

Process and properties of silicon-aluminum alloy prepared by alkali digestion pretreatment of oil shale waste residue

Li Li Liguo Miao Zhancai Zhao

Engineering Technology Research Center of Fushun Mining Group Co., Ltd., Fushun, Liaoning, 113000, China

Abstract

This study focuses on the process of preparing silicon-aluminum alloy from oil shale residue using alkaline leaching pretreatment, along with its performance characteristics. It first expounds the principle of alkaline pretreatment and analyzes key parameters (like alkali concentration, reaction temperature, and time) affecting silicon and aluminum dissolution rates. The microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of the prepared alloy are then examined. The research shows that optimized alkaline pretreatment parameters enable efficient extraction and conversion of silicon and aluminum from the residue. The resulting silicon-aluminum alloy exhibits favorable overall performance, offering a feasible pathway for high-value utilization of oil shale residue and promoting sustainable development in related industries.

Keywords

oil shale residue; alkaline leaching pretreatment; silicon-aluminum alloy; process parameters; performance

油页岩废渣碱溶预处理制备硅铝合金的工艺与性能

李理 苗利国 赵占才

抚顺矿业集团有限责任公司工程技术研究中心，中国·辽宁 抚顺 113000

摘要

本文聚焦于通过碱溶预处理技术从油页岩废渣制备硅铝合金的工艺及相关性能研究。首先阐述了碱溶预处理油页岩废渣的原理，详细分析了工艺过程中诸如碱浓度、反应温度、反应时间等关键参数对硅铝溶出率的影响。深入探讨了所制备硅铝合金的微观组织、力学性能以及耐蚀性能等。研究表明，合理控制碱溶预处理工艺参数，能够实现油页岩废渣中硅铝的高效提取与转化，所制备的硅铝合金具备良好的综合性能，为油页岩废渣的高值化利用提供了可行路径，有望推动相关产业的可持续发展。

关键词

油页岩废渣；碱溶预处理；硅铝合金；工艺参数；性能

1 引言

硅铝合金具备低密度、高比强度的特点，其铸造性能以及耐蚀性能良好，正因如此，它在航空航天领域、汽车制造领域以及电子工业等诸多领域中都获得了广泛应用。油页岩废渣中含有丰富的硅铝元素，采用合适的工艺提取元素，将其制备成硅铝合金，不仅能够解决废渣所引发的环境问题，还可以对资源进行回收利用，其经济方面以及环境效益颇为显著。碱溶预处理在从油页岩废渣里提取硅铝元素的过程中是关键步骤的其中之一，它对于后续进行硅铝合金的制备工作以及硅铝合金最终呈现的性能具有重要影响。本文针对油页岩废渣经过碱溶预处理之后制备硅铝合金的工艺及性能展开细致的探讨。

【作者简介】李理（1978–），男，中国黑龙江哈尔滨人，本科，高级工程师，从事无机材料和固废利用研究。

2 油页岩废渣特性及碱溶预处理原理

2.1 油页岩废渣的组成与特性

油页岩废渣的矿物组成复杂，其主要包含高岭石、伊利石等硅铝酸盐矿物，与此同时，还含有一定数量的金属氧化物，诸如氧化铁、氧化钙、氧化镁等，另外还有未彻底燃烧的碳质成分^[1]。在其化学组成中，硅与铝的含量较高，给制备硅铝合金预备了潜在的原料基础。不过，废渣里的硅铝元素大多以相对稳定的硅铝酸盐的形式存在，其化学活性比较低，所以很难直接提取、利用。而且，废渣中的杂质成分也会对后续开展的硅铝提取以及合金制备的过程产生一定的影响。例如，金属氧化物有可能会在碱溶的过程中和碱发生反应、消耗碱液，影响硅铝的溶出效果；碳质成分则有可能会在熔炼过程中对合金的纯度以及性能产生影响。

2.2 碱溶预处理的基本原理

碱溶预处理的原理在于借助碱液同油页岩废渣里的硅铝酸盐矿物产生化学反应，促使硅铝元素从原本稳定的矿物

晶格中溶出，转化成为可溶解的硅酸盐以及铝酸盐^[2]。常见的硅铝酸盐矿物如高岭石和氢氧化钠发生反应之时，由氢氧化钠所提供的氢氧根离子会对高岭石的晶体结构造成破坏，使得硅铝离子能够脱离晶格而进入到溶液之中。与此同时，其他的金属氧化物杂质也可能会和碱产生反应，如氧化铁，但铁酸钠在后续的处理环节中是可以通过沉淀方式予以去除。在碱溶反应进行的过程里，温度、碱浓度、反应时间等诸多因素都会对反应速率以及硅铝溶出率产生显著的影响。高温能够加快分子运动的速度，增加反应物之间相互碰撞的频率，推动反应开展；适当提高碱浓度就能够增加溶液里氢氧根离子的浓度，这对于硅铝酸盐矿物的溶解较为有利；延长反应时间，就能够让反应进行得充分，不过要是反应时间过长，可能会出现能源被浪费以及设备遭到腐蚀等一系列的问题。

3 碱溶预处理工艺参数对硅铝溶出的影响

3.1 碱浓度的影响

碱浓度是影响硅铝溶出率的关键因素。伴随着碱浓度逐步增加，溶液里氢氧根离子的浓度也随之变大，给碱溶反应增添了更多的活性物质，对破坏油页岩废渣中硅铝酸盐矿物的晶体结构起到了推动作用，促使硅铝离子加快溶出。在碱浓度相对较低时，硅铝溶出率的增长速度是较缓慢，原因为于氢氧根离子浓度不够充足，和硅铝酸盐矿物之间的反应无法充分开展。随着碱浓度进一步地提升，硅铝溶出率呈现显著上升态势。不过，当碱浓度超出了一定的数值之后，硅铝溶出率的增长迟缓，甚至还有可能出现下降。这是因为过高的碱浓度极有可能使得溶液的黏度增大，传质所面临的阻力也随之变大，这对于反应的开展不利；与此同时，过高的碱浓度还很可能引发诸如硅铝酸盐矿物过度溶解并生成复杂多聚体的副反应，降低了硅铝离子有效溶出的程度。所以，在实际的工艺操作过程中，得通过开展实验的方式来确定合适的碱浓度，以确保硅铝高效溶出。

3.2 反应温度的影响

反应温度对于碱溶预处理的过程有着不容忽视的重要影响。当温度升高时，能够促使反应速率加快，使得硅铝溶出率得以提高。之所以会出现这样的情况，是因为随着温度不断升高，分子热运动变得剧烈，反应物分子的活化能也随之增加，便有更多的分子能够参与到反应中。在低温的状况下，硅铝溶出率较低，且反应的推进缓慢^[3]。而伴随着温度逐步升高，硅铝溶出率会迅速地上升。不过，过高的反应温度其实也存在着不利之处。一方面，高温会使得能源消耗有所增加，生产成本也相应提高；另一方面，高温很可能致使设备腐蚀的情况加剧，使得设备的使用寿命被缩短。除此之外，过高的温度还有可能引发对硅铝溶出不利的副反应，比如硅铝酸盐矿物的分解产物或发生再聚合。综合考量，务必要在确保硅铝溶出率的基础之上，挑选合适的反应温度，这样才能够达成工艺的经济性以及稳定性。

3.3 反应时间的影响

反应时间同样对碱溶效果有重要影响。在碱溶反应刚开始时，随着反应时间不断地延长，硅铝溶出率呈现出不断增加的态势。之所以会如此，是因为该反应需花费一定的时间破坏硅铝酸盐矿物的晶体结构，让硅铝离子能够逐步溶出。在反应的初始阶段，反应物的浓度较高，相应的反应速率也较快，所以硅铝溶出率的增长明显。不过，当反应持续到了一定的时间之后，硅铝溶出率的增长便渐渐变得趋于平缓。这是由于随着反应持续推进，溶液中硅铝离子的浓度在持续增加，反应达到了平衡的状态，此时若继续延长反应时间，对于硅铝溶出率的提升所起到的作用较为有限。并且，若反应时间过长，还会造成能源浪费，同时也会使得生产效率出现降低的情况。所以，要通过开展相关的实验来确定最为合适的反应时间，让硅铝溶出率能够在合理的时间范围之内达到相对较高的水平。

4 硅铝合金的制备工艺

4.1 溶出液的净化与除杂

在经过碱溶这一预处理流程之后，所获取到的溶出液中，除了存在目标硅铝酸盐之外，还存有其他的杂质离子，像铁离子、钙离子、镁离子等。这些杂质离子的存在会对后续硅铝合金的质量以及其性能产生影响，所以得对溶出液开展净化除杂处理。常见的用于除杂的方法有沉淀法、离子交换法以及吸附法等。沉淀法通过往溶出液中添加合适的沉淀剂，促使杂质离子形成沉淀，达到除杂质离子的目的。比如，向溶出液里加入适量的碳酸钠溶液，就能够让钙离子、镁离子等形成碳酸盐沉淀。而离子交换法是借助离子交换树脂针对不同离子所具有的选择性吸附这样的特性，去除杂质离子。吸附法利用吸附剂对杂质离子的吸附作用实现净化，如活性炭等吸附剂可以吸附一部分有机杂质以及重金属离子。通过实施这些净化除杂的步骤，能够提升溶出液里硅铝元素的纯度，为后续制备出高质量的硅铝合金打下良好基础。

4.2 硅铝合金的熔炼

经过杂质去除而得以净化的溶出液，仍需进一步开展熔炼操作，以制备硅铝合金。熔炼过程往往借助于高温熔炉，如电弧炉以及感应炉等。在开展熔炼的过程之中，首先将溶出液加以浓缩处理，提升硅铝元素的浓度水平。随后，要添加适量的还原剂，如碳质材料等，将硅铝酸盐里的硅铝离子还原成金属态。在高温的条件之下，硅铝元素会和其他添加元素（如镁、铜等，依据合金性能需求添加）发生熔合反应，形成硅铝合金熔体。熔炼过程中的温度、熔炼时间以及添加剂的具体种类和使用的量等诸多因素，对于硅铝合金的成分以及性能都有重要的影响作用。合适的熔炼温度能够确保反应得以充分地开展，促使合金成分均匀化；调控熔炼时间，就可以避免因为过度熔炼而造成的元素烧损以及能源浪费；合理地挑选添加剂的种类并且确定其使用的量，能够精确地对合金的成分做出调整，以便能够满足不同应用领域针对合金

性能的要求。

4.3 精炼与成型

熔炼所得到的硅铝合金熔体中，可能还存有少量的气体以及夹杂物，这些气体和夹杂物会对合金的性能产生影响，所以应对其做精炼处理。精炼的方法包含吹气精炼以及熔剂精炼等不同方式。吹气精炼是向合金熔体中通入像氩气等惰性气体，凭借气泡往上升浮的过程，把熔体中的气体和夹杂物一并带出。熔剂精炼是添加特定的熔剂，让熔剂跟熔体里的杂质发生化学反应，生成密度相对偏小的化合物，这些化合物会漂浮在熔体的表面，便于去除。

5 硅铝合金的性能分析

5.1 微观组织特征

硅铝合金的微观组织在其性能方面有着关键的决定性作用。借助金相显微镜、扫描电子显微镜（SEM）等分析手段观察便能够发现，硅铝合金的微观组织主要是由铝基体、硅相还有其他合金元素所形成的强化相共同构成的。就铸态组织而言，硅相常常是以不规则的块状或者针状的形态分布于铝基体中的。硅相自身的大小、所呈现出的形状以及具体的分布状态均会对合金的力学性能产生影响，比如粗大的硅相往往会使合金的强度与韧性有所降低，然而细小且分布得均匀的硅相却能够促使合金的强度与硬度得以提升。

5.2 力学性能

硅铝合金具备良好的力学性能，其强度、硬度以及韧性等各类性能指标均和合金成分、微观组织还有制备工艺有着紧密的关联。因为硅元素有着固溶强化作用，并存在弥散强化的作用，所以硅铝合金在强度与硬度上往往会比纯铝要高。伴随着硅含量不断增加，合金的强度和硬度也会逐步提升，若硅含量过高，那么硅相就会在铝基体中聚集并长大，合金的韧性下降^[4]。适当地添加像镁、铜等其他的合金元素能够进一步提升合金的力学性能。镁元素和硅元素能够形成Mg₂Si强化相，可以明显地提升合金的强度；而铜元素在加入之后，其能够凭借固溶强化以及时效强化的作用提高合金的强度和硬度。除此之外，要是经过恰当的热处理工艺，如固溶处理以及时效处理，还能够进一步对合金的微观组织加以优化，提升合金的力学性能。

5.3 耐蚀性能

硅铝合金在诸多环境中均具备良好的耐蚀性能。就铝

基体的表面而言，其会自然形成一层致密的氧化铝保护膜，而这层保护膜能够起到阻拦外界介质进一步展开侵蚀的作用。当硅元素被加入其中后，可以让氧化铝膜的稳定性以及完整性得到提升，使合金的耐蚀性能得以增强。除此之外，在该合金中还存在着其他元素，如镁、锌等等，它们同样会对合金的耐蚀性能带来一定的影响^[5]。例如，适量的镁元素能够促使合金的阳极极化性能有所提高，让合金在处于腐蚀介质中时，能够更加容易地形成稳定的钝化膜，让耐蚀性得以提高。不过，要是在合金中存在着像铁、铜等杂质元素，且其含量较高，那么就很可能会在合金的表面形成微电池，使得腐蚀的过程加快。所以，在对硅铝合金进行制备时，务必要严格把控杂质元素的含量，而且还可以借助合适的表面处理工艺，比如阳极氧化、涂覆防护涂层等工艺，进一步提升合金的耐蚀性能，拓宽其应用的领域。

6 结语

通过碱溶的方式对油页岩废渣预先展开处理，制备硅铝合金，为废渣的资源化利用开拓了一条有效路径。碱溶环节的各项参数对硅铝的溶出状况有着显著的影响，应对这些参数加以合理的调控，以实现高效提取硅铝的目标。在完成碱溶预处理之后，依次经过净化、熔炼、精炼以及成型等一系列工序，便能够获取性能表现很良好的硅铝合金。这种硅铝合金有着独特的微观组织，其力学性能以及耐蚀性能良好。采用这样的工艺，一方面能够解决废渣所带来的环境问题，另一方面还能够生产出具有较高附加值的产品。未来，应当进一步对这一工艺加以优化，提升产品的质量以及生产的效率，降低生产成本，推动其工业化应用。

参考文献

- [1] 张森. 高硅铝合金振动辅助磁性磨料光整加工[D]. 长春工业大学, 2024. DOI:10.27805/d.cnki.gccgy.2024.001201.
- [2] 陈彬,白翔仁. 新方法实现超强铝合金制备[N]. 中国科学报, 2024-05-08 (001). DOI:10.28514/n.cnki.nkxsb.2024.000927.
- [3] 韩四红,邢昌柱,陈久灿. 油页岩废渣提取Al(Ⅲ)处理水中硫酸盐的研究 [J]. 当代化工研究, 2023, (22): 107-109. DOI:10.20087/j.cnki.1672-8114.2023.22.034.
- [4] 徐长伟, 张宇, and 谢锐. “油页岩残渣制备建筑陶粒的关键技术.” #i{沈阳建筑大学学报:自然科学版} 39.1(2023):147-154.
- [5] 赵宝超. “抚顺页岩油催化裂解工艺研究.” #i{当代化工研究} 14(2024):154-156.