doi：10.14186/j.cnki.1671-6620.2026.53

废钢装入对铁水罐冲击力分布影响的模拟

刘津含[1]，刘于乔[1]，张洪雷[2]，邵　磊[1]，魏　国[1]
（1. 东北大学 冶金学院，沈阳 110819；2. 宝钢中央研究院炼钢所，武汉 430080）

摘　要：目前，大废钢比冶炼已成为钢铁企业发展的主流趋势，生产中广泛采用“铁水罐中加废钢后接铁水”措施，以提升废钢比.本文中通过建立废钢颗粒撞击铁水罐衬底的离散元数学模型，研究了在废钢装入铁水罐过程中，不同废钢料型、质量流速对铁水罐包衬的冲击力分布和冲击严重区域的影响，同时还讨论了罐内不同留铁量减缓冲击的效果.结果表明：在本研究条件下，废钢装入初期，薄片形废钢对罐衬的冲击作用明显大于圆柱形废钢，两种料型的冲击差异在装入后期逐步减小；废钢装入速度与罐衬所受冲击强度呈正相关，装入速度越快，冲击载荷越大；此外，罐内留存铁水能够有效削弱废钢带来的冲击作用.

关键词：废钢；铁水罐；离散元模拟；冲击力
中图分类号：TF 702.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-6620(2026)05-0485-09

Simulation on impact force stress distribution in hot metal ladles during scrap charging

Liu Jinhan[1], Liu Yuqiao[1], Zhang Honglei[2], Shao Lei[1], Wei Guo[1]
(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Baosteel Central Research Institute Steelmaking Institute, Wuhan 430080, China)

Abstract: At present, smelting with a high scrap steel ratio has become a mainstream development trend for iron and steel enterprises. The process of adding scrap steel into hot metal ladles prior to hot metal tapping is widely adopted in practical production to raise the scrap ratio. In this paper, a discrete element mathematical model for scrap particle impact on the lining of hot metal ladles is established to investigate the influences of scrap shape and mass flow rate on the impact force distribution and severely impacted zones of ladle lining during scrap charging. Meanwhile, the buffering effect of residual hot metal with different volumes inside the ladle on impact mitigation is discussed. The results show that under the experimental conditions of this study, flake scrap exerts significantly greater impact on the ladle lining than cylindrical scrap at the initial charging stage, and the impact difference between the two scrap types gradually decreases in the later charging period. The charging rate of scrap is positively correlated with the impact intensity on ladle lining; ahigher feeding rate leads to larger impact load. Moreover, residual hot metal retained in the ladle can effectively alleviate the impact induced by scrap dropping.

Key words: scrap steel; hot metal ladle; DEM; impact force

随着国家“双碳”战略的持续推进，钢铁行业面临着日益严峻的节能减排压力[1-2].废钢作为一种载能资源，其使用量的增加有利于降低焦化、烧结、炼铁等高能耗工序的生产压力，在节约焦炭、原煤的同时减少生产碳排放与废水排放，助推钢铁行业低碳绿色发展[3-4]. 因此，高废钢比冶炼已成为钢铁行业发展的必然趋势. 铁水罐加装废钢是实现高废钢比冶炼的常用工艺，该工艺既可有效削减污染物排放，又能创造可观的经济效益，对钢铁行业高质量发展意义重大[5-7].随着该技术的逐步推广应用，相关问题也随之凸显：向罐内加装废钢时，废钢下落易冲击铁水包与鱼雷罐[8]的铝碳化硅碳砖工作层，造成耐火层抗侵蚀性能劣化、使用寿命显著下降.此外，铁水罐砌筑构造复杂[9]，

收稿日期：2026-03-14.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52374329）.
作者简介：刘津含（2001—），女，硕士研究生，E-mail：3237139810@qq.com.
通讯作者：魏国（1974—），男，副教授，E-mail：weig@smm.neu.edu.cn.

引文格式：刘津含，刘于乔，张洪雷，等. 废钢装入对铁水罐冲击力分布影响的模拟［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：485-493.（Liu Jinhan, Liu Yuqiao, Zhang Honglei, et al. Simulation on the impact stress distribution in the hot metal ladles during scrap charging［J］. Journal of Materials and Metallurgy, 2026, 25（5）: 485-493.）

废钢入罐冲击会进一步恶化罐衬服役工况,诱发罐体耐火材料非正常破损,缩短罐衬服役周期[10].上述问题不仅扰乱生产连续稳定运行,还会提升铁水包检修频次与运维成本.因此,开展铁水罐加料工况下废钢冲击特性的相关研究,对高废钢比冶炼技术落地具有重要工程价值.

21世纪以来,随着计算机技术的飞速发展,计算模拟技术被广泛应用于各类复杂工程分析问题的研究中.近年来,离散元模拟已成为探究颗粒运动规律的主流数值方法[11].Ueda等[12]采用离散元法开展高炉模拟研究,分析了物料硬度、滚动摩擦系数及下降速度对高炉炉料下落特性与内部应力分布的影响;Wang等[13]将离散元法与接触模型相结合,研究了颗粒撞击壁面的力学行为,验证了模拟结果与试验结果具有良好的吻合度;杨鑫康等[14]通过理论推导结合数值模拟的方式,得到溜井矿石颗粒的运动轨迹,对比分析中心落矿与斜溜槽落矿两种方式下井壁所受法向力与切向力的差异,并提出了降低溜井井壁受力、延长溜井使用寿命的优化方法;吕坤[15]基于离散元模型对高炉炉型与炉料结构展开研究,探究了炉料结构及炉型参数变化对高炉块状带物料运动状态、径向矿焦比分布及空隙率分布特征的影响规律.

基于上述研究基础,本文立足铁水罐现场实际工况,建立废钢颗粒撞击罐衬的离散元模型.在既定铁水罐规格与装料高度条件下,探究不同废钢料型、装入速度,以及罐内不同留铁量工况下,废钢装入过程对铁水罐包衬产生的冲击力变化特征,分析其演变规律与影响机制,以期为现场实际生产提供理论参考与技术指导.

1 模型建立

离散元(DEM)方法将研究对象划分为独立的单元,并认为各单元之间存在相互运动、接触力和能量联系等.当利用DEM进行求解时,将系统中的每个颗粒单独作为1个单元建立数学模型.

1.1 DEM接触模型

本研究中离散元仿真采用软球模型,原理如图1所示[16].该模型能有效处理两个及以上颗粒间的多重碰撞问题,其对颗粒接触行为的定义较为详细,计算精确度较高,尤其适用于处理多颗粒同时碰撞的复杂工况.在该模型中,颗粒间的碰撞并非瞬时完成,而是持续一段时间,表现为接触点处允许存在一定的重叠.本研究中废钢块之间、废钢块与包衬之间的碰撞均为持续接触过程,其间会产生有限度的接触重叠.

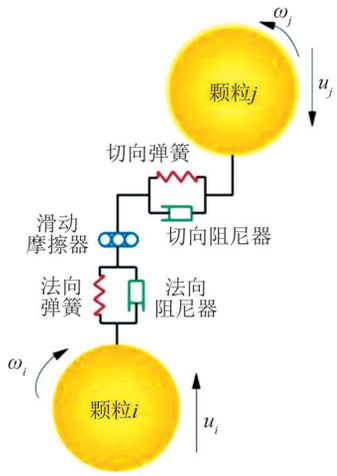


图1 DEM接触模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DEM contact model

本文中不涉及颗粒之间的黏结、破碎、传热等行为,故采用标准Hertz-Mindlin(no-slip)模型,相关计算公式如式(1)和(2)所示.

$$m_i\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{k}\left(F_{\mathrm{cn},ij}+F_{\mathrm{dn},ij}+F_{\mathrm{ct},ij}+F_{\mathrm{dt},ij}\right)+m_ig \tag{1}$$

$$I_i\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{k}\left(M_{\mathrm{t},ij}+M_{\mathrm{r},ij}\right) \tag{2}$$

式中:m_i、u_i、ω_i、I_i分别为颗粒i的质量、线速度、角速度、转动惯量;$F_{\mathrm{cn},ij}$、$F_{\mathrm{dn},ij}$分别为颗粒i受到的法向弹性力、法向阻尼力;$F_{\mathrm{ct},ij}$、$F_{\mathrm{dt},ij}$分别为颗粒i受到的切向弹性力、切向阻尼力;m_ig为颗粒i的重力;$M_{\mathrm{t},ij}$为使颗粒转动的切向力力矩;j为与颗粒i接触的颗粒和壁面数量.

法向弹性力:

$$F_{\mathrm{cn},ij}=\frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\,|\delta_n|^{3/2}n \tag{3}$$

式中:E^*为当量杨氏模量;R^*为当量半径;$|\delta_n|$为法向重叠量;n为法向单位矢量.

法向阻尼力:

$$F_{\mathrm{dn},ij}=-2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_nm^*}\,u_{\mathrm{n},ij} \tag{4}$$

式中:m^*为当量质量;$u_{\mathrm{n},ij}$为颗粒i、j间相对速度的法向分量;β为与颗粒恢复系数相关的参数;S_n为法向刚度.

切向弹性力:

$$F_{\mathrm{ct},ij}=-S_\mathrm{t}\,|\delta_\mathrm{t}|\,t \tag{5}$$

式中:S_t为切向刚度;$|\delta_\mathrm{t}|$为切向重叠量;t为切向单位矢量.

切向弹性力:

$$F_{\mathrm{dt},ij}=-2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_{\mathrm{t}}m^{*}}\,u_{\mathrm{t},ij} \tag{6}$$

式中：$u_{\mathrm{t},ij}$为颗粒 i、j 间相对速度的切向分量.

1.2　模型建立

图 2 为铁水罐几何模型示意图.大弧形侧铁水罐高度为 5 801.42 mm，小弧形侧铁水罐高度为5 597.42 mm.圆柱废钢直径为 30 mm，长度为150 mm；薄片形废钢，长宽均为 102 mm，厚度为 10.2 mm.

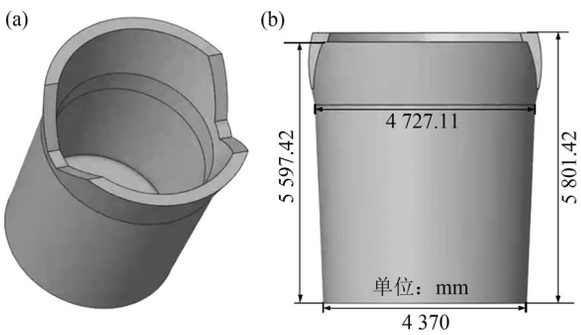


图 2　铁水罐几何示意图

Fig. 2　Geometric diagram of hot metal ladle

(a)—铁水罐 3D 视图；(b)—铁水罐正视图.

表 1 中列出了本模拟采用废钢的主要成分.废钢温度固定为 25 ℃，物性参数变化与时间无关，具体参数如表 2 所列.

表 1　废钢的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of scrap steel (mass fraction)　　%

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.32	1.46	0.007	0.003

表 2　模拟用废钢物性参数

Table 2　Physical properties of scrap steel for simulation

参数	数值
密度 ρ/(kg·m^{-3})	7 850
弹性模量 E/GPa	210
泊松比 v	0.30
碰撞恢复系数 e	0.4
静摩擦系数 μ_{s}	0.4
滚动摩擦系数 μ_{r}	0.03

1.3　计算策略

本研究中通过建立 DEM-Fluent 顺序耦合模型，模拟现场的实际生产情况.以罐底为坐标平面，建立分析区域，得到52 个300 mm×300 mm 与 13 个 600 mm×600 mm 的均匀正方形，如图 3 所示.为了验证分区方式的合理性，设置质量流速为 200 kg/s，对 300 mm×300 mm 和 600 mm×600 mm 两种分区方式下罐底中心区域所受冲击力分布进行对比，结果如图 4 和 5 所示.图 4 展示了不同分区方式下罐底中心区域的冲击力分布情况.由于 600 mm×600 mm 分区的面积较大，为确保对比时的面积相同，取其冲击力数据的 1/4 与 300 mm×300 mm 分区的冲击力数据进行对比.结果表明，两种分区方式下(0,0)区域冲击力数值的差距较小.对比图 4 和图 5 可知，在 300 mm×300 mm 分区方式下，各区域的受力仍为由中心向外递减，52 个 300 mm×300 mm 分区方式的模拟结果与 13 个 600 mm×600 mm 的模拟结果相似.综上，不同分区对计算结果无影响，考虑到计算效率，本文中选取 600 mm×600 mm 的分区方式.后续本文将在相同作用面积条件下，对比分析不同的废钢料型、废钢质量流速，以及罐内不同留铁量工况下，废钢下落过程对炉衬各区域产生的最大单位面积冲击力，进而总结归纳废钢装入过程中炉衬的受力变化规律.

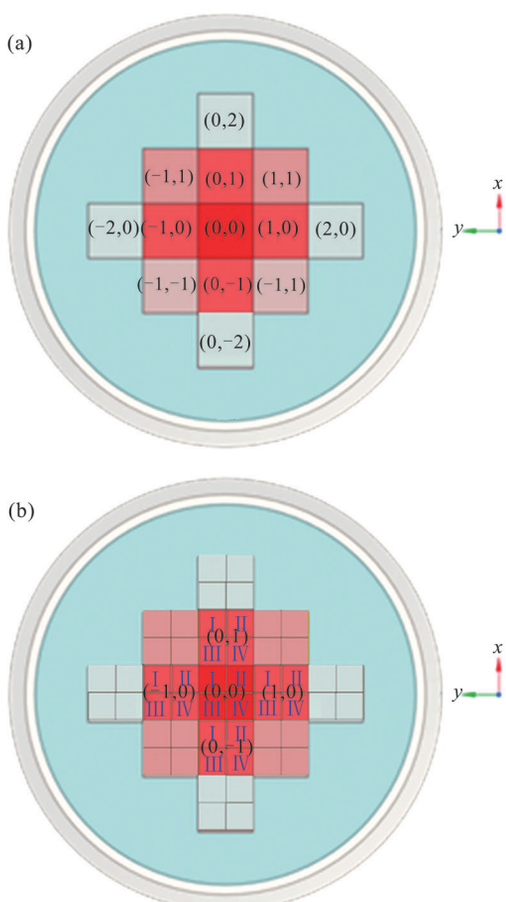


图 3　铁水罐底部区域划分

Fig. 3　Division of bottom area of hot metal ladle

(a)—600 mm×600 mm；(b)—300 mm×300 mm.

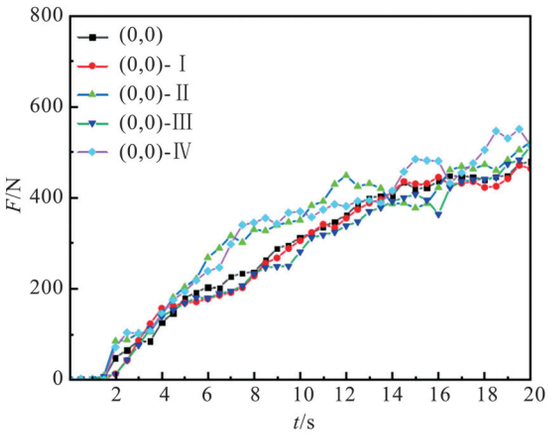


图4 不同分区方式下中心区域的冲击力分布

Fig. 4 Central stress distribution under different partitioning methods

1.4 模拟验证

为确保本文所建立离散元模型的准确性与可靠性,对废钢颗粒的运动形态、扩散规律及撞击特征进行模拟验证.数值模拟结果表明:废钢颗粒沿溜槽管壁下滑移动并逐渐聚集,在重力与管壁摩擦力的共同作用下,形成连续、致密的稳定料流,无明显离散散落现象;当颗粒脱离溜槽管口后,受自身重力与水平侧向初速度的耦合作用,运动轨迹呈标准抛物线分布,整体料流呈现扇形扩散特征.上述废钢颗粒流动与运动规律,与Georgakopoulos等[17]通过试验及数值模拟所得的斜溜槽内废钢颗粒运动特性结论高度一致,初步验证了本模型颗粒运动模拟的有效性.

图6为不同质量流速下废钢颗粒的速度分布与运动轨迹.由模拟结果可知,废钢经溜槽装入铁水罐的过程中,前期下落的废钢颗粒优先堆积于铁水罐底部中心区域并形成初始料堆,后续下落的废钢颗粒受运动惯性影响,持续向前滑移扩散.在实际生产中,铁水罐需反复进行废钢装入作业,罐衬底部中心区域长期承受频繁冲击载荷,是罐体最易发生破损的关键区域.现场生产数据显示,未开展罐内加废钢工艺前,铁水罐平均使用寿命约800炉次;采用铁水罐加废钢工艺后,多数铁水罐出现明显的非正常侵蚀与破损问题.

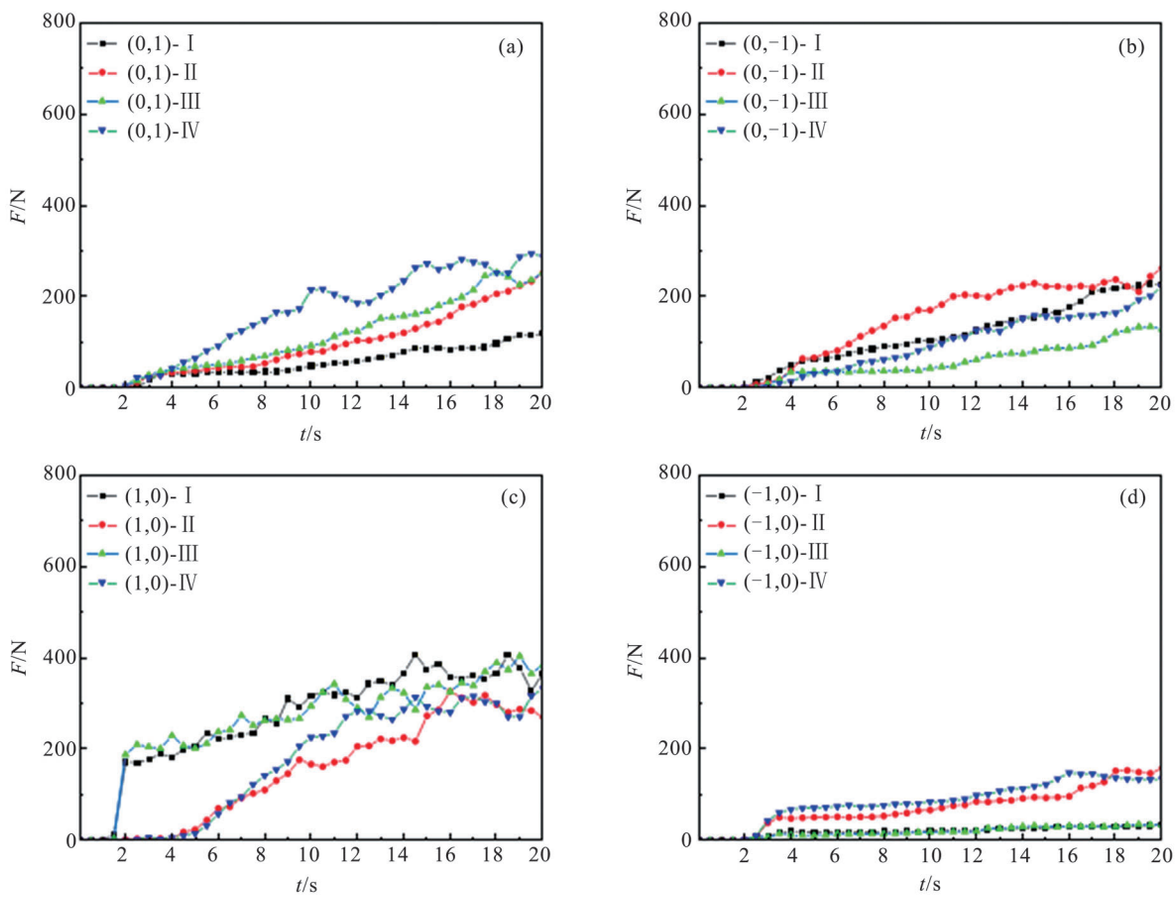


图5 300 mm×300 mm分区方式下(1,0)(0,-1)(0,1)(-1,0)区域的冲击力分布

Fig. 5 Stress distribution in 300 mm × 300 mm areas at (1, 0), (0,-1), (0, 1), and (-1,0)

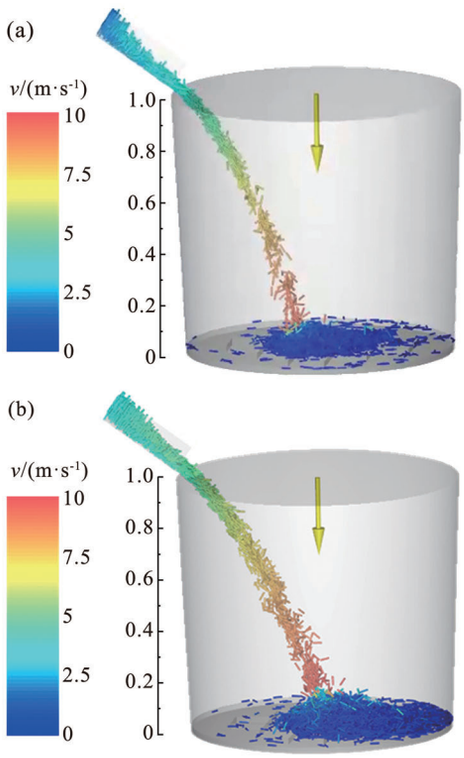


图 6　不同质量流速下废钢的速度分布与运动轨迹

Fig. 6　Velocity distribution and motion trajectory of scrap steel under different mass flow rates

(a)—500 kg/s;(b)—1 000 kg/s.

图 7 为累计装料 79 次后的铁水罐现场破损形貌.

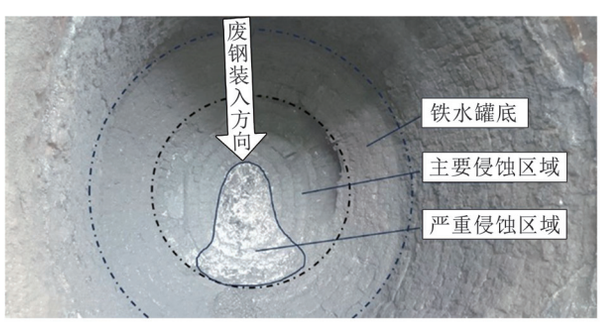


图 7　现场破损铁水罐

Fig. 7　Damaged hot metal iron tank

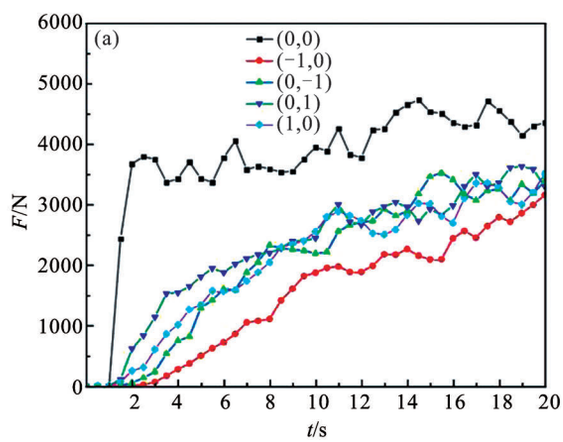
由图可知,罐体破损位置主要集中于罐底中心以及废钢装入方向的对侧罐壁区域.该实际破损区域与本文模拟得到的颗粒冲击集中区域完全吻合,进一步证实了本次离散元模拟结果的真实性与工程适用性.

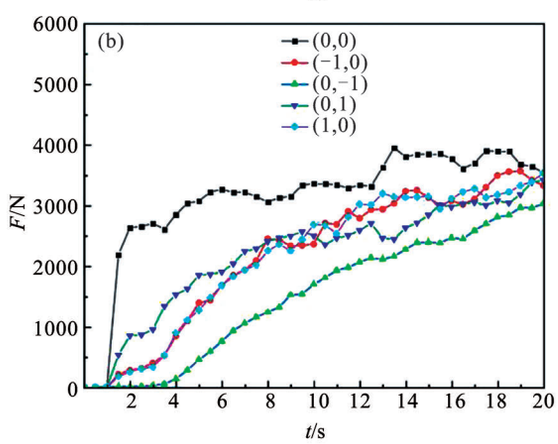
2　模拟结果与讨论

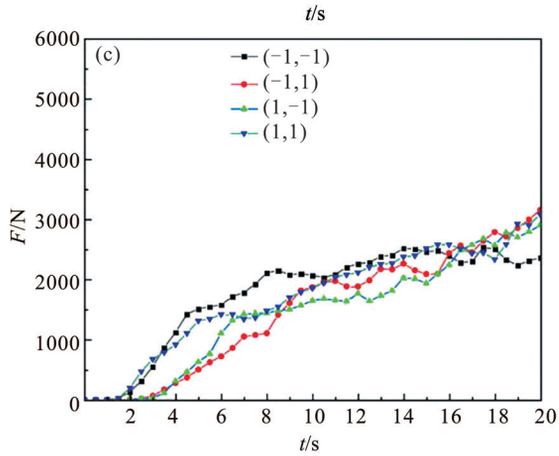
2.1　废钢装入空包冲击规律

2.1.1　废钢料型对炉衬冲击力分布的影响

废钢由斜溜槽装入铁水罐过程中,会以随机角度与力度撞击罐衬并产生冲击载荷,长期反复冲击会损伤罐衬结构,降低铁水罐服役寿命.不同料型废钢的冲击特性存在明显差异:薄片形废钢边缘尖锐,与炉衬接触时易形成局部集中冲击,冲击作用较大;圆柱形废钢的冲击载荷分布更为分散,对炉衬的整体冲击程度相对更小.图 8 示出了在废钢装入量不变的条件下,添加圆柱形与薄片形两种废钢对铁水罐炉衬各区域冲击力分布的影响.由图可知,炉衬中心区域应力最为集中,并且自中心向外侧区域逐步衰减.其中,在圆柱形废钢作用下,炉衬（0,0）区域受力最大,最大冲击力约为 3 950 N;薄片形废钢对（0,0）区域的最大冲击力可达 4 727 N,两种料型废钢在炉衬中心位置的最大冲击力差值约为 777 N.







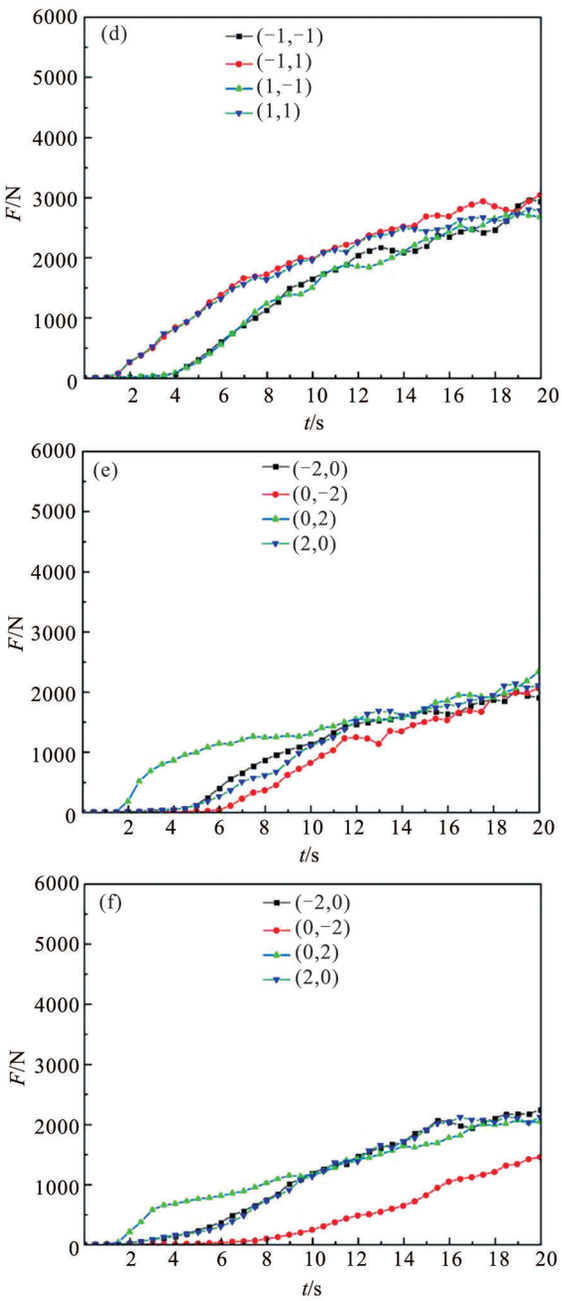


图8 不同废钢料型撞击铁水罐炉衬冲击力分布

Fig. 8 Stress distribution in lining of hot metal ladle subjected to impact from scrap steel of different shapes

(a)(c)(e)—薄片形;(b)(d)(f)—圆柱形.

图9示出了添加不同废钢料型对铁水罐中心和整体冲击力的影响,其中,铁水罐(0,0)区域是废钢随机掉落时冲击力最大处.由图9可知,掉落周期内,薄片形废钢掉落对铁水罐中心的冲击力大于圆柱形废钢.究其原因,薄片废钢边角呈锐角接触罐壁,易产生更大冲击力.在不同废钢料型掉落过程中,铁水罐整体与中心区域冲击力的变化趋势相同,薄片形废钢对应的罐体整体冲击力要高于圆柱形废钢,二者最大相差913 N.综上,圆柱形废钢引发的铁水罐炉衬冲击力更低,选用圆柱形废钢有利于延长炉衬使用寿命.

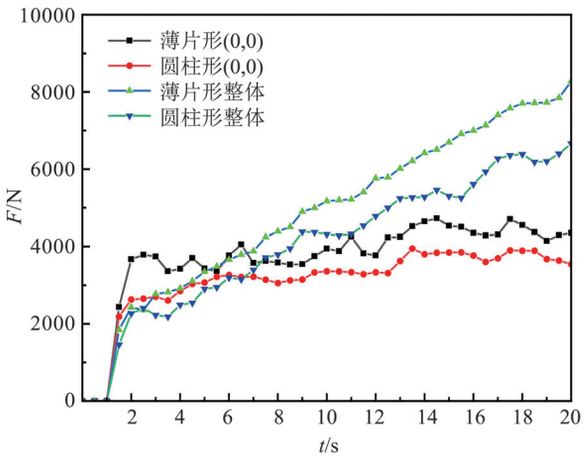


图9 圆柱形、薄片形废钢撞击铁水罐的冲击力变化情况

Fig. 9 Comparison of stress variations in hot metal ladle subjected to impact from cylindrical and thin-sheet-shaped objects

2.1.2 质量流速对铁水罐炉衬冲击力分布的影响

在生产实践中,合理控制废钢装入速度对减轻罐衬损毁至关重要,这既可降低冲击力,又能提升作业效率与生产安全性.在溜槽结构尺寸、倾角固定的条件下,废钢装入速度主要由废钢质量流速决定.因此,本文结合现场工况,探究不同质量流速对铁水罐炉衬冲击力的影响.

图10(a)示出了圆柱形废钢在溜槽出口质量流速为1 000、750、500、300、200 kg/s的条件下,铁水罐中心区域冲击力随时间的变化.由图可知,随着废钢在溜槽出口质量流速的增大,铁水罐中心区域受到的冲击力增加.在质量流速为1 000、750、500、300、200 kg/s的条件下,中心区域冲击力的最大值分别对应3 951、3 720、2 587、2 097、1 659 N,也就是200 kg/s对应的最大冲击力相较于其他质量流速(由大到小)分别下降了58.01%、55.40%、35.87%和20.89%.图10(b)示出了在上述5种质量流速下,铁水罐中心区域的压强对比.由图可知,随着质量流速的增大,该区域的压强显著提高.当质量流速为500 kg/s时,最大压强达22 352 Pa,平均压强为17 251 Pa;当质量流速为1 000 kg/s时,最大压强增至33 289 Pa(增长48.93%),平均压强提高到26 989 Pa(增长56.45%).综上,废钢质量流速越大,铁水罐罐衬冲击损伤越严重;为减小衬体冲击破坏,应适当控制废钢装入流速.

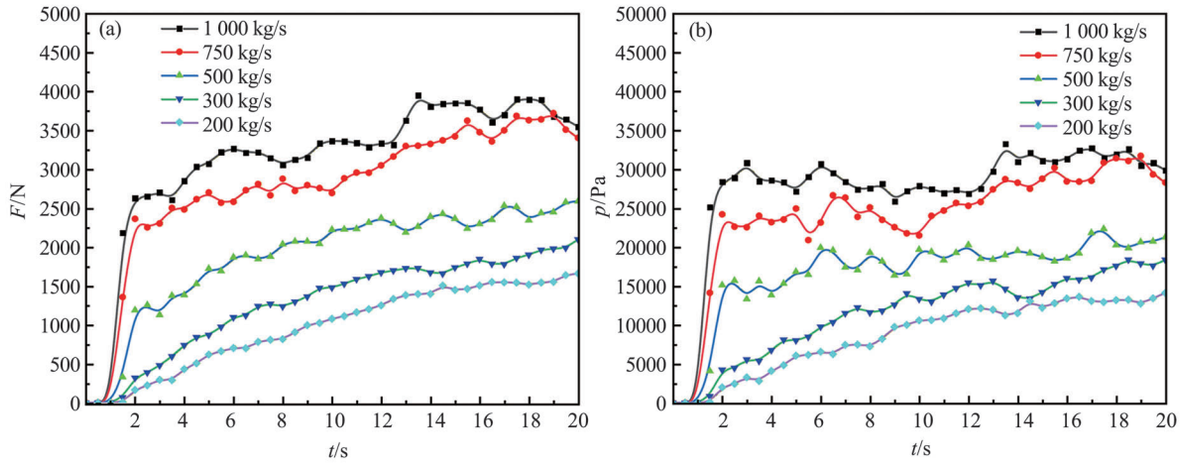


图 10　不同质量流速下废钢装入对包衬(0,0)区域冲击力及压强对比

Fig. 10　Comparison of impact force and pressure exerted by scrap steel on(0, 0) region of ladle lining at different mass flow rates

(a)—冲击力;(b)—压强.

2.2　留铁操作对铁水罐炉衬冲击力分布的影响

在实际生产中,为减轻废钢入罐对铁水罐砖衬的冲击破坏,现场常保留部分罐内铁水、不彻底排空.废钢下落时先与留存铁水接触,可缓冲废钢对罐底的冲击作用.但生产实践显示:留铁量偏低难以实现衬体防护,留铁量过大又会降低罐体利用率、制约生产节奏.为此,本文对比分析不同留铁量下,废钢装入对铁水罐炉衬冲击力分布的影响.

图 11 为废钢落入含铁水的铁水罐过程中不同时刻底部各区域的受力云图.

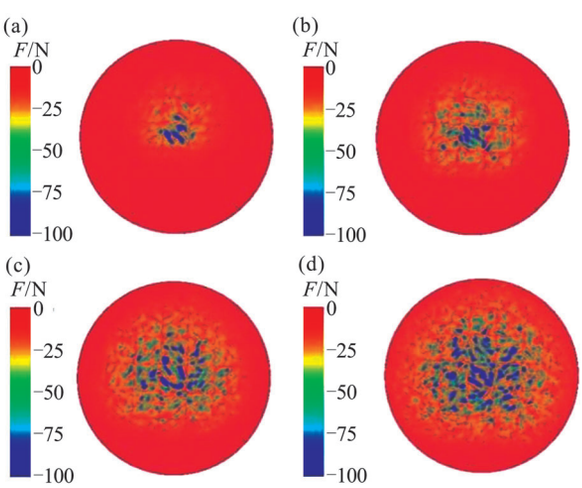


图 11　废钢落入铁水罐(含铁水)过程中不同时刻底部各区域的受力云图

Fig. 11　Contour plots of stress distribution at bottom regions of hot metal ladle (containing molten iron) during scrap steel charging at different time instants

(a)—0;(b)—10 s;(c)—15 s;(d)—20 s.

由图可知,在模拟初期(t=5 s),冲击力高度集中于罐底中心区域(0,0);随着时间的推进,容器底部受到撞击的区域不断变大.

图 12 对比了空罐与留铁操作下废钢落入后铁水罐底部的受力情况.

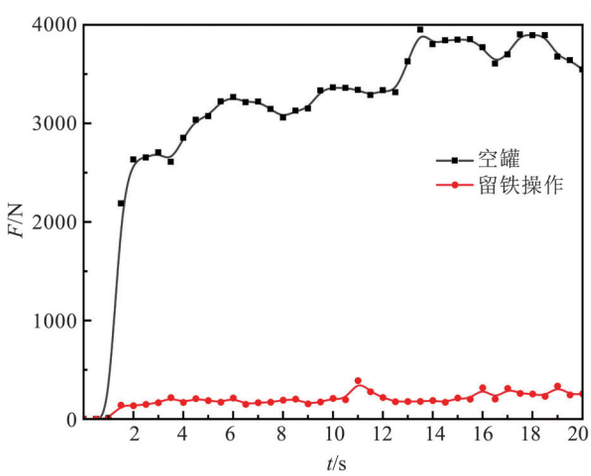


图 12　空罐和留铁操作下废钢装入对铁水罐炉衬冲击力分布的影响

Fig. 12　Impact stress distribution in ladle lining during scrap charging: empty vs. residual molten iron conditions

从图中可看出:空罐状态下,废钢落入时底部受力大,冲击力最大值为 3 950 N,平均值约为 3 109 N;留铁操作下,因铁水有缓冲作用,废钢落入对底部产生的冲击力显著减小,最大值仅为 389 N,平均值则低至约 200 N.不难发现,与空罐状态相比,留铁操作使铁水罐底部受力降幅达 90% 以上.这是因为空罐加料时,废钢直接冲击罐

底,产生较大的冲击力,易造成罐衬机械损伤,加剧衬体磨损、变形乃至开裂,缩短铁水罐服役寿命、破坏罐体结构完整性.

随着罐内铁水体积的增加,铁水层对下落废钢的缓冲效果逐步提升.废钢在重力作用下加速下落,接触铁水液面后,铁水黏性阻力与液面冲击产生的波动可耗散废钢部分动能,降低下落速度.铁水液位越高,废钢在液体内的穿行距离越长,受阻力作用时间越久,这会进一步削弱废钢冲击罐底的动能,有效减小罐底承受的冲击力.图13展示了不同铁水高度下罐底冲击力对比结果.当铁水高度为0.03 m、罐内铁水为3.15 t时,最大冲击力和平均冲击力分别为331 N和236 N.当铁水高度为0.09 m、罐内铁水9.31 t时,最大冲击力降至311 N(与0.03 m时相比降低了6.04%),平均冲击力降至207 N(与0.03 m时相比降低了12.29%).当铁水高度为0.3 m、罐内铁水30.94 t时,最大冲击力进一步降至251 N(与0.03 m时相比降低了24.17%),平均冲击力降至约181 N(与0.03 m时相比降低了23.31%).综上,增加铁水高度对减轻容器底部的冲击力具有积极作用.

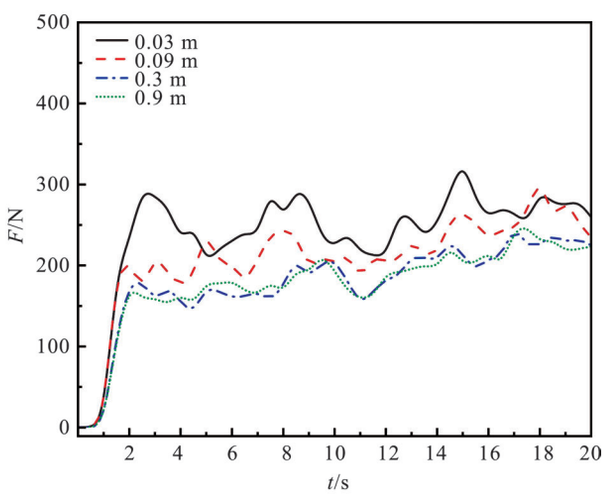


图13 不同铁水高度下铁水罐底部所受冲击力的对比

Fig. 13 Comparison of impact force magnitudes exerted on bottom of hot metal ladle at different hot metal heights

还可以发现,这种影响并非简单的线性变化.从图13中还可以看出,当铁水高度处于在0.9 m、罐内铁水为92.82 t时,最大冲击力为248 N(与0.3 m时相比降幅约1.2%),平均冲击力约为179 N(与0.3 m时相比降低了约1.1%).这一现象表明,当铁水达到一定高度后,继续增大铁水体积,冲击力的降幅逐步趋缓.究其原因:当铁水量充足时,废钢在铁水中的减速过程基本趋于稳定;进一步提升铁水高度,废钢动能的耗散增量有限,削减冲击力的作用不再明显.

3 生产实践

结合模拟研究结果,为减轻废钢装入对铁水罐的冲击损伤,现场可优化废钢装入工艺:优先选用破碎块状废钢,摒弃大块、片状废钢;采用分批投料方式,降低废钢装入速度;同时,严控罐衬耐火砖施工质量.采用上述优化方案后,铁水罐平均服役包次得到显著提升.

4 结论

(1) 同等加料条件下,薄片形废钢尖角易造成罐衬局部应力集中,对炉衬破坏程度更高;圆柱形废钢载荷分散、冲击更小,罐底中心平均冲击力较薄片废钢低16.5%.

(2) 废钢质量流速与罐衬冲击正相关,流速由200 kg/s提升至1 000 kg/s时,罐底中心最大压强上升48.93%、平均压强上升56.45%,低速分批投料可有效降低衬体冲击损伤.

(3) 罐内留存铁水可依靠液相缓冲使罐底冲击力下降90%以上;铁水液位0.03~0.3 m区间,缓冲效果随液位升高明显增强,液位超过0.9 m后,继续增加存铁量的降冲击效果趋于平缓.

(4) 现场优选块状圆柱废钢、控制投料速率、工艺允许时适度留铁,能够有效延长铁水罐服役寿命.

5 参考文献

[1] 常宇辉,魏国,张禹,等. 鱼雷罐内纯氧助燃预热废钢的数值模拟[J]. 材料与冶金学报,2023,22(4):330-336.
(Chang Yuhui, Wei Guo, Zhang Yu, et al. Numerical simulation on preheating scrap with oxy-fuel combustion in torpedo[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2023,22(4):330-336.)

[2] 王国栋,张龙强,付静,等. “双碳”背景下我国废钢资源高质循环利用战略研究[J]. 中国工程科学,2024,26(3):63-73.
(Wang Guodong, Zhang Longqiang, Fu Jing, et al. High-quality recycling and utilization of China's steel scrap resources in the context of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Strategic Study of CAE,2024,26(3):63-73.)

[3] 田春健,臧喜民,张利武,等. 转炉高废钢比炼钢技术的发展状况与探讨[J]. 钢铁研究学报,2024,36(6):692-706.
(Tian Chunjian, Zang Ximin, Zhang Liwu, et al. Development status and discussion on high scrap steel ratio converter steelmaking technology[J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(6):692-706.)

[4] 王润哲,朱荣,昌欢. 废钢中Zn、Sn元素脱除技术研究进展[J]. 特殊钢,2025,46(6):43-53.
(Wang Runzhe, Zhu Rong, Chang Huan. Research progress

on the removal technologies of Zn and Sn elements from scrap steel[J]. Special Steel,2025,46(6):43-53.)

[5] 韩伟刚,郦秀萍,张春霞,等. 铁水包空包加盖保温效果[J]. 钢铁,2015,50(12):91-94.
(Han Weigang, Li Xiuping, Zhang Chunxia, et al. Heat preservation of hot metal ladle by capping[J]. Iron & Steel, 2015,50(12):91-94.)

[6] 魏薇. 优化转炉炼钢炉料结构的几点思考[J]. 世界钢铁,2014,14(1):6-8.
(Wei Wei. Study on the optimization of burden structure for BOF steelmaking[J]. World Iron & Steel,2014,14(1):6-8.)

[7] Gao F,Wang Z D ,Bao P Y,et al. Research on the Precise Addition of Scrap Steel Based on Molten Iron Conditions During the Converter Smelting Process [J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2024,10(4):1-16.

[8] 蔡昌旺,李天学. 鱼雷罐内加废钢对耐材影响分析[J]. 甘肃冶金,2024,46(1):25-28.
(Cai Changwang, Li Tianxue. Analysis of influence of scrap steel in torpedo tank on resistant materials [J]. Gansu Metallurgy,2024,46(1):25-28.)

[9] 伍洋,谭方关,李亚伟,等. 铁水包底砌筑结构对应力分布的影响[J]. 钢铁研究学报,2023,35(7):801-810.
(Wu Yang, Tan Fangguan, Li Yawei, et al. Influence of masonry structure at bottom of hot metal ladle on stress distribution[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(7):801-810.)

[10] 徐国涛,赵元,吴杰,等. 加废钢条件下铁水包的异常侵蚀与用材问题探讨[J]. 耐火材料,2022,56(1):56-60.
(Xu Guotao, Zhao Yuan, Wu Jie, et al. Discussion on abnormal corrosion and material selection of hot iron ladles with steel scrap addition[J]. Refractories,2022,56(1):56-60.)

[11] Tahmasebi P. A state-of-the-art review of experimental and computational studies of granular materials: Properties, advances, challenges, and future directions [J]. Progress in Materials Science,2023,138:101157.

[12] Ueda S, Natsui S, Fan Z Y, et al. Influences of physical properties of particle in discrete element method on descending phenomena and stress distribution in blast furnace [J]. ISIJ International,2010,50(7):981-986.

[13] Wang L G,Ge R H,Chen X Z. Establishing an oblique impact breakage master curve using a DEM bonded contact model[J]. Computers and Geotechnics,2022,145:104668.

[14] 杨鑫康,赖徐强. 基于 EDEM 的新型溜井落矿轨迹及受力特征分析研究[J]. 黄金,2025,46(11):23-28.
(Yang Xinkang, Lai Xuqiang. Analysis of ore trajectory and force characteristics in new ore passes based on EDEM[J]. Gold,2025,46(11):23-28.)

[15] 吕坤. 高炉炉型与炉料结构适应性离散元模拟[D]. 沈阳:东北大学,2021.
(Lü Kun. EDM simulation of adaptability between blast furnace profile and burden structure [D]. Shenyang: Northeastern University,2021.)

[16] Mitra T, Saxén H. Simulation of burden distribution and charging in an ironmaking blast furnace [J]. IFAC-PapersOnLine,2015,48(17):183-188.

[17] Georgakopoulos E, Hosseini A, Kerry T, et al. Experimental and discrete element method analysis of galvanized steel scrap particles along and after an inclined chute[J]. Steel Research International,2022,93(8):2200075.

(上接第 484 页)

[23] Wu D,Ma B,Zhang J,et al. Working fluid pair selection of thermally integrated pumped thermal electricity storage system for waste heat recovery and energy storage [J]. Applied Energy,2024,371:123693.

[24] Qiao H N, Yang B, Yu X H. Development of an efficient cross-scale model for working fluid selection of Rankine-based Carnot battery based on group contribution method [J]. Renewable Energy, 2025, 238: 121961.

[25] Xia R,Wang Z,Cao M L,et al. Comprehensive performance analysis of cold storage Rankine Carnot batteries: energy, exergy,economic,and environmental perspectives[J]. Energy Conversion and Management,2023,293:117485.

[26] 冯军胜,王欢欢,王海涛,等. 热源温度对亚临界 ORC 系统热经济性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(12):4866-4875.
(Feng Junsheng, Wang Huanhuan, Wang Haitao, et al. Effect of heat source temperature on thermal-economic performance of subcritical ORC system [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53 (12): 4866-4875.)