

煤炭加工与环保

煤气化焦油脱除/催化重整技术研究进展

张书, 陈宗定, 徐敏, 许德平, 王永刚

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:介绍了煤气化焦油脱除方法的研究现状,分析了干法、湿法、电捕法、热裂解和催化重整等各种去除焦油方法的优点和存在的不足,重点从反应温度、停留时间及反应气氛等方面阐述了催化重整方法脱除煤焦油的过程。最后对目前应用较为广泛的催化剂进行了较为细致的讨论,并展望了焦油催化重整技术未来的发展方向。

关键词:煤气化;焦油脱除;催化重整;热裂解

中图分类号:TQ523 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2014)01-0106-06

Review on Technology Development for Tar Removal/Catalytical Reforming During Coal Gasification

ZHANG Shu, CHEN Zong-ding, XU Min, XU De-ping, WANG Yong-gang

(School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Recent advances on the approaches for tar removal during coal gasification have been reviewed in this paper. Different types of methods, such as dry method, wet method, electrical capture method, thermal cracking and catalytical reforming and others were analyzed regarding to their advantages and disadvantages. The importance of reaction temperature, residence time and gasifying agents to catalytic tar reforming was emphasized. Particularly, a few widely-used catalysts for tar reforming were carefully discussed. The future direction in the development of catalysts for coal tar catalytic reforming was suggested at the end.

Key words: coal gasification; tar removal; catalytic reforming; thermal cracking

0 引 言

煤气化是实现煤炭洁净利用的方式之一,气化产品主要成分 H_2 、 CO 可以用来合成液体燃料和生产化工产品,用于钢铁冶金作为还原剂或作为燃料电池及汽轮机原料直接发电等^[1-3]。气化效率与气化产品质量受到诸多因素的影响,如煤种、气化温度、压力、滞留时间以及气化反应器类型等。由于煤质和气化炉内反应条件本身的不均匀性和不稳定性,煤焦油前驱体在气化炉内不能完全裂解或气化为小分子气体,这将导致煤气化产品气体中经常会含有一定量的煤焦油组分。气化过程中产生的焦油

一直是制约煤炭洁净利用的主要因素之一,其主要组分为含有芳香环的轻组分物质,这些芳香族碳氢化合物在一定条件下容易聚合、结焦导致堵塞管道、腐蚀设备、污染环境等问题^[2,4]。因此有效去除煤炭气化产品气中的煤焦油对合成气的后续使用显得尤为重要。虽然目前新一代气化炉(如气流床气化炉)的反应条件比较剧烈(高温高压),气体中所含有的焦油量和传统的移动床比较起来下降幅度很大,但是过于苛刻的反应条件(高温高压)也面临着成本高、操作困难、维护费用高、操作安全条件要求高等问题。因此开发相对温和的气化反应系统对于提高整体气化效益非常关键,尤其对于储量丰富、反

收稿日期:2013-08-10;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.01.025

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAA04B02)

作者简介:张书(1980—),男,江苏泗洪人,讲师,博士。通信作者:王永刚,教授,博士生导师, Tel:010-62339882, E-mail: wyg1960@126.com

引用格式:张书,陈宗定,徐敏,等.煤气化焦油脱除/催化重整技术研究进展[J].煤炭科学技术,2014,42(1):106-111.

ZHANG Shu, CHEN Zong-ding, XU Min, et al. Review on Technology Development for Tar Removal/Catalytical Reforming During Coal Gasification [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 106-111.

应活性高的低阶煤(褐煤)。低阶煤的高挥发分含量从某种程度上来说,对于气化系统中的焦油脱除可能会提出更高的要求,因此高效的焦油净化措施在推动整体煤气化技术发展的同时,也为低阶煤高效广泛应用提供了更多的选择。笔者综述了脱除气化产生煤焦油的基本物理和化学方法,简要分析了其优缺点,并着重介绍了煤焦油催化重整的基本要素及其前景。

1 物理法脱除煤焦油

煤气化焦油的物理转化方法是指依靠惯性碰撞、拦截、扩散、静电力、重力等作用对已经生成的焦油从气相向冷凝相进行转移、脱离,进而达到与气体产品分离、减少气化产品中焦油含量的目的^[5],主要包括湿法、干法和电捕等方法。

湿法即水洗法,其脱除焦油过程分为2步,分别采用冷却塔/文丘里洗涤塔及除雾器,冷却塔冷凝重质焦油,夹杂于气流中的液滴和烟雾则由文丘里塔除去。采用冷却塔/文丘里洗涤塔在适当条件下可使煤气中焦油含量低于 10 mL/m^3 ^[5]。除雾器可有效将文丘里洗涤塔处理后煤气中的残余焦油和水除去。干法是利用吸附性很强的材料将煤气中的焦油滤除的方法,依靠碰撞、拦截和扩散等作用,使悬浮在气体中的焦油颗粒沉积于吸附体表面或吸附体孔结构中^[6]。电捕是指利用高压电场使煤气中焦油粒子荷带电后与气体分离,并对其进行电捕。

上述方法各有优劣^[2,5-7],其优缺点总结如下:

①湿法的优点是脱除效率高,可将焦油冷凝在气相之外,成本较低,操作简单。缺点是产生大量含焦废水,易造成严重的环境污染。②干法的优点是无含焦废水产生,避免洗焦废水带来的二次污染。缺点是焦油脱除效果不理想,焦油沉积现象严重;操作费用高,设备复杂;焦油沉积严重且粘附焦油的滤料难以处理。③电捕的优点是湿式电捕分离效果好,能耗低。缺点是设备复杂,易腐蚀,成本较高;对于干法电捕,焦油呈气态便会失效,对于湿法电捕,后期水处理困难,造成污染。目前我国实际工程中一般采用多级湿法联合除焦油系统,其效果较干法好,且操作简单成本低,但存在污染大、能耗高、后续处理繁琐等问题。

2 化学法脱除煤焦油

化学法是指通过不同的化学反应将焦油大分子

转化为 CO 、 H_2 、 CH_4 等小分子气体的过程^[2]。主要包括部分氧化法、等离子体法、热裂解及催化重整。其中部分氧化法和等离子体法研究较少,化学法中以热裂解及催化重整研究居多。

2.1 热裂解

热裂解是指利用高温环境,使煤气中的焦油发生深度裂解,较大分子的化合物通过断键脱氢、脱烷基以及其他的一些自由基反应而转变为较小分子的气态化合物和其他产物^[7]。

Doolan等^[8]研究表明,煤水蒸气气化条件下焦油裂解一般包括以下过程:焦油发生热分解,分解为固体碳、气体和反应自由基,且这些自由基大多具有芳香性。在低温下,这些自由基可以聚合形成较大的分子,在室温下冷凝形成轻组分的焦油;在较高温度下,反应自由基可以进一步裂解形成气体产品和沉积碳;在更高温度下,沉积碳可发生水蒸气气化反应,增加了碳的转化率和气体产物。

焦油主要来源于煤的裂解,所以当煤裂解占主导地位时,焦油产率随温度升高而增加,当煤的裂解和有机质(气相中焦油前驱体)裂解达到平衡时,焦油产率达到最大值;当有机质裂解占主导地位时,焦油产率随温度升高而降低^[9],即焦油的裂解贯穿于整个气化反应过程,但在高温下更为显著,热裂解正是利用了这一规律对焦油进行脱除,并能够达到较好的效果。

Naravaez等^[10]在研究过程中发现焦油含量随温度升高而减少,认为可能是由于高温有利于焦油发生裂解和水蒸气转化反应所致。

侯斌等^[11]研究得出,800~850℃时,焦油裂解率平均在40%左右,900℃时,焦油的裂解率也只有60%左右。只有当温度高于1100℃时,才能得到较高的焦油裂解率,但易产生烟灰。

热裂解法是一种较为有效的焦油脱除方法,且不存在二次污染及废水处理问题,但温度高,导致能耗高且对设备要求苛刻,在实际应用中有一定难度,而且焦油在高温裂解下容易积碳,导致焦油转化效率降低,且阻塞了管路,为设备清理增加了难度。某些工艺中采用加入水蒸气和其他一些氧化性物质的方法,与焦油中某些组分反应生成 CO 、 H_2 及 CH_4 等气体的同时,可与产生的焦炭反应使其转化为小分子气体,从而有效提高焦油转化率。但是氧化剂(如低浓度的氧气)的加入会同时不可避免地消耗

部分有效气体成分(CO 、 H_2),生成 CO_2 和水蒸气。

2.2 催化重整

催化重整是指在催化剂作用下,焦油分子中 $\text{C}-\text{C}$ 、 $\text{C}-\text{H}$ 能够更容易裂解/重整生成小分子有机物质,生成的烃类物质以及焦炭在催化剂作用下进一步与 H_2O 、 CO_2 等气体发生反应,使合成气总量增加及焦油前驱体组分减少的过程。催化剂的加入从2个方面促进了重整反应进行:一方面,催化剂表面为分子间的结合与反应提供据点和场所;另一方面,催化剂活性位参与化学反应在一定程度上降低分子间反应的活化能,使分子间更容易发生反应。

焦油裂解需要较高的温度^[7-11],催化剂的加入可以降低焦油裂解温度^[2,12-15],在 $700\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ 下可获得与 $1\ 000\sim 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ 热裂解类似的焦油转化率。在相同温度下,与热裂解相比,经催化重整得到的产品气体含有更高的 H_2 以及较低的 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 组分^[15-16]。通过催化剂,烃类气体会在催化剂表面与水蒸气、二氧化碳发生重整,生成一氧化碳和氢气,增加水蒸气或 CO_2 分压可以在一定程度上促进重整反应。

大量研究表明^[5,12-13],采用添加催化剂的方法不仅能够有效脱除产品气体中的焦油,而且对气体组分具有重整效果,这是目前脱除煤气化焦油比较经济有效的途径。焦油催化重整效率与反应温度、接触时间、反应气氛以及催化剂种类等密切相关。

1) 反应温度。气化温度不仅对焦油形成数量有重要影响,而且显著影响焦油的组分^[17],Kinoshita等^[18]进行了固定床气化木粉试验,指出随气化温度升高,可检测到的焦油分子种类减少。当气化温度在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时,未检测到含氧化合物如苯酚、甲酚和苯并呋喃的存在。高温有利于低环芳香物种的形成,而苯、萘和菲等物种的降解,需在气化温度 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时才会发生。由于重整过程是吸热过程,高温对重整反应的化学平衡有利。文献^[19]研究表明,低温下蒸汽反应活性低,因而活化的焦油碎片很容易附着在催化剂表面形成焦炭,这些焦炭在低温下很难气化,而高温促进了焦油分子的裂解、蒸汽以及催化剂活性的提高,从而促使焦油中大分子(芳香环体系)的破裂和重整。

王铁军^[6]以 $\text{Ni}-\text{MgO}$ 为催化剂进行粗燃气重整研究发现,提高气化温度有利于焦油转化,减少重整催化剂表面积碳,但温度过高易导致催化剂烧结失

活,适宜重整温度为 $750\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 。Delgado等^[20]以菱镁矿、方解石作为催化剂进行生物质焦油重整研究,发现焦油转化率随催化剂床层温度升高而增大,在 $840\text{ }^\circ\text{C}$ 左右可基本完全脱除。

2) 接触时间。接触时间可以通过改变催化剂床层的厚度和反应器中气体的流动速率来调节,本质上都能够改变焦油前驱体与催化剂的作用时间和强度。Katheklakis等^[21]研究表明,催化反应时间延长导致焦油的二次或多次反应增多,焦油的平均相对分子质量减小,使较轻的产物组分含量增大,在某些方面与提高温度效果类似。Delgado等^[20]研究了接触时间对焦油催化重整效率的影响,结果表明气体挥发分与催化剂接触时间的增加导致气体中焦油的裂解率增加,焦油转化及反应(水蒸气-挥发分)增强,从而利于产出更多的 H_2 和 CO 。

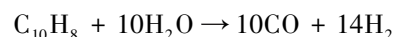
3) 反应气氛。气化剂(如水蒸气、 CO_2 、氧气及其他)是焦油组分催化重整反应过程中重要的反应物之一,不同气化剂具有不同的分子组成和结构,其极性和氧化性差别较大,对焦油催化重整的影响也会差别很大。研究表明以煅烧白云石为催化剂,以含14%的 CO_2 (其余为 N_2)为气化剂时,萘转化率可达到96%,而以含18% H_2O 为气化剂时,萘转化率只有79%,产品气体组成见表1^[16]。

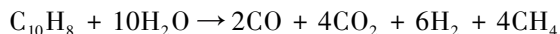
表1 温度 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 不同催化剂条件下的产品气体组成

气化剂	气化剂含量/%	催化剂	气体体积分数/%			
			H_2	CO	CO_2	CH_4
CO_2	14	无	1.6	2.8	16.0	0.67
CO_2	14	白云石	2.9	15.0	4.6	0.13
H_2O	18	白云石	11.0	4.3	1.9	0.22

由表1可知,催化剂的加入使产品气体中 H_2 、 CO 含量明显增加, CO_2 和 H_2O 的加入均在不同程度上促进了 CO_2 和 CH_4 的转化,加入 CO_2 利于 CO 的生成,而 H_2O 的加入则更利于 H_2 的生成。文献^[17]研究表明当采用镍基催化剂时,燃气中含较高 CO_2 时可加重催化剂表面的积碳反应,增加 H_2 含量可提高镍催化剂的还原度和活性,减少表面的积碳程度。

水蒸气不仅可以减少炭黑的产生,而且可以提高可燃气体的产量,水蒸气中的氢和氧元素会转化为有效的产物组成(H_2 、 CH_4 和 CO),如萘在催化裂解时,发生如下反应:





4) 催化剂。催化剂是催化重整脱除焦油技术的核心^[16],要求能够有效脱除焦油,可为后续应用过程提供适宜的合成气比例,应对结焦导致的失活具有一定抵制效果,还应该能够容易重生,具有一定强度,并且价廉易得。一般来说,催化剂主要包括载体及活性组分,载体应具有一定强度且使活性组分均匀分散,获得较高比表面积,而活性组分则应该活性较高,选择性强,对于焦油重整所用催化剂的类型和效果总结如下。

天然矿物类物质本身具有一定的吸附性和催化活性,且耐高温,耐酸碱,常被用作催化剂的载体,在焦油催化重整过程中,常用的有白云石、橄榄石等,又以橄榄石居多。这些物质本身具有一定的催化活性,高温下矿物质分解释放出 H_2O 、 CO_2 ,形成 MgO - CaO 的配合物使颗粒表面具有吸附焦油分子的极性活化位,降低了 $\text{C}-\text{C}$ 和 $\text{C}-\text{H}$ 键断裂键能以及烃类与 H_2O 、 CO_2 反应的活化能^[21]。

白云石是研究最多、使用最广的非金属焦油脱除催化剂,基本组成为: CaO (30%, 质量分数,下同), MgO (21%), CO_2 (45%), 同时还含有少量的 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 ^[6]。大量研究表明^[13,16,22-23],经过煅烧的白云石活性大幅高于未经煅烧的白云石(前者为后者 10 倍左右^[16])。白云石作为焦油催化重整的催化剂虽然具有诸多优点,但硬度低、易粉化,导致燃气中粉尘含量增加,而且其活性随反应的进行很快降低^[6]。相比之下,橄榄石具有良好的高温耐磨性,几乎不会破碎为颗粒^[6],可将其作为气化炉添加料。Rapagna 等^[24] 研究结果表明,橄榄石具有同白云石相似的焦油裂解活性,可在气化炉内将焦油减少 90% 以上。

虽然天然矿物质自身对焦油的催化重整具有一定效果^[22](焦油浓度可降至 $0.5 \text{ g}/\text{Nm}^3$),但经重整后仍会残留一些重质组分(以萘为主)难以除去,这在很大程度上限制了天然矿物质作为催化剂彻底脱除焦油的应用,另有研究表明^[13,15],在这些矿物质基础上负载一些金属(如铁、镍等)活性物质,即采用这些矿物质作为载体,通过离子交换或热浸渍等方法使活性物质均匀分散在其表面制备而成的金属-天然矿物质催化剂,不仅利于矿物质本身稳定性的提高,而且可大幅提高其催化重整效率,900 °C 下可基本实现萘的完全转化^[13]。

目前用于焦油催化裂化和重整的活性金属较多的为镍、铁等物质。文献[25-26]分别以焦炭负载铁、镍进行催化重整焦油研究,铁作为活性物质时,较低温度下效果不显著,而在较高温度下达到较好的脱除效果(800、850 °C 下焦油脱除率分别达到 84%、96%)。低温下(500~700 °C)镍-焦炭催化剂较铁-焦炭催化剂可达到更高的焦油脱除率(约 76%,比铁-焦炭高近 10%),且在 700 °C 下具有较高的芳环重整效率。Michel 等^[27]以浸渍法制备镍-橄榄石催化剂,并对橄榄石及镍-橄榄石催化剂的催化重整效果进行比较,结果表明 800 °C 下,可冷凝物质(焦油+水)含量由 48.9% 降低到 36.7%,同时气体含量有所提高,但应用镍-橄榄石催化剂时,900 °C 较 800 °C 可冷凝物质含量反而有所增加(40.5%),这是由于高温导致催化剂活性降低所致。有研究表明,镍可以通过微小的结构重排作用来提高橄榄石的强度。

很多研究者都将镍基催化剂作为烃以及甲烷等有机组分重整材料^[6,15]。在 740 °C 以上时,采用此类催化剂可使煤气中 H_2 和 CO 含量增加,而烃和甲烷含量下降。镍基催化剂催化重整焦油组分为原理为焦油分子会吸附在镍基催化剂的表面,稳定性降低,同时气相中的氧化剂(H_2O 和 CO_2)在催化剂活性位上吸附解离形成氧自由基,从而使催化剂的表面焦油分子达到重整的效果^[6]。然而由于积碳阻塞活性位,镍基金属很容易失活,大幅降低了催化剂的寿命,可考虑使含焦油的气体先通过其他催化剂(如白云石),降低其中焦油含量,再通过镍基金属,则可有效保持其催化活性。

研究表明^[25,28],褐煤气化焦炭由于丰富的孔隙结构以及表面富含高分散碱金属物质,既可作为载体,又可直接用作催化剂进行焦油的催化重整,其中的金属 Na 可有效抑制炭黑的形成。文献[28-30]的研究表明,焦炭与挥发分的相互作用不仅可以改变焦炭孔隙结构及反应活性,而且可在气化气氛下有效促进挥发分(焦油前驱体)的重整反应。褐煤中(酸性)含氧官能团使煤具有离子交换及分散煤基质中无机物的能力,活性物质可通过离子交换或浸渍在褐煤中达到以分子、甚至原子级分散,而通过热解或部分气化处理可得到半焦炭中活性物质以纳米级分布。Min 等^[19,25]分别以钛铁矿和焦炭负载铁作为催化剂进行焦油催化重整研究,二者具有相同的活性组分(铁或氧化铁),相比之下,采用焦炭负

载铁对焦油催化重整的效果好于钛铁矿,这是由于焦炭负载铁为催化剂时催化反应具有较低的表现活化能和较高的指前因子。相比于其他载体,通过褐煤制备的焦炭载体具有取材方便、廉价易得、不存在后期处理问题等优势,反应后的载体催化剂可通过简单的燃烧或气化,焦炭的热值仍可回收利用,此外焦炭内部本身均匀分布着碱金属及碱土金属,高温下对焦油具有一定催化重整活性,在一定程度上减少了对外加活性金属的依赖和要求,因而以半焦炭作为气化焦油重整催化剂的载体具有较大的研究空间及广阔的应用前景。

3 研究方向

目前针对焦油脱除方法有较为广泛的研究,物理法存在设备复杂、二次污染及能源浪费等问题,限制了其应用;化学法中热裂解法温度要求较为苛刻(1 000 ℃以上)且易产生炭黑,给后续处理带来难度;相比之下催化重整在较低温度下可最大限度地降低焦油含量,调节产气成分,是为最有效的焦油脱除方法。对于催化重整技术的发展,一方面应注重研究的深入,从本质上理解重整过程,另一方面需不断完善催化剂的性能,具体可从以下4方面着手。

1) 催化剂作用机理研究。目前对焦油催化重整机理认识还不充分,研究催化剂作用机理可以进一步了解其重整过程,对催化重整条件的优化及催化剂的改性和完善具有重要的指导意义。

2) 研究应从焦油本身入手。煤气化焦油成分十分复杂,且随着气化条件变化而变化,在对其催化重整进行研究中,部分研究者采用焦油模型化合物(如苯、萘等)进行研究,虽然是焦油主要成分之一,但不能体现整体成分的脱除规律。

3) 催化剂的协同使用。煅烧白云石催化效果好,不易失活但强度不够,容易碎裂,橄榄石具有较高的耐磨性但较为昂贵,镍基金属相对价廉且催化活性高,但容易失活,今后对于催化剂的研究应集中在不同催化剂的耦合(如橄榄石负载镍金属)或多种催化剂联合使用(如先用白云石除去部分焦油再用镍基金属进行催化重整),充分发挥每种催化剂的优势,弥补劣势,使其既具有较高活性和较好的催化重整效果,又不易失活,且节约成本。

4) 煤气化产生的焦炭作为气化焦油重整的催化剂或者作为催化剂载体(负载铁、镍等金属)将非常有实用价值,其活性高,重整效果好且廉价易得,

不存在后期处理问题,具有十分广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] DOU Bin-lin, PAN Wei-guo, REN Jian-xing, *et al.* Removal of Tar Component over Cracking Catalysts from High Temperature Fuel Gas [J]. *Energy Conversion & Management*, 2008, 49 (8): 2247-2253.
- [2] 杜卡帅, 杨国华, 于春令. 生物质或煤气化焦油脱除研究进展 [J]. *环境工程*, 2011, 29(6): 65-69.
- [3] 豆斌林, 高晋生, 沙兴中, 等. 不同催化剂条件下高温煤气中焦油组分的催化裂解 [J]. *燃料化学学报*, 2000, 28(6): 577-580.
- [4] Velegol D, Gautam M, Shamsi A. Catalytic Cracking of a Coal Tar in a Fluid Bed Reactor [J]. *Powder Technology*, 1997, 93(2): 93-100.
- [5] 夏明. 关于煤气化焦油裂解实验及无焦油气化技术的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [6] 王铁军. 高稳镍基催化重整生物质燃气重整制合成气的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [7] Anis S, Zainal Z A. Tar Reduction in Biomass Producer Gas via Mechanical, Catalytic and Thermal Methods: A Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 2355-2377.
- [8] Doolan K R, Mackie J C, Tyler R J. Coal Flash Pyrolysis Secondary Cracking of Tar Vapours in the Range 870 ~ 2000 K [J]. *Fuel*, 1987, 66(4): 572-578.
- [9] 王树东, 郭树才. 神府煤新法干馏焦油的性质及其组成的研究 [J]. *燃料化学学报*, 1995, 23(1): 198-204.
- [10] Naravaez I, Ortoa A, Aznar M P, *et al.* Biomass Gasification with Air in an Atmospheric Bubbling Fluidized Bed; Effect of Six Operational Variables on the Quality of the Produced Raw Gas [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(7): 2110-2120.
- [11] 侯斌, 吕子安, 李晓辉, 等. 生物质热解产物中焦油的催化热解 [J]. *燃料化学学报*, 2001, 29(1): 70-75.
- [12] 薛江涛. 流化床煤热解气化过程中焦油析出特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [13] Kuhn J N, Zhao Z K, Allyson S N, *et al.* Ni-olivine Catalysts Prepared by Thermal Impregnation; Structure, Steam Reforming Activity, and Stability [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2008, 341(1/2): 43-49.
- [14] Mun T Y, Kim J W, Kim J S. Air Gasification of Railroad Wood Ties Treated with Creosote; Effects of Additives and Their Combination on the Removal of Tar in a Two-stage Gasifier [J]. *Fuel*, 2012, 102: 326-332.
- [15] Wang T J, Chang J, Wu C Z, *et al.* The Steam Reforming of Naphthalene over a Nickel-Dolomite Cracking Catalyst [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28(5): 508-514.
- [16] Sutton D, Kellether B, Ross J R H. Review of Literature on Catalysts for Biomass Gasification [J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 73(3): 155-173.
- [17] 王晨光, 王铁军, 吕鹏梅, 等. 整体式催化剂催化重整净化生物

- 质粗燃气性能研究[J].燃料化学学报,2007,35(3):285-288.
- [18] Kionshita C M, Wang Y, Zhou J. Tar Formation Under Differ Biomass Gasification Conditions [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1994, 29(2): 169-181.
- [19] Min Z H, Asadullah M, Yimsiri P, *et al.* Catalytic Reforming of Tar During Gasification. Part I: Steam Reforming of Biomass Tar Using Ilmenite as a Catalyst [J]. Fuel, 2011, 90(5): 1847-1854.
- [20] Delgado J, Aznar M P, Corella J. Calcined Dolomite, Magnesite, and Calcite for Cleaning Hot Gas from a Fluidized Bed Biomass Gasifier with Steam: Life and Usefulness [J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35(10): 3637-3643.
- [21] Katheklakis L E, Lu S L, Bar K D, *et al.* Effect of Free Board Residence Time on the Molecular Mass Distribution of Fluidized Bed Pyrolysis Tar [J]. Fuel, 1990, 69(2): 172-176.
- [22] Gómez-Barea A, Ollero P, Leckner B. Optimization of Char and Tar Conversion in Fluidized Bed Biomass Gasifiers [J]. Fuel, 2013, 103: 42-52.
- [23] Hayashi I, Takahashi H, Iwatsuki M, *et al.* Rapid Conversion of Tar and Char from Pyrolysis of Brown Coal by Reactions with Steam in a Drop-tube Reactor [J]. Fuel, 2000, 79(3/4): 439-447.
- [24] Rapagna S, Jand N, Kiennemann A, *et al.* Steam Gasification of Biomass in a Fluidized Bed of Olivine Particles [J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19(3): 187-197.
- [25] Min Z H, Yimsiri P, Asadullah M, *et al.* Catalytic Reforming of Tar During Gasification. Part II: Char as a Catalyst or as a Catalyst Support for Tar Reforming [J]. Fuel, 2011, 90(5): 2545-2552.
- [26] Virginie M, Adanez J, Courson C, *et al.* Effect of Fe-olivine on the Tar Content During Biomass Gasification in a Dual Fluidized Bed [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012, 121/122(13): 214-222.
- [27] Michel R, Rapagna S, Marcello M D, *et al.* Catalytic Steam Gasification of Miscanthus X Gigantues in Fluidized Bed Reactor on Olivine Based Catalysts [J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(6): 1169-1177.
- [28] Li C Z. Some Recent Advances in the Understanding of the Pyrolysis and Gasification Behaviour of Victorian Brown Coal [J]. Fuel, 2007, 86(12/13): 1664-1683.
- [29] Zhang S, Min Z H, Tay H L, *et al.* Effects of Volatile-char Interactions on the Evolution of Char Structure During the Gasification of Victorian Brown Coal in Steam [J]. Fuel, 2011, 90(4): 1529-1535.
- [30] Zhang S, Hayashi J I, Li C Z. Volatilisation and Catalytic Effects of Alkali and Alkaline Earth Metallic Species During the Pyrolysis and Gasification of Victorian Brown Coal Part IX: Effects of Volatile-char Interactions on Char-H₂O and Char-O₂ Reactivities [J]. Fuel, 2011, 90(4): 1655-1661.

(上接第71页)

观察光谱分析报告中的铁含量及铁屑分析报告机械的磨损指数 P_Q 值的交替变化情况, WK-10B/WK-35 挖掘机减速箱齿轮轴的推压部位最低、最高 P_Q 预警值分别为 1 000、1 5000; 回转、提升、行走部位最低、最高 P_Q 预警值均分别为 500 和 1 000。因为光谱分析只对小于 10 μm 的铁屑有效, 而铁屑分析仪可以检测大于 10 μm 的铁屑, 大小尺寸铁屑比例可反映齿轮及轴承的异常磨损程度, 正常情况下光谱分析报告中的铁含量及铁屑分析报告中 P_Q 值呈线性关系, 否则会出现较大分离, 2 项同时出现较高值, 且偏离越大, 故障风险越大。

3 结 语

通过对 8 台 WK 系列挖掘机减速箱齿轮的轮齿折断、齿面磨损、齿面点蚀和齿轮轴断裂等 4 种失效形式及原因进行分析, 提出了相应的预防措施, 制定正确的修复工艺, 建立 WK 系列挖掘机减速箱齿轮油检测标准, 定期取样检测并对照标准值分析, 杜绝突发故障。根据不同的工况和设备操作者, 制定不同的操作规范。以上方案对改进因齿轮失效所导致 WK 系列挖掘机的故障率高的现状有重要意义。

参考文献:

- [1] 张红顺. 连续采煤机装运齿轮箱的约束模态试验分析[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(12): 80-83.
- [2] 李翠兰, 张爱国, 李慧萍, 等. 浅谈煤矿机械齿轮技术的发展趋势[J]. 煤, 2007, 16(3): 43-44.
- [3] 胡延平. 煤矿机械传动齿轮失效形式分析及改进措施[J]. 江西煤炭科技, 2010(3): 19-20.
- [4] 林福严, 曲敬信, 陈华辉. 磨损理论与抗磨技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 孙庆超. 煤矿机械的润滑[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [6] 黄建龙, 闫存富. 球磨机传动齿轮副失效的分析及改进措施[J]. 煤矿机电, 2010(3): 122-124.
- [7] 张潇云, 周新建. 改进煤矿机械传动齿轮失效的途径[J]. 润滑与密封, 2004(1): 65-67.
- [8] 郭德龙. 接触疲劳损伤[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1999: 28-62.
- [9] 吴兆宏, 朱 华, 葛世荣. 煤矿生产中的摩擦学问题[J]. 矿山机械, 2005, 33(6): 71-73.
- [10] 王大伦. 齿轮失效[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1984: 25-28.
- [11] 王中发. 实用机械设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 15-20.
- [12] 胡义祥. 金相检验实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 7-26.