第28卷 第2期
2020年4月
材料科学与工艺
MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY
Vol. 28 No. 2
Apr. 2020

DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20180199

超重力在冶金和金属材料领域的研究进展及展望

雷家柳[1], 朱航宇[2], 赵栋楠[1]

(1. 湖北理工学院 材料科学与工程学院冶金工程系,湖北 黄石 435003;
2. 武汉科技大学 湖北省冶金二次资源工程技术研究中心,武汉 430081)

摘 要: 超重力作为一种外场强化新技术,基于其优越的传质和相际分离特性,引起了广泛的关注。本文着重介绍了我国超重力技术在金属熔体提纯、冶金固废中有价物质的富集提取分离、金属材料凝固组织细化、非金属夹杂物的去除以及矿石气基还原等冶金和金属材料领域的研究进展和成果,提出了其应用过程中存在的科学问题,并展望了超重力技术的发展前景。虽然,目前还以实验室研究阶段为主,并未实现普适化。但作为一种外场强化新技术,其在冶金和金属材料凝固控制等相关研究体系中已突显出强大的熔体提纯、有价组分富集提取、组织细化、夹杂物去除等作用效果,这为进一步拓展超重力技术在冶金和金属材料领域的研究和开发应用提供了参考价值。超重力有望凭借自身的优点成为冶金和金属材料领域生产过程中一种新的外场技术。随着超重力设备的发展及相关科学问题的研究探索,相信在不久的将来,超重力技术必会在冶金和金属材料研究领域得到广阔的应用前景。

关键词: 超重力;金属提纯;冶金固废;组织细化;夹杂去除;气基还原

中图分类号: TF19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-0299(2020)02-0030-07

Progress and prospect of super gravity in metallurgy and metal material research field

LEI Jialiu[1], ZHU Hangyu[2], ZHAO Dongnan[1]

(1. Metallurgy Engineering Department, School of Materials Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of Metallurgical Secondary Resources, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: As a new outfield strengthening technology, super gravity has attracted extensive attention, because of its powerful characteristics of mass transfer and phase separation. In this paper, the research progress and results of super gravity technology in metallurgy and metal material field were introduced, such as the metal purification, enrichment and separation of valuable material in metallurgy solid waste, microstructure refinement, nonmetallic inclusion removal, gaseous-reduction and so on. The existing scientific problems were put forward and the development prospect of super gravity was prospected. Yet it is still in the laboratory research stage, and the universalization has not been realized. However, as a new outfield field strengthening technology, it has shown great potential and effect in metal purification, enrichment of valuable component, microstructure refinement, inclusion removal, and so on. thus providing a reference to further expand the research and development application of super gravity technology in metallurgy and metal material field. Super gravity is expected to be a new technical means in metallurgy and metal material production with its own advantages. With the development of super gravity equipment and the exploration of related scientific issues, it is believed that the super gravity technology will be widely applied in metallurgy and metal material research field in the near future.

Keywords: super gravity; metal purification; metallurgical solid waste; microstructure refinement; inclusion removal; gaseous-reduced

超重力技术是指通过外加的快速离心旋转来提升加速度,从而达到强化微观混合和传质目的。作为一种外场强化新技术,它最早于1979年提出[1]。其优异的强化传质、强化相际分离的特性,正日益受到各领域研究者的重视。目前,主要

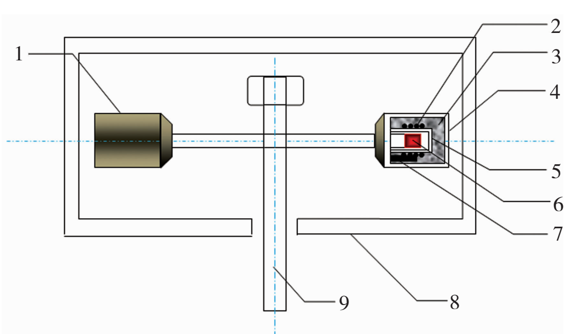
收稿日期: 2018-07-12. **网络出版日期:** 2019-12-23.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704105, 51604198);湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20174504).
作者简介: 雷家柳(1987—),男,博士,讲师.
通信作者: 朱航宇,E-mail: zhuhy@wust.edu.cn
期刊网址: http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx

集中在精馏、环保除尘和生物氧化反应过程强化等方面[2-3]。近年来,超重力技术也逐渐在冶金和金属材料凝固领域得到了一定的探索研究。目前,国内在这方面的研究主要集中在北京科技大学,武汉科技大学等高校,而且主要以实验研究阶段为主,工业化应用还未得到相关推广。

本文主要就目前我国超重力技术在金属熔体提纯、冶金固废中有价物质的富集分离、金属材料凝固组织细化、非金属夹杂物去除以及矿石气基还原等方面的研究进展和成果作了着重概述。分析评述了超重力技术在冶金和金属材料研究领域的研究进展和成果。并对将来超重力技术的发展和科学问题进行了展望。为进一步拓展超重力技术在冶金和金属材料领域的研究和工业应用价值提供参考。

1　实　验

由于还未有专门的超重力设备,目前我国冶金学者和金属材料研究学者对超重力的研究,所用的实验设备都是由单独的加热装置和离心装置自行设计改装的。其中武汉科技大学实验用超重力系统主要由高频感应炉和离心机两个独立的设备组成,超重力系数可达 4 000 以上。北京科技大学的超重力冶金实验系统由可升降高温井式炉与大容量离心机集合而成, 超重力系数可达 6 000以上。参考北京科技大学国家重点实验室的超重力冶金实验系统, 其超重力实验设备如图 1 所示。



1 - 配重炉; 2 - 电阻丝; 3 - 耐火材料; 4 - 炉壳; 5 - 炉管; 6 - 试样; 7 - 热电偶; 8 - 离心机外壳; 9 - 旋转轴

图 1　超重力设备示意图

Fig. 1　Diagram of super gravity equipment

超重力场用超重力系数 G 来表征,G 定义为离心旋转状态下的加速度与静止状态下的重力加速度 g(9.8m/s^2)之比,如式(1)所示。式中,r 为试样与旋转轴之间的距离(m),ω 为离心机的角速度(rad/s^2),N 为离心机的转速(r/min),当 $N=0$ 时,$G=1$。

$$G = \sqrt{g^2 + (\omega^2 r)^2}/g = \sqrt{g^2 + (\frac{N^2\pi^2 r}{900})^2}/g. \quad (1)$$

2　超重力在冶金和金属材料领域的研究进展

2.1　金属熔体提纯

光伏行业的快速发展,造成了太阳能级硅的短缺。由于对硅化学纯度的高要求及高生产成本,目前电子行业很难确保稳定供应太阳能级硅材料。由此,低成本太阳能级硅生产工艺的开发成为了迫切需求。各研究者也在积极寻求高效低成本的提纯方法。Li 等[4] 在铝硅熔体凝固提纯工艺中引入超重力技术。作为一种新的强化分离技术,研究发现铝硅合金经超重力处理后有效地实现了初晶硅颗粒的富集与分离,精炼硅颗粒沿超重力方向聚集在合金试样的底端。与冶金硅原样对比,其纯度由原来的 99.59% 提高到 99.92% 。这为高纯度硅的冶炼开辟了新方向和思路。

此外,随着现代材料技术的发展,人们对于金属材料的纯度要求越来越高,金属熔体的净化广受关注。对于铝熔体,当 G 为 400 时可有效实现 Al_3Fe 的富集分离;当 G 为 500 时,对 Sn - 3% Fe 熔体,杂质铁相全部富集到试样的下部区域;以及 Pb - 3% Cu 熔体,当 G 为 700 时样品下部几乎不存在铜颗粒[6], 甚至是 Al 熔体中低含量(Fe0.19% 、Si0.09%)杂质元素,当 G 达 1 000 时都得到了很好的去除效果[7]。金属熔体在引入超重力技术后,提纯效果显著。虽然,对于其提纯机理研究尚未系统化。但为通过超重力技术手段实现金属熔体的高度提纯及应用提供了可能。

2.2　冶金固废有价物质的富集分离

国家对于固废资源化利用的重视程度日益提高。特别是“十三五”提出的绿色发展新理念,将冶金固废处理提升到了一个新的高度。目前,我国冶金固废的资源化利用率并不高[8-9]。如何高效实现冶金固废的资源化利用,一直都是冶金学者的研究重点所在。Li 等[10-13] 将超重力技术应用到 $CaO-TiO_2-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ 熔体中,探讨了渣熔体冷却过程中钙钛矿相的富集规律。研究发现,经超重力处理后,试样沿超重力方向分层明显,熔体中的钙钛矿相全部聚集在试样的中下部。计算结果表明,经超重力处理后有价元素 Ti 的回收率显著。

Gao[14] 针对攀钢生产现场含钛高炉渣,探讨了超重力技术在实际冶金渣中的应用效果。结果

发现,钙钛矿相全部以典型的枝晶状富集在滤毡上,Ti 的回收率达到 78.17%。此外,Gao 还对以硼镁铁矿为原料的炼铁厂副产品硼渣,通过引入超重力处理模拟渣系,很好地实现了硼的再回收利用实验研究[15]。

高启瑞[16-17]将超重力技术引入到攀钢含钛高炉渣中,探讨碳化钛在超重力场下的富集与分离规律。当超重力系数 G 为300、在1 320 ℃温度下等温分离 20 min 后。碳化钛全部富集在碳毡上部的精矿中,有效的实现了碳化钛的富集分离。并且精矿中碳化钛的含量与原渣相比提高了一倍多。

李冲[18-20]针对 $CaO-SiO_2-FeO-MgO-P_2O_5$ 五元钢渣熔体进行了超重力实验研究,证明通过超重力技术实现钢渣中富磷相和富铁相的富集回收是可行的。并将超重力引入到生产现场实际钢渣中富磷相与富铁相的富集与分离。研究表明钢渣经过超重力处理后,试样分层明显。钢渣中析出的 P_2O_5 相全部残留在上部坩祸中,Fe_tO 相穿过过滤器进入坩埚下部,P_2O_5 及 Fe_tO 的回收率分别高达 82.2% 及 68.5%。

目前,不论是模拟的冶金渣系,还是实际的含钛高炉渣及转炉钢渣。国内冶金学者在引入超重力后,都取得了显著的富集分离效果。超重力作为处理冶金固废的新技术手段,具有一定的研究探索价值。这为超重力在其他冶金渣系上的应用探索及工业应用推广都提供了指导。若能明确富集相在超重力条件下的形核、长大及富集等行为,获得可行的工艺方法,最大限度的实现有价组分的分离,对于实现冶金固废的循环可持续利用,具有重大的经济效益和社会效益。

2.3 金属材料凝固组织细化

金属合金的宏观性能主要取决于其微观组织,如何控制金属材料的凝固组织细化均匀已成为金属材料领域的研究热点所在。杨玉厚[21]探讨了超重力对 Al-Cu 合金和 Cu-Sn 合金凝固组织的影响,发现超重力可以有效细化合金的凝固组织,并且随着超重力系数的增大,Al-4.5% Cu 合金和 Cu-11% Sn 合金凝固组织细化越显著,即由原来柱状晶转变为细小的等轴晶。并且提出了凝固组织细化的超重力作用机理:由于在凝固过程中 Al-Cu 合金和 Cu-Sn 合金析出的固液相之间存在一定程度的密度差,经超重力处理后它们会在凝固进行的熔体中形成“结晶雨”。这种“结晶雨”只在合金的凝固初期阶段才会产生,在凝固后期不起任何细化效果。随着合金溶质含量的增加,由于超重力作用而导致的“结晶雨”也越明显,最终凝固组织的细化作用也越显著。在超重力对 Al 晶粒的细化研究中,Zhao[22]也提出了类似的细化机制。

贾树建研究了超重力对 Al-6% Cu 合金凝固组织的影响,在不同超重力系数下 Al-6% Cu 合金的凝固组织形貌如图 2 所示[23]。从图 2 可知,在超重力作用下,Al-6% Cu 合金晶粒大小变化明显,超重力系数越大,晶粒越细小。此外,超重力还可以很好改善 Al_2Cu 共晶组织的形貌,提高 Al-6% Cu 合金的硬度。对于其他合金,如 Al97.5Ni2.5、ZL205A、Cu-1.6% Cr 及 Al-Ni-Cr,在引入超重力场后,相关研究者也得到了类似的实验效果[24-27]。

除有色合金材料外,李冲[28]以 Cr12 钢和 T10 钢为实验材料,探讨了超重力对钢铁材料凝固组织的影响,发现 Cr12 钢及 T10 钢中间等轴晶区均得到一定的细化,抗拉强度及延伸率都得到良好的改善。研究认为超重力有助于降低晶粒的形核功,加强对流,促进冲刷枝晶,从而形成更多异质形核核心。

此外,基于超重力的强化分离作用,对于合金材料而言,在超重力场中容易导致宏观偏析缺陷。这种宏观偏析的形成主要与具有密度差液相产生的重力偏析及凝固后期富溶质液相产生的通道偏析有关,并且超重力系数越大宏观偏析越明显[21],这会影响超重力的作用效果。当然,也有研究者利用合金元素在超重力条件下的宏观偏析行为,实现了不同凝固组织的分离[29]。

从目前研究进展来看,超重力在金属材料凝固组织细化,性能改善方面所起到的作用不可估量。若能在超重力技术细化金属材料凝固组织的同时改善元素宏观偏析的影响,超重力技术在金属材料制备工程中的发展前景将一片光明。

2.4 非金属夹杂物的去除

非金属夹杂物的存在,严重影响了金属材料的性能。随着科学技术的发展,高效优越的非金属夹杂物去除新技术的开发显得极为重要。宋高阳[30]利用 Al-17% Si-4.5% Cu 熔体中密度较小的初生硅颗粒模拟金属熔体内部的非金属夹杂物,研究了非金属夹杂物颗粒在超重力场中的运动行为和迁移规律,为超重力应用到高温钢液中非金属夹杂物的去除提供了科学依据。随后他将超重力场引入到铝熔体中非金属夹杂的分离去除上,并且讨论了不同超重力系数对非金属夹杂物去除规律的影响。研究发现,引入超重力后,非金

属夹杂物主要聚集在试样底端,并且超重力系数越大,其在底部的聚集程度也越高,非金属夹杂物去除效果也越好,从而有效地强化了非金属夹杂物的定向分离[31-33]。

李冲[34]将超重力引用到对钢液的处理上,探讨了铝脱氧钢中 Al_2O_3 夹杂物在引入超重力后的去除效果。研究发现,经超重力作用后整个试样中的 Al_2O_3 夹杂物大量聚集在试样的上部,Al_2O_3 夹杂物的去除率高达 95.6%,表明超重力为去除铝脱氧钢中 Al_2O_3 夹杂物具有良好的效果。随后李冲在对 304 不锈钢的研究中发现,超重力对去除 SiO_2 复合夹杂物也具有一定的效果[27]。这为开发出新的冶金手段来进行非金属夹杂物的极限去除,实现金属材料的高洁净化提供了新思路。为了拓展超重力在非金属夹杂物去除领域的应用,对于不同种类的金属材料中,不同类型、形状及大小的夹杂物在超重力场下的运动规律有待进一步研究。

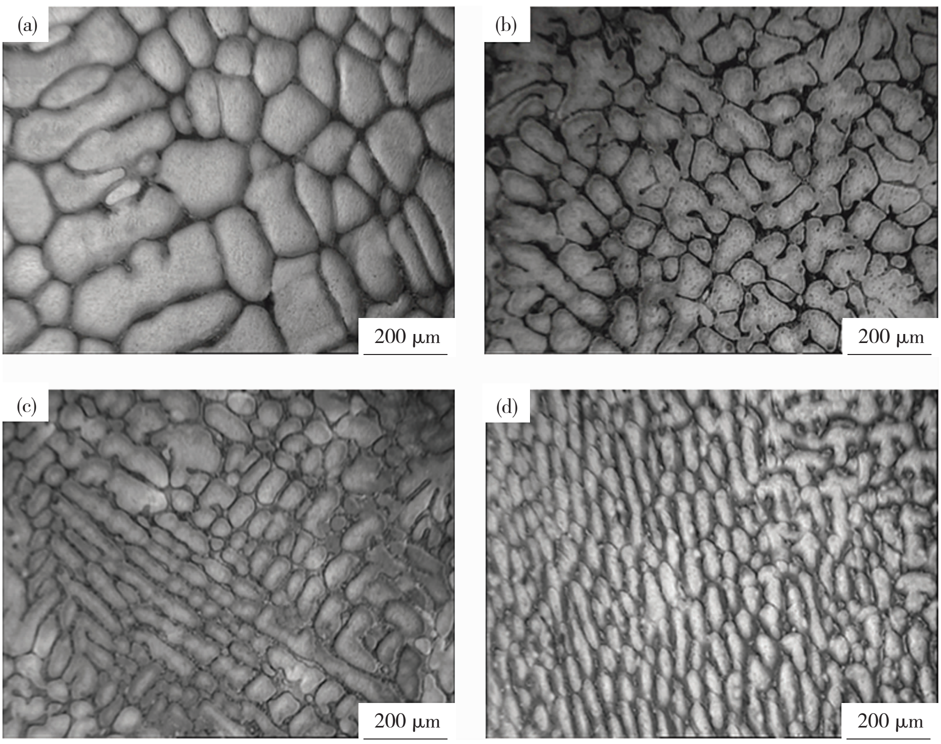


图 2　不同超重力系数下 Al-6%Cu 合金的凝固组织形貌

Fig. 2　Solidification microstructures of Al-6% Cu alloy at different super gravity coefficient: (a) $G=1$ (b) $G=300$ (c) $G=500$ (d) $G=700$

2.5　矿石气基还原

我国的矿产资源并不充裕,目前正面临日益枯竭的问题。并且其利用率也一直不高,许多有价金属都残留于尾矿和弃渣中,如何提高矿产资源的综合利用率显得尤为重要。Gao 将超重力技术引入高磷铁矿石的气基还原产物后研究发现,经超重力处理后铁颗粒和熔渣分别在样品的顶部和底部富集,出现了明显的分层结构,并且磷灰石晶体聚集在渣铁界面。实现了铁、渣、磷灰石三相的分离[35]。对于高磷鲕铁矿气基还原产物中铁相和含磷渣相的分离[36]以及白云鄂博矿气基还原产物中,如何富集分离铈磷灰石,回收利用其中富有的稀土元素[37-38],相关研究者在引入超重力技术后,都取得了良好的实验效果。

由此可见,在矿石气基还原过程中,引入超重力后,不仅可以实现还原产物铁相中有害杂质磷的去除,而且还能同时有效回收渣中的有价组分。此外,针对熔渣气基还原产物的分离也有研究者展开了相关的超重力研究[39]。这些都为以气基还原工艺为主的矿产资源的高效综合利用提供了可能。当然,对于实现工业化应用推广,还需解决超重力设备方面的问题。

3　超重力技术前景展望

作为一种外场强化新技术,超重力技术在冶金和金属材料凝固领域得到了一定的发展和应用。目前,我国超重力技术在金属熔体提纯、冶金渣中有价物质的富集分离、金属材料凝固组织细化、非金属夹杂物去除以及矿石气基还原等冶金和金属材料领域研究较为深入,效果显著。但由

于研究对象的复杂多样性及专门的超重力设备也较为缺乏,为实现工业化推广,目前尚存在需要进一步明确的超重力作用机理和可行的工艺方法等关键科学问题。

相信在“十三五”规划超重力实验装置建设的大背景条件下,针对冶金和金属材料研究领域,专门的超重力设备也会得到一定程度的发展和应用,相关科学问题也会得到更好的研究探索和解决。进而为拓展超重力技术在冶金和金属材料领域中的研究以及工业化应用推广提供了可能。相信不久的将来,超重力技术必会在冶金和金属材料研究领域得到广阔的发展前景。

参考文献:

[1] RAMSHAW C, MALLINSON R H. Mass transfer apparatus and its use: EP, EP 0002568 A1 [P]. 1979.

[2] 邹海魁, 邵磊, 陈建峰. 超重力技术进展-从实验室到工业化[J]. 化工学报, 2006, 57(8): 1810-1816.
ZOU Haikui, SHAO Lei, CHEN Jianfeng. Progress of higee technology-from laboratory to commercializa-tion [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006, 57(8): 1810-1816.
DOI: 10.3321/j.issn:0438-1157.2006.08.013

[3] ZOU Haikui, SHAO Lei, CHEN Jianfeng. High gravity process intensification technology and application[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(3): 588-593.
DOI: 10.1016/j.cej.2009.04.053

[4] LI Jingwei, GUO Zhancheng, TANG Huiqing, et al. Si purification by solidification of Al-Si melt with super gravity[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(4): 958-963.
DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61270-3

[5] 杨玉厚, 李京京, 宋子睿, 等. 利用超重力富集和分离Sn-3% Fe熔体中的杂质元素铁[J]. 工程科学学报, 2018, 40(1): 41-50.
YANG Yuhou, LI Jingjing, SONG Zirui, et al. Enriching and separating iron impurity from Sn-3% Fe melt by super gravity [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(1): 41-50.
DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2018.01.006

[6] YANG Yuhou, SONG Bo, SONG Gaoyang, et al. Enriching and separating primary copper impurity from Pb-3mass pct Cu melt by super-gravity technology[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47(5): 2714-2724.
DOI: 10.1007/s11663-016-0714-x

[7] ZHAO Lixin, GUO Zhancheng, WANG Zhi, et al. Removal of low-content impurities from Al by super-gravity[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2010, 41(3): 505-508.
DOI: 10.1007/s11663-010-9376-2

[8] 于先坤, 杨洪, 华绍广. 冶金固废资源化利用现状及发展[J]. 金属矿山, 2015, 44(2): 177-180.
YU Xiankun, YANG Hong, HUA Shaoguang. The utilization and development status of metallurgical solid waste resource[J]. Metal Mine, 2015, 44(2): 177-180.

[9] 徐景炎, 杨文静, 王荣. 冶金固废资源化利用技术现状及发展建议[J]. 山西冶金, 2017, 40(2): 39-40.
XU Jingyan, YANG Wenjing, WANG Rong. Present situation and development suggestion of metallurgical solid waste resource utilization [J]. Shanxi Metallurgy, 2017, 40(2): 39-40.
DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2017.02.15

[10] LI Juncheng, GUO Zhancheng, GAO Jintao, et al. Evaluation of isothermal separating perovskite phase from $CaO-TiO_2-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ melt by super gravity[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2014, 45(4): 1171-1174.
DOI: 10.1007/s11663-014-0062-7

[11] LI Juncheng, GUO Zhancheng, GAO Jintao. Isothermal enriching and separation of perovskite phase from $CaO-TiO_2-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ melt by centrifugal force [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2014, 41(10): 776-783.
DOI: 10.1179/1743281214Y.0000000206

[12] LI Juncheng, GUO Zhancheng, GAO Jintao. Isothermal enriching perovskite phase from $CaO-TiO_2-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ melt by super gravity[J]. ISIJ International, 2014, 54(4): 743-749.
DOI: 10.2355/isijinternational.54.743

[13] 李军成, 郭占成, 高金涛. $CaO-TiO_2-SiO_2-Al_2O_3-MgO$熔体冷却过程中钙钛矿相超重力富集[J]. 稀有金属, 2014, 38(1): 93-101.
LI Juncheng, GUO Zhancheng, GAO Jintao. Enriching perovskite phase from $CaO-TiO_2-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ melt by super gravity during cooling process[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(1): 93-101.
DOI: 10.13373/j.cnki.cjrm.2014.01.014

[14] GAO Jintao, ZHONG Yiwei, GUO Zhancheng. Selective separation of perovskite ($CaTiO_3$) from titanium bearing slag melt by super gravity[J]. ISIJ International, 2016, 56(8): 1352-1357.
DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-113

[15] GAO Jintao, LI Yu, XU Guoli, et al. Separation of

olivine crystals and borate containing slag from CaO – SiO_2 – B_2O_3 – MgO – Al_2O_3 system by utilizing super-gravity[J]. ISIJ International, 2017, 57(3): 1 – 3.
DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT – 2016 – 601

[16] 高启瑞,宋波, 杨占兵, 等. 含钛高炉渣碳化及超重力分离碳化钛的研究[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(2): 1 – 7.
GAO Qirui, SONG Bo, YANG Zhanbing, et al. Research on enrichment and separation of TiC phase from carbonized titanium-bearing blast furnace slag by super gravity[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018: 1 – 7.
DOI: 10.13264/j. cnki. ysjskx. 2017. 02. 001

[17] 高启瑞, 宋波, 郭占成, 等. 含钛高炉碳化渣中 TiC 的超重力富集与分离的研究[J]. 稀有金属, 2018: 1 – 8.
GAO Qirui, SONG Bo, GUO Zhancheng, et al. Research on enrichment and separation of TiC phase from carbonized titanium-bearing blast furnace slag by super gravity. Chinese Journal of Rare Metals, 2018: 1 – 8.
DOI: 10.13373/j. cnki. cjrm. XY16100008

[18] LI Chong, GAO Jintao, GUO Zhancheng. Isothermal enrichment of P-concentrating phase from CaO – SiO_2 – FeO – MgO – P_2O_5 melt with super gravity[J]. Isij International, 2016, 56(5): 759 – 764.
DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT – 2015 – 633

[19] LI Chong, GAO Jintao, GUO Zhancheng. Separation of phosphorus and Iron-enriched phase from CaO – SiO_2 – FeO – MgO – P_2O_5 melt with super gravity[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47(3): 1516 – 1519.
DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT – 2015 – 633

[20] LI Chong, GAO Jintao, WANG Zhi, et al. Separation of Fe-bearing and P-bearing phase from the steelmaking slag by super gravity [J]. Isij International, 2017, 57(4): 1 – 3.
DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT – 2016 – 694

[21] 杨玉厚. 超重力对金属凝固组织细化及元素偏析行为的基础研究[D]. 北京科技大学, 2017.
YANG Yuhou. Fundamental study on solidification structure refinement and elements segregation of metals by super gravity [D]. University of Science and Technology Beijing, 2017.

[22] ZHAO Lixin, GUO Zhancheng, WANG Zhi, et al. Influences of super-gravity field on aluminum grain refining[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2010, 41(3): 670 – 675.
DOI: 10.1007/s11661 – 009 – 0130 – 9

[23] 贾树建, 宋波, 宋高阳, 等. 超重力对 Al – 6% Cu 合金凝固组织的影响[J]. 过程工程学报, 2014, 14(5): 880 – 885.
JIA Shujian, SONG Bo, SONG Gaoyang, et al. Effect of super-gravity field on solidification structure of Al-6% Cu alloy [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(5): 880 – 885.

[24] 熊梅. 超重力场对 Al97.5Ni2.5 合金凝固组织及性能的影响[D]. 武汉科技大学, 2016.
XIONG Mei. The influence of super gravity on the microstructures and properties of Al97.5Ni2.5 alloy [D]. Wuhan University of Science and Technology, 2016.

[25] 李勉, 万超, 华称文, 等. 超重力场对 ZL205A 合金凝固组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1104 – 1107.
LI Mian, WAN Chao, HUA Chengwen, et al. Effects of high gravity field on microstructure and properties of ZL205A alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(10): 1104 – 1107.
DOI: 10.15980/j. tzzz. 2017. 10. 018

[26] 熊梅,甘章华, 梁宇, 等. 超重力场凝固对 Cu – 1.6% Cr 共晶合金组织的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(6): 1005 – 1008.
XIONG Mei, GAN Zhanghua, LIANG Yu, et al. Influence of super gravity field on solidification structures of Cu – Cr1.6% alloy [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2017, 35(6): 1005 – 1008.
DOI: 10.14136/j. cnki. issn1673 – 2812. 2017. 06.027

[27] 华称文,甘章华, 蒋攀辉, 等. 超重力场对 Al – Ni – Cr 合金凝固组织及显微硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018,38(3): 327 – 332.
HUA Chengwen, GAN Zhanghua, JIANG Panhui, et al. Effects of super-gravity field on solidification structure and microhardness of Al – Ni – Cr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(3): 327 – 332.
DOI: 10.15980/j. tzzz. 2018. 03. 026

[28] 李冲. 超重力处理钢液及钢渣基础研究[D]. 北京科技大学, 2017.
LI Chong. Fundamental research on treatment of molte steel and steelmaking slag with super gravity [D]. University of Science and Technology Beijing, 2017.

[29] 李京伟,孙士瞳, 郭占成. 超重力对 Pb – Sn 合金偏析行为的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012, (12): 47 – 51.
LI Jingwei, SUN Shitong, GUO Zhancheng. Effect of Supergravity on segregation behavior of Pb – Sn alloy [J]. Nonferrous Metals, 2012, (12): 47 – 51.
DOI: 10.3969/j. issn. 1007 – 7545. 2012. 12. 014

[30] 宋高阳,宋波,杨玉厚, 等. 利用超重力分离铝熔体

中的夹杂颗粒[J]. 工程科学学报, 2018, 40(2): 177－183.
SONG Gaoyang, SONG Bo, YANG Yuhou, et al. Separation of inclusion particles from aluminum melt by super gravity. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(2): 177－183.
DOI: 10.13374/j.issn2095－9389.2018.02.007

[31] SONG Gaoyang, SONG Bo, YANG Yuhou, et al. Separating behavior of nonmetallic inclusions in molten aluminum under super gravity field[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2015, 46(5): 2190－2197.
DOI: 10.1007/s11663－015－0403－1

[32] SONG Gaoyang, SONG Bo, YANG Zhanbing, et al. Removal of inclusions from molten aluminum by super gravity filtration[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47(6): 3435－3445.
DOI: 10.1007/s11663－016－0775－x

[33] 宋高阳, 宋波, 杨玉厚, 等. 利用超重力分离5052铝合金熔体中的非金属夹杂[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(1): 29－34.
SONG Gaoyang, SONG Bo, YANG Yuhou, et al. Application of super gravity to separating non-metallic inclusions from 5052 aluminum alloy melt. Nonferrous Metals Science & Engineering, 2015, 6(1): 29－34.
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2015.01.006

[34] LI Chong, GAO Jintao, WANG Zhi, et al. Separation of fine Al_2O_3 inclusion from liquid steel with super gravity[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2017, 48(2): 900－907.
DOI: 10.1007/s11663－016－0905－5

[35] GAO Jintao, GUO Lei, GUO Zhancheng. Concentrating of iron, slag and apatite phases from high phosphorous iron ore gaseous reduction product at 1473 K by super Gravity[J]. Isij International, 2015, 55(12): 2535－2542.
DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT－2015－416

[36] GAO Jintao, ZHONG Yiwei, GUO Lei, et al. Separation of iron phase and P-bearing slag phase from gaseous-reduced, high-phosphorous oolitic iron ore at 1473 K (1200℃) by super gravity[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47B: 1080－1092.
DOI: 10.1007/s11663－015－0575－8

[37] LI Juncheng, GUO Zhancheng. Innovative methodology to enrich britholite ($Ca_3Ce_2[(Si,P)O_4]_3F$) phase from rare-earth-rich slag by super gravity [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2014, 45(4): 1272－1280.
DOI: 10.1007/s11663－014－0071－6

[38] WANG Fuqiang, GAO Jintao, LAN Xi, et al. Direct concentration of iron, slag and britholite-(Ce, La, Pr, Nd) at 1473 K in a super gravitational field[J]. Isij International, 2017, 57(1): 1－3.
DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT－2016－482

[39] LU Yang, GAO Jintao, WANG Fuqiang, et al. Separation of anosovite from modified titanium-bearing slag melt in a reducing atmosphere by supergravity [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2017, 48B: 749－753.
DOI: 10.1007/s11663－016－0868－6

(编辑 张积宾)

本文引用格式:
雷家柳, 朱航宇, 赵栋楠. 超重力在冶金和金属材料领域的研究进展及展望[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(2): 30－36. DOI: 10.11951/j.issn.1005－0299.20180199
LEI Jialiu, ZHU Hangyu, ZHAO Dongnan. Progress and prospect of super gravity in metallurgy and metal material research field [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(2): 30－36. DOI: 10.11951/j.issn.1005－0299.20180199