

蠕墨铸铁发动机的优势及最新进展

金晓春, 刘金城, 史蒂夫·道森
(欣特卡斯特)

摘要: 本文阐述了蠕墨铸铁的性能可以优化发动机的设计和功能。基于在欧洲, 亚洲和美洲的生产经验, 应用蠕墨铸铁可以为减轻发动机的重量、尺寸, 提高动力, 降低噪音、震动和改善不平顺性提供新的机会。对于重载发动机来说更是如此。在乘用车中, 采用蠕墨铸铁可以生产更小更紧凑的发动机缸体, 使得整装蠕墨铸铁发动机比同样排量的铝合金发动机重量更轻。文中以V6和V8柴油发动机为例阐述了这种设计。

关键词: 蠕墨铸铁; 发动机; 生产经验; 最新进展

1 前言

虽然在 1948 年人们就首次观察到了蠕虫状石墨铸铁, 但是稳定生产蠕墨铸铁所需的狭窄控制范围妨碍了像气缸体这样复杂蠕墨铸铁零件的大批量生产; 直到有了先进的过程控制技术, 大批量生产才成为可能。还有, 大批量生产还必须等到现代测量电子学和计算机技术的到来。随着上世纪九十年代铸造技术的发展和铸造方案的解决, 第一款批量生产的发动机气缸体在 1999 年开始生产。现在, 每个月为发动机和汽车制造商生产的蠕墨铸铁气缸体超过 50,000 个, 其中包括: 奥迪、克莱斯勒、达夫、戴姆勒、福特、现代、美洲豹、吉普、路虎、曼、纳维斯达、梅赛德斯、标致-雪铁龙、雷诺、斯坎尼亚、大众和沃尔沃。

排放法规和对小体积高比性能的需求继续驱动柴油发动机技术的发展。虽然较高的最高点火压力 P_{\max} 提高了发动机的燃烧效率, 造成的增加的热负载和机械负载需要新的设计方案。鉴于新发动机设计方案通常倾向于支持 3 到 4 代的车辆, 所选用的工程材料必须既能满足当前设计需求, 同时又能为未来性能的提升提供潜力, 而且无须改变缸体的整体结构。蠕墨铸铁能很好地满足当前的和将来的发动机设计和功能的需求。

2 发动机设计的机会

与传统灰铸铁相比, 蠕墨铸铁提供了以下机会: ①在当前运行负载下减小壁厚; ②通过提高 P_{\max} 和负载提高比性能; ③由于减少了铸态性能波动, 可减小安全系数; ④减小缸筒的膨胀和变形; ⑤降低噪音, 震动和改善不平顺性 (NVH); ⑥缩短螺纹啮合深度从而缩短螺栓长度。

上世纪 90 年代中期, 大多数蠕墨铸铁开发活动集中在减重方面。表 1 给出了不同铸造厂家和发动机制造商进行的设计研究中所获得的减重数据。括号中的减重数据指的是由发动机制造商正在生产的和已经发表的蠕墨铸铁气缸体减重百分比。以 xx.x 为标记的气缸体不曾用灰铸铁生产过, 但是发动机制造商对每一个案例都公开表示过, 如果该气缸体用普通灰铸铁来生产, 需要额外增加重量以满足耐久性的需求。虽然减重潜力取决于原始气缸体的尺寸和重量, 表 1 所示的数据表明, 灰铸铁转换设计成蠕墨铸铁时, 减重 10%~15% 的数值是合理可行的。

表 1 与灰铸铁气缸体相比, 蠕墨铸铁气缸体重量降低数据

发动机尺寸 (升)	发动机类型	灰铸铁缸体重量 (kg)	蠕墨铸铁缸体重量 (kg)	减重 百分比
1.6	直列-4 缸汽油机	35.4	25.0	29.4
1.8	直列-4 缸柴油机	38.0	29.5	22.4
2.0	直列-4 缸汽油机	31.8	26.6	16.4
2.5	V6 (赛车)	56.5	45.0	20.4
2.7	V6 柴油机	xx.x	厂家保密	(15)
3.0	V6 柴油机	xx.x	厂家保密	(25)
3.3	V8 柴油机	xx.x	厂家保密	(10)
3.8	V8 柴油机	xx.x	厂家保密	(20)
4.0	V8 柴油机	xx.x	厂家保密	(15)
4.2	V8 柴油机	xx.x	厂家保密	(20)
4.6	V8 汽油机	72.7	59.6	18.0
9.2	直列-6 缸柴油机	158	140	11.4
12.0	V6 柴油机	240	215	10.4
12.4	直列-6 缸汽油机	xx.x	厂家保密	(15)
14.6	V8 柴油机	408	352	14.2

虽然蠕墨铸铁提供了显著减重的机会, 开发新型蠕墨铸铁发动机的主要动力相对于灰铸铁和铝合金, 其疲劳强度增加一倍, 从而能增加功率密度。一家发动机制造商的研究表明, 一个以蠕墨铸铁为缸体 1.3 升发动机可以具有以灰铸铁为缸体的 1.8 升发动机的功能。为了达到这样的功能提升, P_{\max} 增加了 30%, 缸体的重量反而减轻了 22%。尽管提高了 P_{\max} , 台架疲劳分析表明减重的蠕墨铸铁气缸体比原来的灰铸铁气缸体提供了更大的安全系数裕量, 从而指明进一步提高发动机的功能是可能的。与原来发动机相比, 整装蠕墨铸铁发动机长度减少 13%, 高度降低 5%, 宽度减少 5%, 重量减轻 9%。主轴承座厚度减薄从而能使气缸体变得更短, 这意味着所有其它横贯发动机长度的零部件也可以设计得更轻更短。这使得蠕墨铸铁发动机比铝合金发动机更具重量-竞争力。

蠕墨铸铁发动机的另外一个优点是抵抗气缸筒变形的能力。在高温和高燃烧压力的共同作用下, 气缸筒会产生弹性膨胀。然而, 蠕墨铸铁的高强度和高刚度能更好地抵抗这些作用力并维持缸筒原有的尺寸和形状。减小缸筒变形可以减少活塞环张力和摩擦损失。改善配合度也减少了冷启动时的活塞撞击, 从而降低了噪音、震动和改善不平顺性 (NVH); 减少了油耗, 延长加油周期; 并且减少了漏气, 防止减少转矩损失。表 2 给出了 4 种同样设计的灰铸铁和蠕墨铸铁发动机相对缸筒变形结果。

表 2 灰铸铁和蠕墨铸铁发动机相对缸筒变形

发动机排量(升)	发动机类型	相对灰铸铁, 蠕墨铸铁可以改进/%
1.8	直列-4 缸汽油机	18
1.8	直列-4 缸柴油机	20
2.2	直列-4 缸汽油机	28
4.6	V8 汽油机	22

蠕墨铸铁的高弹性模量对降低噪音、震动和改善不平顺性做出贡献。虽然蠕墨铸铁比震动衰减率低于灰铸铁，但是较高的弹性模量使缸体不易变形，可以减少许多加强筋板。增加 40% 的弹性模量，增加了燃烧点火频率和气缸体共振频率之间的频率间隔。频率间隔增加的净结果就是发动机运行的更安静。在半消声室测定的几种蠕墨铸铁发动机（包括乘用车和商用车发动机）一阶扭转频率模式的增加和噪音降低水平，如表 3 所示。

表 3 对比结果

发动机排量 (升)	发动机类型	一阶扭转频率变化/%	声压水平(dBA)
1.8	直列-4 缸柴油机	+12	相同
2.0	直列-4 缸汽油机	+8	-1.0 to -1.5
2.0	直列-4 缸汽油机	+7	-1.0 to -1.5
2.2	直列-4 缸汽油机	+16	-1.0 to -1.5
2.4	直列-4 缸柴油机	+9	-1.0 to -1.5
4.6	V8 汽油机	+12	未测试
5.8	V8 汽油机	+18	未测试
12.0	V6 柴油机	+8	-0.5 to -1.0
13.8	直列-6 缸柴油机	+8	未测试

与灰铸铁和铝合金相比，蠕墨铸铁的性能为提升乘用车和商用车发动机设计和功能提供许多机会。因为蠕墨铸铁气缸体 1999 年就开始生产了，现在蠕墨铸铁已经成为大批量生产发动机可靠的材料。蠕墨铸铁已经成为 V 型柴油发动机标准设计材料，最新的 15 款 V 型柴油乘用车发动机中的 14 款已经确定采用蠕墨铸铁气缸体。蠕墨铸铁已经更扩展到商用车方面，每一个欧洲重载发动机生产商都至少有一款蠕墨铸铁发动机正在生产。或许关于蠕墨铸铁最引人注目的统计数据是，每一家开发了和推出了一款欣特卡斯特蠕墨铸铁发动机，制造商都获得很好的结果并且还要继续开发和推出更多的蠕墨铸铁发动机。

3 蠕墨铸铁的发展和市场

近年来蠕墨铸铁发动机发展情况及趋势，如图 1 所示。2008 年产量降低是由于美国的金融危机，2012 年的降低是由于欧洲的欧债危机，2013 年已经开始回升。

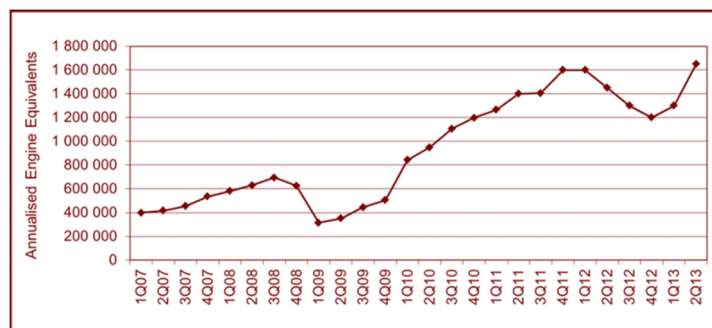


图 1 近年来蠕墨铸铁发动机发展情况及趋势

1999 年第一台蠕铁发动机：奥迪 3.3 升 V8；2003 年第一种大批量生产的蠕铁发动机：福特 2.7 升 V6；2007 年商用车开始量产。当前蠕铁发动机产量：100,000 吨/每年，5 年展望：225,000 吨

/每年。

中国是世界铸件生产大国，也是蠕铁生产大国。欣特卡斯特期待能够在中国开发高效，节能的蠕墨铸铁发动机的过程中作出贡献。