

探讨电热法炼镁装置中的几种电阻式发热材料应用

张泽学² 高生辉¹ 高春云¹ 刘强¹ 张晓²

1. 陕西榆能集团能源化工研究院有限公司 陕西榆林 719000

2. 宁夏三新镁业科技有限公司 宁夏银川 750000

摘要: 本文聚焦电热法炼镁装置中的电阻式发热材料, 对比分析金属类(铁铬铝合金、镍铬合金、钼/钨)与石墨类(天然石墨、人造石墨)等材料的物理化学性能及经济成本。研究表明, 铁铬铝合金适合低温场景, 镍铬合金与石墨类平衡中高温性能, 钼/钨用于超高温环境。未来, 材料创新与智能控温技术将推动电热法炼镁向高效、清洁方向升级。

关键词: 电热法炼镁; 电阻式发热材料; 金属材料; 性能对比; 经济成本

引言

镁作为一种轻质且高强度的金属, 在航空航天、汽车制造、3C产品等众多领域有着广泛且不可替代的应用, 市场需求持续增长。电热法炼镁作为重要的生产方法之一, 其核心在于电阻式发热材料的选择与运用。电阻式发热材料直接决定了炼镁装置的加热效率、温度均匀性以及能耗水平, 进而影响镁的产量与质量。

当前, 市场上电阻式发热材料种类繁多, 不同材料在物理化学性能、经济成本等方面存在显著差异。深入剖析这些材料的特性, 对比其优劣, 并基于实际生产需求提出科学合理的选型建议, 对于优化电热法炼镁工艺、提高生产效益、推动镁产业可持续发展具有重要的现实意义。

一、电阻式发热材料分类与特性分析

(一) 金属类发热材料

1. 铁铬铝合金(FeCrAl)

铁铬铝合金是电热法炼镁中常用的金属类发热材料。物理性能上, 其电阻率在20℃时为1.2~1.6 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, 且随温度升高显著增大, 这使其在高温下能更好地发热; 熔点处于1400~1500℃, 最高使用温度可达1400℃, 热膨胀系数为 $14\times 10^{-6}/\text{℃}$ (20~1000℃), 热稳定性良好。化学性能方面, 表面能形成致密 Al_2O_3 氧化膜, 在1200℃以下抗氧化能力出众, 但对酸性环境敏感, 要避免与含硫气体接触。经济性上, 成本约15~20万元/吨, 低于镍铬合金, 在1200℃下连续使用可达2000小时以上, 维护成本低^[1]。

2. 镍铬合金(NiCr)

镍铬合金在电阻式发热材料领域也占据重要地位。物理性能上, 20℃时电阻率为1.09 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, 高温下电阻稳定性优于FeCrAl; 熔点1400℃, 最高使用温度达1250℃, 且延展性好, 可加工成细丝或薄带, 能适应复杂炉体结构。化学性能上, 表面形成 Cr_2O_3 氧化膜, 耐高温氧化, 但对氯离子和碱性环境敏感, 需配合气体保护使用。经济性上, 成本约40~50万元/吨, 是FeCrAl的2~3倍, 在1100℃下连续使用约1500小时, 适合对控温精度要求高的场景。

3. 钼(Mo)与钨(W)

钼和钨属于特殊的高温金属发热材料。物理性能上, 钼熔点为2620℃, 钨熔点高达3410℃, 适用于超高温环境; 20℃时, 钼电阻率为0.053 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, 钨为0.056 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, 高温下电阻变化小。化学性能上, 二者都存在高温脆性问题, 钼在2000℃以上易脆化, 钨在2500℃以上脆化。经济性上, 钼约80~100万元/吨, 钨约300~500万元/吨, 因成本高昂, 仅用于对温度要求极高且其他材料无法满足的特殊场景。

(二) 石墨类发热材料

1. 天然石墨

天然石墨凭借其独特的层状晶体结构, 展现出良好的物理与化学特性。物理性能方面, 其导电性较强, 电导率约达 10^4 S/cm , 虽仅为金属的1/3~1/2, 但在非金属材料中表现出色; 导热性具有各向异性, 轴向导热系数为120~150 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 径向约30~50 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 热膨胀系数为 $2.5\times 10^{-6}/\text{℃}$ (20~1000℃), 热震稳定性优异,

能较好地适应温度的快速变化。化学性能上，在400℃以上开始氧化，需涂层保护或处于惰性气氛中；对酸碱稳定，但强氧化性酸如浓硝酸会侵蚀其表面。经济性上，成本约2-5万元/吨，远低于金属材料，不过在1600℃下连续使用约800小时后需定期更换^[2]。

2. 人造石

人造石墨（等静压石墨）经过特殊工艺制备，性能更为优越。物理性能上，密度为1.7-1.9 g/cm³，高于天然石墨；孔隙率小于15%，气体渗透性低，非常适合真空环境；机械强度方面，抗压强度达80-120 MPa，抗热震性优于天然石墨。化学性能上，经浸渍处理后，使用温度可提升至2000℃，且纯度可达99.99%，能有效避免杂质对镁还原的干扰。经济性上，成本约10-15万元/吨，是天然石墨的2-3倍，但在1800℃下连续使用约1200小时，综合成本低于镍铬合金。

3. 碳化硅与二硅化钼

碳化硅与二硅化钼作为新型发热材料，在电热法炼镁中也有应用。物理性能上，碳化硅电阻率为0.8-1.2 Ω·cm（20℃），最高使用温度1600℃；二硅化钼电阻率为22×10⁻⁶ Ω·cm（20℃），最高使用温度1800℃。化学性能方面，碳化硅在氧化性气氛中能形成SiO₂保护膜，但高温下易与镁反应；二硅化钼在1000℃以上形成致密氧化膜，抗氧化性优异。经济性上，碳化硅约8-12万元/吨，适用于中低温场景；二硅化钼约30-40万元/吨，成本较高，但由于其良好的抗氧化性和较长的使用寿命，在一些对材料性能要求极高的高温场景中仍具有应用价值。不同类型和特性的石墨类发热材料为电热法炼镁提供了多样化的选择，可根据具体的生产需求和成本预算进行合理选型。

二、电阻式发热材料性能对比与选型建议

（一）物理性能对比

电阻式发热材料的物理性能直接决定了其在电热法炼镁装置中的适用范围与加热效果。最高使用温度是衡量材料性能的关键指标之一，不同材料在这方面差异显著。钨具有极高的熔点，最高使用温度可达3410℃，钼也表现出色，为2620℃，二硅化钼能达到1800℃，人造石墨为2000℃，而镍铬合金和铁铬铝合金相对较低，分别为1250℃和1400℃。这表明在需要极高温度的炼镁场景中，钨和钼是理想选择，但对于常规高温需求，人造石墨和二硅化钼也能满足^[3]。

热震稳定性反映了材料在温度急剧变化时的抗开裂

能力。石墨类材料在这方面优势明显，其良好的导热性和独特的晶体结构使其能够快速适应温度变化，减少热应力导致的损坏。铁铬铝合金次之，镍铬合金再次之，钼和钨的热震稳定性相对较差。在炼镁过程中，若装置频繁启停或温度波动较大，热震稳定性好的材料能显著延长使用寿命，降低维护成本。

（二）化学性能对比

化学性能对于电阻式发热材料在电热法炼镁环境中的长期稳定运行至关重要。抗氧化性方面，二硅化钼表现卓越，其表面能形成致密的氧化膜，有效阻止氧气进一步侵蚀，从而延长材料使用寿命。镍铬合金和铁铬铝合金也具有一定的抗氧化能力，通过合金元素的氧化形成保护层。人造石墨和天然石墨的抗氧化性相对较弱，尤其是在高温有氧环境下，容易发生氧化反应，导致材料损耗^[4]。

耐镁腐蚀性是炼镁过程中不可忽视的性能指标。石墨类材料对镁具有良好的耐腐蚀性，其稳定的化学结构使其在接触镁液时不易发生化学反应，能够有效保护发热材料。碳化硅也表现出较好的耐镁腐蚀性，可作为备选材料。镍铬合金和铁铬铝合金在高温下与镁液直接接触时，可能会发生化学反应，导致材料性能下降，因此在使用时需避免高温直接接触镁液，或采取相应的防护措施。

（三）经济成本对比

经济成本是企业在选择电阻式发热材料时必须考虑的重要因素，包括初始投资和运行成本。初始投资方面，钨和钼由于资源稀缺、加工难度大，价格昂贵，初始投资成本最高。镍铬合金和二硅化钼的价格次之，人造石墨和铁铬铝合金相对较为经济实惠，天然石墨价格最低。企业在选择材料时，需根据自身的资金实力和生产规模，权衡初始投资与长期效益。

运行成本主要包括电耗和更换频率。电耗方面，石墨类材料电阻较低，在相同加热功率下，所需电流较小，电耗相对较低；而金属类材料电阻较高，电耗较大。更换频率上，天然石墨由于热震稳定性和抗氧化性较差，在高温环境下容易损坏，更换频率最高。铁铬铝合金和镍铬合金的性能相对稳定，更换频率适中。人造石墨的质量较好，使用寿命较长，更换频率较低。综合考虑电耗和更换频率，企业可选择综合运行成本最低的材料，以提高生产的经济效益。

（四）选型建议

基于以上对电阻式发热材料物理性能、化学性能和

经济成本的对比分析,针对不同温度场景提出以下选型建议。在低温场景($<1000^{\circ}\text{C}$)下,铁铬铝合金是优先选择。其成本低,且在该温度范围内能够满足加热需求,寿命也足够长,能够为企业降低生产成本。

中温场景($1000\text{--}1400^{\circ}\text{C}$)中,镍铬合金或人造石墨是较好的平衡之选。镍铬合金具有良好的综合性能,能够适应中温环境;人造石墨则在耐镁腐蚀性和热震稳定性方面表现出色,且运行成本相对较低,两者都能在性能与成本之间取得较好的平衡。

高温场景($>1400^{\circ}\text{C}$)下,二硅化钼或钼是合适的选择。但需要注意的是,这两种材料在高温下容易被氧化,需配合气体保护措施,如惰性气体保护,以延长其使用寿命。

对于超高温场景($>2000^{\circ}\text{C}$),钨是唯一可行的选择,但由于其成本高昂,仅适用于特殊实验或短时加热等对温度要求极高且使用频率较低的场景。通过合理选型,企业能够优化电热法炼镁工艺,提高生产效率和经济效益。

三、电阻式发热材料的性能对比与选择依据

(一) 性能对比

从发热温度来看,石墨发热温度可较高,能满足炼镁所需的高温要求;金属材料发热相对较均匀;碳化硅和二硅化钼耐高温性能突出。在抗氧化性方面,碳化硅和二硅化钼较好,石墨在高温下易被氧化,金属材料也可能存在一定的氧化问题。从机械强度看,石墨质脆,金属材料及部分陶瓷发热材料相对较好。

(二) 选择依据

选择电阻式发热材料时,需考虑炼镁工艺的温度要求、炉内气氛、设备成本等因素。对于需要高温且对发热均匀性要求较高的工艺,可考虑碳化硅、二硅化钼或合适的金属发热材料;若对成本较为敏感,且能解决石墨的氧化和机械强度问题,石墨也可作为一种选择。

四、挑战与未来发展方向

(一) 当前挑战

当前电热法炼镁电阻式发热材料面临多重挑战。金属材料在高温环境下易出现脆化现象,导致材料强度下

降、易断裂,影响设备稳定运行;石墨材料虽耐高温,但在氧化性气氛中易被氧化,缩短使用寿命。复合材料如石墨-碳化硅虽综合性能优异,但原材料成本高、制备工艺复杂,限制了其大规模应用。此外,智能控温系统虽能精准调节温度,但与发热体寿命的匹配性欠佳,频繁的温度变化可能加速发热体老化,增加设备维护成本。

(二) 未来趋势

未来,电阻式发热材料将朝着创新、优化与集成方向发展。材料创新方面,纳米改性石墨和高熵合金发热体成为研究热点,纳米技术可改善石墨的微观结构,提升其耐温性与抗氧化性;高熵合金凭借独特的原子结构,具备出色的高温稳定性和抗腐蚀能力。结构优化上,3D打印技术将用于制造复杂流道发热体,实现热场的精准调控,提高热场均匀性。系统集成层面,结合余热回收与多联产技术,可充分利用炼镁过程中的余热,实现能源的梯级利用,进一步降低综合能耗,推动电热法炼镁向高效、清洁、可持续方向迈进。

结束语

电阻式发热材料是电热法炼镁装置的核心,其选型需综合考虑温度需求、化学环境、经济成本及寿命周期。金属类材料(如铁铬铝合金、镍铬合金)适用于中低温场景,石墨类材料(如人造石墨)在高温下具有综合优势,而超高温场景需依赖钼或二硅化钼。未来,随着材料科学与智能控制技术的发展,电热法炼镁将向高效、清洁、低成本方向持续演进,推动全球镁产业绿色转型。

参考文献

- [1] 邓军平.多热源内热式电热法炼镁新技术研究.陕西省,西安科技大学,2014-12-01.
- [2] 吴贤熙.铝硅铁合金热法炼镁的研究[J].有色金属,2000,(02):72-74+97.
- [3] 张晓明,姚广春,郭清富,等.铝硅合金热法炼镁的研究[J].轻金属,1998,(05):42-44.
- [4] 姚广春,孙挺,张晓明,等.电热法生产硅铝合金的探讨[J].有色金属(冶炼部分),1997,(05):12-14.