

高强度铸造活塞裙的分析研究

王 斌, 郑卫刚

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 从铸造技术、热处理工艺以及铸造材料等方面入手, 探讨了提高铸造活塞裙强度的合适途径。为实现强度更高、性能更好的活塞提供参考。

关键词: 高强度; 铸造; 活塞裙

中图分类号: TK423.3⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)05-0041-03

Analysis Research on High Strength Casting Piston Skirt

Wang Bin, Zheng Weigang

(Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: From the aspects of casting technology, heat treatment, and casting material, how to improve the strength of casting piston skirt is discussed, which offers reference for the manufacturing of pistons with higher strength and better performance.

Keywords: high strength; casting; piston skirt

0 引言

活塞组所处的工作条件极为恶劣, 是在高温、高负荷、高速运动、润滑不良以及冷却困难等条件下工作的。活塞裙部主要起导向作用和散热作用, 高强度活塞裙不仅能有效地降低活塞重量和往复惯性力, 而且增大了散热面积使热应力明显下降。

由于活塞裙部推力面与气缸壁仅有 $\beta = 80^\circ \sim 100^\circ$ 圆弧能接触, 故在侧推力的作用下, 有将圆的裙部压扁的趋势, 同时迫使销座轴向的裙部伸长。活塞顶上受到气压力的作用, 使活塞顶部在销座跨度内发生弯曲, 并使活塞裙部有向外扩张的趋势。活塞销座处材料堆积, 使裙部的销座方向上产生大于其垂直方向的热变形^[1]。

活塞裙高强度的实现手段有很多, 本文从铸造技术、热处理工艺以及铸造材料等方面入手, 对提高铸造活塞裙强度的合适途径进行探讨。

1 采用新型铸造技术

活塞的铸造方法有: 熔模铸造、重力金属型铸造、低压铸造、差压(反压)铸造、挤压铸造、离心铸造、半固态成形和磁流铸造等。目前 Al-Si 活塞产品多采用重力金属型铸造(中国)、低压铸造(中国的保温冒口低压铸造铝活塞)、挤压铸造(日本)和半固态成形技术(美国、欧洲和日本等发达国家)。

熔模铸造是一种先进的铸造工艺方法, 是少切削无切削加工工艺的重要组成部分。无论是民用工业还是国防工业都广泛地应用熔模铸造方法, 铸件的尺寸精度和表面光洁度都高。应用这一方法可以铸造各种合金(特别是难于机加工的耐热合金)的形状复杂的铸件。

低压铸造凭借经济性好、生产率高等优点而被广泛用于活塞铸造领域, 且其充型能力强, 可控性高。

挤压铸造是使液态或半固态金属在高压下充型和凝固的精确成形铸造技术, 最近几年有较快的发展, 产品品种不断地增多。挤压铸造经时效处理均

能达到较高的力学性能，强度和刚度明显提高。表 1 为各类挤压铸造合金的典型力学性能比较。

表 1 各类挤压铸造合金的典型力学性能比较

类别	牌号	强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%
Al-Si-Mg 系铸造合金	ZL101	252	15.0
Al-Si-Cu 系铸造合金	ZL105	358	11.3
Al-Cu 系铸造合金	ZL201	485	16.7
Al-Mg-Si-Cu 系变形合金	2B50	380	13.0

2 热处理强化

现代活塞一般都为钢顶铝裙，目的就是为减小往复惯性力，从而减少曲轴的负荷。而铝合金的强度和硬度较低，为了能起到合适的支撑和导向作用，必须对铝合金实施热处理以达到薄臂强背的目的。热处理强化主要分为传统工艺和现代工艺，传统工艺主要是增加其对位错运动的抗力，强化机制主要有弥散强化、固溶强化、沉淀强化、细晶强化、形变强化等。常采用的手段为淬火、退火、固溶热处理等。图 1 为固溶热处理温度对常温力学性能的影响^{[3][4]}。

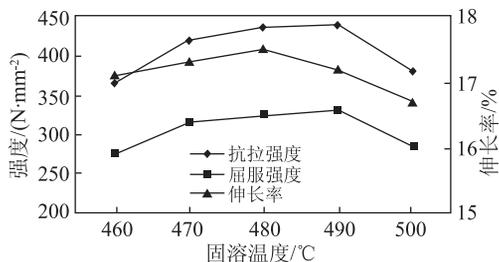


图 1 固溶热处理温度对常温力学性能的影响

现代工艺主要为微弧氧化技术，铝合金经表面微弧氧化热处理后，硬度和强度明显增强，在合金体表面覆盖了抗蚀、耐磨的氧化物陶瓷薄膜，已获得广泛应用^[5]。微弧氧化又称微等离子体氧化，是通过电解液与相应电参数的组合，在铝、镁、钛及其合金表面依靠弧光放电产生的瞬时高温高压作用，生长出以基体金属氧化物为主的陶瓷膜层。铝合金微弧氧化生成以 Al_2O_3 为主的陶瓷膜，且与基体紧密结合，故其硬度和耐磨性相比基体合金显著提高^[6]。由于微弧氧化膜具有比基体合金更高的硬度和弹性模量，且与基体冶金结合，对基体合金拉伸性能的影响较小。有研究发现，微弧氧化膜可以显著提高 LY12 铝合金的抗弯曲能力。

3 采用新的铸造材料

传统铝合金活塞已达到或接近使用极限，为此

寻求新型材料成为解决现有技术不足的最佳途径。随着材料工业的不断发展，更多新型的材料应用到铸造活塞裙上，例如铝基复合材料、陶瓷材料、碳材料、耐热镁合金材料、镁基复合材料等。铝基复合材料凭借质量轻、密度小、可塑性好、比强度高、比刚度好、耐高温、耐疲劳等优点广泛应用于铸造活塞裙领域^[7]。大量研究表明，SiC 增强相的铝基复合材料具有较高的强度，随着 SiC 体积分数的增加，材料强度和刚度增加，但塑性降低。其他增强相的加入使材料有其他的特殊性能，这样不同的金属基体以及增强相的组合使复合材料具有各种优异的性能。表 2 是不同的铝基复合材料的力学性能^[8]。

表 2 不同的铝基复合材料的力学性能

增强相	增强相含量 /(vol%)	拉伸强度 /MPa	弹性模量 /GPa
Al ₂ O ₃ /Al-1.5Mg	20	230	97
SiC/Al-4Cu	15	472	93
SiCP/ZL101	20	375	102

颗粒增强铝基复合材料比较廉价，适合在工业上应用，是 21 世纪最有发展前途的先进材料之一。从理论上分析，颗粒越小，复合材料的弥散强化作用越好，复合材料的性能越佳。如果粒径太小，将导致材料在制备时由于铝合金溶液的粘度大，使得颗粒在液态铝合金中不易分散开来，造成复合材料整体不均匀，而且界面反应也不易控制；颗粒太大，由于颗粒自重产生沉降或上浮，造成严重的铸造偏析，影响铝基复合材料的力学性能。所以，应选择大小合适、密度相当的颗粒，才能使其发挥良好的弥散增强效果，颗粒尺寸通常选取 5 ~ 20 μm ^[9]。表 3 为活塞裙常用铝基复合材料。

表 3 活塞裙常用铝基复合材料

基体材料	增强相	增强相含量 /(vol%)	研制单位
Al 2219	TiC	15-20	Martin
Al 6061	Al ₂ O ₃	10-20	Dural
Al 2124	SiC	10-20	DWA

4 活塞裙强度要求

活塞裙主要起导向作用，在高温高压下承受一定侧压力，为减小磨损，裙与缸套间必须有良好的润滑。当活塞上下运动方向发生改变时，侧推力方向也将随之改变，引起活塞左右晃动并敲击气缸壁，产生冲击振动和噪声。活塞与缸套的间隙越大，冲击振动越严重。

活塞裙必须具有足够长度以承受侧压，使裙部

比压不致过大。比压计算公式:

$$K_{\max} = \frac{P_{H_{\max}}}{DH_2} \quad (\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$$

式中, $P_{H_{\max}}$ 为活塞对缸壁的最大侧压力, N; D 为气缸直径, cm; H_2 为裙部长度, cm。其中 $P_{H_{\max}}$ 可由动力计算求得; 在发动机初步设计时, 亦可按以下经验公式估算:

$$P_{H_{\max}} = 2.7p_1F_p\gamma \quad (\text{N})$$

式中: p_1 为平均有效压力, ($\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$); F_p 为活塞面积, cm^2 ; $\gamma = R/L$ 。

表4列出各种材料活塞裙比压允许值。

表4 裙部比压许用值

材料类型	$K_{\max}/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$
铝合金活塞	50 ~ 100
铸铁活塞	20 ~ 50
高速强载活塞	100 ~ 150

5 总 结

高强度的活塞裙不仅可以有效地减小活塞的往复惯性力, 而且可以有效地降低柴油机曲轴的机械负荷, 减少柴油机的维护工作量。寻求合适的增加

活塞裙高强度的途径, 可以降低活塞裙的制造难度以及制造成本。随着材料工业的发展和热处理技术的成熟, 活塞的质量将变得更轻, 同时性能更好。

参考文献

- [1] 陈大荣. 船舶内燃机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] 齐丕骧, 吴岳壹, 齐霖. 挤压铸造合金材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(1): 28-30.
- [3] 王蕾, 吴光英. 2024、7075 铝合金热处理的工艺及设备[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(6): 51-53.
- [4] 于帆, 刚建伟, 张宏伟. 7020 铝合金热处理工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(2): 51-54.
- [5] 段关文, 高晓菊, 满红. 微弧氧化研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(5): 102-103.
- [6] 侯亚丽, 刘忠德. 微弧氧化技术的研究现状[J]. 电镀与装饰, 2005, 27(3): 24-25.
- [7] 侯丽丽, 尹志新, 樊新波. 铝基复合材料的研究现状及发展[J]. 材料热处理技术, 2008, 37(10): 84-85.
- [8] 王宇鑫, 张瑜, 严鹏飞. 铝基复合材料的研究[J]. 上海有色金属, 2010, 31(4): 194-195.
- [9] 赵龙志, 杨敏. 颗粒增强铝基复合材料的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(20): 107-109.

(上接第31页)

4 结 论

我国自主开发的柴油机越来越多, 目前柴油机的声学性能越来越受到关注, 柴油机的声学设计应该纳入到柴油机的整个开发周期中。柴油机振动噪声的主要激励源是气缸最高燃烧压力和运动部件所产生的不平衡的往复惯性力与回转惯性力, 而在做整机振动噪声分析时, 如果直接将曲柄连杆机构纳入进行计算会增加很大工作量。因此, 本文研究了一种大缸径低速柴油机振动激励力分析方法, 该方法采用虚拟样机仿真分析软件, 应用气缸示功图直接加载方式, 将多刚体与多柔体技术相结合, 得到柴油机机体各轴承上的受力频域和时域曲线。并且, 本文以8K90MC-C低速柴油机曲轴连杆机构为对象, 开展了柴油机轴承座受力的实例分析, 证明了该方法是可行的。尽管该方法是在理想状态下进行的, 仿真所得到的主轴承受力与柴油机在实际工

作状态下的结果会存在一定的偏差, 但是从柴油机优化设计的角度, 该计算结果可以反映大缸径柴油机的振动特性, 具有一定指导意义, 可为下一步柴油机的振动计算提供依据。计算得到的得到柴油机机体各轴承上的受力频域和时域曲线可以作为柴油机振动噪声分析的激励, 开展柴油机声学设计, 为后续柴油机振动、噪声优化设计提供支撑。本文仅以二冲程低速柴油机为对象开展研究, 该方法也可以应用到四冲程的中高速柴油机激励力分析中。

参考文献

- [1] 瑞峰, 崔志琴. 大功率柴油机组合结构建模技术研究[J]. 内燃机工程, 2003(3).
- [2] 李伟. 舰船推进系统研究中的仿真技术[J]. 热能动力工程, 2000(1).
- [3] 王国治等. 斜盘发动机虚拟样机的动力学仿真分析[J]. 华东船舶工业学院学报, 2004(4).