

燃料电池在特殊工程车辆领域的应用进展

作者：许壮 何广利

燃料电池

是一种清洁高效的能源

利用技术，在特殊工程车辆领域推广应用，有

利于实现大气污染物SO₂、NO_x、PM零排放，促进温室气体CO₂

减排。综述了燃料电池为动力的矿山车、卡轨车、掉头机车和货运卡车的应用进展，分析了燃料电池工程车辆替代内燃机车的技术可行性以及由此带来的环保效益，认为燃料电池工程车辆已经具备了规模化应用的条件。

我国社会经济的快速发展消耗了大量化石能源，带来雾霾和温室气体排放等环境问题。发展清洁低碳和安全高效的现代能源技术，支撑我国能源结构优化调整，对于促进绿色可持续发展具有重要意义。

燃料电池是一种清洁高效的发电装置，它通过电化学反应将燃料的化学能直接转化为电能，同时生成水和一部分热能，基本不排放SO₂、NO_x和PM等大气污染物，且CO₂

排放量大幅下降；由于不受卡诺循环限制，燃料电池的发电效率高，能源利用效率大幅提升。近年来，随着制造成本不断降低、使用寿命逐渐提高，燃料电池在交通、固定电站和便携电源等领域的应用越来越受到关注；尤其是在电动汽车领域，世界各国已投入大量资金进行燃料电池汽车的开发和示范应用。

然而，受制于造价较高和加氢设施不足等因素的影响，燃料电池汽车的推广使用进程进展缓慢，尚无法与内燃机汽车展开竞争。在这一市场背景下，燃料电池在成本敏感度相对较低且易于建设加氢设施的特殊工程车辆领域的应用受到重视，并有望率先进入实用化。迄今为止，燃料电池在矿山车、掉头机车、货运卡车和有轨电车等种类的工程车辆上已实现了示范应用，对大气污染物的减排效果显著，并表现出了一定的技术可靠性和经济性，具有较好的市场化前景。

1 燃料电池的技术特点

燃料电池的发电过程是与

热机过程截然不同的电化学反应过程（图1）。燃料氢气

（H₂）进入阳极发生氧化反应生成电子（e⁻）和氢离子（H⁺

），

电子经过

外电路形成电流，

与此同时，氢离子穿过质子交换膜电

解质传导至阴极，与鼓入空气中的氧气（O₂）以及回路电子发生反应生成水（H₂O）。

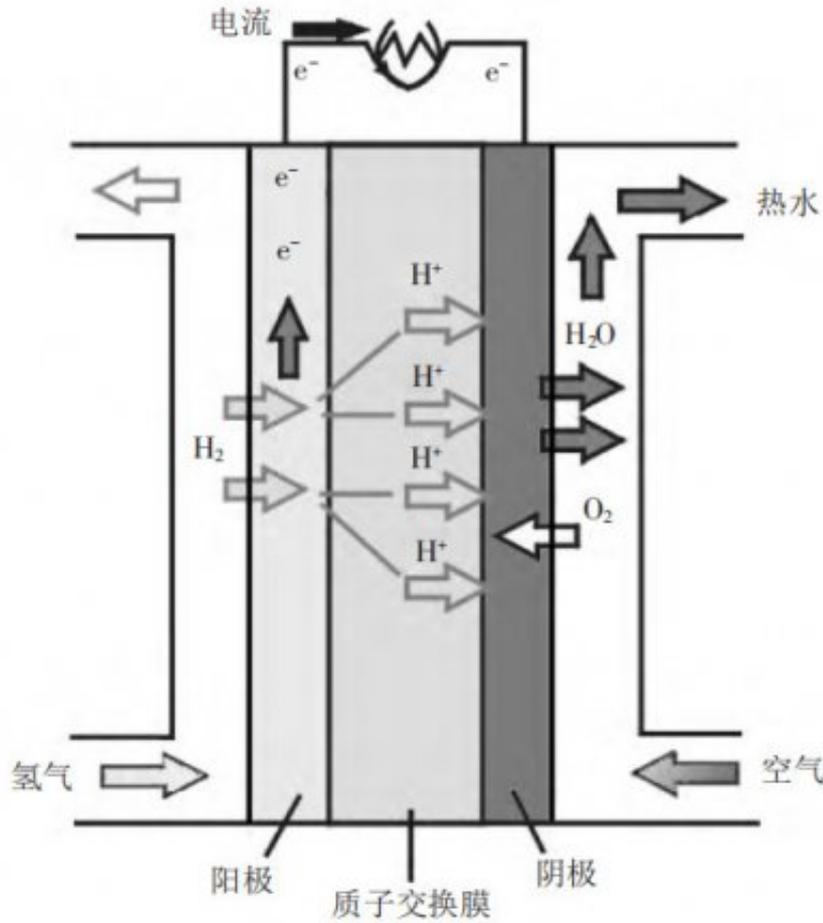
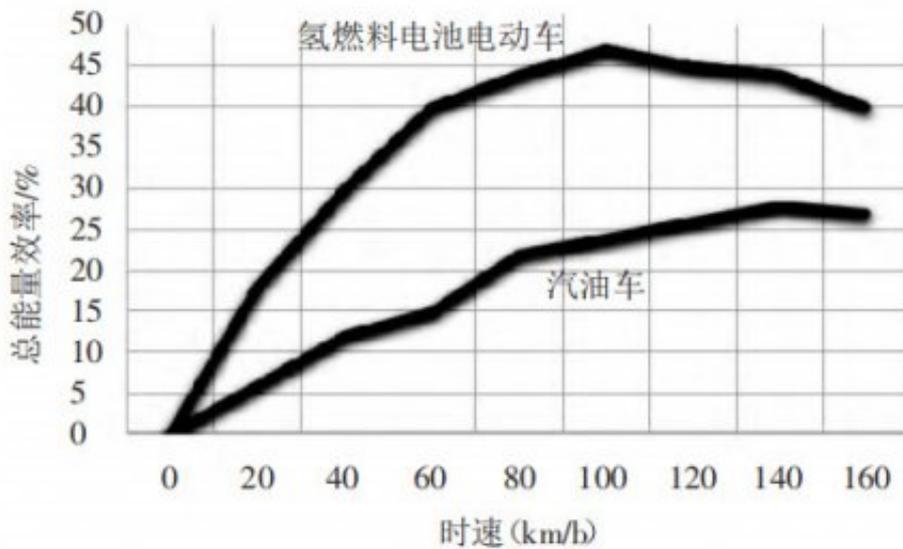
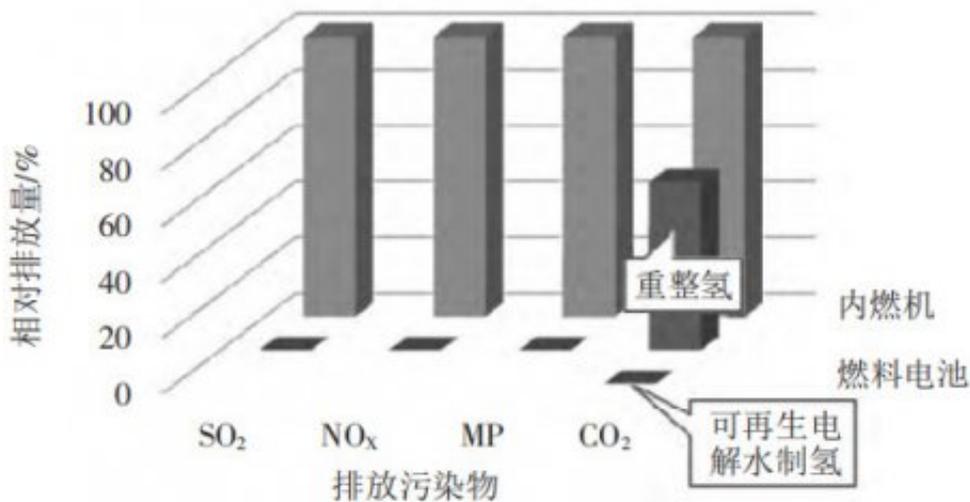


图1 氢燃料电池原理和结构示意图

燃料电池与内燃机相比，能量转化效率显著提高，尤其在中低负荷运行条件下，燃料电池的能量效率接近50%（图2a），这有利于提高燃料利用率，节省燃料成本。与此同时，燃料电池实现了SO₂、NO_x和PM的零排放，当采用天然气重整氢气做燃料时，CO₂排放量削减约40%，当采用可再生能源电解水制得氢气为燃料时，可实现CO₂零排放（图2b）。



(a) 燃料电池汽车与汽油车在不同运行时速下的总能量效率对比^[1]



(b) 燃料电池与内燃机的污染物排放量对比^[1]

图 2 氢燃料电池车与内燃机车的对比

燃料电池不仅具有清洁低碳和高效节能的技术优点，还具有功率密度高和能量密度高的实用性特征。由于燃料电池系统采用薄膜组件和模块化设计，功率密度可以与汽油或柴油发动机接近，达到650W/L或650W/kg，因而有潜力在多种应用领域替代内燃机。此外，燃料电池还具有启动速度快、低噪声、无振动等优点，使用便捷性和舒适性也更好。

2 燃料电池在特殊车辆领域的应用

2.1 矿山车

矿山车是金属、非金属、煤矿等普遍使用的一种用于短距离物料运输和装卸的工程车，一般以柴油机为动力。矿山车在地下矿井或地面较封闭环境条件下作业时，柴油机连续产生的余热和大气污染物极易导致作业位置温度升高、空

气质量下降，威胁到生产安全和人员健康，因此必须配套相应的通风设施促进作业位置热量和空气置换。对于大多数地下矿井，通风系统耗电量大，往往占矿井总用电量的大部分。

燃料电池矿山车能量转换效率高，同等输出功率条件下，理论产热量仅为柴油机矿山车的40%~50%，并且不排放大气污染物。因此，采用燃料电池矿山车替代柴油机矿山车进行井下作业，可以大幅减少所需的矿井通风量，有利于节省通风系统电耗，降低矿井运行成本。2003年，美国Vehicle Projects公司联合内华达州立大学对美国和加拿大近100个金属、非金属矿进行考察，并通过模拟计算分析了几个典型的金矿、银矿、钼矿、盐矿和石灰石矿，发现采用燃料电池矿山车替代柴油机车作业时，地下矿井所需的通风量普遍可削减10%~30%，相应的电耗下降10%以上。以美国内华达州Turquoise Ridge金矿为例，其井下作业的柴油机矿山车总功率约6800kW，若替换为燃料电池矿山车，所需井下通风量由526.5m³/s降低至230m³/s，通风排气管径由6.1m缩小至4.2m，通风系统年用电成本下降约150万美元，通风设施建设投资也减少了约350万美。

2005年，Vehicle Projects公司开发了一台燃料电池装载机，在美国内华达州Turquoise Ridge金矿和加拿大LaRonde金矿的地下矿井进行了总计1000小时的示范运行。该装载机采用Caterpillar R1300型装载机的架构，通过87kW燃料电池和65kW镍氢储能电池组成混合动力系统（图3），瞬时最大输出功率超过140kW，综合动力性能与柴油机矿山车接近。由于井下作业时需严格限制氢气泄漏以保证生产安全，该燃料电池装载机选用了可拆卸的氢化物储氢系统，安装在动力系统两侧，其储氢压力低，储氢总量14kg，可满足至少6h不间断作业（柴油装载机约8h），在装载机工作间歇时，储氢系统可送至矿井外再次加氢。



图3 燃料电池矿山装载机及其动力系统示意图

2012年，Vehicle Projects公司与南非Anglo American Platinum公司合作，设计开发了一款超小型远程控制燃料电池推土机，用于替代常规的蓄电池推土机，在Bathopele铂金矿进行示范应用。安装9kW电堆和2MPa氢化物储氢罐，该燃料电池推土机可连续运行8h，续航能力超过蓄电池推土机（约6h）。使用过程中，燃料电池推土机单次加氢时间约40min，比蓄电池推土机（充电时间大于8h）更加快捷。

2.2卡轨车

卡轨车是煤矿重要的辅助运输设备，依据动力种类，主要包括钢丝绳牵引卡轨车、防爆柴油机卡轨车和蓄电池卡轨车三大类。目前广泛使用的钢丝绳牵引卡轨车需要布置复杂的绳索系统，操作灵活性较差，对钢丝绳的安全性要求较高。相比之下，防爆柴油机卡轨车能够更加灵活的操作和运行，但产生大量的大气污染物和噪声，影响作业环境和人员健康。对于蓄电池卡轨车，其安全性和环保性较好，但受限于能量密度低，一般只能短距离、短时间使用，且充电时间长，无法大规模使用。燃料电池卡轨车无需牵引钢丝绳，不排放任何污染尾气，且能量效率高、噪声小、加氢时间短，因而更加灵活、经济、环保，具有很好的应用潜力。

2012年，Anglo American Platinum公司与Vehicle Projects公司合作开发了5辆燃料电池卡轨车，在南非Dishaba铂金矿的地面和井下示范运行。该卡轨车动力系统采用Ballard公司生产的FCvelo City-9SSLV4型燃料电池电堆，额定输出功率17kW，配套锂离子储能电池组成混合动力，瞬时输出功率最高可达45kW。该卡轨车储氢系统采用氢化物介质，储氢量3.5kg，理论储能50kWh。卡轨车加氢时，采用水冷或空冷将储氢介质维持在室温，管网提供的2MPa氢气进入储氢介质形成氢化物，耗时约20~30min；储氢系统加氢完成后，利用燃料电池的循环热水将储氢介质加热至60~70℃，此时氢化物分解放出压力为1~1.5MPa的氢气，供燃料电池使用。卡轨车整个加氢-

使用过程中，氢气的压力不超过2MPa，安全性好。

由于燃料电池功率密度高，卡轨车的燃料电池-锂离子电池混合动力系统总体积仅为0.5m³，外加储氢系统体积0.3m³，可以紧凑集成在1m³空间内，无需改变卡轨车原有构架（图4）。示范运行表明，与蓄电池卡轨车相比，燃料电池卡轨车具有相似的动力性能，完全可以满足使用需要，并且续航能力显著增加；相比于同等功率的柴油机卡轨车（能量效率约30%），燃料电池卡轨车能量利用效率显著提高，可达50%，有利于节省燃料。

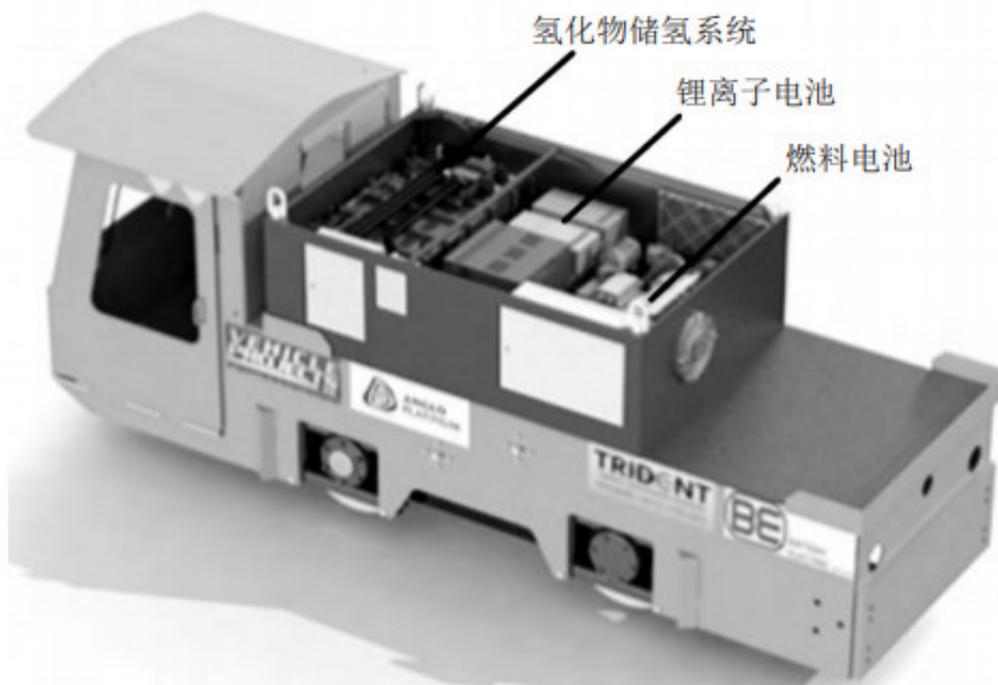


图4 燃料电池卡轨车及其结构示意图^[10]

2.3掉头机车

掉头机车一般以柴油机为动力，使用过程中排放较多的NO_x、SO₂、PM大气污染物。燃料电池掉头机车不排放任何大气污染物，并且无噪声，有利于实现清洁环保。

2010年，BNSF铁路公司在美国洛杉矶示范运行了一辆自重130t的燃料电池掉头机车，用于减少市郊内燃机车带来的尾气污染和噪声污染。考虑到掉头机车启停瞬时功率高（600~1000kW），但稳定运行功率低（40~100kW）的特点，该掉头机车采用了燃料电池-蓄电池混合动力系统，由2个300kW的燃料电池电堆与铅酸电池搭配，瞬时输出功率可达1MW。机车储氢系统由14个35MPa碳纤维氢罐组成，加氢量70 kg，有效使用量63.5kg。实际运行条件下，燃料电池掉头机车牵引重量200t~1800t，所需平均输出功率约96kW，每小时耗氢量约5.73kg，一次加氢后可供使用约11h，能量效率达到41%~49%。由于1kg氢的热值相当于3.5L柴油，且二者成本相近，因此在不考虑氢气压缩和加氢设施建设成本的情况下，燃料电池掉头机车与柴油机车的燃料成本相当。

BNSF铁路公司对燃料电池掉头机车的示范运行表明，燃料电池掉头机车的综合性能和使用成本与内燃机车接近，完全可以替代内燃机车用于市郊的铁路枢纽，从而减少大气污染和噪声污染对周围居民带来的危害。见图5。

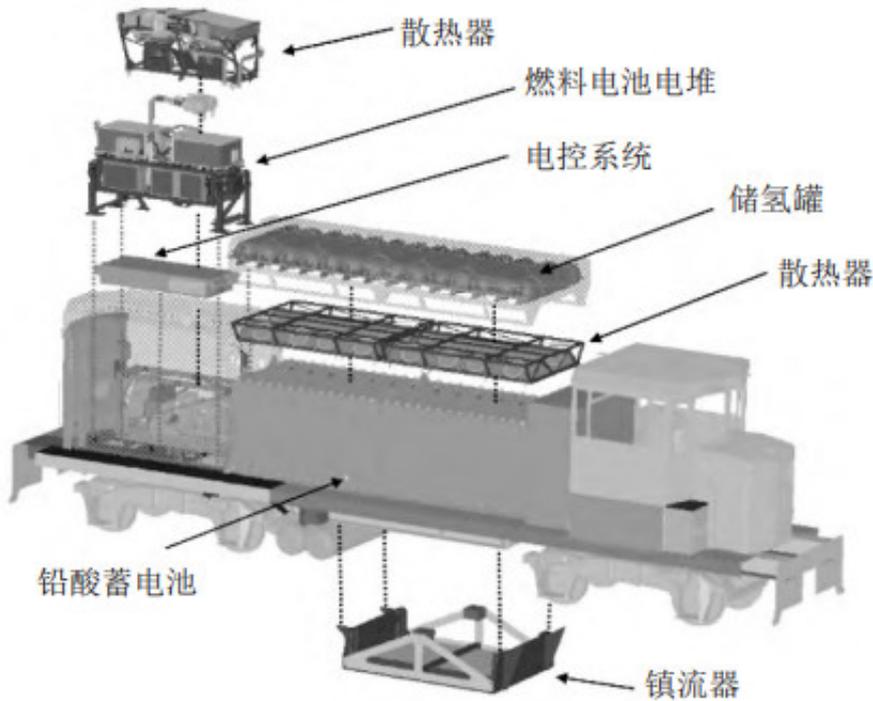


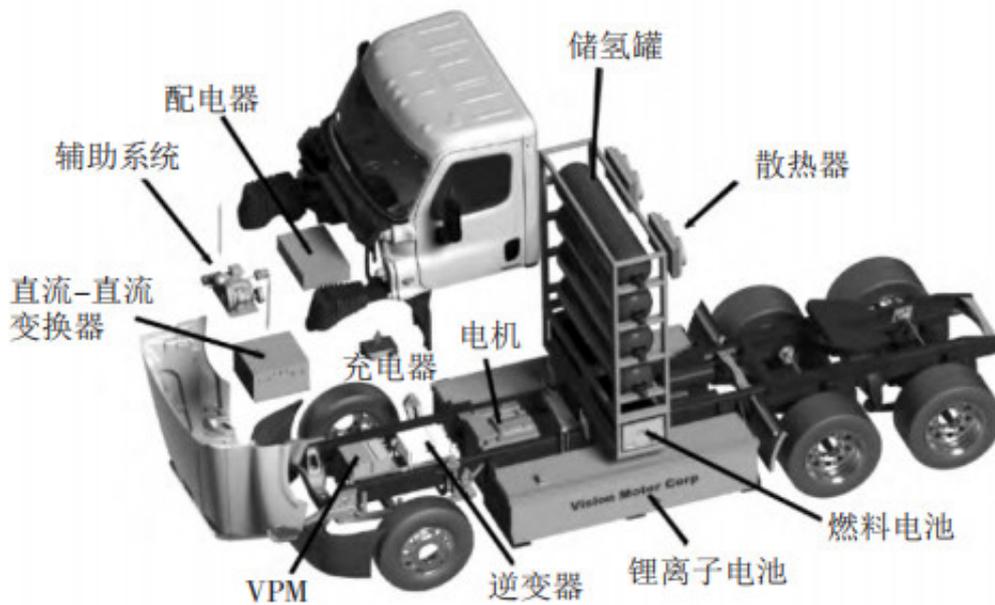
图 5 燃料电池掉头机车及其结构示意图

2.4 卡车

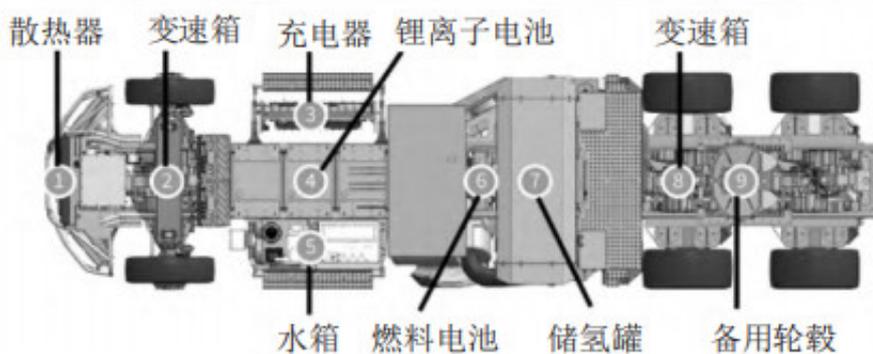
我国柴油车排放的 NO_x 接近汽车排放总量的70%，PM超过90%，以柴油机为动力的货运卡车，已成为城市雾霾的重要来源之一。目前，以锂离子电池为动力的纯电动汽车已经实现了商业化应用，但受制于储能电池能量密度低的缺点，纯电动技术尚无法满足货运卡车的长距离运输要求（纯电动货运卡车续航里程一般小于160km）。相比之下，燃料电池能量密度高，应用于货运卡车具有独特优势。

2011年，美国Vision公司推出了世界首辆燃料电池8级卡车（自重大于14969kg）用于洛杉矶市区和长滩港之间的物流运输。该燃料电池卡车采用65kW燃料电池-130kWh锂离子电池混合动力系统，牵引重量15t，一次加氢量20kg（35MPa），续航里程可达320km。卡车行驶过程中，燃料电池向锂离子电池持续充电，锂离子电池带动电机输出动力；卡车上坡或加速时，电机向锂离子电池充电，回收部分机械能，从而提高能量效率。相比于柴油卡车，该燃料电池卡车的燃料成本节省约35%，且大气污染物排放量显著降低。

2016年，Nikola公司公布了商业化的燃料电池增程式电动8级卡车，包括I型长途运输和II型短途运输两种型号，均采用320kWh锂离子电池提供动力，搭载200kW燃料电池向锂离子电池持续充电，续航里程可达1200~1900km。该卡车由六轮驱动，总输出功率可达1440kW，最大扭矩2670N·m，牵引重量可达36t。相比于柴油卡车的机械传动系统，Nikola卡车的电动系统重量更轻、能量效率更高，因而动力性能显著提高；与此同时，轻量化的动力系统有利于Nikola卡车搭配足够的储氢量，由于氢燃料的能量密度显著高于柴油，Nikola卡车的续航里程比柴油卡车增加近1倍。见图6。



(a) 与 Nikola 公司



(b) 生产的燃料电池 8 级卡车示意图^[18, 19]

图 6 Vision 公司

3结论与展望

燃料电池作为一种清洁高效的能源利用方式，在特殊工程车辆领域具有巨大的应用潜力。以燃料电池为动力的矿山

车、卡轨车、掉头机车作业位置相对固定，无需大量建设加氢设施即可满足燃料供应，有利于降低基础设施投资成本。燃料电池能量利用效率高、零排放，使用过程中，燃料成本一般低于柴油机车，并且环保效益显著提高。

近年来，随着燃料电池零部件和集成技术的更新，以及相关产业链的发展，燃料电池制造成本逐渐下降，使用寿命不断增加，市场竞争力显著提高。与此同时，燃料电池混合动力技术和增程技术的应用，保障了燃料电池系统的可靠性，充分发挥了燃料电池功率密度和能量密度高的特点，拓宽了燃料电池在长距离、大载量货物运输等特殊场合的应用，成为替代柴油机应用于工程车辆的最优方案之一。因此，燃料电池在特殊工程车辆领域已经具备了规模化应用的条件。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/148439.html>