超高纯铁的纯度为 $\geq 4N$ 。鉴于高纯铁中微量杂质的定量分析在技术上具有挑战性,研究者使用剩余电阻率($RRR_H = \rho_{298\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}}$,其中分子分母分别表示在 298 K 和 4.2 K 时的电阻率)来表示铁的纯度。当 $RRR_H \geq 50$ 时称为高铁, $RRR_H \geq 500$ 时可称为超高纯铁, RRR_H 的值越大,铁的纯度越高^[4]。

传统的高炉炼铁工艺只适用于生产工业纯铁,此工艺不仅耗能大且生产出的铁的纯度相对较低,再不能满足高科技领域的材料需求。所以研究如何高效、低耗能地制备高纯铁是有必要的。

1 高纯铁的基本性质及应用

研究和理解高纯铁的物理化学性质有利于铁基材料的发展。铁的本质特征只有在到达一定纯度时才会有所表现。所以要尽快提高铁的纯度,并研究

性质随纯度变化的关系。

1.1 高纯铁的物理化学特性

Kimura^[5]通过实验表明高纯铁的低温脆性和屈服应力的温度依赖性对杂质非常敏感,其在 4.2 K 时依然具有良好的韧性,但 $RRR_H \geq 5000$ 的高纯铁在低于 50 K 的温度下会出现穿晶断裂的现象,在 77 K 时表现出韧脆转变。

Abiko^[6]研究了 C、N、P 和 S 杂质元素对高纯铁性能的影响。常规的高纯铁在常温下的伸长率最高为 40%,Abiko 通过降低铁中的杂质元素来提升铁的纯度,制备出一种在常温引张实验伸长率超 45% 且在 800 K 以上高温引张实验中伸长率超 80% 的超高纯铁。

1.2 高纯铁的软磁特性

Fujita 等^[7]通过实验证明杂质元素 Al 和 S 含量越低,高纯铁的软磁特性越优秀。同时 Fujita 通过电子显微镜观察了析出物。在含有 Al 和 S 的材料中,由于细微析出物对晶界的钉扎效应,晶粒生长性能受到抑制,从而导致软磁特性下降,形成了结晶结构。这也同样说明获得良好软磁特性的最好方法是提高高纯铁的纯度。

1.3 高纯铁的应用

高纯铁作为重要的原料和材料,其纯度直接影

收稿日期:2025-07-18;修回日期:2026-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52274335);河北省科技计划项目 25364003D

作者简介:刘铭阳(2000-),男,硕士生;梁精龙(1979-),男,博士,教授,研究方向为固废回收利用,通讯联系人,ljl@ncst.edu.cn。

响产品的性能。Fe-Ni-Cr合金是高纯铁应用的典型案例,该合金优异的磁性特性被广泛地应用于电磁设备和精密仪器中。

传统的不锈钢材料、钴铬、镍和钛合金应用于骨修复和牙科组织重建等,这些材料虽然易于变形不易断裂,但它们对组织和细胞的亲和力低,且有可能引起金属过敏的现象。Khan等^[8]发现纯度为5N6

的超高纯铁与生物细胞有很高的相容性,能够促进动物细胞的附着和增殖,且不需要表面涂层。因此,高纯铁同样有应用于医学植入材料的潜力。

2 高纯铁制备的技术

制备高纯铁的工艺一般可分为火法冶金、湿法冶金和电化学冶金,图1为高纯铁的一般制备流程。

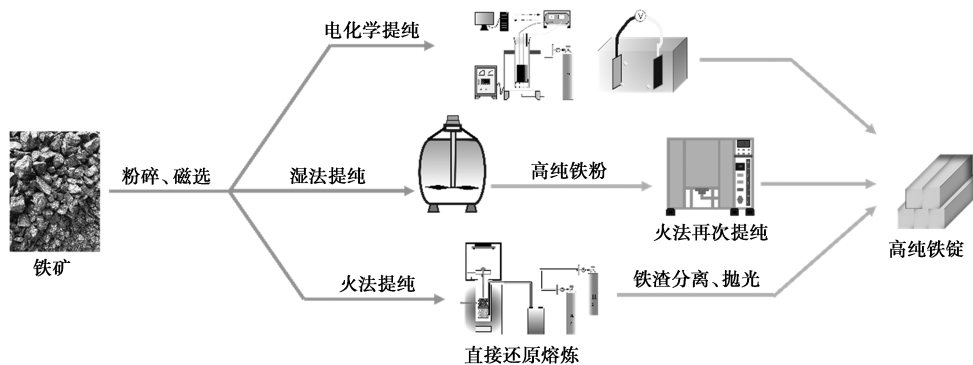


图1 高纯铁的一般制备流程

2.1 湿法制备

2.1.1 溶剂萃取法

溶剂萃取法也称萃取法,是一种分离和提取混合物中目标物质的化学过程,基本原理是利于不同物质在2种不相混溶的液体中溶解度的差异。该方法选择性高且能耗较低,但面对多种金属离子的溶液时,处理过程相对复杂。

Yu等^[9]使用离子液体1-己基-3-甲基咪唑六氟磷酸([Emim]PF₆)-邻重氮酚超声提取分离系统从铁尾矿中提取铁,萃取率达到了92.74%。但未对萃取过程中的杂质分离进行深入研究,可能影响回收铁的纯度。实验主要在实验室进行,未进行大规模工业应用验证,实际生产中的稳定性和成本效益需进一步考察。后续Hu等^[10]利用三烷基氧化膦(Cyanex 923)、异辛烷和磺化煤油的混合物作为萃取剂,对热浸镀锌过程产生的废酸洗液进行了铁和锌的同步提取分离,并验证了多级逆流萃取工艺的工业可行性,为中试和工业化湿法提取纯铁提供了指导。

2.1.2 离子交换法

离子交换法被广泛应用于分离和纯化溶液中离子的技术,利用离子交换树脂的选择性吸附性质来实现离子的分离。

Al-Anber等^[11]利用约旦天然沸石(JNZ)对水相中的Fe³⁺进行去除并研究了不同条件下的吸附性能,包括Fe³⁺溶液浓度、温度和时间的影响。实验

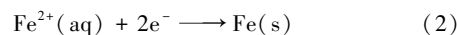
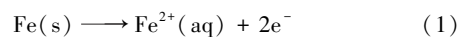
结果发现30℃、40 g/L的JNZ对Fe³⁺的提取效果最佳。

离子交换法和溶剂萃取法都是用于溶液提纯的工艺,但都无法直接获得高纯度金属。湿法冶金提纯主要通过电解工艺实现金属提取。在制备纯度超过6N的超高纯度铁时,单一纯化方法难以满足要求,必须组合使用物理化学提纯的多种工艺。

2.2 电化学法制备

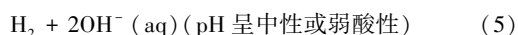
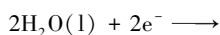
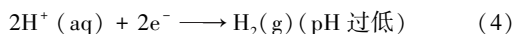
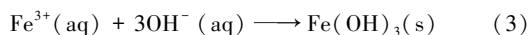
2.2.1 水溶液电解精炼

铁的电解通常在电解池中进行,阳极通常由低碳钢或工业纯铁制成,阴极一般是打磨后的不锈钢或者为惰性电极,例如钛合金板和铂片等。所用电解质一般为含Fe²⁺的水溶液,例如FeSO₄、FeCl₂溶液等。在阳极、阴极发生的反应一般为式(1)、(2)。



传统电解法制高纯铁^[12],以50 g/L的Fe²⁺溶液为电解液,pH为4,在25℃、100 A/m²作用下,得到纯度为3N8以上的高纯铁。类似地,何兵玉^[13]使用亚铁盐电沉积的方法制备高纯铁,阳极为惰性金属板,阴极为导电金属板,通过控制溶液的pH和温度并加以直流电,在经过一段时间的沉积,将阴极上的沉积物剥离便得到了纯度为3N5的高纯铁,但在研究过程中发现溶液中的Fe²⁺极易被氧化成Fe³⁺,Fe³⁺会与OH⁻发生反应生成沉淀附着在阴极表面影响Fe的生成,如式(3)所示。所以在此工艺中需要

控制溶液的 pH 来抑制 OH^- 的浓度,但若 pH 过低或呈中性和弱酸性会在阴极上发生析氢反应,反应式为(4)、(5)。气泡使得阴极产物表面变得粗糙,可能会导致溶液中的杂质离子在阴极聚集从而导致铁沉积的效率降低。



为了改善溶液中 Fe^{2+} 被氧化的问题,姜力强等^[14]在电解水溶液制备高纯铁的过程中加入铁粉来抑制 Fe^{2+} 的氧化,结果显示加入铁粉的抑制效果在 80% 以上。何兵玉^[13]在电解槽和预备罐(盛有硫酸的装置)间安装了电子控制装置,用来监测和维持溶液的 pH。二者的研究为后续电解含铁离子溶液的工艺提供了指导。

2.2.2 熔盐电沉积法

熔盐电沉积法利用熔融态的无机盐作为介质,在一定温度场和电场的作用下,含有所需沉积元素的物质在熔盐中发生化学反应,从而在基体上沉积出相应的物质层。该方法可生产出高纯度的金属,在实际生产中已得到广泛的应用^[15]。

上海大学邹星礼等使用废弃氯化物熔盐电沉积制备了纯铁^[16],实验装置如图 2 所示。将熔盐氯化生产 TiCl_4 工艺中产生的废弃氯化物熔盐破碎、筛分,使其在惰性气体保护下于 $700 \sim 850^\circ\text{C}$ 重熔净化 $1 \sim 24$ h,再研磨制成粉末,得到预熔盐粉末,加入一定量的 NaCl 和 CaCl_2 后进行升温熔融,在恒压电解 40 h 左右得到纯度理想的纯铁。同样地,李金键^[17]将 Fe_2O_3 和 CaO 按照 1:1.5 的质量比混合放入,在 CaCl_2 熔盐和 850°C 的环境中进行电解,最终得到的铁的纯度为 3N2。但二者的共同点在于阳极使用的为高纯碳棒,在电解过程中存在碳污染,使得相应的电流效率降低。找到新的价格低且能满足电解条件的电极尤为关键。

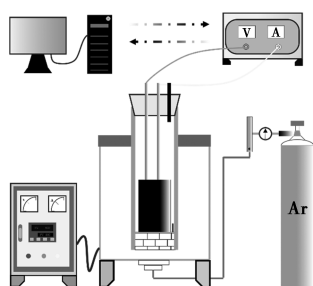


图 2 熔盐电解装置

Yin 等^[18]通过在 1600°C 和氩气环境下,将混合的镍、铜和铁粉浇注在氧化铝管中,制作成 $\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{11}\text{Fe}$ 合金阳极。尹华意分别使用铁丝电极、 Fe_2O_3 涂覆的铁丝电极和 $\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{11}\text{Fe}$ 合金电极进行了循环伏安法测试,使用铁丝电极通过 CV 测量定期检查 RE 的电位,发现在 CV 测量期间其稳定性是可接受的(1 h 内偏移约 20 mV)。接着使用 $\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{11}\text{Fe}$ 合金作为阳极,经过预处理的 Fe_2O_3 粉末作为阴极,在熔融 $\text{K}_2\text{CO}_3-\text{Na}_2\text{CO}_3$ 中进行恒压电解。所得的产物经过 XRD 检测结果表明,在恒压 1.9 V 电解 11 h 后,铁的形态为海绵状,电流效率达到了 95%,效果最佳。

湿法冶金和电化学法冶金可以大大降低金属杂质含量,但不足以去除非金属杂质和制备超高纯铁。电化学法冶金通常在火法冶金净化之后使用,特别是在 5N 纯铁生产中。

2.3 火法制备

传统的铁矿石-烧结高炉冶炼工艺只适用于生产工业纯铁。为了进一步提高铁的纯度,在区域熔炼、等离子电弧熔炼和电磁悬浮熔炼等工艺的基础上发展了一系列火法冶金方法。原理是在特定条件下铁和杂质物理性质的不同进行提纯。

2.3.1 等离子电弧熔炼

等离子电弧熔炼是利用等离子弧的高温熔化和处理金属或其他材料^[19]。Souza 等^[20]探究了利用氢等离子体还原赤铁矿以提取铁的过程和动力学分析,研究发现赤铁矿的还原动力学取决于初始输入质量和电弧功率之比,在优化输入质量和电功率的情况下,经过 15 min 的氢等离子体处理能够完全还原。

等离子电弧熔炼技术广泛应用于航空航天、冶金、材料科学等领域。该方法熔炼效率高,高温处理能力优秀,但是设备成本和能耗相对较高。应通过新材料的研发和制造工艺的改进,降低等离子电弧熔炼法的成本,并发展更高效的节能技术,降低能耗,实现更为绿色的发展趋势。

2.3.2 电磁悬浮熔炼

电磁悬浮熔炼^[21],利用高频交变电流的螺旋线圈产生交变电场,在金属导体表面产生高频涡流,在电磁场的相互作用下产生洛伦兹力,使熔融金属托起,在炉内的高温区域进行精炼。这种方法不需要接触传统的熔炉底部或者石墨电极,所以生产的金属纯度更高。

这种方法在 1923 年由 Muck^[22]首次提出,并申

请了“悬浮熔融”专利。在1952年由Okress完成了首次电磁悬浮熔炼,并提出了电磁悬浮技术^[23]。20世纪末,Li等^[24]成功地将电磁悬浮熔炼技术应用到半导体材料中。在国内电磁悬浮熔炼技术日趋发展,开始广泛应用于实际生产。但使用的设备性价比较低,未来应该降低设备的使用成本,利用悬浮熔炼技术生产难熔金属和新材料是今后研究的方向。

2.3.3 直接还原熔炼法

直接还原熔炼法采用高纯铁矿石,防止焦中含有的杂质污染,可生产纯度为3N及更高的高纯铁。

石家庄新华能源环保科技股份有限公司贾会平的研究结果表明,以干馏气体为还原剂,采用直接还原法制备海绵铁,可以得到高纯铁。该方法充分利用了天然气资源,降低了制铁成本,提高了高纯铁的质量^[25]。直接还原体分馏精炼方法在成本方面具有相当大的优势,但还原铁的过程很难去除大量的金属杂质,需要高品位的原铁,最终获得的高纯铁产品过度依赖于铁精矿的质量。

所以Li等^[26]使用通过直接还原-熔融分离-炉渣精炼工艺制备出纯度为99.987%的高纯铁,首先将焙烧过的铁矿石用氢气还原,得到直接还原铁,接着将还原铁熔化,通过Si-Mo熔分炉熔炼分离炉渣和金属,最后通过添加高碱度炉渣进行精炼脱氧,装置如图3所示。与贾的工艺相比,该工艺成本低,未使用含碳源的CO而是使用了氢气避免了碳的干预,且经过反复的熔融精炼将O、S等杂质元素去除到相当低的水平,但氢气价格昂贵,具有一定的危险

性,发掘更为环保、性价比高和除杂效果优异的还原性气体尤为重要。

2.4 其他制备方法

2.4.1 联合制备

一般情况下仅通过湿法或火法的工艺制备的铁纯度相对较低,所以将2种方法结合,先湿法(溶剂萃取和离子交换法)制备高纯度的铁离子溶液,然后直接蒸发溶液、沉淀-干燥-氧化处理、氢还原和用热纯化工艺制备超高纯铁。

湿法冶金-电解结合是一种生产高纯度产品的工艺。艾琳等提出了一种湿法冶金-电解制备高纯铁的方法^[27]。该方法通过使用盐酸系统的溶液选择性地分离铁和铬,其中将还原剂(铁粉)添加到含有铁和铬的盐酸系统的混合溶液中,以调整溶液的pH到3~4。铬在这个pH下被完全水解形成沉淀物。反应产物经过过滤和分离,生成氯化亚铁溶液和铬沉淀物。这种方法产生一种高纯度的铁溶液,然后被电解,产生高纯度的电铁。

熔盐电解等离子熔炼也是一种制备高纯铁的方法。Pang等^[28]在850℃熔融CaCl₂-CaO-Fe₂O₃的系统中,加以15 mA/cm²的电流密度并通过CaO的辅助和电沉积,可生产出纯度为3N2的高纯铁。在此基础上通过等离子熔炼技术将纯度提升到4N5的超高纯铁。综上所述,仅通过一种方法或工艺制备4N级高纯铁是相对困难的,通过多种方法联合制备是理想的途径。

2.4.2 固态电迁移

固态电迁移^[29],当给金属导体施加直流电时,由于电子的移动,原子或离子在金属中具有迁移现象。因为杂质原子通常具有不同的迁移率,所以该方法可以显著提高被提纯金属的纯度,且在操作中可以精准地控制电流和温度,对环境友好。

Zhong等^[30]利用该方法提纯金属La,其中的金属杂质Fe、Co、Ni、C和O明显向阳极移动,并且随着温度的提高和电迁移时间的延长,迁移效果越好。显然长时间的高温、高电流作用会消耗大量的能源,运行成本高,不易广泛应用于工业生产,所以该方法一般用于提纯稀土金属。

3 结语和展望

高纯铁在高精尖科技领域具有巨大的发展潜力。如何高效、节能和低碳排地制备高纯铁成为科研工作者们主要的关注方向。湿法、火法和二者的结合是制备高纯铁的主要方法,这些方法和工艺为

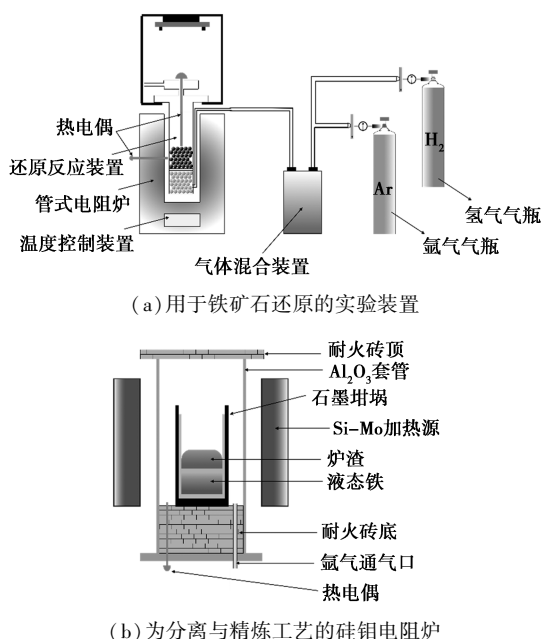


图3 直接还原熔炼装置图

后续研究高纯铁提供了广阔的平台。

(1) 火法制备能实现 2N-3N 纯铁的工业化生产; 电解精炼法能制备出 3N-4N 的高纯铁; 溶液萃取和离子交换法能够产出少量但纯度相对较高的高纯铁甚至是超高纯铁。单纯地靠某一种工艺制备出数量可观的高纯铁比较困难, 可通过多种方法结合制备。

(2) 针对高纯度铁的后续生产, 可制定如下工艺路线: 首先采用湿法冶金纯化技术浸出铁矿石, 获得高品质含铁溶液; 随后通过电解工艺从该溶液中提取金属铁。此阶段工艺可满足 3N-4N 纯度级别铁的用户需求。电解过程完全脱离传统化石燃料, 全程可由风能、光电等清洁能源驱动。对于纯度要求 4N 及以上的铁产品, 只需在电解提纯环节后增加高温精炼步骤。

(3) 高纯铁以高附加值为后续生产工艺的创新提供了广阔的窗口, 对后续传统高炉火法冶金钢冶炼的迭代升级和产品优化具有指导意义。

参考文献

- [1] Abiko K. Why do we study ultra-high purity base metals? [J]. Materials Transactions, JIM, 2000, 41(1): 233-237.
- [2] Furukimi O, Kiattisaksri C, Takeda Y, et al. Void nucleation behavior of single-crystal high-purity iron specimens subjected to tensile deformation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 701: 221-225.
- [3] 黄龙超, 刘南君, 王章洁, 等. 高纯铁的研发进展及展望[J]. 中国材料进展, 2021, 40(10): 762-771.
- [4] 曹为民, 印仁和, 严惠根, 等. 电解制备纯铁及其 RRRH 法研究[J]. 电化学, 2003, (3): 368-372.
- [5] Kimura H. Mechanical properties of high purity iron and effects of solutes on them[J]. ISIJ International, 1994, 34(3): 225-233.
- [6] Abiko K. Ultra-high purity iron excellent in ductility: JP 2002105583A[P]. 2000-09-29.
- [7] Fujita K, Inoue T, Emoto H. Improvement of permeability and magnetic shielding effect of pure iron magnetic shield materials[J]. JFE Technical Report, 2005, (6): 24-28.
- [8] Khan L, Sato K, Okuyama S, et al. Ultra-high-purity iron is a novel and very compatible biomaterial[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2020, 106: 103744.
- [9] Yu R, Yang H, Yu X, et al. Extraction and separation of iron technology and research progress[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 334: 125985.
- [10] Hu S, Xu C, Srinivasakannan C, et al. Recovery of zinc and iron from hot-dip galvanizing spent pickle liquor using solvent extraction[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 362: 119741.
- [11] Al-Anber M, Al-Anber Z A. Utilization of natural zeolite as ion-exchange and sorbent material in the removal of iron[J]. Desalination, 2008, 225(1/2/3): 70-81.
- [12] 黄红兵, 彭其春, 邱文涛. 工业纯铁电解制备高纯铁[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(12): 59-70.
- [13] 何兵玉. 一种亚铁盐电沉积制备高纯铁的方法: CN 202310082909.5[P]. 2023-04-14.
- [14] 姜力强, 郑精武, 陈巧玲. 电沉积软磁铁箔连续化生产的关键技术研究[J]. 稀有金属, 2005, (3): 293-296.
- [15] 张立生, 李慧, 张汉鑫, 等. 高纯铁的制备工艺[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 5-8.
- [16] 上海大学, 攀钢集团研究院有限公司. 一种由废弃氯化物熔盐电沉积制备纯铁的方法: CN 202311099698.2[P]. 2023-11-24.
- [17] 李金键. 氯化物熔盐电沉积制备高纯铁及其机理研究[D]. 上海: 上海大学, 2023.
- [18] Yin H, Tang D, Zhu H, et al. Production of iron and oxygen in molten K_2CO_3 - Na_2CO_3 by electrochemically splitting Fe_2O_3 using a cost affordable inert anode[J]. Electrochemistry Communications, 2011, 13(12): 1521-1524.
- [19] 孙辉, 王力军, 张力, 等. 高纯铁制备技术综述[J]. 金属功能材料, 2009, 16(4): 42-45.
- [20] Souza Filho I R, Ma Y, Kulse M, et al. Sustainable steel through hydrogen plasma reduction of iron ore: Process, kinetics, microstructure, chemistry[J]. Acta Materialia, 2021, 213: 116971.
- [21] 刘宇, 张桂芳, 漆鑫, 等. 电磁悬浮熔炼金属合金的研究进展: 应用和数值模拟[J]. 材料导报, 2022, 36(21): 163-170.
- [22] Muck. Electromagnetic levitation; DE 422004[P]. 1923.
- [23] Okress E C, Wroughton D M, Comenetz G, et al. Electromagnetic levitation of solid and molten metals[J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23(5): 545-552.
- [24] Li D L, Mao X M, Fu H Z. Electromagnetic levitation melting of solar grade silicon material[J]. Journal of Materials Science Letters, 1994, 13: 1066-1068.
- [25] 石家庄新华能源环保科技股份有限公司. 一种高纯铁的生产方法和装置: CN 201510559854.8[P]. 2017-05-31.
- [26] Li B, Sun G, Li S, et al. The preparation of high-purity iron (99.987%) employing a process of direct reduction-melting separation-slag refining[J]. Materials, 2020, 13(8): 1839.
- [27] 金川集团股份有限公司, 兰州金川科技园有限公司. 一种盐酸体系溶液铁和铬选择性分离方法: CN 201911014206.9[P]. 2022-01-25.
- [28] Pang Z, Li J, Chen S, et al. Direct Electrodeposition of high-purity iron from Fe_2O_3 in molten calcium chloride[J]. ISIJ International, 2024, 64(6): 944-953.
- [29] 温宏权. 超纯铁的制备技术综述[J]. 上海金属, 2002, (6): 32-35.
- [30] Zhong J M, Chen D H, Pang S M, et al. Migration regularities of impurities C, O, Fe, Co and Ni and effect of crystal transition on C, O and Fe in purification of metal La by solid-state electrotransport[J]. Rare Metals, 2021, 40(10): 2985-2992. ■