**浅析中国炭黑行业科技进步与创新---机遇与挑战**

青岛黑猫新材料研究院有限公司

王宏 富有斌 寇靖婕 董锡鹏

**摘要：**中国炭黑行业历经数十年发展，从初期技术引进与模仿逐步迈入国际一流行列，但在自主研发、基础理论研究及高端技术应用方面仍面临显著挑战。本文系统分析了行业科技进步与创新的关键问题及未来方向。我国技术创新需聚焦于炭黑生成跨尺度机理研究、新工艺新技术开发以及应用理论研究等方面。行业需加强产学研协同创新，加速AI技术融合，培育复合型人才，通过核心技术攻关与创新生态建设，推动从规模扩张向绿色高端转型，助力"炭黑强国"战略实施。

目 录

一、前言

二、炭黑核心反应机理

三、新工艺新技术

四、炭黑应用理论

五、总结

**一、前言**

中国炭黑行业是从新中国解放后发展起来的，从最开始为了打破国外封锁，开发了槽法炭黑、滚筒法炭黑、混气炭黑和气炉法炭黑，并在七八十年代开发了新工艺炉法炭黑；干法造粒单炉产能从几百吨提高到几千吨，然而这只是解决了有的问题，无论在单炉产能、生产工艺控制水平、生产设备还是基础理论研究等方面都落后于当时国外炭黑同行业。

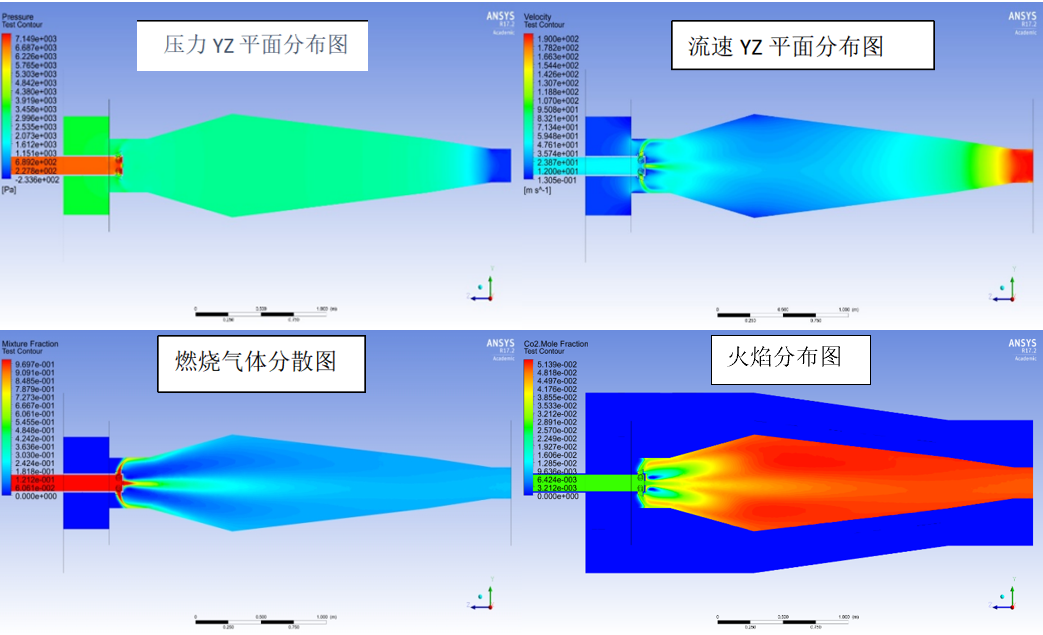
八十年代末，天津炭黑厂从美国大陆碳引进1.5万吨/年硬质炭黑生产线，随后当时的化工部在苏州炭黑厂组织国内各大炭黑厂抽调技术人员进行国产化攻关。至此以后中国炭黑行业有了快速发展，深入了解和学习了国外先进的炭黑生产技术，包括各种基础理论及模拟计算，DCS自动控制系统，关键设备的国产化等。自贡炭研院也组织了多次中高级炭黑培训班，培养了一大批国内炭黑行业的技术人才。经历30多年时间，目前，中国炭黑企业无论在单炉生产规模，生产线自动控制水平还是在产品质量和关键设备制造等方面都处在国际一流水平。

但不可否认，中国目前的炭黑企业自主研发能力还较弱，真正开展炭黑理论研究、新技术、新工艺和新产品的开发还不多，还是以模仿，改进为主。与国际先进的炭黑巨头相比有较大差距。特别是炭黑理论研究、应用研究、新技术研发及科技人才的引进与培养等方面还有较大差距，如果不解决和改善这些不足，会制约中国炭黑行业的未来发展。

**二、炭黑核心反应机理**

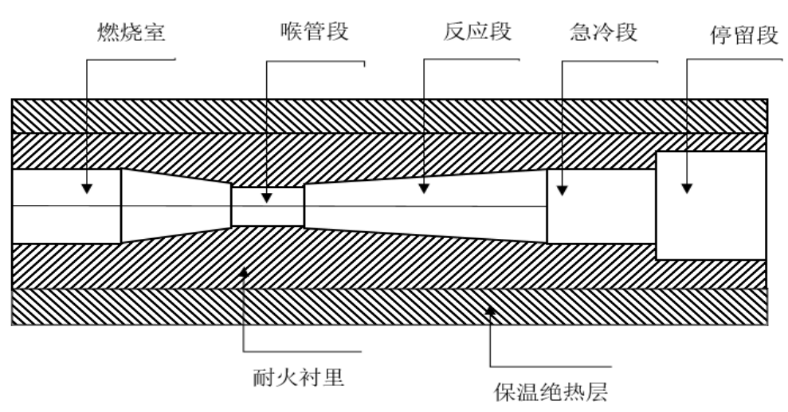
炭黑的生成过程是一个复杂的跨尺度的过程，包括含碳原料分子 从气相、液相到固相的生长和演化，其生成过程基本可分为原料的裂解、苯环的形成、多环芳烃的演变、颗粒成核、颗粒表面及颗粒间反应这几个阶段。这些过程受到原料组成、反应温度、停留时间、扩散方式等因素的影响。

与国际先进炭黑制造技术相比，炭黑反应机理研究和高性能炭黑反应器的设计是目前中国炭黑行业的短板，也是制约中国炭黑行业高质量发展的瓶颈。炭黑反应机理的研究重点在于揭示毫秒级时间内复杂化学反应过程和气液固多相流耦合机理。在过去的半个多世纪里，国际上对炭黑生成机理有了很多研究理论，特别是反应炉的燃烧过程和炭黑生成机制的研究都有了长足的进步，包括前驱体形成，炭黑颗粒成核与生长，结构演变等方面。随着计算机技术的进步，对炭黑的成核，生长和聚合动力学以及温度与压力的敏感性更加明确。可以通过模拟软件和光学方法探测反应器腔内的物理参数包括温度和化学组分，分析反应器内湍流场对反应物分布、温度均质化及颗粒团聚的影响，进而建立有效的炭黑反应炉的物理化学模型，对整个生产流程进行优化，达到提高产能、降低能耗，提高产率，减少污染，调控产品性能与质量的重要作用。



**图1 反应器内压力、流量和火焰分布图**

反应炉是炭黑生产过程的核心设备，自1970年炭黑反应炉被研发出来至今，主要包括5个不同功能的区段：燃烧段、喉管段、反应段、急冷段、停留段。预先加热处理后的空气与燃料通入到燃烧段，以此产生足够的热量来裂解原料烃从而产出炭黑。燃烧段是整个炭黑反应炉中温度最高的区域，一般温度高于1900 ℃，甚至超过 2000 ℃。喉管段作用是将预热过的原料雾化喷出到从燃烧段涌出的气流中，利用燃烧气流的极高温度和动能迅速分散、气化，同时原料烃开始裂解成核。炭黑反应炉中的燃烧室和喉管段是直接接触到高温气流且温度最高的部分，因此燃烧室反应温度的控制、耐高温喉管开发是核心反应系统设计的关键。另外，反应段继续完成生成炭黑的成核以及长大，该工艺段主要进行对粒径大小，尺寸分布的调控。急冷段喷出急冷水，快速使烟气温度快速下降，结束炭黑的生成反应。



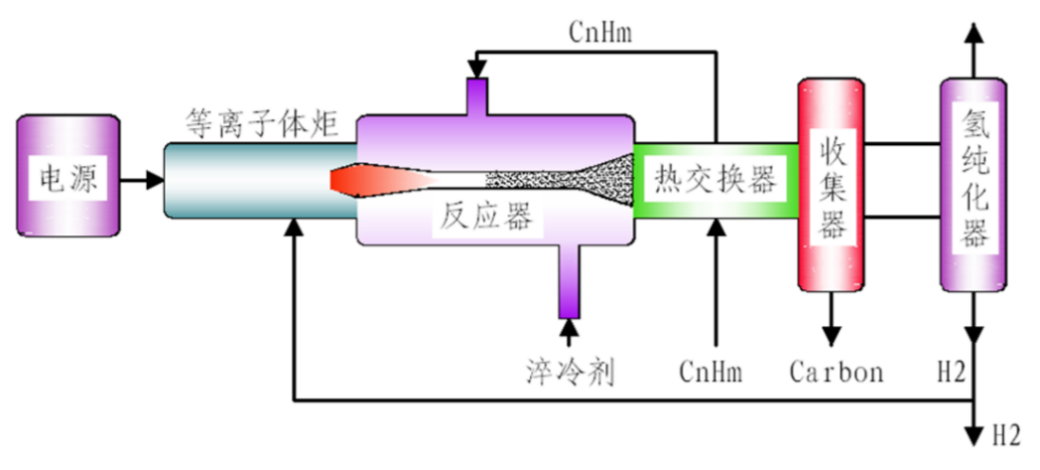
**图2 炭黑反应炉结构图**

目前，国内炭黑企业的炭黑生产线的设计（包括炉型设计）都是模仿改造吸收90年代中国引进的美国大陆炭的1.5万吨/年硬质炭黑生产线的全套技术。在炭黑生产线DCS控制系统中，只能提供燃烧室的理论燃烧温度，而国内通过计算机模拟炭黑反应过程及机理研究还是空白或者有些企业也刚刚开始。如果中国炭黑企业要在科技创新上有所作为，了解和掌握炭黑反应机理和核心反应器的设计是非常重要的。也是中国炭黑企业今后必须要做的事情。特别是目前炭黑原料油的多样化及价格波动，油耗的变化和质量稳定性等都迫切需要建立适合各种油源的炭黑反应炉；同时，AI技术的快速发展，也为炭黑反应机理研究和反应器的设计攻关提供了更为先进的工具，会大大缩短研发时间和投入的经费。

**三、新技术新工艺**

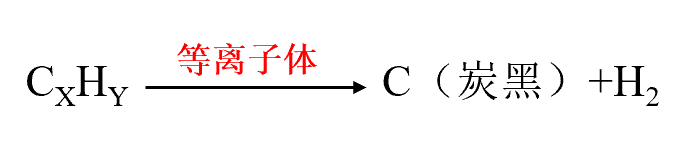
**3.1 用等离子体技术生产炭黑的研发**

等离子体法生产炭黑是通过高能电子、离子和中性粒子组成的电离气体提供的热量加热反应炉，使其达到极高的温度，使得原料烃（气态烃、液态烃或固态烃）裂解快速、连续生产炭黑的方法。等离子体法制备炭黑的主要步骤为：将含有丰富碳元素的天然气或煤焦油为原料，进行预处理以降低原材料灰分，将处理好的原料通入等离子体反应室，该内部设置有等离子体发生器，利用其产生等离子束去轰击天然气或煤焦油产生高温气体，气体与注入等离子反应器的炭黑原料充分混合，使碳氢化合物碳碳键与碳氢键发生断裂产生大量自由基和碳原子，进而聚集生成炭黑颗粒，在反应段末端喷入急冷水，终止炭黑生成反应，后经由袋滤器分离获得炭黑和尾气。



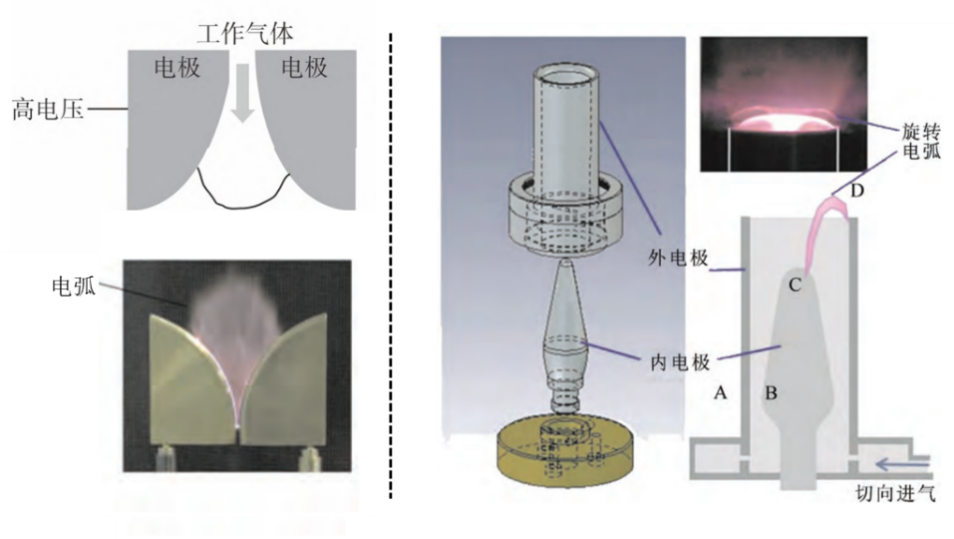
**图3 等离子体法生产炭黑基本原理**

等离子体技术为炭黑生产提供了高效、环保的新途径，通过精准调控反应条件和原料选择，可定制化生产高性能炭黑。该方法具有高温高焓的特点，因而加热效率高，且热效率优势随反应温度的升高而更加明显，同时它能突破炉法炭黑的反应温度限制，在新型碳材料的制备方面具有显著优势。等离子体还可以任意选择气体性质（氧化、还原、惰性），在不使用空气作为等离子气体的情况下，可提高炭黑产率，其核心反应为：



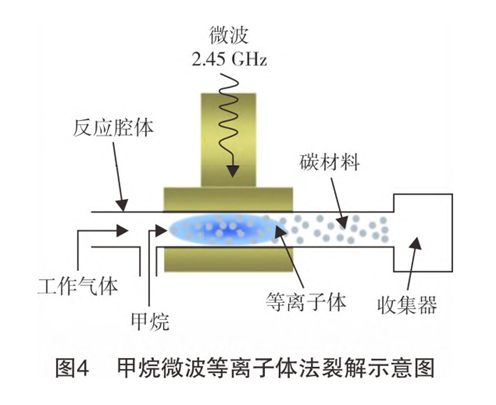
反应中碳转化率接近100%，副产品主要为氢气，无CO₂、NOx等污染物。因而等离子体法炭黑有望成为下一代炭黑节能、清洁生产技术。

等离子体反应腔的设计要以实现维持等离子体温度以裂解烃类原料，确保原料充分裂解，减少副产物（如CO、H₂）为目标。其中，等离子体发生器的设计尤为关键，主要类型有电弧等离子体发生器和微波等离子体发生器等[1-2]。气体电弧放电根据电极结构的不同可分为滑动电弧放电和旋转电弧放电。滑动电弧放电是电弧在气流或机械驱动下沿特定路径（如渐扩电极间隙）滑动，形成动态等离子体通道。该法存在与待反应气体接触不充分的缺点,从而导致反应效率低。旋转电弧放电是电弧在磁场或机械旋转驱动下沿圆周或螺旋路径高速运动，形成大体积等离子体区域。这种旋转式的滑动弧增大了反应区域和反应气体的停留时间，且由于电弧稳定快速旋转，所以等离子体活性粒子分布均匀，有利于提高反应效率。



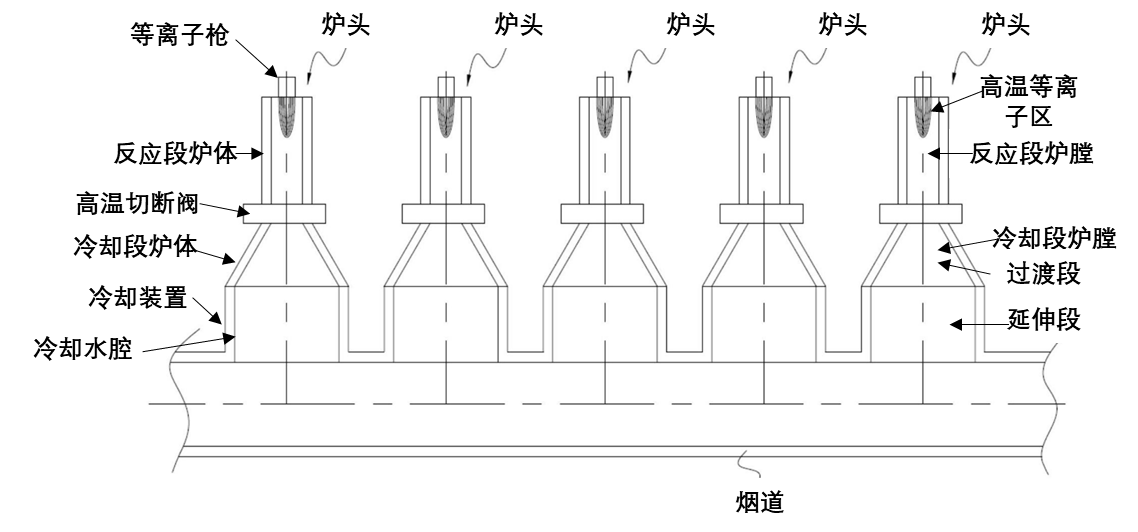
**图4 电弧放电示意图（左：滑动电弧放电；右：旋转电弧放电**）

微波等离子体产生于非接触式腔谐振器中，且不因等离子体与载热气体间的接触而引起载能电极的烧尽或介质污染。微波等离子体具有无电极、大面(体)积、低能耗、高效率和低成本等多种优点，比其他类型的等离子体具有更高的活性。微波等离子体的运行气压很宽,从低压到超过大气压，且装置的等离子体发生室和处理室可分可合,工艺灵活性较大。



**图5 微波等离子体法裂解示意图**

等离子体制备炭黑的炉头反应系统设计决定了反应的连续性和和生产效率[3]。单炉头反应系统由于等离子体枪在运行过程中，电极会产生大量的热量，高温等离子区温度高达到1800℃～2000℃，需要频繁停机更换等离子体抢。更换过程中，整个反应系统进行置换，会耗费大量的惰性气体。且下次开炉时，必须进行重新升温，从而产生严重的热量损耗。多炉头等离子法制备炭黑的反应系统，包括至少两个炉头，炉头连接同一条烟道。炉头包括炉体、等离子枪和高温切断阀。炉体包括反应段炉体和冷却段炉体，反应段炉体与冷却段炉体连接。反应段炉体具有反应段炉膛，冷却段炉体具有冷却段炉膛。高温切断阀设置于反应段炉体和冷却段炉体之间，用以控制反应段炉膛与冷却段炉膛的连通状态。冷却段炉体远离反应段炉体的一端与烟道连接，冷却段炉膛与烟道连通。等离子枪可拆卸地安装于反应段炉体，应段炉体设置有与反应段炉膛连通的原料气体入口和置换气体入口。该反应系统保证了生产的连续性，提高生产效率，且大大降低惰性气体的用量。



**图6 等离子体炭黑多炉头反应系统**

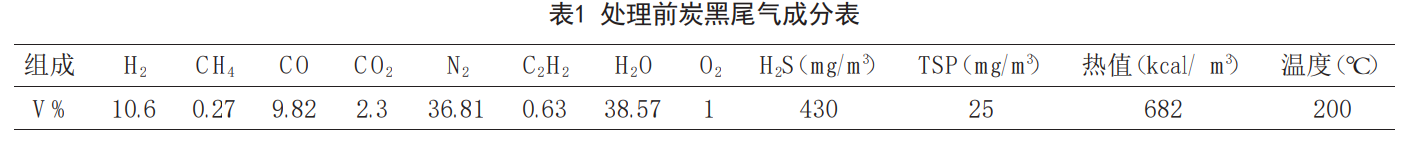
在实际应用方面，等离子体法炭黑生产技术具有广阔的前景[4]。利用等离子体法制备出的炭黑产品具有高的比表面积及孔隙结构，能够提高电极对电子的捕获能力，可以作为储能材料在电池中应用，提高电池的能量密度和充放电效率。等离子体技术生产的炭黑可达到极低的灰分含量，这种高纯度炭黑满足精密电子需求，可用于电子封装材料、电磁屏蔽涂层及半导体器件。利用等离子体炭黑补强橡胶材料，可以制备出高性能的新型轮胎，减少能耗和碳排放。在环保领域，等离子体热解烃类时副产高纯度氢气，可直接用于燃料电池或化工合成，实现“炭黑-氢气”联产，有利于有机废弃物资源化利用。除此之外，也可用于催化剂载体、涂料油墨和新能源储存等高端领域。

**3.2 研制炭黑尾气高值化利用新技术**

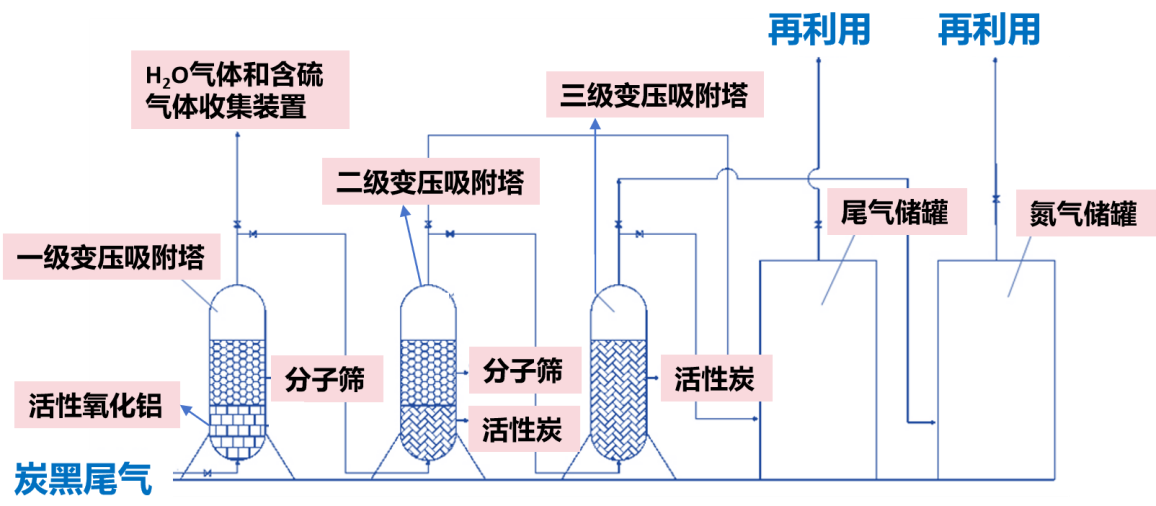
炭黑尾气主要成分为如表1所示[5]。目前，炭黑企业对尾气不进行深入处理，有部分进行水洗处理。尾气中30%供尾气燃烧炉燃烧来提供炭黑干燥所需的能量；70%供低热值尾气锅炉进行燃烧产生蒸汽，供汽轮机进行发电，同时，一部分蒸汽供生产和民用使用，以上尾气利用的缺陷是：尾气热值低造成尾气燃烧炉和尾气锅炉热效率低，一次投资大，经济效益不高；由于尾气含有H2S，要经过脱硫处理，脱硫装置维护和运营成本高。

目前，炭黑企业的生产用燃烧都以煤气、天然气为主，价格会不断提升，影响了炭黑企业经济效益，而自产的尾气又低附加值使用，因此，如何提高炭黑尾气热值，高值化利用，也是炭黑行业科技进步和提升经济效益的重要课题。

**表1 处理前炭黑尾气成分表**

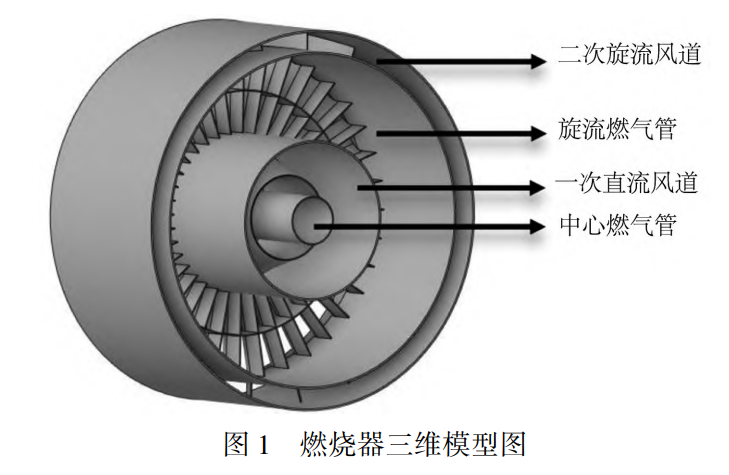


黑猫公司开发了一种炭黑尾气高值化利用的工艺装置，如图7所示。炭黑尾气进尾气燃烧炉和尾气锅炉前先进喷淋塔进行喷淋，洗涤尾气中的H2O气体和部分H2S，并收集废液及中和处理；洗涤后的尾气进变压吸附装置进行干燥，把尾气中的未完全干燥的水分吸附掉；干燥后的尾气进入变温吸附装置,把尾气中的H2S、SO2杂质脱除；把杂质脱除后的尾气进入非低温变压吸附装置，吸附分离出尾气中的氮气，储存在氮气储罐中，供各种应用；处理后的炭黑尾气进入尾气总管，供各种燃烧使用。这种工艺的优点是：尾气热值成倍提高，提高尾气燃烧的热效率（炭黑尾气热值从没处理前的600-800 kcal/ m3提高到3000-3500 kcal/ m3），使尾气能够作炭黑反应的燃料气体，提高企业效益；减少了尾气燃烧炉和尾气锅炉的内部容积和相关配套设施，降低一次投资；脱除了尾气中的H2S、SO2等杂质，减少企业脱硫脱硝建设和运营费用；产生的氮气可供给炭黑企业在特碳处理、油罐区氮封等其他用途，为炭黑企业创造效益增长点。



**图7 炭黑尾气脱硫脱硝一体化工艺流程**

为了解决炭黑尾气中NOX排放高的问题，广大学者积极探索采用先进技术处理尾气。低氮燃烧技术通过空气分级燃烧技术、烟气再循环技术来降低锅炉内过量空气系数和氧气浓度，控制燃烧区域温度分布防止局部高温区形成，从而抑制锅炉燃烧过程中NOx的形成，提高炭黑尾气的利用效率，提升燃烧稳定性，以实现资源循环利用与环境保护的双重目标。清华大学山西清洁能源研究院采用空气/燃料分级技术以及烟气再循环技术，如图8所示[6]。该燃烧器共有两股助燃空气进行配风，一次风从一次直流通道送入；二次风流过旋流叶片进入。旋流叶片产生的径向导引作用使流经的空气形成旋流风,强化了燃气与空气的混合,并形成回流区以达到稳定火焰的作用。旋流叶片角度和烟气再循环比,可以有效地控制炉膛内的温度和NOX分布。这种设计可以让燃气均匀喷出并与助燃风进行混合燃烧,避免了局部高温区的产生。

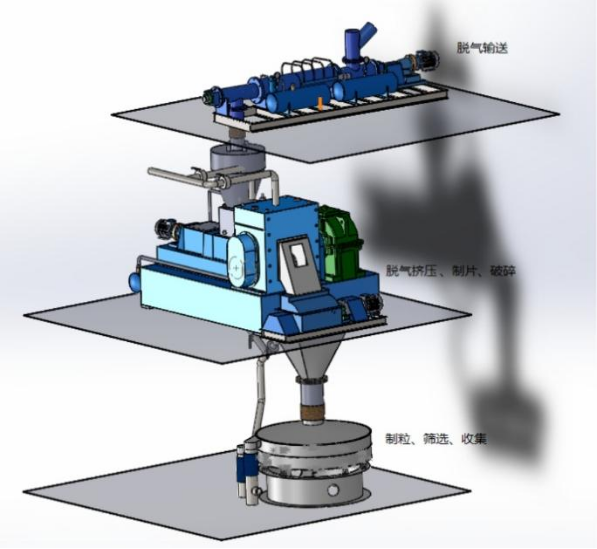


**图8 燃烧器三维模型**

**3.3研制新型炭黑干法造粒技术**

目前普通橡胶和轮胎用炭黑生产线都采用湿法造粒和尾气干燥

系统。设备造价高，运行和维护成本高，同时消耗大量的尾气，水和粘结剂。在一些废轮胎热裂解企业中，采用干法挤压造粒系统，这种造粒系统产生的炭黑粒子硬度和强度难调节，粒子均匀性差，表面不光滑等。由于废轮胎热裂解产生的回收炭黑价格低，轮胎、橡胶企业的应用场景对回收炭黑的要求不高，因此这种造粒系统产生的炭黑粒子能满足要求。而橡胶轮胎企业已经习惯于使用湿法造粒的炭黑，包括炭黑的颗粒硬度、细粉含量，磨损量，粒径大小等都有要求。但从今后的发展来看，干法挤压造粒技术，依然有较大优势，包括资金投入少，占地面积小，连续生产及大幅降低造粒成本等方面。



**图9 干法挤压造粒示意图**

新型炭黑干法造粒技术近年来取得了一些进展。机械压缩造粒技术的改进：通过改进辊压机的结构设计和材料，提高了设备的耐磨性和压缩力，从而提高了造粒的效率和颗粒的强度。调整辊压机的压力分布，使得压力更加均匀，减少了颗粒的破碎率，提高了颗粒的均匀性和一致性。

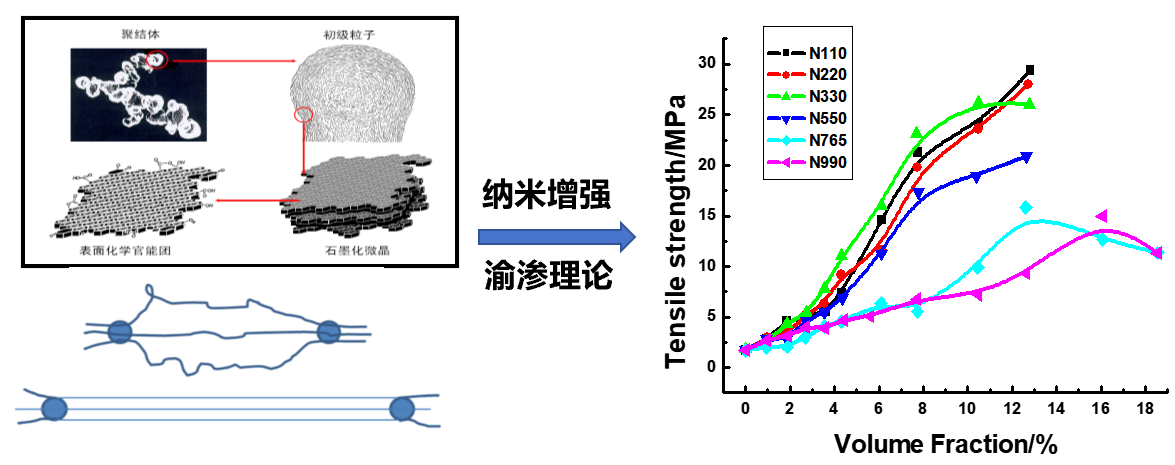
流化床造粒技术的发展：通过改进流化床的结构设计（如分布板的设计、床层高度的控制），提高了流化效果，减少了颗粒的粘结和结块现象。采用更高效、更节能的热源（如微波加热、红外加热），可以提高干燥效率，降低能耗。挤出造粒技术的进步：通过改进螺杆的设计（如螺纹形状、螺距、螺杆长度），提高了物料的混合和压缩效果，减少了颗粒的缺陷。通过优化模具的孔径、孔型和排列方式，提高了颗粒的成型质量和生产效率。通过精确控制挤出温度，防止物料过热或过冷，确保颗粒的质量和一致性。也逐渐开发出诸多其他新型干法造粒技术如：静电造粒技术、磁性造粒技术、声波造粒技术，但目前仍处于研究阶段。

总之，新型炭黑干法造粒技术的发展趋势是向着更高效、更节能、更环保、更智能的方向发展。炭黑企业需要与制造厂家密切合作，共同解决以下技术难题：粒子硬度的可调整，满足轮胎企业需要；造粒产能提升，满足炭黑企业需要；干法产品与湿法产品在化学、物理性能的一致性等。此干法造粒系统将为炭黑行业科技进步，绿色发展做出贡献。

1. **炭黑应用理论**
   1. **炭黑在橡胶中补强机理研究**

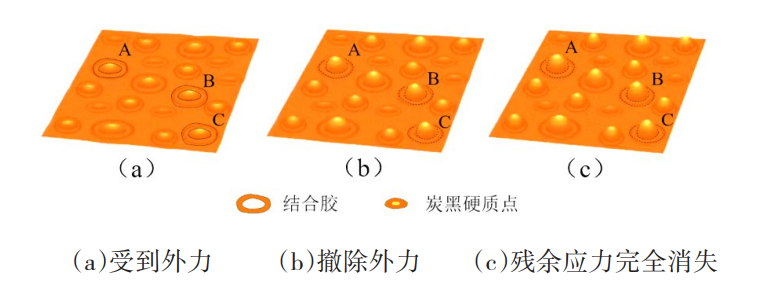
作为橡胶的重要补强剂和填充剂，全球超过92%的炭黑用于橡胶制造，特别是轮胎生产。在橡胶中加入炭黑能够显著增强硫化橡胶的撕裂强度、拉伸强度、定伸应力和耐磨性，延长橡胶制品的使用寿命。炭黑补强橡胶是物理结合与化学结合协同作用的结果，通俗地说补强与炭黑的三要素（粒径、结构及活性）紧密相关，即炭黑颗粒越细，结构及活性越高，补强效果越好。目前，关于炭黑对橡胶的补强机理，已有多种补强理论解释了橡胶和炭黑的相互作用机制。例如，基于炭黑聚集体的流体力学作用的Goth-GoId公式；基于被吸藏在复杂形状炭黑聚集体内的“吸留橡胶”作用；基于炭黑表面活性和聚集体形态学特性的“结合胶”行为；基于炭黑含氢量及表面能的表面化学特性；基于聚集体间距离的“填料网络”理论；基于橡胶分子链可在炭黑粒子表面滑移的分子链滑动理论等。

此外，张立群院士团队认为在橡胶的纳米增强中存在着类似于橡胶增韧塑料的逾渗现象，基于此，他们提出了一种与逾渗现象有关的纳米增强理论[7-8]。该理论认为随着填充细粒子（炭黑）的体积分数逐渐增加，在一定的加工和分散条件下，填料的平均粒子间距也相应地不断减少，当达到一个临界的粒子间距时，交联的橡胶分子链能同时吸附到相邻的两个或两个以上的填料粒子表面（即所谓的桥链），而这些桥链分子链在拉伸的过程中会发生滑移和取向形成平行的伸直链结构，从而会出现强度的突然增大。即橡胶的拉伸强度随着纳米增强剂（炭黑）用量的增加先缓慢增加，进而迅速上升，而后达到平衡。



**图10 橡胶增强中的渝渗现象**

四川轻化工大学材料科学与工程学院陈建教授领衔的科研团队基于橡胶结合胶理论和磨粒磨损机理，提出一种新颖的炭黑补强解释-凹凸理论[9]。该理论的要点认为炭黑补强轮胎耐磨性归因于大量凸出在橡胶基体上的炭黑聚集体颗粒提供的表面硬质点，这些硬质点与地面接触，从而保护了基体橡胶不因高速摩擦而磨损。炭黑原生颗粒和橡胶基体的固定可通过一层结合胶实现。结合胶在受外力产生摩擦时能够提供弹性，能够将部分炭黑颗粒埋藏起来，而另一部分炭黑颗粒则仍然凸出于基体表面抵制耐磨，外力撤除后，其又恢复正常。



**图11 凹凸补强机理**

尽管目前已有多种炭黑补强橡胶的机理，然而，尚未有一种公认且较为完善的理论来充分解释炭黑特有的补强机理，因此，以炭黑为研究对象深入研究炭黑补强橡胶机理，提出新的补强理论，对指导炭黑工业生产及导向仍然具有重要的现实意义。

**4.2 炭黑在非橡胶中的应用研究**

炭黑具有黑度和着色力强的优点，是一种优异的着色剂，是涂料工业不可缺少的黑色颜料。常用于建筑、汽车、铁路车辆和船舶用涂料中。炭黑的原生粒子的粒径、聚集体结构以及比表面积对其着色性能有重要影响。炭黑的黑度即炭黑吸收光的程度约高，光反射愈弱，炭黑及其着色后物质的黑度愈高，它是涂料用炭黑的主要黑色度指标。由于光吸收作用在炭黑粒子内部产生，当炭黑在涂料中的浓度一定时，炭黑粒径越小，对光吸收也越强，黑度越高。同时，炭黑的聚集体会产生光散射作用，当炭黑结构高时，聚集体的光散射增强，从而也会降低光吸收的程度。除粒径外炭黑的结构也会对色调产生影响，结构性较高的炭黑和粒径较粗的炭黑会产生相似的影响。炭黑粒径、结构和油墨性能的关系如表2所示[10]。

**表2 炭黑粒径、结构和油墨性能的关系**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **油墨性能** | **粒径较小** | **结构较低** | **油墨性能** | **粒径较小** | **结构较低** |
| 黑度 | 较黑 | - | 分散性 | 较难 | 较难 |
| 着色力 | 较强 | 较强 | 流动性 | 较差 | 较好 |
| 底色 | 偏棕 | 偏蓝 | 光泽 | - | 较好 |
| 吸油量/粘度 | 较高 | 较低 | 湿润性 | 较慢 | 较快 |

色素炭黑是制造黑色油墨的主要原料，按油墨牵丝的长度通常分为短丝和长丝两大类，前者用于报纸印刷，它能使油墨具有较大的流动性和快干性；后者用作平板印刷油墨，用来印刷书籍、刊物，具有色泽鲜明字迹清晰等特点。高级色素炭黑用在合成树脂漆中可作为轿车的面漆及自行车仪表等的装饰漆。色素炭黑用于塑料加工领域时，不但起到着色的作用，同时可以改善塑料的机械性能，延长塑料在光热和气候老化作用下的使用寿命。国际上，根据炭黑的着色能力，色素炭黑通常分为三类即高色素炭黑、中色素炭黑和低色素炭黑。各类色素炭黑主要根据粒径和黑度进行分类，如表3所示。

**表3 色素炭黑的分类**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **分类** | **代号** | **生产方式** | **黑度值\*** | **粒径/nm** | **比表面积/m2/g** |
| 高色素炭黑 | HCC | 滚筒法、混气法 | ≤70 | 9 17 | 660 240 |
| HCF | 炉法 |
| 中色素炭黑 | MCC | 滚筒法、混气法 | 70 80 | 18 25 | 230 115 |
| MCF | 炉法 |
| 普通色素炭黑 | RCC | 滚筒法、混气法 | 80 90 | 26 37 | 150 50 |
| RCF | 炉法 |
| 低色素炭黑 | LCC | 滚筒法、混气法 | ≥90 | 38 75 | 60 30 |
| LCF | 炉法 |

\*国外对色素炭黑的黑度采用黑度计指数

目前，商业炭黑颗粒表面极性和非极性官能团含量较低，因此，与水、有机溶剂等分散剂亲合力较小，二者依靠物理作用结合，作用力比较弱，容易发生“解吸”，随着炭黑溶液静置时间延长，分散剂和炭黑之间的结合力逐渐减弱，导致炭黑溶液在存放的过程中出现固液分离现象。对炭黑进行后处理改性可以改变其表面极性，进而增强体系相容性；可以提高炭黑润湿分散性能和分散稳定，减少团聚；可以降低色浆粘度，提高炭黑载量；可以获得具有高黑度和高光泽外观的炭黑。通过表面氧化处理，可以使炭黑表面官能团的种类和数量加以改变，挥发份和含氧量增大，pH值降低，表面的活性和极性增加，分散性明显提高。

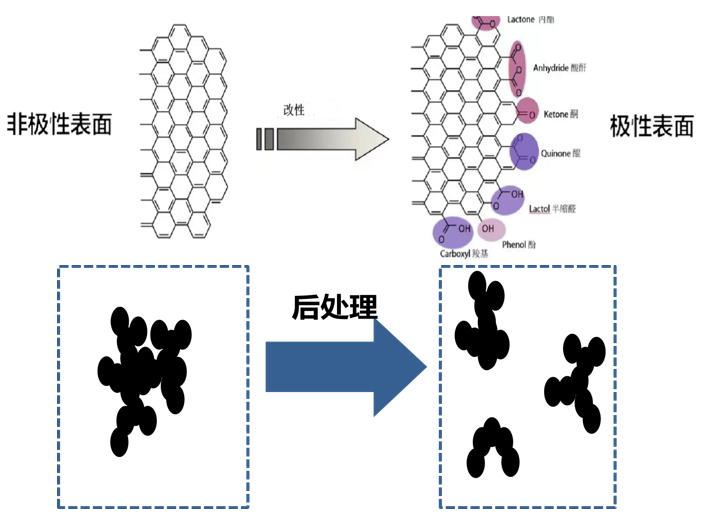


图12 水性炭黑分散机理

导电炭黑是一种典型的特种炭黑，具有良好的导电性能和较高的性价比，广泛应用于导电和防静电制品中。炭黑填充型导电高分子材料，包括功能高分子材料、新型涂料、辐射交联材料和新型橡胶塑料制品等，已广泛应用于矿用管材、电缆屏蔽、航天航空、电子电器、石油化工以及交通车辆等诸多领域。

导电炭黑填充高分子材料性能是炭黑结构及其与基体之间界面相互作用共同决定的。炭黑的结构度越高，在聚合物填充过程中越容易形成完善的三维导电网络，达到相同导电率时所需要的添加量越少。炭黑表面的杂原子基团，如含氧官能团等，也会显著影响炭黑的导电性。通常情况下，经过高温处理后，炭黑导电率会有所提高，原因之一是由于高温破坏了导电炭黑的共轭体系，电子移动受阻。另外，高比表面积炭黑粒径小且孔隙度高度，炭黑内部大量的微孔，有利于增强量子隧道效应；同时高比表面积降低了炭黑之间的接触电阻，从而提高炭黑的导电性。炭黑初级粒子内的类石墨微晶与石墨片层具有相似的结构，类石墨微晶的尺寸越大，可以自由移动的电子越多，有利于提高炭黑的导电性。因此,提高炭黑的石墨化程度也有利于增加炭黑的导电性。

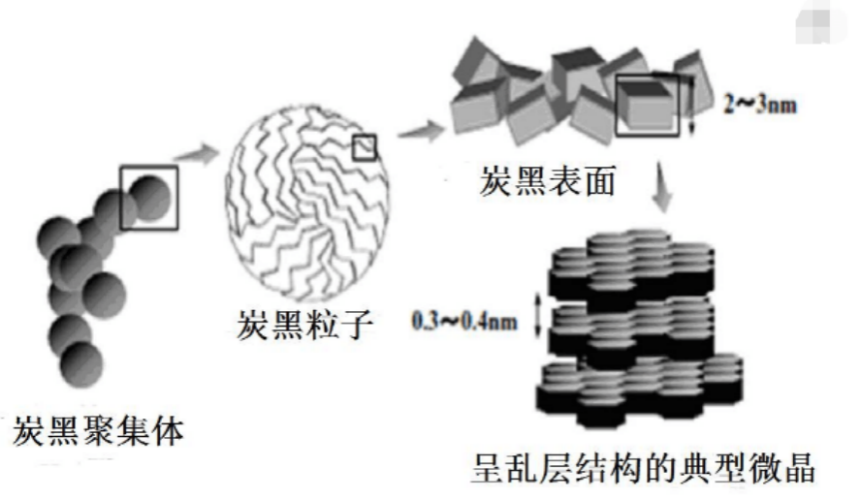


图13 导电炭黑微观结构

导电炭黑在能源领域，如（动力）锂离子电池、铅酸电池和超级电容器中也越来越受到青睐，导电炭黑作为新能源电池正负极体系中的关键导电剂，明确其导电机理进而提高导电性能具有重要意义。目前导电机理较普遍的解释主要有两种，分别为接触传导和隧道效应传导，接触传导是指导电炭黑颗粒通过物理接触形成连续的三维导电网络，电子可直接通过颗粒间接触点跃迁传导。隧道效应传导是指当炭黑颗粒间距很小（纳米级）时，电子可通过量子隧道效应穿越活性物质或粘结剂等非导电介质来实现传导，炭黑在基体中分散越均匀，导电性越好。

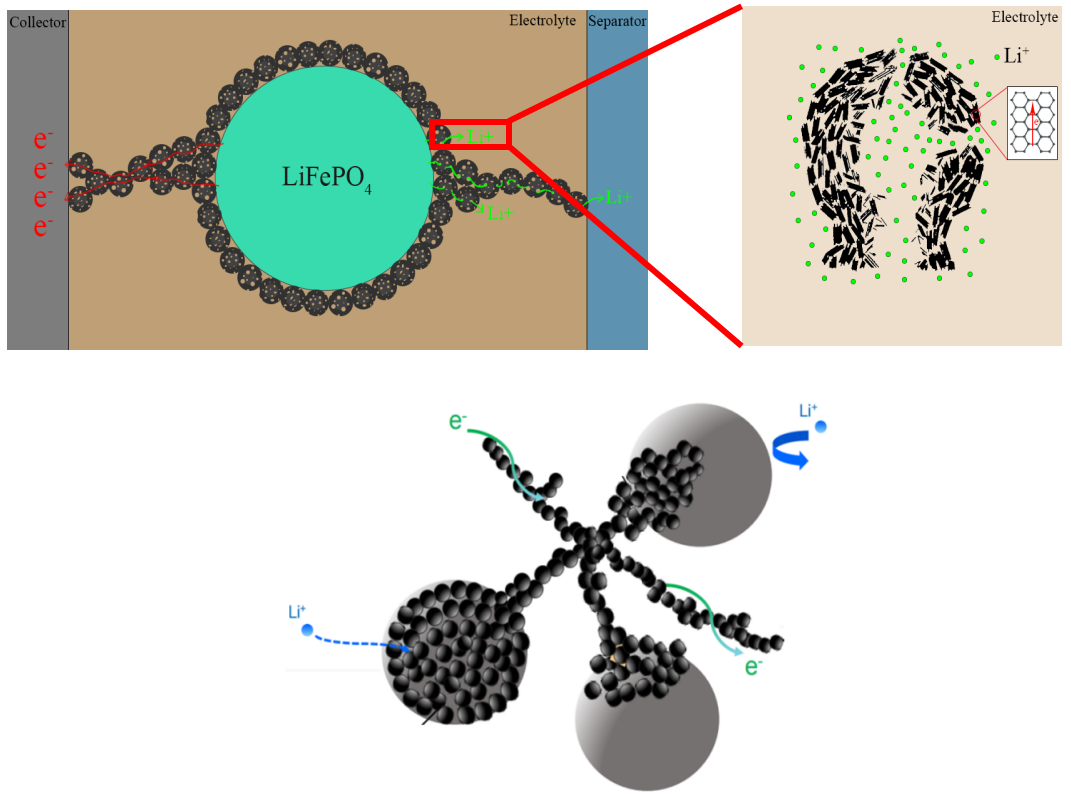


图14 炭黑在电极中导电机理

为了进一步提升炭黑填充导电材料的性能，需从炭黑结构、复合体系及工艺参数多维度协同调控。例如，通过纳米技术、表面改性技术等手段，提高导电炭黑的导电性能和稳定性；通过复合技术、掺杂技术等手段，拓展导电炭黑在新能源、电子信息等领域的应用范围；探索生物质原料（如竹炭、椰壳炭）制备高性能导电炭黑的路径，降低生产成本和环境负荷。

**五、总结**

中国炭黑行业的高质量绿色发展离不开人才的培养和使用。虽然中国炭黑企业近30年发展较快，但人才的引进方面以及内部人才的培养梯队建设方面还远远滞后。特别是在科研人才数量上面临人才短缺的局面。

中国炭黑企业基本都建设在靠近煤焦化资源近的地方，环境较差，人才不愿意来，同时，炭黑行业多年来利润不高，员工收入不高，也制约了人才的引进和培养工作。

目前，随着全球AI技术的迅猛发展，各个行业都在学习、使用AI技术来提升企业的管理效率,降低运营成本。特别是在新技术、新产品的研发上AI技术会大大提高研发效率，缩短研发周期。炭黑行业在AI人才和学习、利用AI方面应加快推进，也是赶超炭黑世界先进水平的机遇。

中国炭黑行业应跟上时代发展的步伐，加大新技术、新产品产学研合作力度，加快各类人才的培养、引进工作。使中国炭黑行业从炭黑大国向炭黑强国转变，推动炭黑行业绿色高质量发展。

**二零二五年六月**

**参考文献**

[1]张浩，朱凤森，李晓东等. 滑动弧放电等离子体重整甲烷关键技术分析[J]. 高电压技术, 2015,9(41), 2930-2942.

[2]张赵西，王丹，丁桐等. 甲烷等离子体法制氢气和碳材料研究进展[J]. 石油与天然气化工, 2023,52(1), 40-53.

[3]刘寒津，王家贵，赵宽明等. 一种多炉头等离子法制备炭黑的反应系统[P]. 中国：CN108997794B，2024-3-22.

[4]顾乾柳, 郑祖东, 袁志辉等. 炭黑的制备方法研究进展[J]. 当代化工研究, 2024,14, 27-30.

[5]许永献. 炭黑尾气的综合利用[J]. 企业技术开发, 2014,33(24), 50-51.

[6]冯娜娜, 王志宁, 窦祖旺等. 炭黑尾气锅炉低ＮＯｘ燃烧技术探究[J]. 工业锅炉, 2025, 01, 15-20.

[7]Zhenhua Wang, Jun Liu, Sizhu Wu etd.Novel percolation phenomena and mechanism of strengthening elastomers by nanoﬁllers[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2010, 12, 3014–3030

[8]张立群，王振华，吴友平等. 橡胶纳米增强中的逾渗行为及其机理[J]. 合成橡胶工业, 2008,31(4), 245-250.

[9]陈建, 刘平, 刘莎等. 凹凸于橡胶表面的炭黑颗粒对轮胎耐磨性的作用[J]. 四川轻化工大学学报（自然科学版）, 2021,34(4), 11-17.

[10]周洁. 热解炭黑的表面特性及其资源化应用研究[D]. 浙江：浙江大学，2006.