钢渣综合利用研究现状

王吉凤[1]，付恒毅[2]，闫晓彤[1]，王　乐[1]，王鹏程[3]

（1. 华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山　063210；2. 华北理工大学 电气工程学院，河北 唐山　063210；
3. 北京科技大学 钢铁共性技术协同创新中心，北京　100083）

［摘　要］　钢渣是钢铁企业利用率比较低的大宗固体废物之一，目前我国钢渣的综合利用率仅为 20% 左右，与许多发达国家 90% 以上的钢渣利用率相差甚远，尚未利用的钢渣存放量高达 10 亿 t。本文综合分析了国内外学者关于钢渣综合利用的文献，主要从以下几方面进行阐述：首先，简单对比分析国内主要的六种钢渣处理工艺及其优缺点；其次，从企业内部循环利用的角度分析介绍钢渣在有价金属回收、烧结方面的应用；最后，从企业外部非循环利用的角度出发分析介绍钢渣在建筑材料、筑路施工、农业肥料、陶瓷产品、海域及水污染治理等领域的综合利用现状。通过分析，笔者认为建立更加详细的钢渣分类系统、升级粉磨工艺及设备是钢渣综合利用的前提。

［关键词］　钢渣；处理工艺；存放量；综合利用；有价金属回收；利用率；钢渣分类

［中图分类号］　TF4；X757　　［文献标志码］　A　　［文章编号］　1672-6103(2021)06-0077-06

DOI：10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.06.015

钢渣是由冶炼材料、冶炼过程中掉落的炉体材料、修补炉体的补炉料及各种金属等混合形成的高温固溶体[1]，其产量为粗钢产量的 15% ~20%。近些年随着钢铁产量不断提高，钢渣作为冶炼工艺的衍生物，其产量也不断递增，因其未得到及时的消纳利用，造成了钢渣的大量堆弃，这不仅导致土地的占用和资源的浪费，其所含的重金属元素还会污染空气、土壤和河流[2]。迄今为止，人类已开发出了近 40 种有关钢渣综合利用的方法，但目前尚未找到大规模资源化利用钢渣资源的有效途径[3]，缺乏更加先进的实现机械化的工业处理线，“钢渣零排放”仍是世界钢铁行业的难题。

1　国内钢渣处理工艺现状

目前国内钢渣主要的六种处理工艺及其优缺点对比如表 1 所示。其中热泼法、滚筒法、热闷法是国内处理钢渣的主要方法[4-6]。

将以上 6 种钢渣处理方法的工艺可行性、运行费用、钢渣分离率等参数进行比较，如表 1 所示。对比各钢渣处理方法的优缺点，仅从钢渣稳定性角度来看，风淬法、水淬法、滚筒法、热焖法都符合钢渣利用稳定性要求，其中，风淬和热焖处理工艺的投资相对较低，所以这两种也是国内目前普遍使用的方法。另外，大多数处理渣的状态都是液态，针对固态的处理方法只有热泼和热焖两种，已经造成堆积的固体钢渣的处理还有待研究。

2　企业内部循环利用

目前，国内钢渣的利用还是以回收铁粉、用作烧结剂等企业内部循环利用的方式为主，可以分为富集回收有价金属和烧结配料两方面。

2.1　富集回收有价金属

通常钢渣中含有 20% 左右的铁氧化物，其中金属铁大约占 10%[7]，并夹杂有锰、铁等有价金属，所以采用对钢渣破碎、筛分、磁选等方式，将钢渣中的金属成分富集回收，投入高炉、转炉参与冶炼，以达到降低冶炼成本的目的[8]。目前国内大部分中小型钢铁企业利用钢渣的方式是以磁选铁粉为主，经

［收稿日期］2021-06-12　［修订日期］2021-07-17

［录用日期］2021-07-18　［出版日期］2021-12-28

［作者简介］王吉凤(1999—)，女，河北承德人，本科，研究方向为材料成型及控制工程。

［通讯作者］王乐(1985—)，男，博士，冶金工程系讲师，研究方向为资源综合利用。

［基金项目］河北省高等学校科学技术研究项目资助(ZD2021331)

［引用格式］王吉凤，付恒毅，闫晓彤，等. 钢渣综合利用研究现状［J］. 中国有色冶金，2021，50(6)：77－82.

表 1 不同钢渣处理工艺对比

处理工艺	风淬	水淬	热泼	滚筒	盘泼	热焖
处理周期	短(约 6 t/min)	短(约 2 t/min)	长(>24 h)	短(约 35 min)	较长	长(10 ~ 12 h)
处理渣状态	液态	液态	均可	液态	液态	均可
渣粒度/mm	≤5	≤5	0 ~ 500	5 ~ 10	>5	<20
渣均匀性	好	好	差	好	差	较差
钢渣稳定性	好	好	差	好	差	好
钢渣分离	好	好	差	好	差	好
可靠性	较好	差	好	差	好	好
占地面积	小	较大	大	小	较大	较大
环境污染	较大	较大	大	小	较大	小
投资	较低	高	低	高	高	较低
运行费用	低	低	低	较高	高	低
渣处理率/%	40 ~ 60	≤50	100	30 ~ 50	100	100

过破碎磁选处理后,回收得到的含铁料可返回冶炼工艺中循环利用,虽然处理工艺较为成熟,但是消纳量有限,钢渣的利用率较低。钢渣中金属的回收率,特别是铁的磁选回收率受破碎粒度的影响,粒度越精细回收率相对越高,所以对破碎粉磨设备的要求越来越高。目前的破碎设备主要为颚式破碎机、惯性圆锥破碎机和棒磨机等[9]。日本钢铁企业每年回收含铁量超过 95% 的铁粉达 18 万 t 左右。我国莱芜钢铁集团有限公司、鞍山钢铁集团公司、宝钢集团有限公司等钢铁企业也通过四破四选、三破五选五筛分等工艺回收钢渣中的金属铁[10]。

铁等有价金属的回收,既能减少原料消耗、降低经济成本,实现二次资源再利用,又能够去除钢渣中的重金属元素,有利于钢渣的进一步无污染综合利用。钢渣综合利用的前提为对钢渣进行预处理,为提高有价金属的回收率,需要不断地提升粉磨工艺设备,改善钢渣的难磨性。除此之外,将钢渣内部非磁性氧化物转变为磁性氧化物的氧化处理钢渣的新处理方法,也为提高有价金属磁选的回收率提供了新方向。

2.2 用作烧结配料

钢渣中存在 40% ~50% 的氧化钙、6% ~10% 的氧化镁等,1 t 钢渣经过粉磨处理后可以代替 0.7 ~0.75 t 石灰石作烧结配料使用。钢渣用作烧结配料在许多中大型钢铁企业内部循环利用,已经取得了良好的经济效益和社会效益[11]。但钢渣用作烧结配料时对配料比例和钢渣粒度有要求,处理不当会造成 P 等有害元素的富集,导致铁水中 P 元素含量上升,进而影响炼钢过程的脱磷效果和成本[12]。

在烧结过程中可采取控制钢渣配加量、混料均匀化、优化原料结构、降低燃料用量、合理控制烧结矿碱度、增加风量和负压、改性脱磷处理等操作来提高烧结成品率。此外,钢铁冶炼主要是以铁元素为核心的物理、化学反应过程,随着铁矿石等生产原料的不断加入,以及钢渣用于烧结配料反复循环利用后,铁元素以外的副产品逐渐累积,会降低烧结矿的含铁品位,对高炉冶炼造成不利影响,影响钢渣的利用率。因此若钢渣仅作为烧结配料应用时不能满足钢渣大量应用的需求,还需寻找大规模综合利用钢渣的有效方法,实现钢渣“变废为宝”是研究的主要方向。

3 钢渣综合利用——企业外部非循环利用

企业外部非循环利用指的是将钢渣用于除冶金工艺以外的其他领域,通常需要对钢渣进行一定的处理,不同的应用领域处理方式不同,且为非循环利用。

3.1 钢渣应用在筑路施工领域

经研究发现,钢渣的物理性能与天然碎石相近,这也就为其在筑路领域中的应用提供了一定的可行性。但是钢渣中含有的的游离氧化钙遇水后反应生成氢氧化钙,使钢渣体积膨胀 98%;温度降低时,钢

渣中的 C_3S 和 C_2S 还会发生相变造成体积的膨胀[13-14]。体积膨胀会导致道路、建材制品的开裂，成为制约钢渣利用的最大难题。

张妍等[15]通过碳酸化的处理方式，使钢渣中的硅酸盐、$Ca(OH)_2$、f-CaO 和 f-MgO 等物质与 CO_2 进行反应，生成以方解石（$Ca_XMg_{1-X}CO_3$）为主的碳酸盐，可有效改善钢渣体积膨胀问题。在 CO_2 含量为 99.9%、压力为 0.2 MPa、水固比为 0.1、钢渣比表面积为 483.58 m^2/kg 的条件下，碳酸化反应 20 min 后，钢渣粉中的 f-CaO 和 f-MgO 含量均降到 3% 以下，压蒸膨胀率降低到 0.29%，小于 0.5%，符合国家标准。

许博等[16]通过乙酸浸泡和掺入微硅粉两种处理方式来降低钢渣的体积膨胀率。其中乙酸浸泡处理对钢渣体积膨胀的抑制效果明显，膨胀率降低幅度达 76% 以上，能够满足在大多数工程中的应用。掺入微硅粉处理在掺量超过 4.8% 时，体积膨胀率小于 0.4%，效果较好，继续增大掺量则经济效益不大。除此之外，也有很多掺加其他矿物材料抑制钢渣膨胀性的方法，例如掺加粉煤灰、高炉水渣、矿渣微粉等，但是在掺入量达 5% 时，上述三种物料无论单独掺加还是两者结合都不如单掺硅粉抑制钢渣膨胀效果好。

钢渣在筑路领域的应用，与钢渣的凝胶性、掺料比、游离氧化物含量等有关，除此之外还与生产地域是否缺乏天然砂石原料有关，在经济预算符合预期的情况下，钢渣完全可以代替天然砂石用于土基、路面底基层、垫层、沟槽回填等。目前绝大多数钢渣的放射性与活度小于工业废渣放射性物质限制标准，其力学性能、化学指标在一定程度上也满足《公路路面基层施工技术细则 JTG－TF20—2015》等相关技术准则，因此能够满足堆弃钢渣的大量利用。

3.2　钢渣应用在建筑材料领域

钢渣中硅酸三钙（$3CaO\cdot SiO_2$）、硅酸二钙（$2CaO\cdot SiO_2$）、铝酸三钙（$3CaO\cdot Al_2O_3$）、铁铝酸四钙（$4CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3$）等矿相具有水硬凝胶性，遇水发生反应生成的 C—S—H 凝胶具有一定的强度，因此可以应用在建筑行业用于生产水泥、混凝土等材料。

3.2.1　水泥原料

日照京华新型建材有限公司将日钢钢渣进行了充分粉磨细化，具有良好的颗粒分布和填充密实作用，但也带来了钢渣微粉－水泥胶凝材料严重缓凝且早期强度过低的问题。柳东等[17]针对该问题对钢渣微粉进行特性分析，得到导致该问题的原因是在碱性溶液作用下，P 元素会随着钢渣中玻璃体的解聚逐渐释放，难溶性磷酸盐转变为可溶性磷酸盐，与 Ca^{2+} 结合形成羟基磷灰石，阻碍硅酸盐水泥熟料的正常水化，且这种变化在 12 h 内最明显。解决方法：钢渣微粉代替硅酸盐水泥时的适宜量为 15%，适宜掺加 4% 的 CaO 可以有效缩短其缓凝时间，增加水泥致密性；掺加适量 Na_2SO_4 对钢渣微粉－水泥凝胶材料水化物进行化学活化，可提高胶凝材料早期强度，过量时则会引起水泥石结构膨胀，导致后期强度降低。

3.2.2　混凝土

王琪等[18]以陈化钢渣骨料代替天然骨料，制备全钢渣透水性混凝土。研究结果表明：钢渣骨料的粒径在 4.75～9.5 mm 范围内，所制备的透水混凝土强度和透水性较好。透水性混凝土多孔式结构可在一定程度上抑制其体积膨胀性，得到的透水混凝土具有良好的力学性能和物理性能。我国海绵城市的建设为钢渣的利用提供了新的可行性途径，将产生良好的社会效益、绿色效益与经济效益。拌合物的工作性能对透水混凝土有很大影响，目前尚未有一致的准确测量方法的手段，未来需开展此方面的深入研究。

陈华等[19]为解决宝钢集团有限公司 2 万 t/a 的特殊钢渣的处理利用问题，将其作为掺合料制备发泡混凝土。特殊钢渣即为经过预处理的钢渣，其游离氧化钙的含量极低，其中的 Pb、Ni、Cr 等重金属含量超标，不能直接使用，且具有难磨、凝胶性差的特点。首先采取特殊钢渣就地集中处理模式，通过水洗球磨、水摇床分选回收金属资源，其次将提取金属后剩余的钢渣微粉与粉煤灰混合作为矿物掺合料代替部分水泥，用以制作发泡混凝土，最终得到制备发泡混凝土所用水泥、钢渣微粉、粉煤灰、发泡剂的最佳掺和比约为 12∶5∶2∶1。钢渣中的 C_3S 在制备发泡混凝土过程中迅速水化，C_2S 和 $Ca_3Al_6Si_2O_{16}$ 也在后期发生缓慢水化，生成 C—S—H 凝胶剂有助于提高发泡混凝土的力学性能，同时能有效固化重金属。特殊钢渣较一般废弃钢渣来说，可以起到提升发泡混凝土力学性能的凝胶活性作用、惰性充填作用、抑制重金属浸出的化学固化和物理包裹作用，使钢渣在应用于发泡混凝土方面更具有安全性。

钢渣中含有 C_3S、C_2S 等矿相,其水化性能比水泥熟料中矿相水化性能低,所以钢渣需要进一步的加工处理,比如掺加一定量的掺合料和适量石膏,经混合、球磨后,可生产钢渣水泥;或者粉磨到一定比表面积的微粉,可以用作水泥熟料或者混凝土掺合料。钢渣在此领域不仅适用范围广,而且需求量大,能够消纳大量钢渣。但是掺和物的选择及对后续性能的影响,尚未有详细的描述、检测手段,需要进一步研究。

3.3 钢渣应用在农业领域

3.3.1 硅钙肥原料

法国、德国、波兰等许多欧洲国家在利用钢渣制作农业肥料方面研究了很多年,近年来我国对钢渣制作农业肥料的研究也取得了一定成果[20]。宁东峰等[21]通过比较不同成品钢渣对水稻生长、生产和害虫防御的作用,研究钢渣中硅的释放规律。研究发现:加入钢渣能够在水稻缺乏相应硅元素时,提高水稻叶片内的含硅量并促进水稻的生长、生产和对病虫的妨害。但是由于钢渣成分复杂,不同处理方式、不同原产地的钢渣中有效硅含量不同,水淬渣的含硅量明显高于自然空气缓冷情况下的含硅量,当钢渣中可被植物吸收的有效性含硅量大于 15% 时,被称为高品质硅肥原料。

在日本,丸岡伸洋等[22]提出了一种模拟水田条件的填土柱试验方法,该柱由含有孔隙水和土壤肥料的耕作层,以及一层地表水组成。利用炼钢渣中含有的 CaO 和 SiO_2,通过脱盐处理和二氧化硅施肥的方法洗去过量的 Na,用于恢复日本东北部海岸附近因海啸而受到破坏的稻田。钢渣用来补充钙可以有效降低钠的浓度,因此具有较大的潜力能够成为恢复沿海稻田的经济化解决方案。

3.3.2 土壤改良

钢渣中的 Ca、Mg 元素含量较高,多以碱性化合物的形式存在,所以可部分代替传统石灰用于改良酸性土壤,通常含磷量为 4% ~7% 的钢渣可用作土壤改良剂[23]。

魏贤等[24]研究施用钢渣对小麦-水稻轮作条件下酸性土壤的改良效果,结果显示钢渣能够提高土壤的 pH 值,增加农作物的产量。

况琴等[25]利用钢渣和生物质炭调控富硒区土壤,以提高硒的生物有效性。钢渣增加土壤 pH 值的效果有益于活化土壤中的硒元素,硒的有效性可提高 1.4 ~2.0 倍,而生物质炭活化土壤中硒的效果不明显。

钢渣中含有大量植物生长所需要的有益元素,同时钢渣具有较大的比表面积和孔隙度,是优良的硅钙肥原料和酸性土壤改良剂。另外,不同成分的钢渣能否作为硅肥原料、土壤改良剂,很大程度上取决于其所含成分,对于一些含有重金属元素,尤其是重金属含量超标的钢渣,因具有二次污染风险,因而限制了其在农业领域的应用。

3.4 钢渣应用在陶瓷产品领域

钢渣含有大量的硅酸盐成分,加以处理可以满足制备微晶玻璃、透明玻璃和彩色玻璃陶瓷的需求。微晶玻璃具有良好的物理化学性能,应用广泛;透明玻璃和彩色玻璃陶瓷,可用于建筑装饰[26]。

孙靖婷等[27]利用氯化铵浸取钢渣-熔融还原提铁制备微晶玻璃。首先将钢渣进行铵浸萃取 Ca 元素并且就地固定 CO_2 的初步处理,进而混合 SiO_2 后还原提取铁元素,最后利用还原渣在 800 ℃下核化 1 h,960 ℃下晶化 1 h 并加入形核剂制备微晶玻璃。该处理方法采用氯化铵浸出 CaO,使钢渣的稳定性增强,后续加入少量改质剂还原提取铁,制备微晶玻璃主晶相为透辉石,夹杂部分钙长石。

赵立华[28]利用 Ca、Fe 含量较高的钢渣制备硅钙陶瓷材料。Fe 元素有促进辉石陶瓷致密化、增强晶相等作用,但是 Fe 元素含量过高则不利于陶瓷烧结和提升陶瓷性能;此外,Fe_2O_3 在小于 10% 时能够提高辉石系陶瓷的抗折强度,CaO 与黏土和滑石等原料的分解产物作用生成的钙长石、透辉石等促进了样品在致密化之前完成初结晶过程,生成的晶体后续在陶瓷烧结过程中也起到重要的支撑骨架作用。最终工业试验结果:在烧结温度 1 180 ℃,烧结时间 75 min 条件下,得到的钢渣辉石陶瓷砖具有良好的物理化学性能,施釉效果较为理想,有较大的推广性和应用性。

陶瓷工业对原料消耗量大,可以消纳大量的钢渣。传统陶瓷工艺要求原料的游离氧化钙含量小于 3% ,所以限制钢渣在陶瓷原料上利用的根本原因依然是钢渣内游离氧化物的含量。近年来,建立以钢渣为原料的新型陶瓷工艺成为主要研究方向,例如以富 CaO 钢渣为原料的 Si-Ca 基陶瓷、利用表面活性剂制备的泡沫陶瓷、以钢渣和粉煤灰为原料的新型钢渣陶瓷、瓷质釉面砖、多孔陶瓷等,不仅增加对

堆弃钢渣的消纳量，更提高了陶瓷产品的各项性能。

3.5　钢渣应用在其他领域

3.5.1　海域环境领域

目前为止，日本的钢渣利用率高达 98%，除了返回循环利用和应用于道路、建筑、农业肥料等方面，还在海洋环境应用领域开发了新的工艺。钢渣中含有的 FeO、SiO_2是海藻生长所需的必要元素，所以可以将钢渣应用在贫瘠海域作为化肥和地基材料，钢渣中大量的 CaO 可以将导致海水富营养化的 P 元素固化，此外钢渣呈碱性并含有大量 Fe，可以抑制沉积在海底的硫化物还原为硫化氢[29-31]。因此，住友金属、新日铁等钢铁企业利用钢渣的各项成分改善修复海域环境。

我国是海洋大国，海岸线有 1.8 万 km，近年来海洋环境污染严重，我国沿海钢铁企业分布较多，开发钢渣新产品改善海洋环境成为我国钢渣大规模利用的新方向。

3.5.2　水污染治理领域

钢渣表面呈多孔式结构，具有良好的吸附能力，通过钢渣改性或与其他物料形成复合颗粒，可应用于水污染治理领域[32]。闫英师[33]利用改性钢渣处理选矿废水中的 Pb^{2+}、Zn^{2+}，结果表明改性钢渣对 Pb^{2+}、Zn^{2+}具有良好的吸附效果，吸附方式为单分子层吸附，涉及到电子转移与共用，吸附反应速率受化学吸附机制影响。以硫酸浓度为 2 mol/L 为最佳条件对钢渣进行改性时，Pb^{2+} 的去除率最高达到 97.1%；以高温为 700 ℃为最佳改性条件时，Zn^{2+} 的去除率最高达 96.46%，比钢渣改性前提高 20 个百分点。但是 Pb^{2+}、Zn^{2+}之间存在竞争吸附，所以 Pb、Zn 混合离子的去除率均小于单一离子去除率，混合离子的竞争关系机理和去除率的影响因素还需进一步深入研究。

除此之外，钢渣已经在处理氮磷废水、金属离子废水、染料废水、焦化废水、有机废水等领域取得了较好的效果，实现了“以废治废，变废为宝”的绿色理念[34]，是未来钢渣综合利用的理想发展方向。

4　结论及展望

通过对钢渣利用难点以及在各个应用领域的应用现状分析，钢渣的利用方式逐渐多元化、综合化、规范化。但是尚缺乏更加合理、经济、大规模的工业化处理方式，提高钢渣利用率还需进一步解决如下根本性问题。

1）解决钢渣成分复杂性的问题，需要开发出合理、精确的检测手段及设备，建立更加详细、精确的钢渣成分、矿物分类标准，实现钢渣的分类应用，因地制宜，提高钢渣的综合利用率。

2）激发钢渣的凝胶活性，提高钢渣在水泥、混凝土应用领域中的消纳量，可大大提高对钢渣的处理能力。目前，对于碱激发矿渣胶凝材料的研究已经比较成熟，而碱激发钢渣胶凝材料的研究较少，因此，研究碱激发钢渣胶凝材料是一个有潜力的课题和方向。

3）钢渣中的游离氧化钙等引起的体积不稳定性问题是制约钢渣在道路工程、建筑工程中利用的最大难题，需要探索更加经济、有效提高钢渣稳定性的工艺路线。

4）钢渣的利用还受其粉磨工艺及设备的影响，钢渣的粉磨粒度越精细，铁等金属的回收率越高，越有利于钢渣的进一步应用，所以升级粉磨工艺及设备是钢渣综合利用的前提。

［参考文献］

［1］　杨淇，连芳，文天阳，等. 利用钢渣尾渣制备耐火喷涂料的试验研究［J］. 矿物学报，2012，32（S1）：194－195.

［2］　曹杨. 盛隆冶金钢渣在道路工程中应用的可行性研究［J］. 西部交通科技，2019（10）：44－47.

［3］　高雪松，金振来，杨小峰. 利用钢渣换填路基的鉴定与应用研究［J］. 北方交通，2011（6）：51－52.

［4］　薛鹏. 转炉渣中镁铁尖晶石的形成机理及磁选提铁研究［D］. 北京：北京科技大学，2018.

［5］　向俊一. 转炉钒渣钙化提钒工艺优化及提钒尾渣综合利用基础研究［D］. 重庆：重庆大学，2018.

［6］　孙朋，郭占成. 钢渣的胶凝活性及其激发的研究进展［J］. 硅酸盐通报，2014，33（9）：2230－2235.

［7］　吴龙，郝以党，岳昌盛，等. 钢渣热闷处理及资源化利用技术［J］. 工业加热，2016，45（2）：46－50.

［8］　杨建华. 冶金钢渣制备混凝土路面砖的应用与研究［D］. 西安：西安建筑科技大学，2018.

［9］　ZHOU Yuqi，SUN Jianwei，LIAO Yanwu. Influence of ground granulated blast furnace slag on the early hydration and microstructure of alkali-activated converter steel slag binder［J］. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry，2020：1－10.

［10］　罗莉萍. 钢渣的处理工艺和利用现状［J］. 中国金属通报，2020（1）：220－221.

［11］　郭家林，赵俊学，黄敏. 钢渣综合利用技术综述及建议［J］. 中国冶金，2009，19（2）：35－38.

［12］　FENG Yu，CAO Yuanfang，YANG Zhang，et al. Mechanical behavior of self-stressing Steel Slag Aggregate Concrete Filled Steel

Tubular short columns with different loading modes[J]. Structures, 2020, 26: 947 – 957.

[13] SONG Weilong, ZHU Zhiduo, PU Shaoyun, et al. Efficient use of steel slag in alkali-activated fly ash-steel slag-ground granulated blast furnace slag ternary blends[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259(1). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119814.

[14] 钱强. 转炉渣中 f-CaO 的消解研究[J]. 鞍钢技术, 2010(4): 43 – 45.

[15] 张妍, 常钧, 何萍. 钢渣中游离氧化钙和氧化镁碳酸化反应[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(6): 634 – 640.

[16] 许博, 蓝天助, 刘朝晖, 等. 不同处理工艺对钢渣膨胀稳定性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(1): 88 – 94.

[17] 柳东. 日钢钢渣微粉在混凝土中的应用[D]. 济南: 济南大学, 2014.

[18] 王琪. 迁钢未陈化钢渣透水混凝土试验研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.

[19] 陈华. 利用特殊钢渣微粉制备发泡混凝土的基础研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.

[20] 张朝晖, 廖杰龙, 巨建涛, 等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(7): 1 – 4.

[21] 宁东峰, 宋阿琳, 梁永超. 钢渣硅肥硅素释放规律及其影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 500 – 508.

[22] MARIKA N, OKUBO M, SHIBATA H, et al. Improvement of desalted paddy soil by the application of fertilizer made of steelmaking slag (Recovery of a paddy field damaged by the tsunami using fertilizer made of steelmaking slag-1)[J]. Tetsu-to-Hagane, 2015, 101(8): 445 – 456.

[23] 张建松, 张玉柱, 张遵乾. 钢渣综合利用[C]//2014 年低成本炼钢共性技术研讨会论文集. 2014: 4.

[26] 张建松,张玉柱,张遵乾. 钢渣综合利用[C]//2014 年低成本炼钢共性技术研讨会论文集. 2014: 315 – 318.

[24] 魏贤, 赵梦霖, 邹雪园. 小麦–水稻轮作下施用钢渣对酸性土壤的改良效果[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(19): 104 – 106.

[25] 况琴, 吴山, 黄庭, 等. 生物质炭和钢渣对江西丰城典型富硒区土壤硒有效性的调控效果与机理研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6): 705 – 714.

[26] HE Tusheng, LI Zaibo, ZHAO Sanyin, et al. Effect of reductive component-conditioning materials on the composition, structure, and properties of reconstructed BOF slag[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119269.

[27] 孙靖婷, 谭昭君, 王江, 等. 铵浸钢渣熔融还原提铁制备微晶玻璃研究[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(5): 908 – 912.

[28] 赵立华. 利用钢渣制备高钙高铁陶瓷的基础及应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.

[29] PAOLA Librandi, GIULIA Costa, STEFANO Stendardo, et al. Carbonation of BOF slag in a rotary kiln reactor in view of the scale-up of the wet route process[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019, 38(3). doi: 10.1002/ep.13140.

[30] HUANG Xuesong, ZHANG Yingjie, LI Xue, et al. Direct preparation of polysilicic acid flocculant by using pickling waste liquor of metal plate[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 36. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101267.

[31] 景馨, 毛艳丽, 曲余玲, 等. 钢渣在修复海洋环境中的应用[C]//第八届中国金属学会青年学术年会. 2016: 338 – 340.

[32] 朱雁风, 张林帅, 张子阳. 钢渣处理含铬离子废水的研究[J]. 中国粉体工业, 2020(2): 31 – 34.

[33] 闫英师. 改性钢渣去除矿山废水中铅、锌离子的试验研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.

[34] 张宇丰, 姜东域, 张致远. 钢渣应用于处理工业废水的进展[J]. 宁波化工, 2016(1): 1 – 6.

Research status of comprehensive utilization of steel slag

WANG Ji-feng, FU Heng-yi, YAN Xiao-tong, WANG Le, WANG Peng-cheng

Abstract: Steel slag is one of the bulk sold wastes that have not been well utilized by steel mills. At present, the overall utilization rate of steel slag in China is only around 20%, much lower than in many developed countries, in which over 90% of the slag can be utilized. The amount of unused steel slag stock in China is enormous: 1 billion metric tons. After an overview of the related literature by scholars of China and other countries on steel slag utilization, the paper gives a short description of the six main processes of steel slag treatment in China, and compares their advantages and disadvantages. Then the paper reviews the recycling practices inside steel mills, including recovering valuable metals and sintering. Lastly the paper reviews the recycling practices outside steel mills, including the utilization of steel slag in construction materials making, road pavement, fertilizers, ceramic products, pollution control of sea and other water bodies. The paper concludes that for better utilization of steel slag, a more detailed classification system, upgraded milling process and equipment are needed.

Key words: steel slag; treatment processes; slag storage; comprehensive utilization; recovery of valuable metals; utilization rate; classification of steel slag