

商用车发动机活塞的发展趋势

林风华^{1,2}, 石小明^{1,2}, 刘世英^{1,2}

1. 滨州渤海活塞有限公司, 山东 滨州 256602; 2. 山东省发动机活塞摩擦副重点实验室, 山东 滨州 256602

摘要:根据发动机发展趋势以及活塞的结构特点,分析铝合金活塞和钢活塞强化措施和强化部位;从发动机效率提升角度分析活塞轻量化和活塞及其组件间的匹配性。分析结果表明:活塞本体以及特殊部位强化是高强化活塞的发展方向,强化后活塞承受最高爆发压力可达到30 MPa;活塞轻量化、低压压缩高度设计、低摩擦磨损设计、头部隔热涂层的应用以及活塞冷却的精细化管理,能够提高发动机热效率,是未来商用车发动机活塞的发展趋势。该分析可以为内燃机活塞行业的发展提供参考。

关键词:活塞;高强化;低油耗;热效率;发展趋势

中图分类号:TK401

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2021)06-0076-05

引用格式:林风华,石小明,刘世英.商用车发动机活塞的发展趋势[J].内燃机与动力装置,2021,38(6):76-80.

LIN Fenghua, SHI Xiaoming, LIU Shiyong. Development trend of piston for commercial vehicle engine[J].

Internal Combustion Engine & Powerplant, 2021, 38(6):76-80.

0 引言

节能减排、绿色制造、循环经济是内燃机发展总体趋势。高效、低碳、近零排放已成为内燃机发展的方向。提高内燃机热效率、降低二氧化碳排放等同于降低油耗,是全球内燃机技术发展的最大挑战和首要目标。重型柴油机有效热效率的短期目标是达到50%,中长期达到55%以上^[1-2]。内燃机产业需要发展高强化整机技术、高性能关键零部件技术、先进燃烧技术、低摩擦技术、低消耗功附件、轻量化以及余热能利用等关键技术。活塞作为发动机的核心零部件,与上述7项技术中的6项息息相关。

根据《中国制造2025》的总体目标,我国内燃机技术发展的总体目标是:到2025年自主创新和自主开发能力得到显著提高,原始创新能力和创新技术实现领跑,关键技术和关键零部件实现突破,内燃机热效率和有害排放水平达到国际先进水平^[3]。核心零部件活塞的开发及其国产化对于国家节能减排政策顺利实施,保障国民经济持续健康发展和国防安全,建立我国安全、自主、可控的内燃机工业生态至关重要。

十四五期间,活塞企业需进一步夯实关键零部件和配套部件技术基础,提升发展创新能力,必须在国六及后国六时代为高性能发动机活塞制定清晰的技术路线和有效的解决措施。针对高强度、轻量化、高效率的需求,研发适应于未来发动机发展需求的核心零部件新技术,突破内燃机升级换代的瓶颈。

1 活塞材料及加工强化措施

提高缸内燃烧温度和提升爆压势必提高发动机强化水平^[4-5]。活塞承受交变的热-机耦合应力,必须对活塞的材质和加工工艺进行优化,提高活塞可承受的应力极限,才能满足高强化发动机的可靠性和耐久性需求^[6-7]。

收稿日期:2021-08-30

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010114)

第一作者简介:林风华(1964—),男,山东滨州人,研究员,主要研究方向为内燃机活塞设计,E-mail:lfh@bhpiston.com。

1.1 材料选择

商用车发动机活塞材料以铝合金和钢质材料为主^[8-10]。在特定的工况负荷下,铝合金材料承受的温度极限可达到 400 °C,温度过高,燃烧室喉口因高温导致材料性能下降而产生疲劳开裂^[11],因此若进一步提升负荷,则需采用钢质材料。目前轻型商用车活塞材料仍然以铝合金材料为主,而重型发动机活塞则逐步开始选择使用钢质材料^[12-13]。

铝合金材料主要以共晶铝硅合金为主,可以通过调整合金成分不断改善和提高材料性能,特别是高温疲劳性能。钢活塞的主流材料为 38MnVS6 和 42CrMo。铝硅合金新材料研发主要通过调整材料成分并结合成型工艺,提高铸件成型的金相等级,促使合金相弥散分布,提高活塞的高温延展性,从而提高活塞高温抗疲劳性能。钢质材料需要开发新的高温抗氧化材料,材料的高温抗氧化性越好,可承受的燃烧温度越高。燃烧温度高有利于提高发动机整机热效率。某公司的活塞材料综合性能与生产成本的关系如图 1 所示。

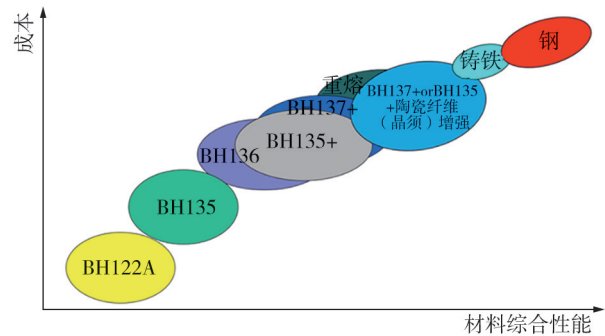


图1 活塞材料综合性能与生产成本的关系

1.2 铝合金强化技术

传统铸造铝合金活塞为重力铸造,模具冷却方式为随机冷却。随着发动机强化程度的提高,发动机最高爆发压力越来越高,燃烧室喉口、销孔常出现疲劳开裂失效。因此,在现有材料铸件的基础上,提升铸件性能特别是高温抗疲劳性能尤为关键,通过控制铸件的冷却速率,提升活塞金相致密性,增强材料本体强度,如马勒 Top Cast 技术和国内某公司开发的铝硅合金活塞金相强化技术 (combustion bow rim metallographic refining, CMR)。CMR 主要解决了 3 个问题: 1) 利用随型模具冷却结构和二次浇注工艺系统设计,突破了冷却面积狭小的限制和一次浇注成型温度梯度分布不均的弊端,奠定了活塞金相强化工艺技术的基础; 2) 通过采用模糊理论控制单组内循环冷却参数,实现对模具温度控制,解决活塞复杂型面顺序凝固和金相细化的行业难题; 3) 开发了活塞浇注随流细化加入系统,解决了传统精炼细化的时效性和沉积性问题,实现了对 α 铝基体的晶粒细化,提升了活塞性能。

为进一步提升燃烧室喉口抗疲劳性能,活塞生产企业还开发了重熔激冷再结晶技术,提高喉口的疲劳性能。采用该技术后,初晶硅长度可由 60 μm 减小为 6 μm ; 活塞喉口热疲劳性能可提高 4.2 倍,活塞热疲劳寿命测试试验结果如图 2 所示。此外,在燃烧室喉口部位采用陶瓷材料,通过浇铸方式成型。该技术利用陶瓷抗高温性能优良的特点,提高喉口部位的疲劳性能。经试验,燃烧室镶陶瓷后,活塞可耐受 400 °C 左右的高温。

1.3 钢活塞强化技术

重型商用柴油机负荷增加使得传统铝活塞已达到使用极限,越来越多的选择用钢活塞来替代铝活塞。质量大是钢活塞面临的首要问题,通过采用降低活塞压缩高度、增大销孔直径、减小活塞销长度等轻量化设计手段,可以使钢活塞、活塞销等摩擦副组件的质量与铝活塞相当。钢活塞热导率低于铝活塞,一方面造成钢活塞表面温度高于铝活塞; 另一方面钢活塞燃烧室内燃烧温度高于铝活塞,有利于提高燃烧性能,提升燃烧效率和热效率。钢活塞配缸间隙小于铝活塞,有利于降低发动机冷起动及低负荷工况下摩擦功损耗。因此,钢活塞在发动机尤其是重型商用发动机上的应用越来越广泛。

虽然采用钢活塞具有一些优势,但随着发动机负荷的进一步提高,尤其是发动机升功率和爆发压力的进一步提高,钢活塞燃烧室尤其是喉口部位会出现氧化现象。目前钢活塞可承受的极限温度为 450~

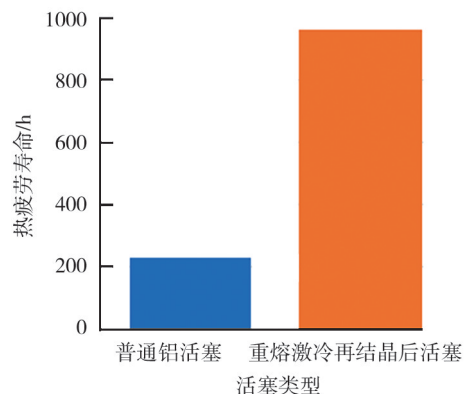


图2 普通铝活塞与重熔激冷再结晶活塞热疲劳寿命对比

500 ℃,高于 500 ℃ 钢活塞氧化明显,无法满足发动机耐久性使用要求。解决钢活塞头部氧化通常采用的技术方案为:研究新型耐氧化钢质材料和头部抗氧化涂层。某公司开发的新一代具有抗氧化涂层、1000 h 耐久试验的钢活塞如图 3 所示。由图 3 可知:耐久试验后活塞外观正常,无氧化剥落现象。

钢活塞需要强化的另一个部位是活塞销孔。随着发动机负荷增加以及活塞组件轻量化设计要求,活塞销孔接触面积减小,接触压力增大,钢活塞销孔局部接触压力可超过 130 MPa。钢-钢摩擦副的配合导致钢活塞销孔极易发生咬合,尽管可以采用活塞销孔镶嵌衬套的方法解决,但衬套费用高,活塞成本增加。由于钢活塞本体硬度高,销孔目前普遍采用镗削加工方式,在加工过程中销孔表面易留下尖锐刀痕,影响活塞销孔承载能力和可靠性,因此必须采用超精加工技术和新的磷化工艺。某公司成功开发销孔表面改性强化技术,强化后粗糙度可达到 Ra0.2。利用该技术进行表面形变强化,可降低镗削加工留下的尖锐刀痕产生的应力集中及缺口效应,同时对表面切削加工形成的材料撕裂进行修复,有效地提高销孔表面承载能力,普通加工和超精细加工的销孔表面分别如图 4、5 所示。



图 3 具有抗氧化性能的钢活塞

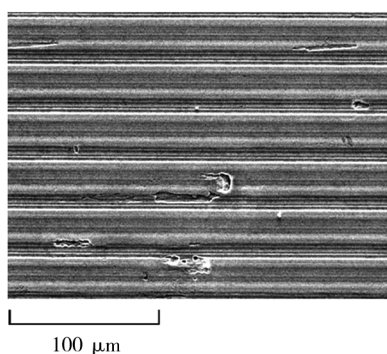


图 4 普通镗削加工销孔表面

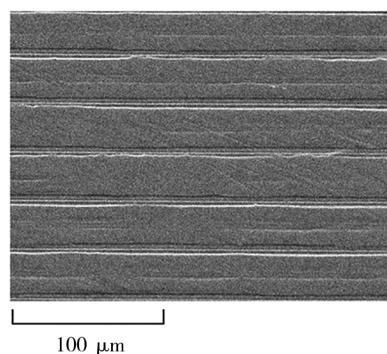


图 5 超精加工销孔表面

负荷增加加剧了活塞环槽的磨损。为降低摩擦功,活塞环高度普遍较小,活塞环刚性较差,导致活塞环扭曲变形增大,活塞环在环槽内的二阶运动不平稳,环槽局部出现磨损,活塞环槽需进行二次硬化。

2 效率提升设计技术

2.1 轻量化设计

减小活塞压缩高度是活塞轻量化设计的一个发展方向。活塞中心线以上的质量占活塞总质量的 75% 以上,减小压缩高度可显著减小活塞质量。降低压缩高度不仅可有效降低发动机缸内组件质量,减小往复惯性力,而且还有利于降低缸体高度,减小整机尺寸与质量,实现发动机小型化和轻量化设计。在整机高度不变的情况下,减小活塞的压缩高度后,允许连杆长度相应增加,减小工作循环内连杆偏转角度,减小活塞裙部与气缸接触面的侧向压力,降低缸内组件摩擦损耗,有利于提高整机热效率,降低燃油消耗^[14]。采用低压缩高度设计后,活塞头部空间减小,活塞销孔与顶面距离减小,活塞冷却油腔布置困难;活塞各部位温度升高,应力-应变增大,销孔承载能力降低,容易发生销孔咬合与拉缸等失效;活塞整体高度减小,活塞裙部支撑面相对较小,活塞偏摆严重,加剧活塞摩擦磨损。活塞轻量化设计的发展趋势是协调处理好活塞结构布局,在降低活塞压缩高度及轻量化的基础上,综合考虑活塞及其与活塞销、活塞环、缸套的配合,保证活塞各部位应力、应变、温度的合理分布,对活塞结构进行拓扑优化和型线优化,保证活塞二阶运动平稳,降低摩擦功。目前新设计的活塞压缩高度可减小为缸径的 50% 以下。

活塞结构创新还需考虑活塞及模具制造成型的可行性,加强活塞成型工艺的研究,如3D打印技术等新成型方法在活塞制造中的应用。

2.2 匹配性

提高发动机热效率是一项系统工程,应使发动机各零部件性能实现最优匹配,提高活塞热效率应做好以下工作。

1) 活塞及其组件的轻量化及低摩擦磨损设计。尤其是减小活塞环高度、降低活塞环组弹力以及应用新型涂层,缸内组件的匹配性优化设计,配合低黏度机油的使用,有望使摩擦功降低30%以上。

2) 发动机近零排放及热管理。对活塞燃烧室部位进行超精加工,配合发动机先进燃烧技术保证燃料充分燃烧,活塞顶面可采用热障涂层技术,减少内燃机热损失,提升燃料利用率,降低燃油消耗,图6为带有顶面隔热涂层的钢活塞。

3) 全时域工况冷却控制。为保证活塞具有足够的强度及各部位温度控制在合理的限值内,要求活塞具有良好的冷却效率。随着热负荷增加,活塞冷却油腔对机油流量的需求也会增加,导致机油泵机械损失增加,加速机油老化。目前冷却机油的喷油量主要取决于额定功率和最大扭矩的需求量,但在发动机实际运行过程中,发动机工况的变化具有不确定性,活塞温度变化频繁,如果机油喷油量不随负荷变化,会导致活塞与缸套之间的工作间隙不断变化,无法保证活塞与缸套之间处在最佳润滑状态。随着电子喷油泵的普及,未来有望对冷却喷嘴的喷油量进行实时控制,冷却机油的需求将随负荷的变化实时进行调整,研究全时域工况下活塞整体的冷却能力,有助于使活塞等缸内组件始终运行在最佳间隙范围,减小摩擦损失及机油泵机械损失,提高发动机热效率。



图6 顶面隔热涂层钢活塞

3 结语

1) 活塞本体以及特殊部位强化措施,是未来高强度活塞的技术解决措施和发展方向,通过对活塞进行强化,活塞可承受爆发压力有望达到30 MPa。

2) 目前铝合金强化措施主要是如何提高材料高温热机械疲劳性能;今后铝合金强化技术路线将围绕高温合金材料研发、金相组织的致密性和均匀性分布控制、缺陷的控制,结合局部强化技术和成型工艺的优化改进开展工作。

3) 提高内燃机热效率,是全球内燃机技术发展的最大挑战和首要目标,商用车发动机热效率有望提高到55%。通过采取轻量化设计、降低压缩高度设计、降低活塞摩擦磨损设计、头部隔热涂层的应用以及活塞冷却的精细化管理,可为发动机热效率提升做出贡献,也是未来商用车发动机活塞的发展趋势。

参考文献:

- [1] 中国内燃机工业协会. 内燃机产业高质量发展规划(2021—2035)[R]. 北京:中国内燃机工业协会,2021.
- [2] 魏安力. 2030 碳排放达峰 2060 实现碳中和和内燃机责无旁贷[N/OL]. 中国汽车报,2020-10-10[2020-12-20]. http://www.cnautonews.com/houshichang/2020/10/13/detail_2020101037725.html.
- [3] 邢敏. 内燃机工业发展趋势[R]. 第七届内燃机可靠性技术国际研讨会. 北京:内燃机可靠性国家重点实验室,2018.
- [4] BABERG A, FREIDHAGER M, MERGLER H, et al. 柴油机活塞材料的选择理念[J]. 范明强,译. 国外内燃机,2014(1): 56-58.
- [5] BALAGI S A, KUMAR S L, SARANYA S N. Study of combustion characteristics on single cylinder direct injection diesel engine with plasma and HVOF coated ceramic powders on piston crown[J]. Materials Today:Proceedings,2020,33:989-994.
- [6] NICK P, FELIX L, MARTIN D. Thermal analysis of steel and aluminium pistons for an HSDI diesel engine[C]//2019 WCX SAE World Congress Experience. Detroit, USA;SAE International,2019.

- [7] BINDER C, NADA F A, RICHTER M, et al. Heat loss analysis of a steel piston and a YSZ coated piston in a heavy-duty diesel engine using phosphor thermometry measurements[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(4): 1954–1968.
- [8] MAZOUZI R, KELLACI A, KARAS A. Effects of piston design parameters on skirt-liner dynamic behavior[J]. Industrial Lubrication & Tribology, 2016, 68(2): 250–258.
- [9] 张俊青, 李猛猛, 赵旭东, 等. 基于有限元方法的锻钢活塞热分析[J]. 内燃机与动力装置, 2018, 35(2): 77–81.
- [10] 李鹏. 国外商用车发动机活塞的技术发展趋势[J]. 汽车工艺与材料, 2011(2): 16–20.
- [11] 曹洪志, 邹震宇, 陈波, 等. 过共晶铝硅镁合金的研究现状及发展趋势[C]//重庆市铸造行业协会, 重庆市机械工程学会铸造分会. 2012(第22届)重庆市铸造年会论文集. 重庆: 重庆市铸造行业协会, 重庆市机械工程学会铸造分会, 2012.
- [12] UCHIDA N, OSADA H. A new piston insulation concept for heavy-duty diesel engines to reduce heat loss from the wall[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(5): 2565–2574.
- [13] KELLEHRE J, AJOTIKAR N. Piston cooling nozzle oil jet evaluation using CFD and a high speed camera[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2016, 9(2): 291–297.
- [14] 周峰. 高压共轨柴油机活塞组动力学特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.

Development trend of piston for commercial vehicle engine

LIN Fenghua^{1,2}, SHI Xiaoming^{1,2}, LIU Shiyong^{1,2}

1. Binzhou Bohai Piston Co., Ltd., Binzhou 256602, China;

2. Shandong Key Laboratory of Engine Piston Friction Pairs, Binzhou 256602, China

Abstract: According to the development demand of engine and the structural characteristics of piston, the strengthening methods and strengthening parts of aluminum alloy piston and steel piston are analyzed. The light weight of piston and the matching between piston and its components are analyzed from the perspective of engine thermal efficiency improvement. The results show that strengthening of piston body and its special parts is the development direction of high strengthening piston. After strengthening, the maximum burst pressure of the piston can reach 30 MPa. The engine thermal efficiency can be improved by means of piston lightweight, low compression height design, piston low friction and wear design, application of head thermal insulation coating and fine management of piston cooling, which is the development trend of commercial vehicle engine piston in the future. The analysis can provide reference for the development of piston.

Keywords: piston; high strength; low fuel consumption; thermal efficiency; development trend

(责任编辑:刘丽君)