重型车用柴油机活塞结构及材料的发展趋势

□ 马勒技术投资（中国）有限公司/曾少波

在内燃机中，活塞作为气缸中往复运动最大的一个零部件，工作条件最为严酷，工作强度最大，承受着高的热负荷、机械负荷和强烈的磨损，经常处于高温、高负荷、高速、润滑不良、冷却困难的情况下，易产生各种故障，直接影响整机的性能、经济性、可靠性和耐久性。而材料和结构是决定活塞性能的关键因素。为此，从重型车用柴油机活塞的工作环境及开发要求以及国家对排放、燃油消耗不断提出更高要求出发，就铝活塞、钢活塞的应用现状及发展动态作以评述。

活塞工作条件

活塞在极恶劣的环境下工作，直接承受高温、高压的气体力、惯性力、侧向力以及作用在重心上的力矩。活塞顶面承受的气体压力，对重型车用柴油机来说，批量生产的普遍已经达到16～17.5MPa，即将量产的也普遍达到18～20MPa，开发中的则有的更高。

活塞在工作中承受很高的热负荷；与顶面直接接触的燃气最高温度约2 000℃，循环平均温度约800℃，热量通过对流以及辐射等方式传到活塞顶面，使得铝活塞顶面的最高温度一般都超过300℃。如果燃烧室缩口率较大，则顶面的最高温度可达到350℃，甚至更高；对钢活塞而言，顶面最高温度可达450～500℃，在超负荷试验中达到甚至超过550℃。

因此，活塞工作条件对活塞材料提出了以下主要要求：具有高的机械强度，尤其是具备较高的高温强度；小的热膨胀系数，使得活塞与缸孔之间有合适的间隙，活塞运行平稳；低密度，减小活塞的质量及惯性力；吸热性差而导热性好；具备良好的耐磨损、耐腐蚀性能；工艺性好，易加工。

随着国家排放法规的不断升级及市场对重型柴油机的动力需求不断攀升，重型柴油机的强化程度，即爆发压力、升功率不断增加，这导致活塞的机械负荷、热负荷不断增加。

重型车用柴油机活塞结构

1.铝合金活塞

带内冷油道的铝活塞有潜力承受18～20MPa以下的爆发压力，这也是国Ⅳ、国Ⅴ阶段国内重型柴油机主要采用的活塞类型，也是目前应用的最为广泛的活塞。其主要分为两种形式：开式油道及闭式油道。

在开式油道活塞中，冷却喷钩出口与缸孔轴线有一夹角，即呈倾斜方式，随着活塞上下运动，油束的落点在不断的发生变化，在一个工作循环里冷却油分成两部分：大部分进入内冷油道通过振荡冷却以达到活塞降温的目的；少部分进入活塞内腔，参与到对连杆小头孔、销、销孔的润滑，改善销联接副的润滑，降低磨损及咬销的风险。

在闭式油道中，冷却喷钩出口与缸孔轴线平行，在活塞的上下运动中，油束始终对准活塞的进油孔；为了改善销联接副的润滑，在内腔上部钻油孔与内冷油道联通，使得部分冷却油从该孔喷射到连杆小头上已达到对销联接副的润滑目的。

通常情况下，闭式油道的活塞的进油效率一般达到60～80%，可以使活塞得到更好的冷却。

2.钢质活塞

当爆压达到18～20MPa甚至更高时，铝活塞在燃烧室喉口部位遇到非常大的挑战，钢活塞是个稳妥的选择，其主要结构形式有铰接式钢活塞、全钢独体式钢活塞、摩擦

焊钢活塞及激光焊钢活塞。首先在国内得到大规模应用的是铰接式钢活塞、全钢独体式活塞及摩擦焊钢活塞。

铰接式钢活塞采用钢头、铝裙形式，通过活塞销将其联接起来，在工作中导向和密封作用分开实现。锻钢活塞头承受气体压力，然后经活塞销，连杆传至曲轴；轻质的铝裙仅承受侧向力。钢质头部也可采用封闭的冷却腔达到较好的冷却效果。铰接式活塞除了高强度和耐热性，磨损情况也很好。但其最大缺点是整个活塞组件的重量比铝活塞组件增加30%以上。

全钢独体式活塞采用一体式锻钢结构，整个活塞组件减重效果显著，比铰接式活塞组件减重15%以上，优化之后甚至接近铝活塞组件的重量；可实现最低50%缸径的压缩高；为改善活塞冷却性能，冷却油道采用弹性钢片封闭。全钢活塞目前广泛应用于爆压20MPa左右的重型柴油机。

摩擦焊钢活塞相对于全钢独体式活塞，裙部长度明显增加，对导向有利，减小了活塞二次运动的幅度；在爆压大于23～24MPa下环槽变形更小，整体结构更坚固。因为整体结构强度提升，内冷油道可以进一步靠近燃烧室以降低燃烧室喉口温度。专门的温度试验显示摩擦焊钢活塞燃烧室喉口温度在早期运行时比全钢独体式的低50℃左右；但是其过大的冷却油道截面积降低了充满率（15%～30%），焊接部位过大的焊接飞边也对冷却油在油道内的振荡冷却造成不利影响。另外，冷却油道过于靠近燃烧室导致油道顶部温度明显升高，积碳更容易在油道顶部生成。在专门的超负荷耐久性试验中，摩擦焊钢活塞内冷油道顶部积碳明显厚于全钢式活塞，两种钢活塞的燃烧室喉口温度相当。

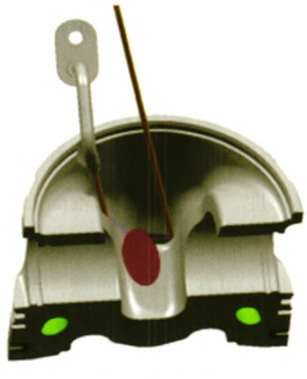
激光焊钢活塞相比于摩擦焊钢活塞，内冷油道内几乎没有焊接飞边，这样可以实现较好的振荡冷却效果；同时在内冷油道截面设计上比摩擦焊钢活塞的有更大的自由度，其可实现50%～60%的充满率，即实现更好的冷却；与摩擦焊相比，因为焊接部位的变化，其可实现低于50%缸径的压缩高，这给发动机整机降重提供了很好的实现途径。

重型柴油机活塞材料

据重型柴油机的要求，在国内市场实际应用最多的主要是铸造铝合金及锻钢活塞，国外（主要是日本市场）还有球墨铸铁活塞应用。

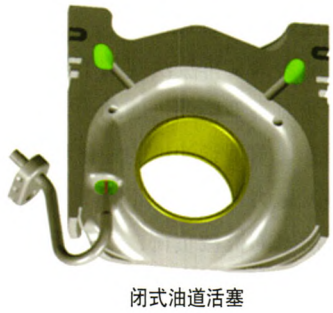
1.铝合金活塞

铝合金的密度比钢铁的小很多，可以减小活塞的质量及往复运动的惯性力。但是受限于铝合金的高温强度及重型车用柴油机的使用环境，燃烧室最高温度一般限制在



开式油道活塞

全钢独体式



闭式油道活塞

摩擦焊钢活塞

铰接式

激光焊钢活塞

350～360℃以下。相比较以往，最新的铝合金材料在高温强度上有了明显提升。

在国内使用广泛的铸造铝活塞材料牌号有ZL109，AC8A，KS1275，M124，M142，M174+，KS1295，JB2，BH135，BH136，B2(+)，S2N等。

2.氧化铝陶瓷纤维增强铝合金活塞

用结晶态三氧化二铝陶瓷纤维镶铸在燃烧室部位来增强活塞燃烧室喉口的抗开裂能力，表现出良好的导热性及抗开裂能力，其制造工艺已经成熟。

但是带冷却油道结构及陶瓷纤维增强的活塞在压铸过程中的复杂性导致成本大幅增加却限制了其大规模推广使用的可能性。

3. 钢活塞

钢是最重要的工程材料之一，与铝合金相比，钢的机械强度高、热膨胀系数小、耐磨损性能好，但是密度大、加工难度大、成本高。在锻钢的材料应用上，主要是38MnVS6及42CrMo4。其使用温度限值可达500～550℃。

结语

（1）随着国家法规的收严及市场的需求，重型柴油机大功率、高爆压的趋势越来越明显，活塞的工作环境变得更加恶劣，活塞的工作条件势必对活塞材料提出更高的要求，与此同时，活塞的结构对强度、冷却、机油耗等也有影响。从目前的发展趋势来看，国三、国四阶段采用钢活塞的机型很少；进入国五阶段，将有更多的重型柴油机采用钢活塞；当国六开始执行时，铝活塞基本上会退出重型柴油机市场，绝大多数重型柴油机将会采用钢质活塞。

（2）摩擦焊钢活塞虽然整体强度高，但由于甚大的飞边，油道设计优化及冷却效率提升受到限制，需要开发新的摩擦技术减小飞边并具备降低压缩高的潜力。

（3）激光焊钢活塞整体强度、裙部导向能力与摩擦焊钢活塞相当，冷却油道设计、制造的自由度远高于摩擦焊，再加上本身具备实现低压缩高的能力，从长期发展来看，其将是钢活塞结构的主要形式。AUTO1950

（上接第71页）

（5）以两端60° 倒角为基准，滚渐开线花键。

（6）采用直角弯板，以ϕ100f7轴径及工艺菱形销定位，卧式加工中心铣叉口两端面，镗主销孔（见图5）。

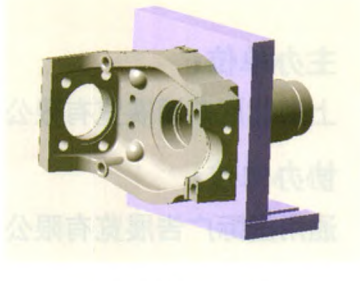


图5 弯板定位三维模型

通过V形铁支撑，自制心轴找正；加工时以ϕ100f7轴径定位，在卧式镗床上加工内孔，V形定位的定位误差＜ϕ0.008mm，加工后，内孔与轴径同轴度误差＜ϕ0.03mm，完全满足图样＜ϕ0.05的要求。采用直角弯板，以ϕ100f7轴径及工艺菱形销定位定位，在卧式加工中心上加工主销孔及叉口两端面，主销孔位置度＜ϕ0.08mm（图样要求＜ϕ0.10mm），两叉口端面垂直度＜0.04mm，完全满足图样＜0.05mm的要求。

结语

通过对加工后的成品进行检测，结果表明所有检测项均满足设计要求，完成了前驱动桥转向节的机加工作。

通过前驱动桥铸造转向节的试制加工，验证了一体式驱动桥转向节的结构合理，加工工艺可行，同时为后续转向节的批量生产提供了经验。对等温淬火球墨铸铁的机械加工知识有了进一步了解，对于等温淬火球墨铸铁的加工刀具的选用以及切削参数的选取有了较多积累。AUTO1950

翟来涛

中国第一汽车股份有限公司技术中心试制部总成试制室主任工程师。长期从事变速器、驱动桥等传动系统总成开发工作，在变速器、驱动桥总成开发方面有丰富经验。目前主要负责驱动桥、前轴、传动轴等新产品试制工作。