

重金属

非牛顿流体下冶金熔池中气泡运动的研究进展

赵 凯, 申耀宗, 张兴华, 魏志芳, 王 彬

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

[摘 要] 对冶金反应器中气泡行为进行研究是提高冶金熔池反应效率、实现高效熔炼的重要途径。实际熔炼过程中的熔体是气、液、固三相流的非牛顿流体,非牛顿流体中的气泡运动和牛顿流体中的气泡运动相似,同样会经历气泡的产生、聚并以及破裂过程,但非牛顿流体以其自身复杂的流变性,使得气泡在非牛顿流体中的运动区别于牛顿流体中的运动特性和形态特性,并且由于气泡运动而造成对周围液相的影响也有所不同。目前关于非牛顿流体下气泡运动的研究都存在很多理想假设和很大的局限性,与实际工艺条件下的流体存在很大差距。本文对关于气泡行为的运动机理和气泡运动在非牛顿流体中的技术应用进行了阐述,介绍了当下的研究体系机理、现状以及未来研究的方向。

[关键词] 气泡运动;非牛顿流体;牛顿流体;运动机理;冶金熔池;技术应用

[中图分类号] TF061.2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2021)02-0001-06

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.02.001

在冶金领域中,熔池中的多相流熔炼主要分为牛顿流体和非牛顿流体,当前研究对于简化后的牛顿流体居多,而在实际生产中,熔池的熔炼并非理想状态,由于煤粉、渣等存在于熔炼过程中,流体往往呈现出非牛顿流体状态。目前,针对于气泡运动的研究主要有数值模拟以及实验分析的方法^[1-4],气泡相关特性的应用被广泛运用于石油、环境以及化工等领域^[5-10]。本文通过对比在不同条件下牛顿流体和非牛顿流体熔炼中气泡的运动规律,结合自身课题中侧吹熔池熔炼中的研究现状,对气泡运动在相关流体中的变化和机理进行了分析,提出了气泡运动在未来的发展方向。

1 气泡行为的运动机理

对于反应器中的多相流行为,气泡尺寸以及形

状的变化是一个关键参数,由于气泡和气泡之间的相互作用以及气泡和周围环境的相互作用,不同气泡的尺寸和形状使得不同的运动阶段会呈现出不同的影响效果。

1.1 牛顿流体中的气泡行为

气泡在产生后,会出现聚合与破裂行为,其过程也十分复杂。对于气泡的聚合,在目前没有统一的表达式来描述,通常要根据自身的实验条件来进行拟定;对于气泡的破裂,目前的认知主要是认为气泡在运动的过程中,由于液相作用诱发湍流漩涡,引发碰撞,以此获得变形能量,发生破碎^[11]。

目前,对于气泡运动路径的研究,大多学者都会采用高速摄像机的方法进行采集,而对于气泡周围速度场的研究,PIV的方法显得更为普遍^[12]。其中,闫红杰^[13]等对静止水中的单气泡行为进行了研究,气泡在液体中运动时,主要受重力、惯性力以及浮力和表面张力的作用,因此采用了不同的准则数进行描述,由此得到We和Re的预测效果最优,除此之外,还发现气泡在静止液体上升的过程中,气泡的运动路径会随着气泡的不断变形而呈现出不同的运动轨迹。气泡的形状变化还会受到周围条件的制

[作者简介] 赵凯(1981—),男,博士,副教授,研究方向为炼铁理论与工艺、余热回收。

[收稿日期] 2020-08-26

[基金项目] 国家重点研发计划“全氧冶炼合理炉型设计及高能量密度熔炼工艺研究”(2017YFB0603802)

约,从各项研究结果可以了解,流动环境对小气泡的影响程度远大于流动环境对大气泡的影响,且随着气泡尺寸的逐步增大,流动的依赖性会逐渐减小,关于这一点,Ziegenhein T 等^[14]运用了 PIV 技术在不同流动条件下的鼓泡塔实验研究中也有所论述。

对于牛顿流体来说,在不同的流体体系中,气泡的生长机理可以简要概括为气泡之间的上浮碰撞、湍流随机碰撞以及湍流剪切碰撞,在大部分的浸入式气泡中,都会经历气泡的聚合和破裂。徐玲君等^[15]通过采用基于流体体积法下的几何重构技术以及相关的处理程序对单个气泡在静水中的特性进行研究,得知气泡的变形在不同的气泡大小状态下是不一样的,气泡越小,其内外压差越大,此时更容易维持球形,而气泡越大,内外压差反而会减小,此时会在气泡两侧以及尾部形成尾迹流,进而产生推力,促使气泡发生形变。

对于气泡上升和聚并的过程,王乐等^[16]以及邢少鹏等^[17]都通过数值模拟的方法对多气泡的运动进行了研究,一方面,发现气泡间距的变化会直接影响气泡相互融合的结果,除此之外,不同直径和不同位置的切换也是影响气泡聚并行为的重要因素;另一方面,研究表明气泡直径以及运动速度的增加会加剧尾随气泡的上升。

1.2 非牛顿流体气泡行为

非牛顿流体中的气泡行为同样会经历生成、上升以及破裂过程,由于非牛顿流体中存在较为复杂的流变性,导致气泡的聚并、碰撞所表现出来的一些相关特性异于牛顿流体。

在气泡的生成过程中,Acharya 等^[18]通过高速摄像机对有机玻璃管中的流体进行观测,发现在黏弹性溶液气泡形成过程中,聚合物溶液的弹性会对气泡造成一定的影响,表现在气泡聚并速率小、聚合次数多。Miyahara 等^[19]研究了非牛顿流体中浸没孔口的气泡形成,建立了两阶段气泡生成模型,用以预测气泡体积。该模型考虑了非牛顿流体中的流变参数等影响,分析结果认为在流变参数大的情况下,气泡会趋向于非球形变化,惯性力是影响气泡形成的主导因素,导致在非牛顿流体中气泡所形成的体积会比牛顿流体中所形成的大。关于这一结论,Costes 等^[20]在关于非牛顿流体的气泡形成中也有同样的论述。除此之外,Favelukis 等^[21]针对非牛顿流体中的气泡生长建立了动力学模型,通过研究发

现,随着时间的变化,气泡半径的变化呈现指数函数趋势,并且在气泡形成的后期,气泡形态的变化是区别于前期的,主要受传质控制。

非牛顿流体中气泡聚并过程的基本运动机理和牛顿流体相似,首先尾随气泡需要到达前行气泡的尾流区,由于力的作用促使气泡发生碰撞,从而发生聚并。Shiloh 等^[22]通过对稀分散体中的气泡聚并行为进行研究,把气泡的聚并效率和碰撞速率相联系,得出了液滴尺寸和聚并速率两者与滞留率的基本关系,并表明流体的黏性会影响气泡的聚并速率;碰撞和聚并行为并非先后伴随发生。Crabtree 等^[23]通过高速摄像机对黏性流体中气泡的聚并行为进行研究,并建立关联模型,发现尾迹流可以较好地描述气泡的聚并现象,分析原因是由于气泡浮力以及惯性阻力的共同作用所控制。LI H Z 等^[24]采用粒子图像测速和双折射测量技术对非牛顿流体中的气泡相互作用及聚并行为进行了研究,提出气泡所产生的应力以及松弛形成的动力竞争控制了气泡之间的相互作用,对于线性气泡的研究提供了较好的指导。

在气泡的破裂过程中,非牛顿流体下的球形气泡发生破裂对气泡周围的流体产生拉伸作用,而这种拉伸行为对工业研究有着重要作用^[25]。针对于非牛顿流体中的气泡破裂行为,Tanasawa 等^[26]通过建立三参数线性模型对黏弹性液体中的气泡破裂行为进行了研究,发现在同时具备黏性和弹性的条件下,其液体对气泡破裂所产生的黏性阻力要小,并且在气泡的破裂过程中,气泡伴随着发生一定的摆动。Yoo 等^[27]选用了相关数学模型,采用有限差分法对其进行求解,对黏性液体的气泡行为进行了研究,指出气泡在快速扩散下会发生摆动行为,但这一行为的产生是有前提条件的,在极低的扩散情况下,同样存在气泡的摆动,但此时这一现象与流变性质无关,气泡摆动行为都是伴随着气泡的破裂而产生的。

对比牛顿流体和非牛顿流体下的气泡特性机理,可以得知非牛顿流体在相关的气泡机理上和牛顿流体下的气泡机理相似,气泡都会经历生成、聚并以及破裂的过程,且在气泡上升到破裂的整个过程中,同样会受到与气泡本身相关的力的作用,但是面对同样的过程,非牛顿流体下的气泡行为会呈现出不同的形态特性以及运动特性。

2 非牛顿流体中的技术应用

非牛顿流体中的气泡行为具有和牛顿流体中气

泡行为不同的特性,关于非牛顿流体下的气泡运动对周围流场的影响以及气泡之间相互作用的认知,对于实际熔炼效率的提高和能耗的控制都具有重要意义。目前对非牛顿流体中的多相流探索主要是在射流特性研究以及非牛顿流体下的喷嘴特性影响研究等方面^[28-31],而在冶金领域中,则主要集中于冶金渣的相关研究中。

2.1 非牛顿流体在冶金渣中的应用

冶金领域内的泡沫渣问题在近年来越来越被重视,太强的泡沫渣会引起过量的喷溅,而适量的泡沫渣则有利于反应的进行。

吴铿等^[32-33]针对泡沫对冶金过程中熔渣的影响进行了研究,通过对熔渣的一维本构方程进行分析,提出了一种判断泡沫化程度的方法,同时也对非牛顿流体下的熔渣流变特性进行了相关研究,探究了温度变化以及添加剂的加入对流变特性的影响,通过研究发现:针对不同粒度条件下的添加剂,泡沫所呈现出来的流变特性是不一样的,且非牛顿流体的流变特性在粒度小的添加剂中更为显著。该研究不足之处就在于所采用的测量熔体流变曲线的方法是一种相对的测量方法,存在一定的误差,虽在后期对所得本构方程进行了对比性的误差分析,但此方法还存在理想因素考虑偏多的问题。

关于非牛顿流体下的冶金熔渣和泡沫化的关系,Y. Ogawa等^[34]对减渣冶炼中的气泡行为以及相关碳质材料的控制进行了研究,采用了X射线透视法,观察熔渣还原炉实验,发现提高含碳材料的加入量可以较为有效地减小炉渣的起泡率,增大气泡的接触面积和频率也有类似的效果,除此之外,也发现大颗粒碳质材料因本身尺寸较大且含有活性孔隙,对气泡的排出有利。该研究的不足之处就在于实验做了很多理想化的假设,使得结果存在一定的局限性。针对于此,白晨光等^[35]对非牛顿流体条件下熔渣流变特性的研究情况进行了说明,提出了在熔渣体系中,产生泡沫化的原因和本身所具有的非牛顿流体特性是密不可分的,且不同大小粒度的材料作为添加剂所造成的熔渣流变特性也不同。

在其他方面,Y. Zhang等^[36]采用X射线观察法研究了含碳颗粒物和泡沫之间的相互作用,发现在颗粒物的总表面积和液态渣表面积之比逐步增大的过程中,泡沫指数会出现明显的降低,并指出焦炭对液态渣具有消泡作用。岳宏瑞等^[37]以高炉渣为

基础,研究含钛熔渣的非牛顿流体现象,指出在加入不同质量分数的TiC时,熔渣所表现出来的触变特性也是不同的。具体来讲,TiC含量的增加以及温度的降低都会使这种特性更为显著,而针对含TiC的熔渣,吴铿等^[38]对碳还原TiO₂所导致的发泡过程进行了研究,通过对当前发泡特性方程的改进,进行了相关实验,提出了发泡系数和消泡系数可以对发泡程度进行定量的描述,而针对整个过程的发泡情况,也可用发泡强度和发泡寿命进行定量描述,不足之处在于该项研究仅仅实现了定量分析的突破,在实际研究中还存在一定的局限性。

非牛顿流体下的冶金渣是未来冶金行业的重要课题,而对于其中的气泡行为,现阶段的研究都进行了大量的简化假设,未来还需要对实验机理进一步把控,对实验过程实现进一步完善,从而实现从理想研究到实际应用的过渡。

2.2 非牛顿流体中射流、喷嘴特性研究

无论是在熔池熔炼领域还是其他反应器内反应机理研究领域,射流特性以及喷嘴特性都是影响反应效率、发现相关机理的重要途径。

Miyahara等^[39]对浸没孔口下的气泡形成进行了研究,所用液体为甘油水、乙醇水等溶液,主要对单气泡行为进行了实验,从而得出了不同种类的流型,但是由于当时技术限制并没有对大孔径下同时产生的气泡形成以及漏液现象进行实验验证。De-kee等^[40]对非牛顿流体条件下的气泡运动进行了实验研究,通过对两个喷嘴所产生的气泡进行观察,发现尾流气泡是在进入先前气泡的尾迹后,再加速完成碰撞,并绘制了初始孔口分离距离和气泡聚集形成的体积之间的函数关系图,不足之处在于,在气泡注入的同时,黏性流体会存在轻微的干扰作用。Davidson等^[41]通过摄影观测对水平喷孔下的气泡形成进行研究,研究对象为矿物油和水,应用相关数学模型理论,发现在低流量下,孔口气泡形态通常为单“静态”气泡,此时气泡体积仅和孔口半径和表面张力有关,与流量无关;在高流量下,随着气泡频率的增大,气泡体积变为和流速相关,而与表面张力无关。杨辉等^[42]研究了双喷嘴下的非牛顿流体中的气泡运动,通过VOF-CSF法模拟双喷嘴下的气泡形成以及碰撞过程,发现了3种不同的流型,流型的形成受周围环境的影响,且在周围液相环境的影响下,两个喷嘴所产生的气泡的聚并也有所区别,但是

该实验所研究的液相仅局限于不可压缩流体,存在一定的局限性。

关于非牛顿流体中的射流研究,王玉龙等^[43]通过搭建高速摄影光学研究平台,对幂律流体下的射流现象进行了研究,发现在幂律流体中,因为高黏度剪切变稀的物性,降低了射流的轴转换振荡现象,但随着射流的进行,这种现象还会受到射流速度的影响。曹伟等^[44]同样对幂律流体下的射流进行了研究,对于雾化速度场,运用了 PIV 技术,发现了幂律流体的雾化效果之所以会被气流的扰动所影响,主要是通过影响液膜表面波强度,从而使液膜出现破裂,造成液膜宽度减小,最终影响雾化。而关于非牛顿流体中的雾化应用,蒋丽莎等^[45]对其射流特性进行了相关研究,指出牛顿流体雾化张角要大于黏弹性流体,且喷射雾滴的粒径会随距离的增大而增大。幂律流体研究的不足之处就在于其进行了大量的简化假设,和实际应用还存在一定的差距。

2.3 气泡运动研究的局限性及未来发展方向

目前关于气泡运动的研究仅局限于牛顿流体下的气液两相流研究,大多研究首先通过数值模拟的方法探究牛顿流体下的熔池喷溅现象以及速度场和流场情况,其次通过物理模拟的方法对理想条件下的模拟结果进行了水模型实验验证,而对于熔池中的研究都忽略了实际熔炼工况下存在的固态炉料。在实际熔炼过程中,熔池中的流体并非理想条件下的牛顿流体,而是包含气、液、固三相流的非牛顿流体,基于此,在未来关于侧吹熔池熔炼炉的课题研究中,需要在原先牛顿流体下的熔池气泡运动的研究基础上做出相关改进。当流体作为非牛顿流体形式存在时,进一步探究熔池中喷吹气泡在流变特性的作用下,对周围流场、速度场以及产生的搅动喷溅效果的相关现象变化,从而实现理论分析和实际应用的结合。

3 结语

气泡运动的研究在工程领域内有着较大的作用,而对冶金反应器中气泡行为的研究又是提高冶金熔池反应效率、实现高效熔炼的一个至关重要的环节。近年来针对于气泡行为的研究大多停留在牛顿流体中,而对非牛顿流体下的气泡运动研究并不多。但对于冶金领域来说,由于在实际的熔炼过程中往往伴随着冶金渣、煤粉的存在,大部分的实际熔

炼往往呈现的是非牛顿流体特性。而非牛顿流体中的气泡运动和牛顿流体中的气泡运动是相似的,同样会经历气泡的产生、聚并以及破裂过程,但非牛顿流体以其自身复杂的流变性,使得气泡在非牛顿流体中的运动区别于牛顿流体中的运动特性、形态特性以及由于气泡运动对周围液相产生的影响,从而导致实际运行过程不同。结合当下对非牛顿流体的了解,未来还需对非牛顿流体下的气泡行为特性进一步研究,特别是对当前非牛顿流体研究中存在的简化假设太过理想、气泡运动研究单一以及相关理论机理分析不全面等不足之处,需要加强突破研究。

[参考文献]

- [1] WU Liangyu, LIU Lingbo, HAN Xiaotian, et al. Numerical simulation on dynamic behaviors of bubbles flowing through bifurcate T-junction in microfluidic device[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(10): 421-431.
- [2] KURIAN J Vachaparambil, KRISTIAN Etienne Einarsrud. Numerical simulation of bubble growth in a supersaturated solution[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 81: 690-710.
- [3] LIM Do Yeong, BANG In Cheol. Controlled bubble departure diameter on biphilic surfaces for enhanced pool boiling heat transfer performance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150.
- [4] POULAIN S, VILLERMAUX E, BOUROUBA L. Ageing and burst of surface bubbles[J]. J. Fluid Mech, 2018; 636-671.
- [5] 赵立华, 郭建龙, 徐佳亮, 等. RH 真空室内气泡行为的研究[J]. 工程科学学报, 2018, 40(4): 453-460.
- [6] LI Y J, LIU M Y, LI X N. Single bubble behavior in gas-liquid-solid mini-fluidized beds [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 286: 497-507.
- [7] HUBER M, DOBESCH D, KUNZ P, et al. Influence of orifice type and wetting properties on bubble formation at bubble column reactors[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 152: 151-162.
- [8] TSUGE Hideki, TEZUKA Yusuke, MITSUDANI Masae. Bubble formation mechanism from downward nozzle—effect of nozzle shape and operating parameters [J]. Chemical Engineering Science, 2006(61): 3290-3298.
- [9] TRIPATHI M K, SAHU K C, KARAPETSAS G, et al. Bubble rise dynamics in a viscoplastic material[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2015, 222: 217-226.
- [10] LI X N, LIU M Y, MA Y L, et al. Experiments and meso-scale modeling of phase holdups and bubble behavior in gas-liquid-solid mini-fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 192: 725-738.
- [11] 邵品. 冶金熔体内气泡行为的数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015: 73-98.
- [12] DIETRICH N, MAYOUFI N, PONCIN S, et al. Bubble forma-

- tion at an orifice: a multiscale investigation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 92(14): 118–125.
- [13] 闫红杰, 赵国建, 刘柳, 等. 静止水中单气泡形状及上升规律的实验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(7): 2513–2520.
- [14] ZIEGENHEIN T, LUCAS D. Observations on bubble shapes in bubble columns under different flow conditions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 85: 248–256.
- [15] 徐玲君, 陈刚, 邵建斌, 等. 单个气泡静水中上升特性的数值模拟[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(3): 357–361.
- [16] 王乐, 曹洲榕, 郑西朋, 等. 三气泡上升聚并的数值模拟研究[C]//2016全国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 2016: 168–174.
- [17] 邢少鹏, 黄亚宇. 多个气泡的动态模拟分析[J]. *新技术新工艺*, 2017(3): 39–42.
- [18] ACHARYA A, ULBRECHT J. Note on the influence of viscoelasticity on the coalescence rate of bubbles and drops[J]. *AIChE Journal*, 1978, 24(2): 348–351.
- [19] MIYAHARA T, WANG W H, TAKAHASHI T. Bubble formation at a submerged orifice in non-Newtonian and highly viscous Newtonian liquids[J]. *Chemical Engineering of Japan*, 1988, 21(6): 620–626.
- [20] COSTES J, ALRAN C. The formation of bubbles in a non-Newtonian liquid[J]. *The Chemical Engineer*, 1978, 330(1): 191–193.
- [21] FAVELUKIS M, ALBALAK R J. Bubble growth in viscous Newtonian and non-Newtonian liquids[J]. *Chemical Engineering of Japan*, 1996, 63(3): 149–155.
- [22] SHILOH K S, SIDEMAN S, RESNICK W. Coalescence and break-up in dilute polydispersions[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1973, 51(5): 542–549.
- [23] CRABTREE J R, BRIDGWATER J. Bubble coalescence in viscous fluids[J]. *Chemical Engineering Science*, 1971, 26(6): 839–851.
- [24] LI H Z, FRANK X, FUNFSCHILLING D, et al. Towards the understanding of bubble interactions and coalescence in non-Newtonian fluids: A cognitive approach[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(21/22): 6419–6425.
- [25] 范文元, 朱春英, 马友光, 等. 非牛顿流体中的气泡行为[J]. *化学工业与工程*, 2006(5): 446–452.
- [26] TANASAWA I, YANG W J. Dynamic behavior of a gas bubble in viscoelastic liquids[J]. *Journal Applied Physics*, 1970, 41(11): 4526–4531.
- [27] YOO H J, HAN C D. Oscillatory behavior of a gas bubble growing (or collapsing) in viscoelastic liquids[J]. *AIChE Journal*, 1982, 28(6): 1002–1009.
- [28] CHOO Y J, KANG B S. A study on the velocity characteristics of the liquid elements produced by two impinging jets[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 34(6): 655–661.
- [29] BAI F, DIAO H, ZHANG M, et al. Breakup characteristics of power-law liquid sheets formed by two impinging jets[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2014, 46(5): 6–21.
- [30] LIU Mingyan, HU Zongding. Studies on the hydrodynamics of chaotic bubbling in a gas-liquid bubble column with a single nozzle[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 27(5): 537–547.
- [31] MA Dou, LIU Mingyan, ZU Yonggui, et al. Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 72: 61–77.
- [32] 吴铿, 储少军, 潜伟. 冶金渣非牛顿流变特性对其泡沫化的影响[J]. *化工冶金*, 1999(2): 199–204.
- [33] 吴铿, 储少军, 潜伟. 非牛顿流体冶金熔渣的流变特性[J]. *钢铁*, 1998(11): 16–20.
- [34] OGAWAY. Slag Foaming in Smelting Reduction and its control with carbonaceous materials[J]. *ISIJ International*, 1992, 32(1): 87–94.
- [35] 毛红霞, 白晨光, 邱贵宝, 等. 非牛顿冶金熔渣流变特性的研究进展[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2005(6): 52–56.
- [36] ZHANG Y, FRUEHAN R J. Effect of carbonaceous particles on slag foaming[J]. *Metallurgical Materials Transactions*, 1995, 26B(8): 813–819.
- [37] 岳宏瑞, 姜涛, 薛向欣. 含钛冶金熔渣非牛顿流体现象的表征与分析[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(7): 1485–1492.
- [38] 吴铿, 赵勇, 潜伟, 等. 合成高炉渣中TiO₂还原的发泡特性参数[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 12(4): 817.
- [39] MIYAHARA T, IWATA M, TAKAHASHI T. Bubble formation pattern with weeping at a submerged orifice[J]. *Chemical Engineering Japan*, 1984, 17(6): 592–597.
- [40] DEKEE D, CARREAU P J, MORDARAKI J. Bubble velocity and coalescence in viscoelastic liquids[J]. *Chemical Engineering Science*, 1986, 41(9): 2273–2283.
- [41] DABIDSON L, AMIC E. Formation of gas bubbles at horizontal orifices[J]. *AIChE Journal*, 1956, 2(3): 337–342.
- [42] 杨辉, 朱春英, 马友光, 等. 非牛顿流体中双喷嘴连续气泡的生成与聚并[J]. *化学工程*, 2016, 44(8): 37–41.
- [43] 王玉龙, 尹燕, 白富强, 等. 幂律流体椭圆形射流破碎的试验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2019, 25(2): 161–168.
- [44] 曹伟. 幂律流体双股射流碰撞雾化的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 54–69.
- [45] 蒋丽莎. 非牛顿流体雾化射流性能测试及喷嘴结构优化设计[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.

Research progress of bubble movement of non-Newtonian fluid in metallurgical molten pool

ZHAO Kai, SHEN Yao-zong, ZHANG Xing-hua, WEI Zhi-fang, WANG Bin

Abstract: Research on bubble behavior in metallurgical reactors is an important way to improve the reaction efficiency of metallurgical baths and realize high-efficiency smelting. The melt in the actual smelting process is a non-Newtonian fluid of gas, liquid, and solid three-phase flow. The bubble motion in a non-Newtonian fluid is similar to the bubble motion in a Newtonian fluid, and it will also experience the bubble generation, coalescence and rupture process, but with its own complex rheology, Newtonian fluid makes the movement of bubbles in non-Newtonian fluids different from the movement characteristics and morphological characteristics of Newtonian fluids. The influence of bubble movement on the surrounding liquid phase is also different. The current research on bubble motion under non-Newtonian fluids has many ideal hypotheses and great limitations, which are far from reality. This article describes the motion mechanism of bubble behavior and the technical application of bubble motion in non-Newtonian fluids, and introduces the current research system mechanism, status quo and future research directions.

Key words: bubble motion; non-Newtonian fluid; Newtonian fluid; movement mechanism; metallurgical molten pool; technology application

未来 5 年将有 3 倍增长空间 锂电铜箔 2021 年预计“供不应求”

“锂电铜箔的行业已经进入了高速发展阶段,2021 年底我国锂电铜箔仍将供不应求。”诺德投资股份有限公司常务副总裁陈郁弼日前在出席“2021 第十六届中国国际铜产业链峰会暨新基建铜基材料应用论坛”时说到。他预计,到 2025 年锂电铜箔还将有 3 倍的增长空间。

随着下游新能源行业逐步复苏,对上游锂电原材料的需求也逐步提升。去年下半年以来,锂电铜箔行业快速回暖,市场供不应求,头部企业处于满产满销状态,加工费快速攀升。

“目前锂电铜箔每吨售价已经超过 10 万元。”陈郁弼说道。据业内人士透露,供不应求的状态不断推升锂电铜箔价的加工费。东吴证券研报中指出,自去年 12 月以来,锂电铜箔加工费已经多次上调,铜箔价格加速上涨迹象明显。据悉,目前 4.5 μm 的高端产品加工费高达 7 万元/吨。

加工费的上涨,也推动铜箔企业盈利大幅提升。广东嘉元科技股份有限公司 2021 年一季度报告显示,公司一季度盈利超预期,营业收入同比大增 259% 至 5.31 亿元,实现归母净利润 1.11 亿元,同比增长 366%,单季度毛利率达 31.46%,环比增长 7.22%。诺德投资股份有限公司也在 2021 年一季度业绩预告中表示,一季度新能源动力电池客户订单需求同比大幅增加,锂电铜箔需求量也大幅增加,公司一季度营业收入较去年同期预计增长 150% 左右,盈利水平显著提升。

根据中国电子材料行业协会铜箔分会最新统计数据,2021 年国内将有 11 家铜箔企业共计 10.75 万吨新增产能,其中 10.05 万吨为锂电铜箔;2022 年将有 10.05 万吨新增铜箔产能,其中 85% 为锂电铜箔,约 8.5 万吨。

陈郁弼表示,由于大部分新增产能在 2021 年底/2022 年释放,因此 2021 年锂电铜箔仍将会供不应求,2022 年供求关系有望趋于缓和。

而展望未来,随着下游新能源汽车、5G 通讯等行业的迅猛发展,对上游锂电原材料的需求也将继续提升,行业发展空间看好。陈郁弼预计,到 2025 年全球锂离子电池总需求将达 888 GWh,对锂电铜箔总需求量为 75.5 万吨,未来 5 年锂电铜箔将有 3 倍的成长空间。

从技术发展趋势看,陈郁弼认为,下游动力电池对高能量密度的追求,推动铜箔往轻薄化发展,4.5 μm 锂电铜箔市场发展潜力巨大,已有企业实现批量生产供应,市场渗透率约为 3%,未来渗透率有望快速提升,预计 2021 ~ 2022 年渗透率分别达到 20%、40%。

(资料来源:中国有色金属学报)