

高炉炉渣余热回收技术的研究进展

王波, 王夕晨, 袁益超, 周秋平
(上海理工大学 能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要: 本文介绍了固体颗粒冲击、机械搅拌、转鼓粒化、离心粒化和风淬等国外的高炉炉渣余热回收系统, 对我国应用高炉炉渣余热回收处理技术的现状进行了总结。在比较国内国外同类技术的优缺点后, 指出基于离心粒化技术的余热回收系统具有粒化性能优异、回收效率高等优点, 据此认为有必要进一步研究该系统运行能耗、系统稳定性和控制参数以及渣粒的处理能力和粒径的均匀性等问题, 以尽早实现商业化应用。

关键词: 高炉渣; 粒化; 传热; 余热回收

中图分类号: X756 文献标识码: A

引言

钢铁工业是能源密集型产业, 其能耗约为中国总能耗的 10% - 15%^[1]。高炉炉渣是钢铁工业中最主要的废弃物, 每生产一吨铁约产生 300 kg 高炉炉渣, 其出炉温度通常在 1 400 °C 以上, 含有大量的热量。2010 年中国生铁产量约为 5.9 亿 t, 产生高炉炉渣约 1.8 亿 t, 水力除渣过程中损失的热量达到 2.7×10^8 GJ, 折合标准煤约 920 万 t。因此回收利用高炉炉渣的余热对炼钢行业节能减排, 提高能源效率, 有着至关重要的作用。

目前, 国内外已有不少机构致力于高炉炉渣的余热回收系统的研究和开发。常规的高炉渣余热回收过程中, 一般是先将液态高炉炉渣进行初步冷却粒化, 然后将固化的渣粒送入余热回收装置进行热量的回收。本文介绍了高炉炉渣的基本特性, 讨论了典型高炉炉渣余热回收系统的工作原理、工艺流程和热量回收效果, 为今后高炉炉渣余热回收技术的进一步发展和实际应用提供参考。

1 高炉炉渣余热回收的制约因素

1.1 物理性质

高炉炉渣的导热系数较低, 这是余热回收的一个

重要制约因素。在 1 400 - 1 500 °C 高炉炉渣处于液态时, 导热系数在 $0.1 - 0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[2]。当处于固态时, 导热系数在 $7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右。Goto 等通过红外测量技术测定了 20 - 1 500 °C 范围内高炉渣导热系数的变化规律^[3]。研究结果表明处于固态的高炉炉渣, 其导热系数会随着温度的升高而增加 $1 - 2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。然而这一变化规律会在 1 200 °C 左右炉渣由固体向液体产生相变的过程中, 发生改变。此时高炉炉渣的导热系数随着温度的上升而减小。所以, 导热系数低使得高炉炉渣的粒化成为了余热回收的一个限制因素。粒化后的渣粒大小直接影响换热介质和渣粒的热交换效果。渣粒较小时, 可以在较短的时间内获得较好的传热效果。

相当一部分余热回收设备对熔渣流动性的要求比较高, 以达到最佳的熔渣流量和风量的配比。普通高温熔渣粘度在 $0.2 - 0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 并且随着温度的降低粘度缓慢增加, 大约 1 320 °C 时开始出现凝固相后, 熔渣粘度急剧增加。此外, 成分对熔渣粘度也有一定的影响^[4]。

1.2 能耗与污染

高炉熔渣的排放量大, 而且排出时的温度一般超过 1 400 °C, 其所含热量较高, 具有显著的回收价值, 但传统的湿法处理方式对环境污染比较严重。

传统的水力冲渣方式会造成大量水资源的消耗和热量的浪费, 尤其是一些钢铁企业处于缺水地区, 这一因素的制约就显得尤其突出。此外, 在对炉渣进行湿法处理的过程中, 还会产生 SO_x 和 H_2S 等酸性气体, 从而造成环境污染。若要对湿法处理以后的高炉炉渣进行进一步利用, 还需要消耗相当一部分的能量对湿渣进行干燥。因此对高炉炉渣的干法处理技术的开发和应用将成为趋势。

如果用空气或者氮气作为冷却介质来回收高炉炉渣的热量, 则排渣温度越低, 回收效率越高, 所需气体的流量也越大, 相应的送风机的功率也越高, 因

收稿日期: 2013-09-12; 修订日期: 2013-12-16

作者简介: 王波(1981-), 男, 四川珙县人, 上海理工大学副教授, 博士。

此设计余热回收装置时应综合考虑回收的热量、装置的投资和运行成本。如果采取传热管束等间壁式热交换方式,虽然管内液体的比热和换热系数都相比气体更大,但可能存在管子磨损等风险。所以,高炉炉渣的余热回收应选择合适换热介质种类、流量和进出口温度等参数,以达到综合效益的最大化。

1.3 冷渣的利用

高炉炉渣中不仅携带了大量余热可资利用,并且粒化高炉炉渣本身具有水泥材料的性质,因而可以用于生产水泥。高炉炉渣的主要是由 CaO、MgO、Al₂O₃ 和 SiO₂ 等组成的硅酸盐和铝酸盐,个别含有 TiO₂、V₂O₅ 等。Al₂O₃ 和 SiO₂ 主要来自矿石中的脉石和焦炭中的灰分,CaO 和 MgO 主要来自熔剂^[5]。

需要特别指出的是,粒化高炉炉渣的活性不仅取决于化学成分而且更重要的是取决于冷却条件^[6]。冷却速度越快,它的性质就越接近于水泥材料的水硬性和强度。所以在对熔渣进行粒化处理的过程中,必须保持一定的冷却速度,以促成其形成更多具有粘结性和水硬性的玻璃体结构,使得它能够成为高附加值的产品。同时,由于它替代了水泥生产,从而避免了水泥制造中排放的大量 CO₂ 温室气体。综上所述,在进行余热回收的过程中,也要将高炉炉渣后期的利用品质考虑在内。

2 国外高炉炉渣余热回收系统的发展现状

高炉炉渣余热回收技术发展至今,粒化始终是一个必不可少的环节。目前,基于机械碎渣法、风淬法以及离心粒化法已经衍生出了一系列的余热回收系统。

2.1 机械碎渣余热回收系统

2.1.1 固体颗粒冲击法

固体颗粒冲击法是用循环固态颗粒对高温熔渣进行淬碎。该系统最早由瑞典 Merotec 公司开发,如图 1 所示。

在这个工艺中是利用已固化的循环渣粒将新渣进行淬碎,所以设计了两个渣粒回收装置。液态渣以约 1 300 °C 的高温从渣罐倒入粒化机中。最终通过筛子将渣粒分成 >3 mm 和 0-3 mm 两种粒径规格。前者直接回收在右侧回收装置中,后者作为循环渣粒进入左侧回收装置,由渣管返回循环渣容器,与渣罐中 1 300 °C 高温液态渣一起送入粒化机进行粒化,粒化后的新旧渣混合物继续送入流化床换热器进行余热回收。在流化床中,高炉炉渣与空气通

过对流的方式进行传热,流化床内渣粒的温度可以通过风量调节,一般为 500-800 °C^[7]。通过这种方式获得的渣粒粒径大部分在 6 mm 以下,而粒径处于 0-3 mm 的渣粒将会作为循环渣粒被送入粒化装置。此外,由于循环渣粒的存在,避免了新渣粒的粘结。流化空气通过风机进行再循环,空气带走的细渣粒则通过旋风除尘器进行捕集。运用该余热回收系统可产生大约 250 °C 的饱和蒸汽,余热回收效率大约在 65% 左右。但由于它的焓回收效率比较低,因此这一系统在很长一段时间内都没有进行商业化应用。

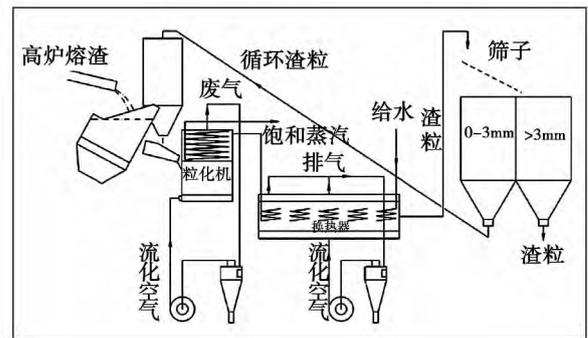


图 1 固态渣冲击法余热回收系统

Fig. 1 Solid-state slag impingement method-based waste heat recovery system

2.2.2 机械搅拌法

在机械搅拌法处理过程中,高温熔渣主要通过运动中的棍棒或刀片进行搅拌和击碎。日本 Kawasaki 钢铁公司开发了一种基于机械搅拌技术的高炉炉渣余热回收系统,如图 2 所示。

在这个系统中,高温熔渣在一个碗状的容器中,通过一个搅动的棍棒击打熔渣并破碎。在这个容器的周围布置着换热的水管,高炉炉渣的热量通过导热和辐射的形式和水管中的冷却水发生热量传递。然后,粒化了的炉渣被送入流化床,将它的余热传递给冷却空气,得到的热空气则被送进余热锅炉。这套系统的余热回收可以达到高温熔渣总热量的 59%。

而在另一个由日本 Sumitomo 金属开发的系统中,如图 3 所示,高温熔渣通过旋转叶片进行击碎粒化,而热量则以导热和辐射的方式传递给位于轴心的套管中的水。这套系统的排渣温度大约在 900 °C,其余热回收效率达到 50%。机械搅拌方法的主要缺点是淬碎后的渣粒粒径相对较大,这就增大了

它的导热热阻,因此余热回收效率不高,也不便于后续的高炉炉渣综合应用。目前,这两项技术都没有实现商业化应用。

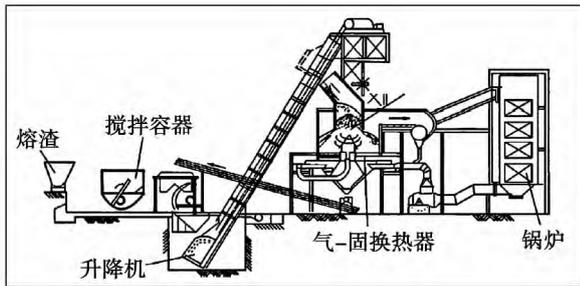


图 2 机械搅拌法余热回收系统 (Kawasaki 钢铁公司)

Fig. 2 Mechanically-agitated method-based waste heat recovery system (Kawasaki Iron and Steel Corporation)

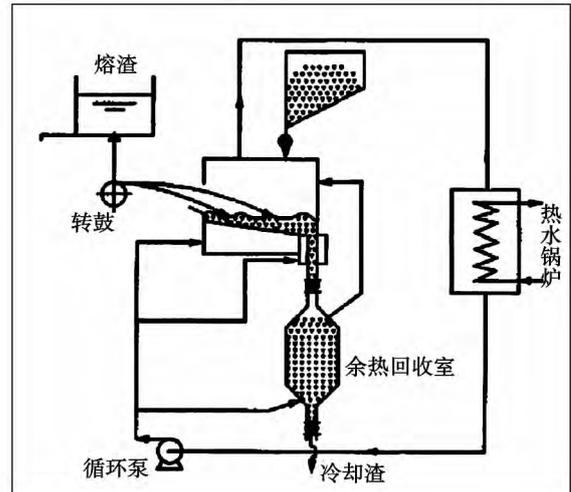


图 4 转鼓法余热回收系统 Fig. 4 Rotary drum method based waste heat recovery system

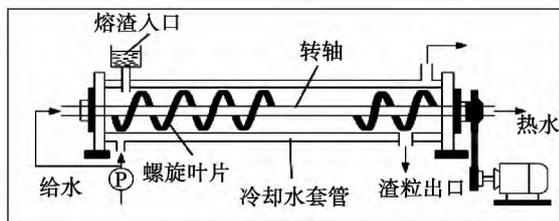


图 3 机械搅拌余热回收系统 (Sumitomo 金属公司)

Fig. 3 Mechanically-agitated method-based waste heat recovery system (Sumitomo Metal Co. Ltd.)

2.2.3 转鼓法

转鼓法是一种基于转鼓离心作用使液态渣冷却为固态渣的技术。在 20 世纪 80 年代早期,日本 Ishikawajima Harima 重工和 Sumitomo 钢铁公司开发了第一套基于转鼓技术的余热回收系统,如图 4 所示。

高温熔渣首先被倾倒在转鼓上,在转鼓的直接作用下破碎。然后,分离的高炉炉渣在转鼓离心力的作用下,甩入转鼓下容器中的倾斜面,再缓缓进入余热回收室。在这套系统中,空气可以被加热到 500℃ 的高温,并且余热回收效率也接近了 60%。该炉渣处理方法属于半急冷处理方法,所得产品可作混凝土骨料。

1984 年,日本 NKK 也设计了一套双鼓系统^[8],如图 5 所示。

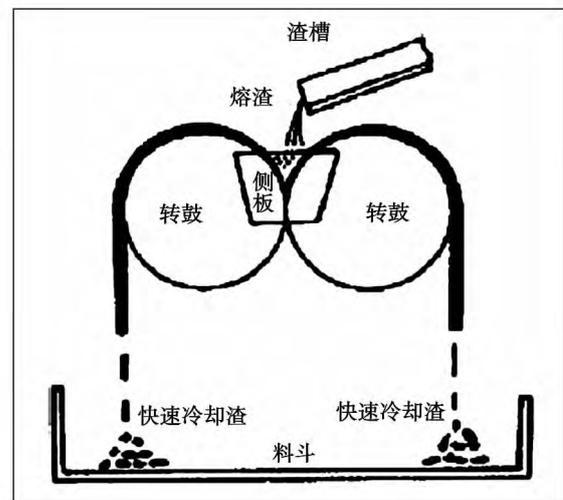


图 5 双鼓法余热回收系统 Fig. 5 Dual roller method-based waste heat recovery system

这套系统最主要的组成部分是两个反向转动的转鼓。渣流被泼倒在两鼓之间的渣槽中。高炉渣一方面由于重力作用在渣槽中往下流动,另一面又因为转鼓的旋转作用获得向上的运动速度。在这两种运动的共同作用下,熔渣被初步冷却并粒化。最后,高温渣粒与位于转鼓之中的低沸点冷却介质进行传热。所得的冷却剂蒸汽被送进余热锅炉。整个系统已经在大型化实验中取得成功,其余热回收效率达到 40% 并且得到了含有 80% 玻璃体的固态渣。但

是转鼓上的熔渣要及时地进行清理,否则会使得传热系数急剧下降。由于系统的运行不稳定,基于这种技术的系统已经停止了使用。

2.2 风淬余热回收系统

2.2.1 日本风淬余热回收系统

早在 1977 年,日本 Mitsubishi 重工和 NKK 就在福山研制了一套以回收转炉钢渣余热为目的的风淬系统^[8-9]。之后 1981 年两家公司建成了最大处理能力 80 t/h 的高炉渣余热回收装置,该系统的原理如图 6 所示。

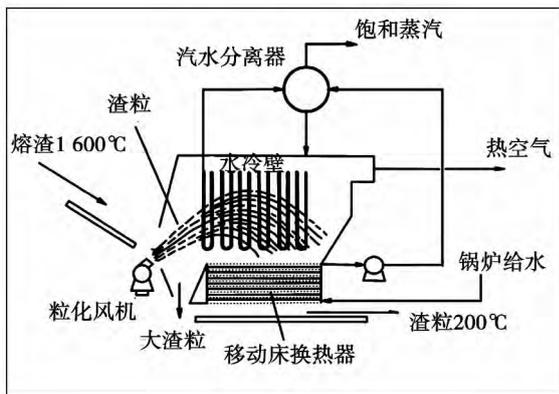


图 6 日本风淬余热回收系统 (Mitsubishi 重工和 NKK)

Fig. 6 Japan air quenching waste heat recovery system (Mitsubishi Heavy Industries and Nippon Kokan KK)

在这个流程中,气流不仅将熔渣淬碎,而且利用气流的速度将渣粒吹入锅炉,与锅炉的水冷壁进行高效的热量交换。同时,系统中还设置了另一个移动床换热器,用以回收高炉渣剩下的热量。在上世纪 90 年代早期,这项技术已经投入了商业规模的试验,具备每小时 20 t 的平均处理量,最多可以达到每小时 80 t 的处理量。渣粒粒径小于 3 mm,平均粒径为 1 mm。由蒸汽回收的热量达到 41%,而空气回收的热量也达到 39%。在这个回收系统中获得的高质量渣粒,为之后高炉渣的综合利用提供了条件。但是,由于每处理 1 t 渣需要消耗 1 000 m³ 的空气^[10],鼓风机能耗高,并且回收的热空气温度也相对较低。因此,这项技术由于经济效益不佳,没有更多地推广应用。

2.2.2 俄罗斯风淬余热回收系统

俄罗斯 Ural 钢铁研究院对日本 NKK 风淬技术

进行了完善,并已投入了工业化阶段的使用,其工艺流程如图 7 所示。

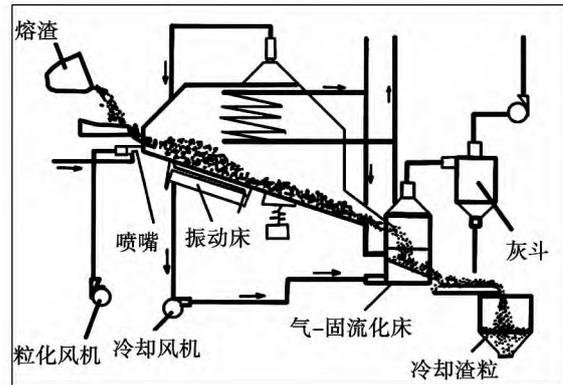


图 7 风淬余热回收系统(俄罗斯 Ural 钢铁研究院)

Fig. 7 Air quenching waste heat recovery system (Russian Ural Iron and Steel Research Institute)

这套装置主要由一个振动床和一个流化床构成,其中液态钢渣由渣罐倒入中间漏斗,通过其底部喷嘴的高速气流淬散,并送入余热回收室,在回收室内形成颗粒,并收集辐射热。然后通过振动床沿着斜面抖入流化床继续进行余热收集。振动床的作用主要是防止高温渣粒在倾入流化床之前,再次粘结而影响粒化效果。最终经过流化床的渣粒由链板运输机运至储料斗。这套系统回收到的高炉渣可以被冷却至 160 - 200 °C 的范围之间^[11-12]。炉渣热量可作为热水、蒸汽或热空气回收。

2.3 离心粒化余热回收系统

2.3.1 转杯法

高速旋转的转杯是该系统的重要组成部分,其原理为:高温液态渣通过流渣槽倾倒在高速旋转的转杯上,在离心力和表面张力的共同作用下,熔渣呈放射状被甩出转杯边缘而得到粒化。转杯式余热回收系统的原型最早由 Pickering 等在 20 世纪 80 年代提出^[13-14],其系统如图 8 所示。

高炉渣通过密封流渣槽进入热回收室,直接落到位于回收室中心的转杯上。在转杯的边缘,熔渣在离心力的作用下甩出粒化,渣粒由径向飞出。在转杯周围引入了环形空气射流,使得熔渣薄膜产生不稳定波动,从而促使渣粒破碎。高温渣粒撞击内壁时已经达到相当的硬度,不会粘附在内壁上^[15],从而完全下落至主流化床。然后,渣粒溢流到次级流化床,回收其剩下的热量。该系统中渣粒

能被急速冷却,得到产品中玻璃体结构大于 95%。Pickering 等还从理论上预测,该余热回收系统工业化后的余热回收效率可达 60%^[16],渣粒可以被冷却到 250 °C^[17]。

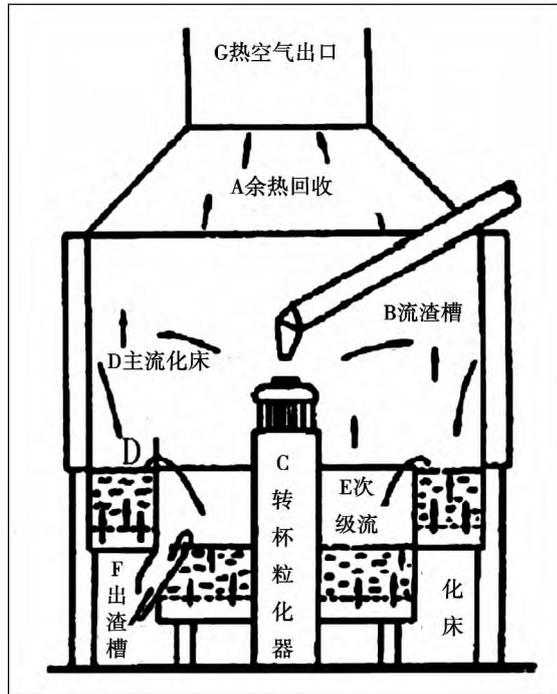


图 8 转杯法余热回收系统

Fig. 8 Rotary-cup method-based waste heat recovery system

Mizuochi 等人还针对这套余热回收系统^[18]研究了旋转杯用于熔渣粒化的可行性,考察了不同形状和不同转速下的熔渣粒化情况。通过实验研究发现,具有浅薄内壁的旋转杯更适用于粒化,在较低转速下,得到的颗粒的平均直径为 5-6 mm,大多数颗粒形状不规则,并且直径分布不均匀。当转速增加到 3 000 r/min 时,得到颗粒的平均直径小于 1 mm,颗粒的球形度较好且直径分布范围较窄。

2.3.2 转碟法

与转杯法原理相似,转碟法同样是依靠转碟的离心力对高炉炉渣进行粒化的。两者的主要区别在于粒化装置的结构。日本北海道大学的 Akiyama 等^[19]以及澳大利亚 CSIRO 的 Xie 等^[20-24]最近都在转碟法上有所研究,由 Akiyama 等提出的系统如图 9 所示。

从图 9 中可以看到其粒化过程。高温的熔渣首先被甩出转碟呈现薄膜状,然后由于离心作用的衰

减,在外沿又形成了大量的韧带状熔渣。最后,韧带状的炉渣被破碎成颗粒。其中,转碟的转速、熔渣的粘度以及气流速度对粒化效果具有重要的影响,在研究工作中应该协调好三者之间的最佳关系,以达到最好的粒化效果。该套系统收集到的渣粒直径在 0.6-0.8 mm 之间。2004 年, Purwanto 等对这套系统进行了数值模拟和分析^[25]。在他的模拟方案中,可以计算出单个颗粒的直径和温度场。

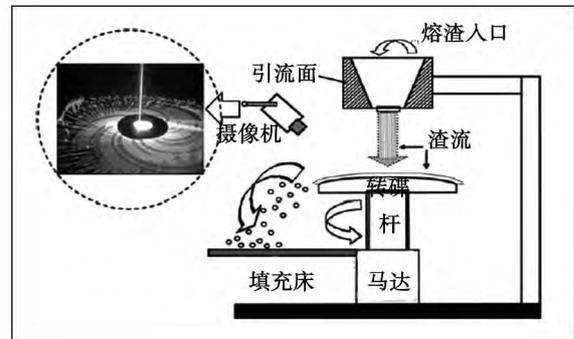


图 9 转碟法余热回收系统

Fig. 9 Rotary-disk method-based waste heat recovery system

澳大利亚 CSIRO 的研究组成员在 2002 年对这套系统进行了完善,提出的系统分为两个阶段。首先,通过转盘甩出的熔渣被上升气流击碎、粒化,温度下降到大约 900 °C,并形成玻璃体结构。然后,破碎的渣粒落入位于其下的填充床,进行余热回收。整个流程过后,渣粒可以被冷却到大约 50 °C,而热空气温度超过 600 °C。获得的高温空气用来产生蒸汽或预热高炉煤气。该装置的余热回收效率可达 58.5%^[15]。截止到 2010 年,这项系统已经完成了试验并在不久的将来会投入工业应用。

3 我国钢铁工业废弃物(高炉炉渣和钢渣)处理技术的发展现状

目前,国内的处理技术尚处于起步和借鉴国外经验阶段。相比国外成熟的干法处理工艺,我国的干法处理技术尚处于研发、试验阶段,和它们相比仍然有一定的差距。在我国钢铁企业中,大部分使用的是湿法处理工艺,其原理是利用熔渣的热量,喷水直接将渣淬碎。该技术简便,但容易产生大量污水、腐蚀性蒸汽和粉尘,并且浪费了大量优质的余热资源,对环境造成很大的影响。

3.1 露天倒渣水淬法

该法一般在偏僻地点设置露天渣坑,以保证安全。通过抱罐车将炉渣运至渣坑,将渣倒于坑内,喷水淬碎。废渣碎裂成块后由推土机堆集,装车送渣场磁选和筛分。这种方法较原始、设施少、操作简单,但占地面积大,浪费大量的余热资源,还会产生污水、蒸汽和粉尘,对周围环境产生污染。

3.2 闷渣水淬法

上钢五厂采用该项技术。废渣在地坑冷却到 300 - 600 °C 后,将大块废渣铲入翻斗车,运至闷罐车间,倒入闷罐,盖上罐盖后,由上往下喷水,水和蒸汽将渣淬碎。该技术可获得 60% - 80% 的 20 mm 渣块。但该法污水处理困难,渣污染、粉尘问题也很严重。

3.3 浅盘热泼水淬法

目前唐钢正使用该项技术进行处理,宝钢也已从新日铁引进该技术。抱罐车将废渣运入炉渣间,起重机吊起渣罐,将熔渣快速泼于浅平渣盘,泼渣后,喷水冷却。浅渣盘可倾斜,将渣倒于排渣车上,接着向排渣车淋水,进行二次冷却,使渣温降至 200 - 300 °C 后再倒入冷却水池,进行第三次冷却。接着用抓斗机取出水池中渣块,放入皮带机送往回收场。通过该法,可以得到 ≤ 300 mm 的渣块。该法处理量大、快速冷却、机械化程度高,但多次装卸、冷却废渣,操作作业量和污水处理量都很大。

3.4 渣箱热泼法

武钢目前采用该项技术。通过起重机吊起渣罐向敞开式渣箱泼渣,每泼完一罐渣后,适量均匀喷水,然后进行相同操作进行下一轮操作。待整个渣箱泼满后,再进行大量集中喷水。渣箱底部有滤水层,可将未蒸发的残留水排出渣箱。废渣冷却至 100 °C 以下时,用装载机将其铲起,装车运走。该法粒化效果 ≤ 300 mm、处理设备少、操作简单,但仍然无法解决湿法处理技术对周围环境的污染问题。

3.5 国内干法处理技术的研究现状

我国干法处理技术尚处于试验、研究阶段,能进行商业应用的成熟技术还很少。

马鞍山钢铁厂和成都钢铁厂较早组织了风淬技术的研究^[26],试验结果表明吨渣耗气量在 16 m³ 以上时,渣粒平均粒径可控制在 2.56 mm 以下。于庆波等通过实验研究了采用转杯法对液态炉渣进行粒化的过程中^[27] 转速对熔渣粒径的影响。龙跃等利用石蜡模拟了熔渣的粒化过程^[28],比较了不同粒化

方法的效果。邢宏伟等对高温熔滴凝固过程进行了数值模拟^[29]。郭健翔等进行了流化床式余热回收试验^[30],分别研究了流化风速和颗粒粒径对传热效率的影响。通过对移动床中高温渣粒冷却过程进行数值模拟^[31],结果表明该法的余热回收效率在 96.2% - 97.7% 之间。这些研究说明,通过合适的干法处理技术,把渣粒的粒径控制在合适范围内并达到较高的热回收效率是可行的。以上成果都为我国高炉炉渣余热回收技术的发展提供了理论支撑。

4 余热回收系统的分析和比较

表 1 中比较分析了上述余热回收系统的粒化效果和余热回收效率等因素。这些装置是用以回收生产中高炉炉渣所蕴含的高品质热量。从表 1 中可以看出,从机械法到离心粒化法,其粒化效果越来越好。当颗粒粒径越小时,其传热效果也相对更好,后期生产高附加值产品的品质也越高。此外,在余热回收系统发展的早期,通常采用间壁的热交换方式,例如机械搅拌法中采用隔离的水冷壁中的水和管外灼热的高炉炉渣进行传热。由于这种间壁式传热方式的传热热阻高于直接接触式传热,因此这种形式的余热回收系统往往回收效果不是非常理想。直到 20 世纪 90 年代,流化床技术被广泛运用于余热回收系统之中,大大提高了热回收效率。但在流化床技术中要确保渣粒正常流化,对渣粒的粒径和形状的规则性也提出了更高的要求,这进一步促进了更为先进的粒化技术的研究和发展。纵观各种系统,可以发现其余热回收效率大致在 40% - 65% 的范围内。

对大部分机械法余热回收系统来说,它们难以达到较高的冷却速度,很难形成大量对水泥生产更为有利的玻璃体结构。但由于它们可以在冷却装置中停留更长的时间,即使其颗粒粒径较大,热量回收效果也相当可观(50% - 65%)。对风淬法来说,高速气流作用可以得到含有更多玻璃体结构的细小渣粒,但也因此带来了一个问题,就是过快过多的冷风,使得热空气的温度大大降低,难以达到满意的热回收效果(40% - 50%)。

因此,综合分析上述余热回收系统的各方面因素,可以认为基于离心粒化技术的余热回收系统具有粒化性能优异(1 - 6 mm)、回收渣粒品质好、余热回收效率(58.5% - 60%)高等优点,具有广阔的研究空间和发展前景。

表 1 高炉炉渣余热回收系统的比较

Tab. 1 Comparison of blast furnace slag waste heat recovery systems

研究机构	粒化方法	渣的种类	渣粒粒径/mm	换热形式	热回收率/%
瑞典 Merotec	固体颗粒冲击法	高炉渣	-3	流化床	65
日本 Kawasaki	机械搅拌法	高炉渣	40	间壁式换热器	-50
日本 Sumitomo	机械搅拌法	高炉渣	20	间壁式换热器	-50
日本 Ishikawajimae Harima 和 Sumitomo	单个转鼓形式	高炉渣	10	流化床	60
日本 NKK	双鼓形式	高炉渣	—	间壁式换热器	40
日本 Mitsubishi 和 NKK	风淬法	钢渣、高炉渣	-3	间壁式换热器	41
英国 Pickering	转杯法	高炉渣	1-6	流化床	60
澳大利亚 CSIRO	转碟法	高炉渣	1-4	填充床	58.5

4 结 论

基于离心粒化技术的余热回收系统的效果是目前各种系统中比较理想的,其余热回收效率最高可达 60%。它不仅拥有优异的粒化性能,能获取优质的渣粒,并且它所需要的风量也更少,减少了风机设备的能耗,可以获得更高的出口风温和热回收效率。在离心粒化法系统中,各部件的结构简单,相比风淬法和机械法具有设备简单、运行可靠、经济性高等特点。

然而该技术目前仍然存在一些缺点和问题,有必要进一步深入开展研究:

(1) 由于高炉炉渣导热系数小、粘度大,所以在利用离心技术进行粒化时,不得不增大风量、提高风速。这样做虽然提高了粒化效果,却降低了传热效率。由此带来的影响是风机设备电耗增大,并且收集到的热空气往往温度不高。

(2) 高炉炉渣余热回收技术的关键在于控制熔渣的冷却条件和确定机械装置的结构形式、尺寸^[32]。高炉炉渣的物理性质和水泥相似,因而可以用于制造水泥,其品质取决于熔渣粒化过程中的冷却速度。在余热回收系统的设计中,应进一步综合考虑装置形式、熔渣粒化能耗、渣粒冷却速度和熔渣热量回收效果,以期获得最佳的操作参数。

(3) 目前离心粒化技术在单位时间内的处理量还比较小,当该技术应用于生产过程中时,随着处理量的增加,固态渣的渣粒粒径大小和均匀性的变化规律和控制方法,也需要进一步研究。

(4) 炉渣在离心力的作用下飞出粒化装置并发生凝固,在此过程中会发生热量的损失。郭英等通

过研究发现^[16],按 1.8 mm 粒径计算,落地后温度约为 1 365 K,此时热损失为 40%。因此可以考虑在炉渣飞行过程中,通入空气,预先回收一部分热量。

(5) 对于一个余热回收系统,关键之处在于其运行的可靠性和稳定性。在优化余热回收系统的参数的同时,还应进一步改进转碟式等系统重要部件的结构,提高使用寿命和可靠性,为规模化生产使用打下基础。

参考文献:

- [1] 张春霞,齐渊洪,严定鏊. 中国炼铁系统的节能与环境保护[J]. 钢铁 2006 41(11): 1-5.
ZHANG Chun-xia, QI Yuan-hong, YAN Ding-liu. Energy-saving and environmental protection of iron-making systems in China[J]. Iron and Steel 2006 41(11): 1-5.
- [2] 孙秀云,王连军,李健生,等. 固体废物处置及资源化[M]. 南京: 南京大学出版社 2007.
SUN Xiu-yun, WANG Lian-jun, LI Jian-sheng, et al. Solid waste disposal and conversion to resources [M]. Nanjing, Nanjing University Press 2007.
- [3] G Bisio. Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy [J]. Energy, 1997, 22(5): 501-509.
- [4] 严定鏊,郭培民,齐渊洪. 高炉渣干法粒化技术的分析[J]. 钢铁研究学报 2008 20(6): 11-13.
YAN Ding-liu, GUO Pei-min, QI Yuan-hong. Analysis of the dry-method granulation technology for slag discharged from blast furnaces [J]. Journal of Iron and Steel Research 2008 20(6): 11-13.
- [5] 朱文渊. 高炉熔渣处理及资源化利用技术概述[J]. 中国水运, 2011, 11(5): 107-108, 135.
ZHU Wen-yuan. General description of technologies for dealing with molten slag from blast furnaces and resource-oriented utilization [J]. China Water-borne Shipment 2011 11(5): 107-108, 135.
- [6] 李鸿江,刘清,赵由才. 冶金过程固体废物处理与资源化[M]. 北京: 冶金工业出版社 2007.
LI Hong-jiang, LIU Qing, Zhao You-cai. Solid waste disposal and conversion to resources in the metallurgical process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2007.

- [7] 闫兆民,周扬民,杨志远,等.高炉渣综合利用现状及发展趋势[J].钢铁研究,2010,38(2):53-56.
YAN Zhao-min,ZHOU Yang-min,YANG Zhi-yuan,et al. Current status and development trend of the comprehensive utilization of slag from blast furnaces [J]. Iron & Steel Research,2010,38(2):53-56.
- [8] Ando J,Nakahara T,Onoue H,et al. Development of blast slag granulation plant characterized by innovation of the slag treatment method,heat recovery,and recovery of slag as resources [J]. Mitsubishi Heavy Industry Technical Review,1985,22(2):136-142.
- [9] Barati M,Esfahani S,Utigard TA. Energy recovery from high temperature slag [J]. Energy,2011,36:5440-5449.
- [10] LI Guang-qiang,ZHU Cheng-yi. Environmental protection and energy conservation of ferrous metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2010.
- [11] DAI Xiao-tian,QI Yuan-hong,ZHANG Chun-xia. Development of molten slag dry granulation and heat recovery in steel industry [J]. Iron Steel Research,2008,20(7):54-57.
- [12] WANG Shao-wen,LIANG Fu-zhu,WANG Ji-zeng. Technologies for and utilization of solid waste recycling [M]. Beijing: Beijing Metallurgical Industry Press,2008.
- [13] Bisio G. Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy [J]. Energy,1997,22(5):501-509.
- [14] Pickering SJ,Hay N,Roylance TF,Tomas GH. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast furnace slag [J]. Iron and Steel-making,1985,12(1):14-21.
- [15] 戴晓天,齐渊洪,张春霞,等.高炉渣急冷干式粒化处理工艺分析[J].钢铁研究学报,2007,19(5):14-19.
DAI Xiao-tian,QI Yuan-hong,ZHANG Chun-xia,et al. Analysis of the quenching and dry type granulation process for slag from blast furnaces [J]. Journal of Iron and Steel Research,2007,19(5):14-19.
- [16] 郭英.高炉渣破碎及余热回收过程的数值模拟[D].沈阳:东北大学,2008.
GUO Ying. Numerical simulation of a granulation and waste heat recovery process for slag from blast furnaces [D]. Shenyang, Northeast University,2008.
- [17] QU Yu-lin,MAO Yan-li,ZHANG Dong-li,et al. New progress in dry granulation and heat recovery from molten blast furnace by rotary cup atomizer at home and abroad [J]. Energy and Metallurgical Industry,2011,30(4):23-25.
- [18] 刘军祥.高炉渣余热回收装置传热特性实验研究[D].沈阳:东北大学,2009.
LIU Jun-xiang. Experimental Study of the heat transfer characteristics of a slag waste heat recovery device from blast furnaces [D]. Shenyang: Northeast University,2009.
- [19] Akiyama T,Mizuochi T,Yaji J,et al. Feasibility study of hydrogen generators with molten slag granulation [J]. Steel Research International,2004,75(2):122-126.
- [20] Xie D,Jahanshahi S. Waste heat recovery from molten slag [C]. Iron and Steel Institute of Japan. 4th International congress on science and technology of steel-making(ICS2008). Gifu: Iron and Steel Institute of Japan,2000:674-677.
- [21] Xie D,Jahanshahi S,Norgate T. Dry granulation to provide a sustainable option for slag treatment [C]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings of Sustainable Mining 2010. Melbourne,Australasian Institute of Mining and Metallurgy,2010,22-28.
- [22] Nexhip C,Davidson R,Norgate T,et al. Dry granulation of slags for producing cement Binder [C]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Green Processing 2004. Melbourne,Australasian Institute of Mining and Metallurgy,2004,85-96.
- [23] Xie D,Washington B,Norgate T,et al. Dry granulation of slag-turned waste into valuable cement binder [J]. CAMP-ISIJ,2005(18):1088-1091.
- [24] Xie D,Pan Y,Flann R,et al. Heat recovery from slag through dry granulation [C]. Jahanshahi S,Rickards T. 1st CSPR annual conference,Australia,CSIRO Minerals,2007,29-30.
- [25] Hadi P,Toshio M,Tomohiro A. Prediction of granulated slag properties produced from spinning disk atomizer by mathematical model [J]. Material Transactions,2005,46(6):1324-1330.
- [26] 李永治,李文祥.钢渣风淬技术研究[J].炼钢,1994,10(5):40-44.
LI Yong-zhi,LI Wen-xiang. Study of the technology for quenching the steel-making slag by air [J]. Steel-making,1994,10(5):40-44.
- [27] 于庆波,刘军祥,窦晨曦.转杯法高炉渣粒化实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(8):1663-1165.
YU Qing-bo,LIU Jun-xiang,DOU Chen-xi. Experimental study of the granulation of slag from blast furnaces based on the rotary-cup method [J]. Journal of Northeast University (Natural Science Edition),2009,30(8):1163-1165.
- [28] 龙跃,魏航宇,王少宁.液态钢渣处理工艺选择的模拟研究[J].冶金能源,2010,29(1):37-40.
LONG Yue,WEI Hang-yu,WANG Shao-ning. Simulation study of the treatment process selection for liquefied steel-making slag [J]. Metallurgical Industry Energy Source,2010,29(1):37-40.
- [29] 邢宏伟,王晓娣,龙跃.粒化钢渣相变传热过程数值模拟[J].钢铁钒钛,2010,31(1):79-83.
XING Hong-wei,WANG Xiao-di,LONG Yue. Numerical simulation of the phase-change heat transfer process of granulated steel-making slag [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2010,31(1):79-83.
- [30] 杨宝金.干法高炉渣余热回收的理论及实验研究[D].青岛:青岛理工大学,2010.
YANG Bao-jin. Theoretical and experimental research of the dry-method-based waste heat recovery from slag from blast furnaces [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology,2010.
- [31] 王波.移动床中钢渣颗粒冷却过程的计算[C]//中国金属学会.2011年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨论文集.唐山:中国金属学会,2011,546-549.
WANG Bo. Calculation of the cooling process for steel-making slag particles in a moving bed [C]. Chinese Society of Metals. Proceeding of 2011 National Metallurgical Energy Conservation, Emissions Reduction and Low Carbon Technology Development. Tangshan: Chinese Society of Metals,2011,546-549.
- [32] 王海风,张春霞,齐渊洪,等.高炉渣处理技术的现状和新的发展趋势[J].钢铁,2007,42(6):83-87.
WANG Hai-feng,ZHANG Chun-xia,QI Yuan-hong,et al. Current status and development tendency of the treatment technologies for slag from blast furnaces [J]. Iron and Steel,2007,42(6):83-87.

(孙显辉 编辑)

高炉炉渣余热回收技术的研究进展 = **Advances in the Study of the Blast Furnace Slag Waste Heat Recovery Technologies** [刊 汉] WANG Bo ,WANG Xi-chen ,YUAN Yi-chao ,ZHOU Qiu-ping (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(2) . - 113 - 120

Described were blast furnace slag waste heat recovery systems based on such technologies from foreign countries as solid particle impingement ,mechanical agitation ,rotary drum granulation ,centrifugal granulation and air quenching etc. and summarized were the current status of the application of blast furnace slag waste heat recovery and treatment technologies in China. After the authors have compared the merits and demerits of the same kind technologies both in domestic and abroad ,they pointed out that the waste heat recovery system based on the centrifugal granulation technology boasts excellent granulation performance and a high heat recovery efficiency etc. On this basis ,they believed that it is necessary to further study the operating power consumption ,stability ,control parameters and slag particle treatment capacity of the system as well as the uniformity of the particle diameters etc. in a hope to realize its commercial applications as soon as possible. **Key words:** blast furnace slag ,granulation ,heat transfer ,waste heat recovery

槽道出口位置对高负荷扩压叶栅性能的影响 = **Influence of the Location of the Slot at the Outlet on the Performance of a Highly-loaded Diffusion Cascade** [刊 汉] WU Pei-gen ,WANG Ru-gen ,HU Jia-guo ,GUO Fei-fei (College of Aeronautic and Astronautic Engineering ,Air Force Engineering University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710038) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(2) . - 121 - 126

In the light of the fact that a highly-loaded diffusion cascade features a small range of the attack angle and easy separation of the flow from the suction surface ,by using a local flow control method-slotting from the pressure surface to the suction one ,the authors designed a converging-deflecting type slot structure and studied the influence of various locations of the slot on the performance of the cascade by using a numerical and simulation method. The calculation results show that under the operating condition at a positive attack angle ,the slotting treatment of the blades can effectively eliminate the air flow separated from the suction surface ,thus heightening the static pressure rise ,lowering the total pressure loss and broadening the stable operation range. For a separation at a large attack angle ,the optimum slotting location is close to the middle part of the blade profile. **Key words:** highly-loaded diffusion cascade , blade slot ,flow control ,large turning angle ,boundary layer separation

扇形叶栅实验中可调导叶的应用研究 = **Study of the Applications of Adjustable Guide Blades in Sector-shaped Cascade Tests** [刊 汉] FU Wen-guang ,SUN Peng (College of Marine Engineering ,Dalian Maritime Uni-