

车用柴油机微粒排放机外处理技术现状

祁丽霞 纪威

(中国农业大学车辆与交通工程学院)

摘要 简述了微粒排放机外处理技术的发展背景,介绍了常用车用柴油机微粒排放机外处理技术,如微粒过滤器、静电捕集、旋风(流)分离、氧化催化器技术,以及微粒净化组合技术,针对我国实际情况分析了各种微粒处理技术在实际使用中存在的主要问题,分析比较结果表明,微粒过滤器和组合技术是比较有前途的微粒处理方式。

关键词 车用柴油机; 排放; 微粒; 机外处理

中图分类号 S 219.031

Off-Engine Control Technologies for Exhausting Particle From Vehicle Diesel Engines

Q i L i x i a, J i W e i

(College of Vehicle and Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract The developing background of the off-engine control technologies was described briefly. The common measures to control particle emission such as, diesel engine exhaust particle filter, the technique of engine emission control with plasma, the cyclone filtration technology for reducing engine particulate emissions, the oxy-catalyst and the combined technology used to control vehicle engine emission were introduced emphatically. The problems lying in each measure were analyzed in accordance with Chinese specific conditions. The analysis showed that diesel engine exhaust particle filter and the combined technology are the better ways to control exhaust particle from vehicle diesel engine.

Key words vehicle diesel engine; exhaust emission; particle; off-engine control technology

近年来,柴油机以其良好的经济性和耐久性而应用日趋广泛。在有害排放物方面,与相同排量的汽油机相比,柴油机的CO和HC排放量要比汽油机少许多,但是,柴油机的微粒排放量却远远高出汽油机,因而对环境的污染也越来越不容重视。柴油机排放物中的微粒被排入大气后以颗粒状悬浮于空中,颗粒直径越小沉降时间越长。有资料表明,直径2~10 μm 的微粒被吸入人体气管后有可能被排出体外,对人体的危害不大,2 μm 以下的微粒不易排出,被吸入肺部后在肺中滑动,可引起肺组织的摩擦损伤,逐步形成慢性病变,如肺气肿等。由于柴油机废气微粒的直径多为0.1~1 μm ,碳烟中的PAH(多环芳香烃)还有很强的致癌性,危害性较大,因此,减少柴油机的微粒排放成为柴油机进一步发展的关键技术问题,具有重要意义。

收稿日期: 2002-02-09

祁丽霞,北京清华东路17号 中国农业大学(东校区)230信箱,100083

1 采用机外处理技术的背景

柴油机排气中的有害排放物主要是 NO_x 和微粒子(碳烟和可溶性未燃碳氢), NO_x 是在高温富氧的情况下生成的,而微粒是在局部高温缺氧的情况下经氧化、热裂解、凝聚形成的,因此, NO_x 与微粒的生成机理之间存在矛盾,这样就给减少柴油机排气中的有害成分、全面满足排放标准带来了困难。目前,可采用的控制柴油机有害排放物的机内净化措施基本上是通过改善混合气质量,合理选择燃烧室与喷油器结构参数,适度组织气流运动以实现燃料喷雾、气流与燃烧室三者之间的合理匹配来改善燃烧过程的。主要措施有:1)采用废气涡轮增压,改善换气质量;2)适当减小喷油提前角;3)采用新型燃烧系统;4)使用燃料添加剂(二茂铁 $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ 等);5)掺水燃烧;6)使用废气再循环等^[1]。可以说,目前柴油机微粒排放水平较以前有了大幅度的降低,这是在采用了几乎所有新技术的基础上得到的,在没有更新的技术出现的情况下,从燃烧角度解决微粒排放问题已接近技术极限,同时机内净化技术还给微粒排放问题提出了新课题。有研究资料表明:在采用了现代柴油机机内净化技术后,尤其是采用高压喷射技术后,虽然柴油机排放的微粒总质量大幅度减少,但微粒数量反而有所增加。这些微粒的体积和质量远小于以前,但因其更细更小更不易沉降,所造成的危害更大。正是因为微粒的数量比质量对人体健康危害更大,所以说,如果用超细微粒的数量来评价柴油车的微粒排放性能,则柴油机的微粒排放性能可能不但没有改善,还有所恶化。因此降低微粒排放的机外净化技术越来越受重视,从而得到了较大的发展。

2 常用微粒排放机外处理方法

由于柴油机排放物中的微粒物是有机和无机化合物以固态和液态形式构成的一种复杂化合物,所以后处理技术主要从以下 2 个方面着手。一是捕集排气中的颗粒状物质;二是氧化转化其中的有机可溶成分。目前较常用的方法有如下几种。

2.1 微粒过滤器^[2~10]

在微粒排放机外处理技术中,对微粒过滤器(又称微粒捕集器)的研究一直是国外柴油机排气净化研究中的重要课题,它主要是通过扩散、沉积和撞击机理来过滤捕集柴油机排气中的微粒的。当微粒过滤物在过滤器中堆积过多时,会使排气背压升高,柴油机性能恶化,必须定期除去微粒,即过滤器再生。因此,滤芯的选择和过滤器的再生技术是微粒过滤系统及再生系统中的关键性技术。

滤芯是过滤器工作的主体,决定了过滤器的效率、工作可靠性、使用寿命以及再生技术的使用和再生效果。因其工作性质和工作环境的需要,对滤芯的性能指标要求很高。目前最常用的过滤材料为堇青石,其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 及 MgO 等。这种材料具有一定的机械强度和较好的抗热冲击能力,热胀系数小;弱点是耐高温能力不足,导热系数小,再生时,内部燃烧能量不易传出,致使滤芯烧融或烧裂。近年来,出现了一些新型滤芯材料,如 SiC ,与堇青石相比孔径更均匀,并具有通流性能好,过滤效率高,耐高温(超过 1 600)和通用性好等特点^[3],为解决再生系统复杂化及再生难的问题提供了广阔的前景。在滤芯的结构设计中,GM 公司认为最具发展前途的 4 种过滤体形式为:壁流式蜂窝陶瓷体、泡沫陶瓷体、金属丝网和编织陶瓷纤维。其中,壁流式蜂窝陶瓷是目前综合性能较好的过滤体,但国内尚不能生产;编织陶瓷纤维

能适应催化、过滤等一系列要求且有良好的耐高温性,是一种优良的过滤体形式,但陶瓷纤维质地较脆,在生产和使用过程中易损坏,生产工艺十分复杂。我国较常使用的是泡沫陶瓷,它具有各项同性,不易造成热应力损坏,但其机械强度低,承受排气冲击和机械振动的能力不高。

柴油机微粒过滤器的再生方式可分为被动再生和主动再生。被动再生即为催化再生,即在过滤体上浸渍催化剂或在燃油中加入添加剂来降低微粒的氧化反应活化能,从而降低碳粒起燃温度。这种方式以燃油中加入金属有机物,使燃烧后生成的金属氧化物对微粒起催化作用最为常见。采用催化再生的缺点是:微粒与催化剂的接触反应极不均匀,很难进行完全再生;催化剂易发生中毒;添加剂可造成过滤器慢性堵塞等。主动再生即外加能量的再生方式。主要有喷油助燃再生、电加热再生、逆向喷气净化再生、电自加热再生(利用具有高导电性的结晶SiC作为过滤材料,再生时直接将过滤体作为加热元件通电加热,使微粒燃烧)、微波再生等方式。与催化再生相比,主动再生的控制系统较复杂,一些传感元件和控制元件价格很高,工作特性受发动机工作过程的影响也较大。

受成本、可靠性、使用期限等的影响,在我国使用微粒过滤器还有不少问题需要解决,如滤芯材料的选择与开发,再生方式的优化,燃油品质需要提高等。

2.2 静电捕集^[11~15]

静电捕集技术是指利用静电力从气流中分离悬浮粒子,具有捕集率高(可达99%),阻力小(气压损失约为0.01~0.2 kPa),捕集粒径范围宽,能于高温高压下连续工作,能耗低等特点,在工业除尘中应用较广,技术较为成熟。其原理是,以一根曲率很小的裸露电线作为放电极(或用芒刺电极组),以有一定面积的管或板作集尘极,分别与高压直流电的两极相连。当气流在其中通过时,气体在放电电极周围的强电场作用下电离,气体离子与周围微粒碰撞接触,使微粒带电,荷电微粒在电场力作用下被集尘极捕获,从而使废气得到净化。

据 Kittelson 等人对微粒本身携带的电荷特性的研究,证明柴油机排放的微粒中带电微粒的质量分数为70%~80%,每个带电微粒约带1~5个基本正电荷或负电荷,整体则呈电中性。从电阻率来看,柴油机排气微粒的电阻率在 $10^6\sim 10^8\ \Omega\cdot\text{cm}$ 之间,正处于静电除尘的最佳电阻范围。这就说明利用附加电场实现柴油机排气微粒吸附是可行的。柴油机排气微粒的粒径大多为0.1~1 μm ,相对静电除尘的理想处理粒径较小,为达到更好的效果,可考虑加装预荷电装置增加微粒荷电量,使小颗粒产生凝聚效果,提高捕集效率。

无论是国内还是国外,静电捕集技术在车用发动机上应用所面临的最大问题是高压电源的供给问题。另外,静电捕集设备体积庞大,结构复杂,不易解决自动清灰问题,成本也较高,这些问题在很大程度上影响了它的实用化。

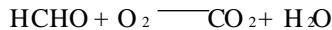
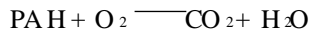
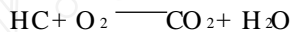
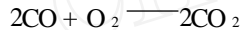
2.3 旋风(流)分离^[16~20]

旋风分离技术是较早用于工业实践的气固分离技术之一。它是一种使含尘气流作旋转运动,借作用于颗粒上的离心力把微粒污染物从气体中分离出来的方法。从分离机理上看,旋风(流)分离主要适用于捕集粒径较大的微粒,一般用于工业预除尘。近年来,旋风(流)除尘器的结构形式、分离机理及流场分析等都有了较大改进。由于旋风(流)分离技术可净化的微粒粒径逐渐减小,国内外研究者开始尝试把旋风(流)分离技术应用于柴油机微粒净化方面,并作了不少有益的探索。目前比较有效的分离形式有轴流直流式和涡流式。轴流直流式柴油机排气旋流净化器是采用轴流直流式旋流子作分离器件,当气流通过分离室时,微粒沿径向由简体轴线

处移动到筒体内壁, 与筒体内壁碰撞粘附而被捕集。涡旋式的除尘机理是, 使具有很高压力和速度的排气沿切向进入涡旋室, 当气流在其中高速旋转时, 离心力使其中粒径较大的微粒分离出来。同时高速旋转的气流还可以形成一定的真空度, 使发动机的进排气进行得更加彻底。旋风(流)净化技术的缺点在于它对微小粒径的微粒还无能为力, 在实际应用中需要采取一定的措施, 使细小微粒凝聚成较大的微粒, 才能达到较高的净化效率。因此, 该种技术还需要在微粒的凝聚机理、凝聚特性、细小微粒的分离机理及流场分析、机构结构优化等方面作进一步的研究。

2.4 氧化催化器^[21-22]

氧化催化器主要是针对柴油机排气中的可溶有机成分(SOF)的, 当排气流通过氧化催化器时, 微粒中的 PAH 和醛(HCHO)被催化氧化为 CO_2 和 H_2O , 同时还可将 HC 和 CO 氧化。主要反应如下



影响氧化催化器性能的主要因素有排气温度和燃油含硫量, 我国燃油品质较差, 含硫量较高, 排气温度过高时会形成硫酸和硫酸盐, 增加微粒排放。图 1 示出了在柴油车上使用氧化催化剂时工作温度(排气温度)对排气微粒转化效率的影响。由图 1 可见, 当温度低于 150 时, 催化剂基本不起作用。随着温度的升高, 排气微粒主要成分的转化效率逐渐增高。当温度高于 350 后, 由于硫酸盐大量产生, 反而使微粒排放量增大, 而且, 硫酸盐还会覆盖在催化剂表面降低催化剂的活性和转化效率。此外硫对大多数催化剂来讲都有毒性, 可引起催化剂中毒。因此, 在我国使用氧化催化剂必须提高燃油品质, 还要设法降低氧化催化器的成本价格。

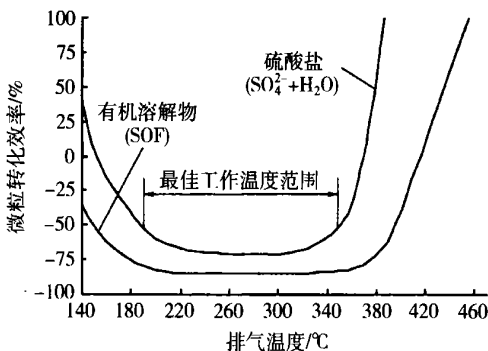


图 1 使用氧化催化剂时微粒转化效率与排气温度的关系

2.5 组合技术

所谓组合技术, 即将 2 种或 2 种以上的机外控制技术综合运用, 以达到更好的性能指标或经济实用性要求。比如马朝臣、魏名山^[23, 24]等研制的静电旋风捕集器, 即是把静电捕集与旋风分离结合的技术, 该装置通过静电技术捕集排气微粒, 以旋风分离技术实现自动清灰, 具有排气阻力小(0.5~ 3 kPa)、捕集效率高(70%以上)的优点, 且较好地解决了自动清灰的问题。王完成、宁智^[25]等人研制的静电金属丝网捕集器则是利用了静电技术与过滤机理结合的方法, 它以不锈钢丝网作过滤体, 用电晕荷电技术增加排气中带正电微粒的数量, 同时将用作过滤体

的不锈钢丝网连接于电源负极。排气微粒在电场力的作用下粘附于不锈钢丝网上,从而提高了不锈钢丝网的过滤效率。试验表明,单纯不锈钢丝网过滤体的过滤效率为20%~50%,采用电晕荷电技术后,其过滤效率在过滤初期提高了30%,过滤后期提高了20%,组合不锈钢丝网的过滤效率可达50%~75%,净化效果较好。其他^[26]的组合方式还有,将过滤除尘技术应用于氧化催化转化器等。从目前的情况来看,组合技术是取得较好效果的最有效方法,但需要在不同技术的组合方式以及结构形式的设计上做进一步努力。

3 结束语

在微粒机内净化技术受到挑战的今天,柴油机微粒机外净化处理技术是一条解决问题的有效途径,但目前还没有一项技术能全面满足实用性和经济性的要求。结合目前的研究状况和我国的现实情况,要达到较理想的效果,还需要在以下几个方面做出努力:

- 1) 提高燃油品质,大力研制推广含硫、铅量低的柴油。
- 2) 研制适合我国国情的新型滤芯材料,优化微粒过滤器的再生方式,降低制造成本。
- 3) 进一步研究微粒的凝聚、分离机理,对已有的技术进行组合与改进,降低成本,提高效率。研究与实践证明,组合技术与微粒过滤器将是比较有前途的处理方式。

参 考 文 献

- 1 重澄教 内燃机排放与净化 上海:上海交通大学出版社,1994 84~ 133
- 2 Itoh A. Study of SiC application to diesel particulate filter: material development SA E Paper, 960366
- 3 M urtag h Martin J. Development of a diesel particulate filter composition and its effect on thermal durability and filtration performance SA E Paper, 940235
- 4 Harddenberg H O. Experiences in the development of ceram's fiber coil particulate traps SA E Paper, 870015
- 5 刘忠长 柴油机用泡沫陶瓷排气微粒过滤体的过滤机理和分级效率 内燃机学报, 1987, 5(3): 239~ 246
- 6 Zhang Chunrun, Zi Xinyun Studies on the application of microwave heating technology to diesel exhaust particulate control ICCE'97, 1997. 273~ 276
- 7 李东江 柴油机排气颗粒过滤器再生技术(上). 柴油机, 1996(2): 28~ 30
- 8 李东江 柴油机排气颗粒过滤器再生技术(下). 柴油机, 1996(3): 11~ 13
- 9 M ajew ski W A [美]. 适应欧3标准的强载柴油机微粒捕集器 国外内燃机, 2000, 32(1): 45
- 10 尧命发, 许斯都 柴油机有害排放物控制的新发展 内燃机工程, 1997, 18(3): 41~ 44
- 11 曾 科, 蔡丽红, 蒋德明 等离子体技术在控制汽车尾气排放上的应用 车用发动机, 2000, 130(6): 43~ 46
- 12 Kittelson D B. Electrostatic collection of diesel particles SA E Paper 860009
- 13 Natansong C. Depositions of aerosol particles by electrostatic attraction upon a cylinder around which they are flow ing Akad Nauk U SSR, 112(4): 696~ 699
- 14 高 竣 车用柴油机微粒排放控制 柴油机设计与制造, 2000(4): 27~ 29
- 15 朱联锡 空气污染控制原理 成都: 成都科技大学出版社, 1990 33~ 147
- 16 Arcoumanis C. Developments in cyclone filtration of diesel exhaust particulate Third International Conference on Innovation and Reliability in Automotive Design and Testing, Florence, 1992 167~ 170
- 17 Barbaris L N. Evaluation of a cyclone-based particulate filtration system for high-speed diesel engine Proc Instn Mech Engrs, 1994, 20(4): 43~ 45

- 18 Arcoumans C. Cyclone filtration of diesel exhaust particulate: a feasibility study. International Conference on Analysis of Thermal and Energy Systems, Athens, 1996 94~ 97
- 19 宁 智, 刘双喜, 资新运, 等. 柴油机排气微粒旋流净化技术的初步研究. 内燃机学报, 2000, 18(2): 140~144
- 20 纪 威, 杨占鳌, 王凤彩, 等. 柴油机涡旋式消音吸清器的研制. 见: 中国内燃机学会燃烧节能学术委员会. 中国内燃机学会大连内燃机学术研讨会论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 2000
- 21 李纯菊[译]. 新一代废气催化中和器. 国外内燃机, 2001, 33(2): 64
- 22 王建昕, 傅立新, 黎维彬, 编著. 汽车排气污染治理及催化转化器. 北京: 化学工业出版社, 2000 293~ 315
- 23 徐绍曾, 马朝臣, 肖宗成, 等. 柴油机排气微粒静电旋风捕集器的试验研究. 内燃机学报, 1993, 11(1): 51~56
- 24 马朝臣, 魏名山, 鲍 捷, 等. 利用高温静电旋风捕集器捕集柴油机排气微粒. 内燃机学报, 2000, 18(3): 235~ 237
- 25 王宪成, 宁 智, 高希彦, 等. 柴油机排气微粒静电金属丝网捕集器的试验研究. 内燃机学报, 2000, 18(2): 123~ 126
- 26 Neef J P, Michiel M, Mouljn J A. Particulate emission control. Fuel Processing Technology, 1996, 47: 1~ 69