

汽车排气阀门技术的演进与挑战： 从传统铸造到先进制造工艺的过渡

李星

国家知识产权局专利局专利审查协作广东中心 广东广州 510630

摘要：探讨了排气阀门制造技术的演变与未来趋势。随着发动机性能和环保要求的提升，传统铸造工艺逐渐被3D打印、激光熔化等先进制造技术取代，这些技术提高了阀门的精度与性能。高温合金和陶瓷材料增强了阀门的耐高温性与抗腐蚀性。尽管如此，材料稳定性和制造精度等问题仍然存在。未来，排气阀门将朝智能化、绿色环保和可持续发展方向发展，特别是在新能源汽车领域，智能排气阀门和新材料的应用将推动行业进步。

关键词：排气阀门；先进制造技术；高温合金；陶瓷材料；智能化

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.z1.004

排气阀门作为汽车发动机的重要部件，承担着废气排放的关键功能，直接影响发动机性能和排放控制^[1]。气门的组装状态如图1所示。传统上，排气阀门主要采用铸造工艺，尤其是铸铁和不锈钢^[2]。随着发动机技术进步和环保法规的严格，传统铸造工艺显现出耐高温性不足、生产精度低和使用寿命短等局限性。

为应对这些挑战，现代汽车工业逐渐引入先进制造技术，如3D打印和激光熔化等，这些技术显著提升了阀门的制造精度与性能。然而，尽管先进制造工艺为排气阀门技术带来了新的机遇，仍面临诸多挑战。新材料研发与应用需要克服稳定性和成本问题，且先进制造工艺的普及受到技术难度和市场接受度的限制^[3]。本文将探讨排气阀门制造技术的演变历程，分析

从传统铸造到先进制造工艺的过渡，重点讨论技术挑战和未来发展趋势。

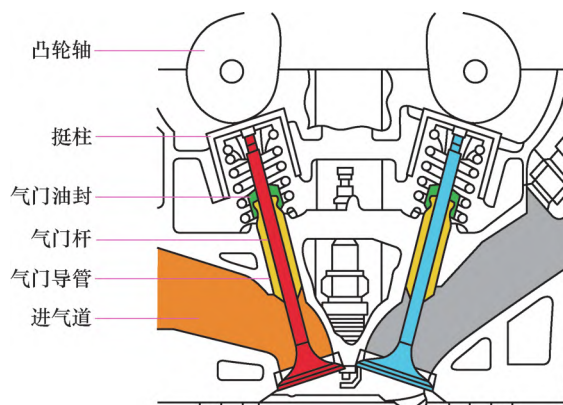


图1 气门的组装状态

先进制造工艺的崛起与应用

随着汽车工业对发动机性能、耐久性和环保要求不断提高,传统制造工艺的局限性逐渐显现,尤其在排气阀门的生产中。为了提升性能和生产效率,3D打印、激光熔化、精密铸造及表面处理等先进制造技术应运而生。3D打印室利用计算机辅助设计(CAD)和制造(CAM)实现高效自动化,并能快速生产复杂的几何结构,避免传统铸造的模具和复杂步骤。同时,激光熔化技术通过高能激光熔化粉末,直接根据数字模型制造高精度的阀门,精密铸造则提高了尺寸精度和表面质量,并减少材料浪费^[4]。现代表面处理技术如陶瓷涂层和金属涂层能够在极端环境下增强阀门的抗氧化、耐磨损和耐腐蚀能力,有效延长其使用寿命^[5]。

先进制造技术在排气阀门中的应用

1.3D打印技术

采用3D打印技术,设计师可以精确控制阀门内部的通道形状,以优化气流流动,提升发动机效率。此外3D打印能够生产轻量化、强度高的阀门部件,降低发动机的整体质量,进一步提升燃油经济性。文献[6]基于金属3D打印技术提出了一种新方法,该方法针对气门零件特征进行优化,提高了零件性能并提升了整体效率。通过计算机辅助软件构建气门零件模型,并设计打印流程。文献[7]探讨了基于选择性激光熔化(SLM)的金属3D打印技术在汽车零部件制造中的应用,指出该技术能有效替代传统铸造和金加工工艺,提高成形效率并缩短研发周期。不过,该技术仍需通过热等静压(HIP)进行后处理,以提高零部件的疲劳强度。

2. 焊接与激光熔化技术

随着焊接技术的进步,早期采用单一材料制造气门的传统方式逐渐被新的制造方法所取代。这种方法使气门各部分能够根据不同的工作需求,选择最合适的材料,如图2所示,锥头需要耐高温和冲击,杆部表面要求耐磨损,而内部则需具备高韧性^[8]。与此同时,激光熔化技术的应用为气门制造带来了显著的优势。通过精确控制材料的熔化过程,激光熔化能减少传统铸造中可能出现的气孔和裂纹缺陷,提升阀门的耐高

温性和抗氧化性。该技术还可以提高产品的精度,减少后续加工步骤,从而降低生产成本和时间。激光熔化能够在阀门表面形成更细致的晶粒结构,增强材料的疲劳强度和抗磨损性能,尤其适合在高温高压环境下工作的排气阀门^[9]。

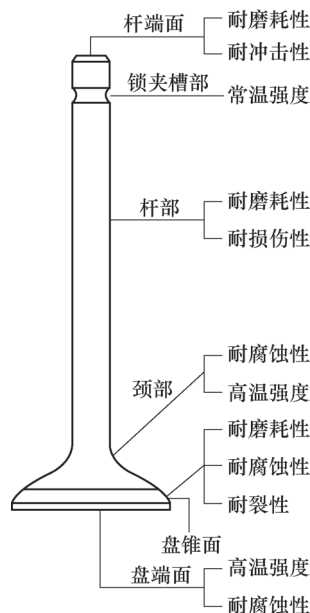


图2 气门各部分的性能要求

3. 新型材料

世界各国在高档次柴油机中普遍采用具有高温强度特性和耐高温腐蚀性的镍基耐热合金(如Inconel 751和Nimonic 80A)作为排气门用材。由于镍基合金成本过高,各国正在开发高铬(Cr含量不小于20%)的低镍耐热合金,以保留Inconel和Nimonic系列的优良特性,并优化铝/钛和铬/碳比。此外,研究也开始关注以A3B型金属间化合物为基的合金,如以 Ni_3Al 、 $TiAl$ 和 Fe_3Al 为强化相的合金,以减轻气门的质量。近年来,新型空心气门受到研究者的关注,源于赛车运动,其设计旨在减少质量以提升性能。空心气门在高温下的材料温度得以降低,且可优化配气机构的动态响应,适应涡轮增压导致的高排气温度。因此,气门材料的不断改进是提升发动机性能的关键驱动力,改进方法包括研发新材料、增强合金元素和改良现有材料。同时,降低成本可以通过减少昂贵元素含量、提高成材率和采用更先进的加工工艺来实现,尤其在民用领域中显得尤为重要。

4. 成型工艺

随着气门材料的不断改进，新材料的出现使得合金含量逐渐增加，提升了气门的使用性能。然而，这也导致了其工艺性的下降，尤其是在锻造过程中。气门头部通常需要达到很高的锻粗比，因此无法使用常规的方法进行成形。国内普遍采用电热锻粗工艺，投入产出比较高，可以实现显著的锻粗比。此外，挤压法也被应用于毛坯成形，使用热轧棒料在中频加热后进行挤压。然而，由于挤压条件严格，模具磨损严重需要频繁更换，无形之中增加了生产成本。近些年来，新的成形技术逐渐兴起，例如摆动辗压和楔横轧加锻造工艺等，这些新方法能够生产出更高质量的气门，显示出良好的发展前景。

技术演进中的挑战与问题

尽管先进制造工艺在排气阀门技术中的应用取得了显著进展，但在实际生产过程中，仍然面临诸多挑战。新材料的稳定性、先进制造技术的普及以及环保法规的严格要求，都是制约排气阀门技术进一步发展的关键因素。

1. 材料与制造工艺的挑战

尽管高温合金和陶瓷材料显著提升了排气阀门的性能，但在实际应用中仍面临诸多挑战。高温合金在极端环境下的疲劳寿命和抗冲击性能需进一步验证，长期高温负荷可能导致材料物理化学性质变化，从而引发疲劳裂纹和失效，影响阀门的长期稳定性。虽然陶瓷材料具备优异的耐高温和抗腐蚀特性，其脆性在高负荷和高冲击环境下易导致破裂。

此外，先进制造工艺如3D打印和激光熔化技术虽然提升了设计灵活性和生产效率，但在精度和一致性方面仍存在不足。3D打印能制造复杂形状的零部件，但精度控制不及传统铸造，可能导致局部过热和材料不均匀，影响产品质量。激光熔化在制造高精度部件方面表现出色，但在大规模生产中，保持产品一致性仍需优化。材料选择、温度控制等因素对最终产品质量至关重要，因此需加强工艺控制和质量检测。

2. 环保与法规压力

随着全球环保法规日益严格，汽车排气系统，尤

其是排气阀门，面临更高的要求。作为发动机排放系统的重要部件，排气阀门需具备耐高温、抗腐蚀和抗氧化性能，以满足欧VI和美国六期等排放标准对氮氧化物和颗粒物的严格限制。这推动了排气阀门材料和制造工艺的创新，特别是开发更耐高温和耐磨损的材料，如陶瓷材料，以提升其性能并减少有害物质排放^[10]。

此外，环保法规还要求排气阀门具备更高的生产精度，以减少气体泄漏。因此，如何平衡环保要求与生产成本，成为排气阀门技术发展的关键挑战。

3. 市场需求与技术普及问题

尽管3D打印和激光熔化等新技术显著提升了排气阀门性能，但高成本和市场接受度仍制约其普及。这些技术的生产成本较高，尤其是使用高性能金属或陶瓷材料时，费用常是传统工艺的数倍。此外，对设备和技术人员的要求较高，许多传统制造企业缺乏足够的资金和技术支持，难以快速转型。

随着排气阀门设计和制造的复杂化，生产周期和供应链管理面临新挑战。先进制造工艺需要精细的调度和高效物流，以确保及时交付原材料和成品。然而，许多汽车制造商仍依赖传统供应链模式，导致生产延误和质量波动。因此，建立高效灵活的供应链体系，成为解决技术普及难题的关键。

未来发展趋势与展望

随着汽车工业的不断发展，排气阀门技术面临着越来越复杂的挑战和要求。在全球环保法规趋严、发动机性能提升和消费者对高效能汽车的需求增加的背景下，排气阀门的技术革新已经成为提升发动机性能、延长使用寿命并满足排放要求的重要途径。

1. 材料与技术的未来方向

随着发动机技术和排气系统温度的提高，排气阀门对材料的耐高温性、抗腐蚀性和抗氧化性的要求愈加严格。未来，排气阀门材料将向高性能高温合金和复合材料发展，如钛合金、铝合金、镍基合金和钴基合金等，这些材料能显著提高阀门的耐热性、疲劳强度和使用寿命。同时，陶瓷复合材料技术的进步使陶瓷材料克服了脆性，增强了抗冲击性能，预示陶瓷基复合材料有望成为高性能排气阀门的重要材料^[11]。

此外，基于纳米技术的合金材料将在未来排气阀门中得到应用，进一步提升抗氧化、抗腐蚀和抗磨损性能。优化高温合金的成分和微观结构，将成为未来研究的关键，以提高材料在极端条件下的稳定性。

2. 排气阀门的智能化发展

随着汽车智能化技术的发展，排气阀门的智能化和自适应能力逐渐成为研究热点。智能排气阀门系统通过集成电子控制单元（ECU）和传感器技术，实时监测发动机状态，并自动调节排气阀的开闭时机，从而优化发动机性能。例如，自适应排气阀门可以根据发动机负荷、转速和温度的变化，动态调整排气流量，以提高燃烧效率、减少排放并提升动力输出。此外，智能排气阀门能够与车辆的整体智能控制系统协同工作，根据不同的驾驶模式进行精确调节，实现最佳排放和性能平衡。在未来，物联网技术的进步将使排气阀门能与云端数据平台交互，获取更多实时信息，从而进一步提升工作效率。整体而言，自适应排气阀门将为电动汽车和混合动力汽车提供重要的技术支持，推动环保和性能的双重优化。

3. 绿色环保与可持续发展

随着全球新能源汽车产业的快速发展，虽然燃油车的排放问题逐渐缓解，但排气阀门的需求依然存在。电动汽车（EV）不再需要传统的排气系统，但混合动力车（HEV）和插电式混合动力车（PHEV）依然需配备排气阀门，以确保内燃机的高效运行。因此，排气阀门的绿色环保性能成为未来汽车排气系统的重要发展方向。在新能源汽车的设计中，排气阀门将更注重优化发动机效率和减少污染物排放，同时采用环保材料和智能控制系统实现更精确的调节。伴随日益严格的环保法规，尤其是在欧洲和美国，汽车行业面临更高的排放标准，促使排气阀门的设计与制造更加关注材料的环保性和可持续性。

结语

排气阀门技术随着全球汽车产业的发展，从传统铸造工艺向先进制造工艺转型，取得了显著进展。新型高温合金、陶瓷复合材料以及3D打印和激光熔化等技术的应用，大幅提升了排气阀门的性能、耐久性和

制造精度，满足了现代发动机对温度、压力和排放的高要求。然而，行业仍面临材料稳定性、制造精度和智能化应用等技术挑战，同时环保法规的日益严格也推动了创新。未来，排气阀门技术将继续朝着更高性能、智能化和环保的方向发展，特别是在新能源汽车普及和绿色发展的背景下，智能自适应阀门和新材料的应用将进一步优化发动机性能，并推动汽车行业的可持续发展。

参考文献：

- [1] 李明, 孙友松. 发动机气门成形加工发展综述[J]. 锻压装备与制造技术, 2007, 42 (6) : 18-21.
- [2] 姚玲珍, 卢钟祎, 倪洪义, 等. 时效对6Cr21Mn10MoVNbN钢制排气门工艺性能的影响研究及推广应用[J]. 内燃机与配件, 2012 (3) : 14-17.
- [3] 张可人, 李劲光, 安俊亭, 等. 铸造 γ -TiAl合金晶粒细化方法研究进展[J]. 铸造技术, 2024, 45 (3) : 249-258.
- [4] 李伟军, 李周裕, 王媛慧. DLC涂层改善气门挺柱摩擦学性能的试验研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26 (5) : 704-709.
- [5] 郭思良, 张健, 王海军, 等. 钛合金气门在高海拔环境中的应用优势与表面处理[J]. 材料保护, 2024, 57 (5) : 105-118.
- [6] 杨雪莉, 张灵, 林远鹏, 等. 基于金属3D打印技术的柴油发动机气门零件制造方法[J]. 机械管理开发, 2024, 39 (9) : 297-299.
- [7] 蔡黎, 代妮娜, 邓明, 等. 基于金属3D打印技术的发动机气门设计与制造[J]. 制造技术与机床, 2017, (12) : 157-160.
- [8] 黄世盛, 唐卫岗, 王思鸿, 等. 精密薄壁件——气门嘴焊接整体解决方案研究[J]. 电焊机, 2021, 51 (10) : 66-71, 154.
- [9] 王梁, 胡勇, 林英华, 等. 电磁复合场对激光熔注增强颗粒分布梯度的调控[J]. 中国激光, 2018, 45 (10) : 67-74.
- [10] 吴哲, 王小龙. 汽车排气系统的优化改进[J]. 内燃机与配件, 2022 (18) : 35-37.
- [11] 王宇宙, 董建新. 汽车发动机用气门材料的选择及研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30 (13) : 87-93, 101. **AUTO1950**