

Cu 渣处理技术现状及展望

李 帅^{1,2} 康泽双^{1,2} 刘万超³

(1.中铝郑州有色金属研究院有限公司; 2.国家铝冶炼工程技术研究中心; 3.中铝环保节能集团有限公司)

摘 要 随着 Cu 行业的迅速发展,中国 Cu 渣年产生量已超 2 000 万 t,Cu 渣的大量堆存或处置会引起空间和环境问题,一定程度上阻碍了 Cu 行业的健康可持续发展。阐述了 Cu 渣来源、种类、性质及对环境的影响,并从有价元素回收、资源化利用等方面分析归纳了 Cu 渣处理进展。最后,展望了 Cu 渣规模化应用需要解决的问题。

关键词 Cu 渣;回收利用;处理技术

中图分类号 TG146.1⁺¹ **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Technical Status and Prospect on Processing Technologies of Copper Slag

Li Shuai^{1,2}, Kang Zeshuang^{1,2}, Liu Wanchao³

(1.Zhengzhou Non-ferrous Metal Research Institute Co., Ltd.; 2.China National Engineering Research Central for Aluminum Metallurgy; 3.Chinalco Environmental Protection and Energy Conservation Group Co., Ltd.)

Abstract: With the rapid development of the copper industry, the annual discharge of copper slag in China has exceeded 20 million tons. Dumping or disposal of such huge quantities of copper slag cause environmental and space problems, which hinders the healthy and sustainable development of the copper industry to some extent. The effects of sources, types, properties and environmental impact of copper slag on the environment were described, and the progress of copper slag treatment was analyzed and summarized from the aspects of valuable elements recovery and resource utilization. Finally, the problems that need to be solved in the large-scale application of copper slag were prospected.

Key Words: Copper Slag, Recovery and Utilization, Processing Technologies

Cu 渣是 Cu 冶炼和精炼过程的副产物^[1]。2019 年中国精炼 Cu 产量达到 978.4 万 t,约占全球 Cu 产量的 40%。Cu 在中国有色金属的消费中仅次于 Al。Cu 冶炼产能的快速发展不可避免产生了大量 Cu 渣,据统计每生产 1 t 的 Cu 需要外排 2.2 t 的 Cu 渣^[2,3]。Cu 渣成分及矿物结构复杂,导致其利用率很低,绝大多数 Cu 渣被丢弃,不仅占用宝贵土地,而且会污染环境^[4]。关于 Cu 渣的处置及技术利用,国内外学者开展了大量研究,并取得一定成效,但仍缺乏经济、安全、环保利用技术。本课题对现有研究成果进行系统论述,为后续 Cu 渣研究提供参考。

1 Cu 渣来源及性质

1.1 Cu 渣来源及种类

Cu 渣是 Cu 冶炼过程产量最大的固体废弃物,是

造钼熔炼和冰 Cu 吹炼过程中的产物^[5]。不同的 Cu 冶炼工艺,可以得到不同的 Cu 渣。据统计,中国 97% 的 Cu 采用火法冶炼^[6],火法熔炼渣年排放量在 2 000 万 t 以上,目前累计堆存量达到 2.0 亿 t。按照冶炼设备不同,Cu 渣可分为:转炉渣、电炉渣、反射炉渣等;根据生产流程可分为:熔炼渣、吹炼渣等;按照 Cu 渣的冷却方式又可分为:水碎渣、缓冷渣、自然冷却渣等^[7]。此外,还有一定数量湿法炼 Cu 浸出渣^[8]。

1.2 Cu 渣组成及性质

Cu 渣的化学组成、含量及矿物结构因冶炼工艺、冶炼设备及原材料不同而呈现一定差异。但 Cu 渣通常均含有 Fe、Si、O、Cu 等元素,其中前 3 种元素含量在 80% 以上^[9]。Cu 渣的主要物相组成为:铁硅酸盐、磁铁矿、钙铝榴石及铜钼等。典型的 Cu 渣成分见表 1^[6,10]。从表 1 可知,Cu 渣中 Fe 含量为 25%~45%、Cu 含量

收稿日期:2020-08-25;修改稿收到日期:2020-10-21
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0703100);中铝郑州研究院自主研发项目(ZYY-2020-KJ-05)
第一作者简介:李帅,男,1989 年出生,工程师,郑州(450041),E-mail:lishuai.neu@foxmail.com
引用格式:李帅,康泽双,刘万超. Cu 渣处理技术现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):289-293.
LI S, KANG Z S, LIU W C. Technical status and prospect on processing technologies of copper slag[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021,41(3):289-293.

为 0.17%~4.6%。Cu 渣中 Fe 品位高于 Fe 矿石可采工业品位,又含有较多的 Cu、Zn、Au、Ag 等有色元素,

是重要的二次金属资源。表 2 为典型 Cu 渣的一些理化性质。

表 1 不同冶炼方法的典型 Cu 渣成分

Tab.1 Typical copper slag composition by different smelting methods								%
冶炼方法	w_B							
	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cu	S	
密闭鼓风炉	25~33	31~39	6~19	0.7~7.0	4~12	0.35~2.40	0.2~0.45	
诺兰达法	33~40	22~25	0.5~1.0	1.0~1.5	0.5	3.4	5.2~7.90	
瓦纽科夫法	37~40	22~25	1.1~2.4	1.12~1.6	1.2~4.5	2.53	0.55~0.65	
三菱法	39~45	30~35	5~8	—	2~6	2.14	0.55~0.65	
艾萨法	31~35	31~34	2.3	2	0.2	1.00	2.8	
闪速熔炼	29~42	28~38	5~15	1~3	2~12	0.17~0.33	0.46~0.79	
特尼恩特转炉	37~43	26.5	9.3	7	0.8	4.6	0.8	

表 2 典型 Cu 渣的理化性质^[11~13]

Tab.2 Physical and chemical properties of typical copper slag											
外观	密度/ (kg·m ⁻³)	莫氏 硬度	细度 模数	松装密度/ (kg·m ⁻³)	内摩擦 角/(°)	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	熔点/ ℃	硫酸钠安 定性损失	可溶氯/ ×10 ⁻⁶	吸水率	pH
黑色玻璃状	2 800~3 800	6~7	3.5	1 600~2 000	40~53	500	1 050~1 150	0.9	<50	0.15~0.55	7

1.3 Cu 渣对环境的影响

《控制危险废料越境转移及其处置巴塞尔公约》裁定 Cu 渣不属于危险废物^[13]。在国内 Cu 渣通常被视为Ⅱ类一般工业固废。Cu 渣对环境的影响主要体现在:占用土地资源,由于其含有一定量的重金属,存在污染周围水体和土壤的风险。Cu 渣粉末暴露在空气中,会漂浮在空中,引起大气污染。

2 Cu 渣中有价元素回收技术

2.1 回收金属 Cu

Cu 渣中的 Cu 存在形式主要为金属 Cu、氧化铜及铜铈^[14]。部分 Cu 渣中 Cu 含量远高于原 Cu 矿中的 Cu 含量,具有较高的回收利用价值^[6]。国内外对 Cu 渣中 Cu 的回收开展了大量研究,主要回收方法有火法贫化法、选矿法、湿法等。

火法贫化法根据设备不同又可分为电炉贫化法、反射炉贫化法、真空贫化法等。无论何种贫化方法,其原理都是通过降低渣中 Fe₃O₄ 含量,来优化渣的粘度和密度,以利于铈液滴向熔池底部沉降,实现渣层和铈层的充分分离,从而降低渣中的 Cu 含量^[15]。常见火法贫化法的优缺点见表 3。目前 Cu 渣火法贫化已经在部分企业得到应用,但企业通常对火法贫化技术的经济及环境影响考虑较为不足。在选择贫化方法时多决于现场条件,如资金、场地、副产品、杂质等^[16]。

选矿法包括浮选法、磁选法、重选法^[17]。其中浮选法回收 Cu 渣中的 Cu,主要原理是借助硫化 Cu 颗粒和 Cu 颗粒与渣中其他成分表面理化性质的差异,采用浮选药剂,实现 Cu 的有效回收,Cu 回收率一般≥90%。浮选法适用于处理低氧势渣,具有 Cu 回收率高、工艺

表 3 常见火法贫化法的优缺点

Tab.3 Methodological advantages and shortcomings of copper slag impoverishment		
Cu 渣贫化方法	优点	缺点
反射炉贫化法	适用于贫化 Cu 含量较高的 Cu 渣,具有炉膛大、处理能力强,可处理大块回炉	1.未被还原的 Fe 氧化物易在炉内结瘤,降低炉子寿命 2.炉床升高导致铈相的液位升高,既影响放渣作业,又增加 Cu 的机械损失
电炉贫化法	1.投资小、处理周期短 2.可处理各种性质炉渣及返料,无 Fe ₃ O ₄ 持续堆积现象,并可实现渣中多种金属回收	工艺能耗高、炭质电极材料损耗大,经济上不利于规模化应用
真空贫化法	贫化速度快、能大幅度地降低渣中 Cu 含量	生产成本低、操作复杂,尚未工业化应用

简单、能耗低、经济性好的优势,在 Cu 冶炼行业得到较为广泛的应用,缺点是设备多、厂房占地面积大。磁选法对磁性物质具有较好的分选效果,但 Cu 渣中多为弱磁性物质(Fe 橄榄石),因此磁选效果较差,磁选法一般不单独使用,通常和浮选法联合,回收 Cu 渣中的有价金属。重选法是根据 Cu 渣中不同矿物密度及在介质中运动特性的差异实现不同组分分离。重选法可回收得到粒度较大的金属 Cu,其不仅处理成本低、污染小,而且 Cu 对 Cu 渣粒度要求较为宽泛。

湿法适合处理低品位 Cu 渣,可实现 Cu 渣中多种有价金属的高效回收,且具有能耗低的优点。其原理是采取合适的浸出剂对 Cu 渣中赋存的矿相结构进行溶解、破坏,使赋存有价金属元素的复杂矿相转化成简单的盐类化合物,然后利用萃取或者除杂等工序回收金属。研究比较多的处理方法包括:硫酸浸出法^[18]、氨水浸出法^[19,20]、氯化浸出法^[21]及生物浸出等^[22]。近年来为了提高浸出效率,研究者开发了多种强化浸出工艺,

如加压浸出、超声波辅助浸出等。湿法浸出 Cu 渣,Cu 的浸出率一般都在 90% 以上,但存在大量废水及设备腐蚀等问题,需要进一步研究解决。

2.2 回收 Fe

Cu 渣中 Fe 含量远高于工业可开采铁矿石品位,Fe 回收是实现 Cu 渣减量化的重要环节。当前从 Cu 渣中回收 Fe 的研究有很多,但是 Fe 的实际利用率却很低,主要原因是 Cu 渣中的 Fe 主要以结构比较稳定的 Fe 橄榄石或玻璃相形式存在,传统磁选法处理效果很差。为了提高 Fe 回收率,通常需对 Cu 渣进行改性处理^[23~25],常用的改性剂为氧化钙、氟化钙,其目的是将铁橄榄石和含铁的玻璃相转变成有磁性的金属 Fe 或磁铁矿^[26]。常见 Fe 回收技术及其优缺点见表 4^[27~29]。

表 4 Cu 渣中 Fe 的回收技术对比

Fe 回收技术	技术路线	优缺点
直接磁选法	通过磨矿解离、实现 Cu 渣中强磁性物质解离,利用磁选法回收 Fe(磁铁矿)	流程短、操作简单;但 Fe 回收率较低,一般不超过 30%
还原焙烧-磁选法	通过向 Cu 渣中添加还原剂或通入还原性气体,将 Cu 渣中含 Fe 矿相转化成单质 Fe,再利用磁选回收 Fe	Fe 回收率在 80% 左右;但存在能耗高,还原剂消耗量大等问题
氧化焙烧-磁选法	高温条件下加入 CaO 并控制气氛,促进硅酸铁分解转化为磁性氧化铁,再通过磨矿-磁选回收磁铁矿	Fe 回收率在 65%~80% 之间,能耗相对较低;但存在流程长,气氛控制要求高等问题
高温熔融还原法	通过添加造渣剂和还原剂,在熔融条件下使 Cu 渣中含 Fe 组分被还原成 Fe 水,利用熔渣和 Fe 水密度差异实现渣 Fe 分离	Fe 回收率在 90% 左右,处理时间短;但能耗高,成本高,难以规模化推广
湿法浸出	将 Cu 渣在酸性或者碱性介质中进行处理,并借助熔剂萃取、分离杂质回收 Fe	可实现多种金属协同回收,但 Fe 回收率较低,一般不超过 20%

2019 年中国粗钢产量为 8.3 亿 t,铁矿石进口 10.75 亿 t,对外依存度高达 81.6%。研究开发低成本高效回收 Cu 渣中的 Fe 资源技术,不仅具有很好的经济效益,并可在一定程度上缓解铁矿石的对外依存度,是 Cu 渣利用的重要方向之一。

3 Cu 渣综合利用

Cu 渣具有致密性、高硬度及耐磨性等优良的物理性质和含有复杂硅酸盐成分的化学性质,可被作为整体用于道路、水泥、建筑等领域。

3.1 Cu 渣用于生产水泥

Cu 渣的化学成分分析表明,其基本与水泥体系相容,Cu 渣中含有大量 Fe 氧化物,在生成水泥熟料时,常被用作 Fe 胶质剂^[30],Cu 渣的加入量一般不超过

10%^[3,31,32]。与传统 Fe 胶质剂相比,添加的 Cu 渣具有较高的比磨削能,经济上并不一定合理,但其加入可以降低水泥熟料的煅烧温度(约 50 ℃),并可减少生产过程中 CO₂ 的排放量。随着国内基础设施投入的不断增长,对水泥及制品的需求也在增加,水泥混凝土及制品产业仍是 Cu 渣的最有效利用途径之一。鉴于在水泥生产中使用 Cu 渣取得了显著成效,为了评估其经济性及对环境的影响,需要对该过程进行生命周期评价(LCA)。

3.2 Cu 渣用于路面材料

1994 年华盛顿交通委员会开展 Cu 渣集料在热拌沥青路面中的研究^[33],并应用在加利福尼亚州公路建设中。EMERY J J^[34]对公路建设中使用 Cu 渣的可行性、道路性能及对环境的影响进行了研究。研究表明,Cu 渣作为细骨料在沥青混合料(如沥青碎石、密级配沥青碎石、沥青砼和半密级配沥青混凝土)方面具有良好的应用潜力,Cu 渣掺量高达 30%。Cu 渣制备混凝土,在中国也已应用多年,技术成熟,并先后制定了地方标准《Cu 渣代砂混凝土及砌筑砂浆技术规程》和行业标准《混凝土用 Cu 渣粉》。Cu 渣用于道路建设领域,能够规模化消纳 Cu 渣,但其通常作为一个区域性解决方案,因为 Cu 渣的远距离运输会增加处置成本,导致经济上不划算。因此,仅适合在 Cu 冶炼厂附近应用。

3.3 Cu 渣用作除锈剂

传统除锈剂通常为砂子,主要化学成分为石英(质量分数≥95%),其强度低,使用过程中容易出现棱角钝化,影响除锈效率。Cu 渣棱角尖锐、莫氏硬度为 6~7,适合制作磨料。纵振海等^[35]以 Cu 渣原砂为原料,采用自然沥水、烘干、筛选分级等工艺制备出性能优良的除锈料,除锈标准达到 Sa2.5~Sa2。张启等^[36]公开了一种利用炼 Cu 炉渣生产除锈磨料的方法,方法与上述工艺类似。Cu 渣制备除锈剂,产品性能优良,具有处理流程简单、附加值高特点,但是难以消纳大量 Cu 渣。

3.4 Cu 渣其他用途

Cu 渣除了上述利用途径外,近年来研究者也积极研究开发新的利用技术。LI H 等^[37]研究了 Cu 渣催化氧化燃煤烟气中单质 Hg 的性能,结果表明,在 200~300 ℃下,Cu 渣对 Hg 具有优异的催化氧化性能,在 250 ℃条件下,Hg⁰ 的氧化效率高达 93.8%。HUANOSTA G T 等^[38]对 Cu 渣催化过氧化物高级氧化技术降解水中苯酚过程进行了研究,并评估了 Cu 渣作为水处理催化剂的应用情况。ZEYNOLABEDIN R 等^[39]以 CoFe₂O₄/Cu 渣为光催化剂,采用 UV+H₂O₂ 工艺降解水中 2-硝基苯酚(2NP),降解率达 96.55%。

SINGH J 等^[40]以 Cu 渣为前驱体在室温下合成碱活化粘合剂(ABB)。WEI R 等^[41]以 Cu 渣和白炭黑为原料,焦炭为还原剂,在感应炉中制备了 FeSi45 合金,Si 和 Fe 的回收率分别为 77% 和 95%。Cu 渣的研究正从过去的“减量化、资源化”走向“高值化”,鉴于其排量大,仅依靠单一的技术手段很难规模化消纳 Cu 渣,且容易造成产品种类单一,引起产能过剩。多途径消纳,特别是根据区域内不同固废之间性质,开展协同处置利用研究,是促进 Cu 渣走向高附加值规模化利用的有效途径。

4 结 语

Cu 渣中金属回收是其综合利用的重要方向之一,但目前研究主要集中在 Cu、Fe 元素回收,产业化应用多以选矿法为主,存在回收效率低等问题。Cu 渣中有价金属的回收,特别是多种金属协同回收技术仍需改进和创新。

基于 Cu 渣自身理化性质而开发的综合利用技术很多,但整体利用率并不高,与国外发达国家相比还有很大差距,主要表现在:Cu 渣管理和处置过程粗放、高值化利用技术少、缺乏 Cu 渣专用处置装备。受环境、资源、能源等因素影响,开发经济、安全、环保的 Cu 渣利用技术必将成为未来的发展趋势。为此,要进一步加大对 Cu 渣相关的基础理论研究,开发集成化、专业化、自动化的处理装备,并在 Cu 冶炼聚集区建立大型综合 Cu 渣处理厂,将区域内 Cu 渣集中处置,提升 Cu 渣的利用率、破解 Cu 渣利用难题。

参 考 文 献

- [1] 何伟,周予启,王强. Cu 渣粉作为混凝土掺合料的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4 125-4 134.
- [2] GYUROV S, RABADJIEVA D, KOVACHEVA D, et al. Kinetics of copper slag oxidation under nonisothermal conditions[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 116(2): 945-953.
- [3] ALP I, DEVECI H, SÜNGÜN H. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 159(2-3): 390-395.
- [4] ALTER H. The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the basel convention[J]. Resources Conservation and Recycling, 2005, 43(4): 353-360.
- [5] SHI C, MEYER C, BEHNOOD A. Utilization of copper slag in cement and concrete[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 52(10): 1 115-1 120.
- [6] 朱祖泽,贺家齐.现代 Cu 冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] 张体富,邓戈,解琦.Cu 冶炼渣的资源化利用[J]. 冶金能源, 2012, 31(5): 48-52.
- [8] 邓福海. 有色冶金 Cu 渣综合回收研究及应用现状[J]. 现代冶金, 2016, 44(3): 44-47.
- [9] 王鑫. Cu 渣提 Fe 综合利用试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,

2016.

- [10] 曹志成. Cu 渣转底炉直接还原回收 Fe 锌工艺及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [11] UTIGARD T A. Density of copper/nickel sulphide smelting and converting slags[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1994, 23 (1): 37-41.
- [12] BIPRA G, JANA R K. Premchand characteristics and utilisation of copper slag-A review[J]. Resources Conservation & Recycling, 2003, 39(4): 299-313.
- [13] MURARI K, SIDDIQUE R, JAIN K K. Use of waste copper slag, a sustainable material[J]. Journal of Material Cycles & Waste Management, 2015, 17(1): 13-26.
- [14] MAWEJA K, MUKONGO T, MUTOMBO I. Cleaning of a copper matte smelting slag from a water-jacket furnace by direct reduction of heavy metals[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2-3): 856-862.
- [15] 周萍,余建平,陈红荣,等. Cu 闪速炉沉淀池渣中铋液滴沉降机理及其影响因素[J]. 中国有色金属学报, 2006(12): 2 132-2 137.
- [16] 张林楠,张力,王明玉,等. Cu 渣的处理与资源化[J]. 矿产综合利用, 2005(5): 22-27.
- [17] OZEL E, TURAN S, CORUH S. Production of brown and black pigments by using flotation waste from copper slag[J]. Waste Management & Research, 2006, 24(2): 125-133.
- [18] AHMED I M, NAYL A A, DAOUD J A. Leaching and recovery of zinc and copper from brass slag by sulfuric acid[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2016, 20: S280-S285.
- [19] RUDNIK E, BURZYŃSKA L, GUMOWSKA W. Hydrometallurgical recovery of copper and cobalt from reduction-roasted copper converter slag[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(1): 88-95.
- [20] 刘海洋,颜文斌,石爱华,等. 从铜镉渣中析出铜锌镉的氧化氨浸工艺[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 97-100.
- [21] HERREROS O, QUIROZ R, MANZANO E, et al. Copper extraction from reverberatory and flash furnace slags by chlorine leaching[J]. Hydrometallurgy, 1998, 49(1-2): 87-101.
- [22] 徐家振,金哲男,焦万丽. 生物法贫化 Cu 熔炼炉渣[J]. 有色矿冶, 2001, 17(1): 28.
- [23] 张琳,刘先阳,库建刚. 氧化钙在 Cu 渣还原过程中的作用[J]. 中国冶金, 2019, 29(9): 9-14.
- [24] HEO J H, KIM B S, PARK J H. Effect of CaO addition on iron recovery from copper smelting slags by solid carbon[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2013, B44(6): 1 352-1 363.
- [25] 万新宇,齐渊洪,高建军,等. 水淬 Cu 渣还原熔分回收粒 Fe 和 Cu[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(10): 22-29.
- [26] 刘金生,姜平国,肖义钰,等. 从 Cu 渣中回收 Fe 的研究现状及其新方法的提出[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(2): 23-28.
- [27] 张汉泉,高王杰,胡超杰,等. Cu 渣煤基直接还原过程中的 Fe 物相转变[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(4): 311-321.
- [28] 李磊,胡建杭,王华. Cu 渣熔融还原炼 Fe 过程研究[J]. 过程工程学报, 2011(1): 69-75.
- [29] AYŞE V B. Effect of ultrasound on the dissolution of copper from copper converter slag by acid leaching[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(6): 790-796.
- [30] DHIR R K, BRITO J D, MANGABHAI R, et al. Copper Slag in Cement Manufacture and as Cementitious Material [M]. UK: Woodhead Publishing, 2017.

高性能铜合金研究现状及发展趋势

李龙健¹ 于风云² 李仁庚³ 张斯若¹ 康慧君¹ 王同敏¹

(1.大连理工大学辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室; 2.大连理工大学材料测试分析中心;
3.南京工业大学先进轻质高性能材料研究中心)

摘 要 从铜合金材料的性能需求出发,系统阐述了高性能铜合金的发展历程、研究现状及未来发展方向。以铜合金服役性能为主线,介绍了铜合金强度、导电性、耐热性和耐磨性等影响因素、调控机理及相互作用机制。总结了高强高导铜合金、高耐热铜合金和高耐磨铜合金的制备方法和强化机理,为新型高性能铜合金的设计与制备提供参考。

关键词 高强高导铜合金;耐热性;耐磨性;服役性能

中图分类号 TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress and Development Trend of High-Performance Cu Alloys

Li Longjian¹, Yu Fengyun², Li Rengeng³, Zhang Siruo¹, Kang Huijun¹, Wang Tongmin¹

(1.Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology, Dalian University of Technology; 2.Center of Material Testing and Analysis's, Dalian University of Technology;
3.Key Laboratory for Light-weight Materials, Nanjing Technology University)

Abstract: The development history, research progress and development direction of high-performance copper alloy were systematically described based on the performance requirement. The influencing factors, regulating mechanism and interaction mechanism of copper alloy, such as strength, electrical conductivity, heat resistance and wear resistance were introduced. The fabrication methods and strengthening mechanism of copper alloy with superior comprehensive properties were summarized, providing ideas for the design and fabrication of new high-performance copper alloy.

Key Words: Superior Copper Alloy, Heat Resistance, Wear Resistance, Service Performance

收稿日期:2020-09-16;**修改稿收到日期:**2020-09-28
基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51525401);国家自然科学基金资助项目(51774065,51971052)
第一作者简介:李龙健,男,1996 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail: lilongjian@mail.dlut.edu.cn
通信作者:康慧君,男,1982 年出生,副教授,辽宁大连(116024),E-mail: kanghuijun@dlut.edu.cn
引用格式:李龙健,于风云,李仁庚,等. 高性能铜合金研究现状及发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):293-298.
LI L J, YU F Y, LI R G, et al. Research progress and development trend of high-performance Cu alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021,41(3):293-298.

[31] MOHAMMAD M A, SATISH K A, ASHWANI P. Potentials of copper slag utilisation in the manufacture of ordinary Portland cement[J]. Thomas Telford Ltd., 2013, 25(4): 208-216.

[32] TAEB A, FAGHIHI S. Utilization of copper slag in the cement industry[J]. Zkg International, 2002, 55(4): 98-100.

[33] COLLINS R J, CIESIELSKI S K, MASON L S. Recycling and Use of Waste Materials and By-products in Highway Construction [M]. Washington, DC: Transportation Research Board, 1994.

[34] EMERY J J. Slag Utilization in Pavement Construction, Extending Aggregate Resources[M]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1982.

[35] 纵振海,肖其中,卫耕,等. Cu 渣砂磨料的生产与应用[J].水泥工程, 2005(6): 83-84.

[36] 张启,蒋守鹏. 一种利用炼 Cu 炉渣生产除锈磨料的方法,中国: CN1196377[P].1998-10-21.

[37] LI H, ZHANG W, WANG J, et al. Copper slag as a catalyst for mercury oxidation in coal combustion flue gas[J]. Waste Management, 2018, 74: 253-259.

[38] HUANOSTA G T, DANTAS R F, RAMIREZ-ZAMORA R M, et al. Evaluation of copper slag to catalyze advanced oxidation processes for the removal of phenol in water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 213-214(4): 325-330.

[39] ZEYNOLABEDIN R, MAHANPOOR K. Preparation and characterization of nano-spherical CoFeO supported on copper slag as a catalyst for photocatalytic degradation of 2-nitrophenol in water [J]. Journal of Nanostructure in Chemistry, 2017, 7(1): 67-74.

[40] SINGH J, SINGH S P. Synthesis of alkali-activated binder at ambient temperature using copper slag as precursor[J]. Materials Letters, 2020, 262: 127 169.

[41] WEI R, YANG M, LV X. Preparing Ferrosilicon Alloy with Copper Slag[M]. Switzerland, Cham: Springer, 2017.

(编辑:刘晨辉)