

车内燃机催化消声器的设计与性能优化研究

陈誉天 刘家杰

广西玉柴机器股份有限公司 广西 玉林 537000

摘要: 本文聚焦车内燃机催化消声器, 阐述其基于化学反应与声学原理协同的工作机制。分析设计需求, 涵盖尾气净化、噪声控制、可靠耐久及空间布置等方面。详细探讨结构设计, 包括整体布局、催化反应单元与声学结构设计; 介绍材料选择, 如耐高温耐腐蚀、吸声及催化剂载体材料。最后提出基于仿真分析、催化剂性能及综合性能协同优化的方法, 为催化消声器的设计与性能提升提供参考。

关键词: 车内燃机; 催化消声器; 结构设计; 性能优化

1 车内燃机催化消声器的工作原理与设计需求分析

1.1 催化消声器的工作原理

车内燃机催化消声器是一种集尾气净化与噪声降低功能于一体的装置。其工作原理主要基于化学反应与声学原理的协同作用。在化学反应方面, 当内燃机排出的高温尾气通过催化消声器时, 首先进入催化反应单元。该单元内涂覆有特定的催化剂, 如铂(Pt)、钯(Pd)、铑(Rh)等贵金属催化剂。这些催化剂能够降低尾气中有害物质(如一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO_x))发生氧化还原反应的活化能, 使反应在相对较低的温度下就能高效进行。从声学原理来看, 催化消声器通过其特殊的声学结构来降低排气噪声。当排气气流通过消声器时, 声波在消声器内部的扩张腔、收缩腔、穿孔管等结构中不断反射、干涉和吸收^[1]。扩张腔使声波在截面积突然增大的区域产生反射, 部分声波能量被反射回声源方向; 收缩腔则使声波在截面积突然减小的区域产生折射和散射, 进一步改变声波的传播方向和能量分布; 穿孔管上的小孔使得声波在管内外介质之间来回传播, 声能不断转化为热能而耗散。通过这些声学结构的协同作用, 达到降低排气噪声的目的。

1.2 设计需求分析

车内燃机催化消声器设计需统筹多因素以满足汽车性能要求。在尾气净化上, 要保证对CO、HC和NO_x的转化效率符合国家排放标准, 且在冷启动、怠速、加速、减速等不同工况下均能稳定净化尾气。要最大程度降低对发动机动力性和经济性的负面影响, 防止因排气背压过高造成发动机功率下降、油耗增加。噪声控制方面, 需使催化消声器在发动机全转速范围内有效降低排气噪声, 将噪声控制在法规限值内, 提升乘客舒适性。并且要兼顾消声器的频率特性, 确保对不同频率噪声均有良好衰减效果。可靠性和耐久性上, 因催化消声器要承

受发动机排气的高温、高压和腐蚀性环境, 所以必须具备出色的耐高温、耐腐蚀性能, 保障长期使用中结构和性能稳定。要确保与发动机排气系统连接牢固, 避免因振动、热膨胀等因素出现泄漏或损坏。空间布置上, 鉴于汽车内部空间有限, 在满足性能要求的前提下, 催化消声器要尽可能紧凑地布置在发动机舱或底盘下方, 同时避免与其他零部件干涉, 保障安装和维护的便利性。

2 车内燃机催化消声器的结构设计

2.1 整体结构布局设计

催化消声器整体结构布局设计需综合考量发动机排量、排气流量、噪声特性及车辆空间限制等因素。其常见结构形式分为单腔式、双腔式与多腔式。单腔式结构简约、体积小巧, 适配小排量发动机。它由扩张腔与催化反应单元构成, 借扩张腔的声学效应及催化反应单元的净化功能, 达成尾气处理与降噪目的。但受限于结构, 其在噪声控制上存在短板, 对特定频率噪声的衰减能力欠佳。双腔式在单腔式基础上增设一个腔室, 凭借两腔室的声学耦合效应, 能更高效地削减排气噪声。两腔室可分别规划为不同声学结构, 例如一为扩张腔, 另一作收缩腔或共振腔, 以此拓宽消声频段, 提升消声效能。同时这种结构便于合理安置催化反应单元, 进而增强尾气净化效率。多腔式结构最为复杂, 由多个腔室与催化反应单元组合而成。它可依据发动机排气噪声的频谱特征, 针对性地设计各腔室的声学结构, 实现对不同频率噪声的精准衰减。多腔式消声器消声与净化效果俱佳, 但结构繁杂、成本高昂, 多用于对环保和驾乘舒适性要求严苛的高端车型。在整体结构布局时, 还需科学确定催化反应单元的位置。通常, 应尽量靠近发动机排气口, 以充分借助排气高温提升催化剂活性、加速反应。另外, 要保证催化反应单元与消声器壳体间热绝缘良好, 防止高温损伤壳体及其他部件。

2.2 催化反应单元设计

催化反应单元通常由催化剂载体和催化剂涂层组成。催化剂载体的选择至关重要,它需要具有较大的比表面积、良好的热稳定性和机械强度。常见的催化剂载体材料有陶瓷蜂窝载体和金属蜂窝载体。陶瓷蜂窝载体具有成本低、比表面积大、热稳定性好等优点,但机械强度相对较低,容易在受到冲击或振动时损坏。金属蜂窝载体则具有机械强度高、导热性好等优点,能够快速将发动机排气的热量传递给催化剂,提高催化剂的活性,但成本较高^[2]。在设计催化反应单元时,要根据发动机的排量和排气流量合理确定载体的大小和形状,以确保尾气能够充分与催化剂接触,提高反应效率。要优化载体的孔道结构,如孔道密度、孔径大小等,以平衡排气背压和净化效果之间的关系。孔道密度过高会导致排气背压增大,影响发动机性能;孔道密度过低则会使尾气与催化剂的接触时间不足,降低净化效率。催化剂涂层是催化反应单元的关键组成部分,其成分和涂覆工艺直接影响到催化剂的活性和稳定性。催化剂涂层通常由贵金属催化剂、助剂和载体材料组成。贵金属催化剂是主要的活性成分,助剂可以提高贵金属的分散度和稳定性,增强催化剂的抗中毒能力。在涂覆工艺方面,要确保催化剂涂层均匀、牢固地附着在载体表面,避免在使用过程中出现脱落现象。

2.3 声学结构设计

声学结构设计是催化消声器实现噪声降低功能的关键。扩张腔通过截面积的突然增大,使声波在腔内发生反射和干涉,部分声波能量被反射回声源方向,从而达到消声的目的。在设计扩张腔时,要根据目标消声频率合理确定扩张腔的长度和截面积变化比例。一般来说,扩张腔的长度与目标消声频率的波长有关,截面积变化比例越大,消声效果越好,但同时也会增加排气背压。收缩腔则是通过截面积的突然减小,使声波在腔内发生折射和散射,改变声波的传播方向和能量分布。收缩腔可以与扩张腔配合使用,形成更复杂的声学结构,提高消声性能。共振腔是一种针对特定频率噪声进行消声的结构,它由一个封闭的腔室和一个颈管组成,当声波的频率与共振腔的固有频率相等时,腔内的空气会发生共振,消耗大量的声能。在设计共振腔时,要根据目标消声频率精确计算腔室的容积和颈管的尺寸,以确保共振腔具有良好的消声效果。穿孔管是一种在管壁上开有许多小孔的管状结构,当声波通过穿孔管时,会在管内外介质之间来回传播,声能不断转化为热能而耗散。穿孔管的消声效果与孔径大小、孔间距、穿孔率等因素有

关。一般来说,孔径越小、孔间距越小、穿孔率越大,消声效果越好,但同时也会增加排气背压。在实际设计中,需要综合考虑这些因素,以实现最佳的消声效果和排气性能平衡。

3 车内燃机催化消声器的材料选择与应用

3.1 耐高温耐腐蚀材料选择

由于催化消声器需要承受发动机排气的高温 and 腐蚀性环境,因此耐高温耐腐蚀材料的选择至关重要。在消声器壳体材料方面,常用的有不锈钢和铁素体耐热钢。不锈钢具有良好的耐腐蚀性和美观性,但成本较高。其中,奥氏体不锈钢(如304、316等)在常温下具有良好的韧性和耐腐蚀性,但在高温下容易发生晶间腐蚀,需要通过添加稳定化元素(如钛、铌等)来提高其高温耐腐蚀性。铁素体耐热钢(如409、430等)具有成本低、热膨胀系数小等优点,其耐高温氧化性能较好,适用于一般的发动机工况。在催化反应单元的载体材料方面,陶瓷蜂窝载体通常采用堇青石陶瓷,它具有较低的热膨胀系数和良好的热稳定性,能够在高温下保持结构的完整性。金属蜂窝载体则一般采用不锈钢或铁铬铝合金,这些材料具有良好的机械强度和导热性,但需要在表面进行特殊的处理,以提高其耐高温氧化和耐腐蚀性能。

3.2 吸声材料的选择与应用

吸声材料在催化消声器中主要用于吸收声波能量,提高消声效果。常用的吸声材料有玻璃纤维、矿棉、泡沫铝等。玻璃纤维具有良好的吸声性能和耐高温性能,其吸声原理是通过纤维之间的空隙和摩擦将声能转化为热能。然而玻璃纤维在使用过程中容易产生粉尘,对人体健康有一定危害,因此需要进行密封处理。矿棉也是一种常见的吸声材料,它具有成本低、吸声效果较好等优点。但矿棉的耐高温性能相对较差,在高温环境下容易发生收缩和变形,影响其吸声性能和使用寿命^[3]。泡沫铝是一种新型的多孔金属材料,具有密度小、比强度高、吸声性能好等优点。它通过其内部的大量孔隙对声波进行散射和吸收,能够在较宽的频率范围内实现良好的吸声效果。泡沫铝还具有良好的耐高温、耐腐蚀性能,适用于催化消声器等高温环境。

3.3 催化剂载体材料的优化

为了提高催化反应单元的性能,需要对催化剂载体材料进行优化。一方面,可以通过改进载体的制备工艺,提高载体的比表面积和孔隙率,增加催化剂的负载量,从而提高催化反应效率。另一方面,可以对载体材料进行表面改性处理,提高其与催化剂涂层之间的结合力,增强催化剂的稳定性。另外,还可以研究新型的载

体材料,如碳化硅、氮化硅等,这些材料具有更高的热稳定性和机械强度,有望在未来得到更广泛的应用。

4 车内燃机催化消声器的性能优化方法

4.1 基于仿真分析的结构优化

随着计算机技术的发展,基于仿真分析的结构优化方法在催化消声器设计中得到了广泛应用。在CFD仿真中,可以分析排气气流在消声器内的速度分布、压力分布和温度分布,预测排气背压和催化剂的活性分布。通过对仿真结果的分析,可以发现消声器结构中存在的问题,如气流速度过高导致的局部压力损失过大、催化剂活性不均匀等,并针对性地对结构进行优化。在FEA仿真中,可以分析消声器在发动机振动和热应力作用下的结构强度和变形情况。通过仿真计算,可以确定消声器在不同工况下的应力分布和变形规律,评估其可靠性和耐久性。根据仿真结果,可以对消声器的结构进行加强设计,如增加加强筋、优化壳体厚度等,以提高其结构强度,避免在使用过程中出现破裂或变形等问题。

4.2 催化剂性能优化

催化剂性能是影响催化消声器尾气净化效果的关键因素。为了提高催化剂的性能,可以从以下几个方面进行优化。首先,优化催化剂的成分和配比,通过研究不同贵金属催化剂之间的协同作用以及助剂对催化剂性能的影响,确定最佳的催化剂成分和配比。其次,改进催化剂的制备工艺,采用先进的制备方法,如溶胶-凝胶法、浸渍法、化学气相沉积法等,可以制备出具有高分散度、小粒径的催化剂颗粒,提高催化剂的比表面积和活性位点数量。同时严格控制制备过程中的工艺参数,如温度、压力、时间等,确保催化剂的质量和性能稳定^[4]。另外,还可以研究催化剂的再生技术。随着使用时间的增加,催化剂表面会逐渐积累一些有害物质(如硫、磷等),导致催化剂活性下降。通过采用合适的再生方法,如热再生、化学再生等,可以去除催化剂表面的积炭和中毒物质,恢复催化剂的活性,延长催化剂的使用寿命。

4.3 综合性能协同优化

催化消声器的性能优化不仅仅是单一性能的优化,而是需要综合考虑尾气净化、噪声控制、排气背压、可靠性和成本等多个因素,实现综合性能的协同优化。在优化过程中,可以采用多目标优化算法,如遗传算法、粒子群算法等,将催化消声器的各项性能指标作为优化目标,通过建立数学模型和约束条件,寻找最优的结构参数和工艺参数。例如,在保证尾气净化效率和噪声控制效果的前提下,尽可能降低排气背压,提高发动机的动力性和经济性;同时,要考虑材料的成本和加工工艺的可行性,确保催化消声器具有良好的性价比。还可以通过实验验证和实际路试对优化后的催化消声器进行性能评估。将优化后的消声器安装在发动机上进行台架试验和实际道路试验,测量其尾气排放、噪声水平、排气背压等性能指标,并与优化前的结果进行对比分析。根据实验结果,进一步对消声器的结构和性能进行微调,直到满足设计要求为止。

结束语

车内燃机催化消声器作为兼顾尾气净化与降噪的关键装置,其设计与性能优化对汽车环保与舒适性至关重要。本文从工作原理、设计需求出发,系统阐述了结构设计材料与选择要点,并提出了多种性能优化方法。未来,随着汽车技术的不断发展,催化消声器需在满足更严格排放法规和噪声标准的同时,实现更高效的性能协同,以适应市场对汽车环保与舒适性的更高要求。

参考文献

- [1]顾倩霞,左言言,赵海卫,宋文兵.汽车消声器的声学性能分析与结构优化[J].机械设计与制造,2021,(04):48-52.
- [2]刘国彬;陈祝健;李云;黄灵河;钟建德;李海潮.某乘用车排气系统啸叫原因分析及改善[J].汽车实用技术,2022,04:83-88.
- [3]王盼.某乘用车排气系统异响噪声分析和方案优化[J].环境技术,2021,03:150-153.
- [4]李少鹏,陈晖,邹云伟,等.醇氢动力汽车排气消声器声学性能模拟仿真[J].内燃机与配件,2019,000(008):67-69.