

توسعه یک موتور احتراقی کوچک دوار SI / CI

چرخه هیبریدی با توان بالا

همانطور که از نام آن مشخص است، HEHC تلاش می‌کند تا بهترین ویژگی‌های چند چرخه ترمودینامیکی شامل دیزل¹، اتو² و اتکینسون³ را با هم ترکیب (هیبریداسیون) کند تا موتور با بازده بالا ایجاد کند. در بهترین شکل، HEHC ویژگی‌های زیر را با هم ترکیب می‌کند:

- نسبت تراکم بالای هوا (مانند چرخه دیزل)
- احتراق حجم ثابت (ایزوکوریک) (مانند چرخه اتو) احتراق طولانی مدتی در حجم نزدیک TDC (نقطه مرگ بالا) انجام می‌دهد.
- انبساط بیش از حد تا فشار اتمسفر (مانند چرخه اتکینسون).

چرخه HEHC توسط مایع پیستون توسعه داده شده است و در [7، 8، 9] ثبت شده است. ساختار X که بعدها با جزئیات آن شرح داده شده، برای انجام این چرخه طراحی شده است، و همچنین در [19، 20] ثبت شده است. در نسخه احتراق تراکمی (CI) چرخه HEHC، هوای تازه (بدون سوخت) تا یک CR بالایی در محفظه احتراق متراکم شده است. سوخت درست قبل از نقطه مرگ بالا به درون محفظه احتراق تزریق شده است و CI (احتراق تراکمی) اتفاق می‌افتد. حداکثر احتراق تحت شرایط نسبتاً حجم ثابت اتفاق می‌افتد، این حالت با قرار گرفتن طولانی مدت حجم محفظه احتراق در نزدیکی TDC بدست می‌آید. سپس گاز حاصل از احتراق تا حجم بیشتری نسبت به حجم

¹ Diesel

² Otto

³ Atkinson

مکش اولیه منبسط می‌شود. شکل 1 نشان می‌دهد که یک منطقه بسیار بزرگتری را، در مقایسه با چرخه‌های اتو و دیزل، توسط منحنی‌های ترمودینامیکی پوشش داده شده است، بنابراین نشان دهنده بازده بیشتری است.

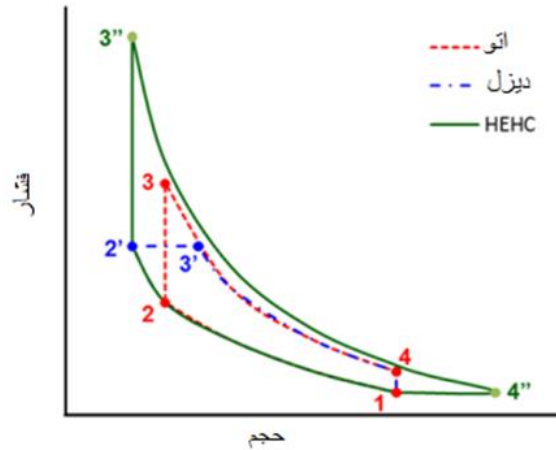
چرخه HEHC همچنین می‌تواند با SI عمل کند، اگر چه با بازده کمتر. در این حالت مخلوط سوخت و هوا تا یک نسبت تراکم پایین تری، مشابه سیکل استاندارد موتور اتو متراکم شده است. کاهش در CR موجب کاهش بازده در مقایسه با CI می‌شود، اما قرار گرفتن حجم احتراق در نزدیکی TDC باعث فشار حداکثر و بازده بالاتری نسبت به موتورهای پیستونی که به صورت SI عمل می‌کنند، می‌شود. این موضوع به تغییرات آهسته تر جابه جایی در نزدیکی TDC نسبت به موتورهای پیستونی مرتبط است. انبساط بیش از حد مانند چرخه اتکینسون موجب افزایش بازده می‌شود. قرار گرفتن حجم در TCD به موتور این اجازه را می‌دهد که احتراق حجم ثابت (ایزوکوریک اضافی) واقعی-تری، در مقایسه با انجام پیستون با چرخه اتو بدست بیاید

چرخه HEHC با تکنیک های تقویت سازگار است، در درجه اول با اضافه کردن یک سوپرشارژر اثر آن در افزایش فشار دیاگرام PV خواهد بود. اگر انبساط بیش از حد تا نزدیکی فشار اتمسفر بدست آمده باشد، یک توربو شارژر نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما یک سوپرشارژر هنوز هم کار خواهد کرد. در این مقاله ما در مورد حالت بدون سوپرشارژر تمرکز خواهیم کرد.

مدل ترمودینامیکی استاندارد HEHC گاز ایده آل با هدف مقایسه با چرخه‌های استاندارد اتو گاز ایده آل (حرارت اضافی حجم ثابت) و دیزل (حرارت اضافی فشار ثابت) ارائه شده است. شکل 1 مقایسه کیفی دیاگرام حجم ثابت (P-V) برای هر چرخه را نشان می‌دهد. تحلیل چرخه‌های اتو و دیزل استاندارد گاز ایده آل برای اهداف تئوری مفید است تا روند بازده را توضیح دهند، و یک بحث مشترک در بسیاری از کتاب های درسی موتور احتراق داخلی است. این چرخه‌های استاندارد گاز ایده آل فرض‌های زیر را در نظر می‌گیرند:

- سیال کاری گاز ایده آل با گرمای ویژه ثابت است.
- احتراق به صورت انتقال گرما به محیط از منبع خارجی در حجم ثابت (HEHC و اتو) یا فشار ثابت (دیزل) مدل شده است.

- هر دو فرآیند های تراکم و انبساط به صورت آدیاباتیکی و برگشت پذیر هستند.
- چرخه با انتقال حرارت به محیط کامل می-شود.



شکل 1 مقایسه نمودار P-V چرخه‌های استاندارد گاز ایده آل

بازده‌های حرارتی هر چرخه گاز ایده آل با جزئیات قبلا در مقاله‌های [10، 11، 12، 13 و 14] و همچنین در کتاب [15] توضیح داده شده اند و در اینجا توضیح داده نخواهند شد. بازده‌های حرارتی هر چرخه به صورت زیر می‌تواند نوشته شود:

برای یک مقایسه کمی چرخه‌ها مقادیر زیر انتخاب شده‌اند: CR برای چرخه اتو 9.5، برای HEHC 18.5 و برای چرخه دیزل 18.5 است. نسبت حرارت مخصوص گاز 1.4 فرض شده است. فشار مکش (p_1) و دما (T_1) به ترتیب 101 kPa و 300 k فرض شده‌اند. انرژی ورودی در حین فرایند احتراق برای همه چرخه‌ها 1816 kJ/kg فرض شده است. جدول 1 مقایسه کمی چرخه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این تحلیل بازده ترمودینامیکی ایده آل HEHC (η) 38 درصد بیشتر از دیزل، و 35 درصد بیشتر از چرخه اتو است.

بازده واقعی برای هر چرخه کمتر از چرخه استاندارد گاز ایده آل آن است. انحرافات از چرخه ایده آل شامل نشتی (توسط ضربه)، انتقال حرارت، اصطکاک، اتلافات مکانیکی دیگر، تلفات پمپاژ، و حرارت مخصوص و خواص گاز می-شوند که تابعی از فشار، دما و محتویات سیلندر (مخلوط هوا-سوخت) هستند.

یک مدل ترمودینامیکی صفر بعدی از HEHC و ساختار X با استفاده از معادلات چرخه سوخت- هوا با اقتباس از [15] ساخته شده است. مدل صفر بعدی بیشتر شامل استفاده از زیر مدل‌هایی می‌شود که محفظه‌های کاری و دریچه‌ها، خواص ترمودینامیکی گازهای سوخته و نسوخته، جرم و انرژی منتقل شده از میان مرزهای سیستم و فرآیند احتراق را توصیف می‌کند. انتقال حرارت با استفاده از رابطه Woschni مدل شده است و انتقال جرم، شامل نشتی، با استفاده از معادلات جریان تراکم پذیر یک بعدی برای جریان از میان یک ارفیس⁴ مدل شده است. احتراق (اضافه شدن حرارت) از طریق توابع Wiebe اعمال می‌شود. توصیف کاملی از مدل در خارج از محدوده این مقاله است، اما نتایج تحلیل صفر بعدی نشان می‌دهد که بازده بالا (60 درصد خاص نشان داده شده) با فرضیات معقول برای CR، نشتی، انتقال حرارت و ضرایب جریان انتخاب شده از منابع امکان پذیر است. یک اثر فشار برای مثال و نمودار P-V شبیه سازی در شکل 2 و 3 نشان داده شده است. در قسمت نتایج، فشار شبیه سازی شده در مقابل فشار اندازه گیری شده واقعی نشان داده‌ایم.

ساختار و عملکرد موتور

شکل 4 نمای داخلی از موتور نمونه X1 (1.35 L CI / دیزل) را نشان می‌دهد. یک ویدئو از موتور X مطابق با چرخه HEHC موجود است که به وضوح عملکرد موتور و چرخه را نشان می‌دهد. یک موتور تک روتور، شامل یک روتور، محفظه، شفت خارج از مرکز، وزنه متعادل کننده متقابل، صفحات جانبی مکش/تخلیه و/یا پوشش‌ها می‌شود. همانطور که در شکل نشان داده شده است دارای یک طرح ساده فقط با دو قسمت دوار است. ساختار X1 (70 hp) در حالت CI عمل می‌کند. کوچکترین موتور از گروه، XMV3 (70cc / 3HP)، که بر روی چرخه HEHC اصلاح شده برای عملیات SI عمل می‌کند، یک نسخه کوچکتر از X1 است. توصیف اصول عملیاتی و اجزای این موتور تقریباً مشابه است.

⁴ Orifice

برای تحلیل چرخه ایده آل استاندارد هوا، مقادیر 1.3 تا 1.4 برای نمونه استفاده شده‌اند. تا زمانیکه مقدار مشابه برای مقایسه چرخه‌های مختلف استفاده شده است، روند بازده نشان داده شده است.

عملکرد

محفظه و روتور سه محفظه کاری درون موتور تشکیل می‌دهند (شکل 5 را ببینید). هر یک از این محفظه‌ها به طور پی در پی در حالیکه روتور در آن می‌چرخد، متراکم و منبسط می‌شود. یک چرخه 4 مرحله‌ای درون هر یک از سه محفظه به طور کامل انجام شده است و این به طور همزمان اتفاق می‌افتد. فرآیندها، برای محفظه پایین سمت راست در شکل 5 توضیح داده شده، شامل موارد زیر می‌شوند:

(1) مکش،

(2) تراکم،

(3) احتراق و انبساط و

(4) تخلیه.

موتور پورت بندی شده است و جریان گاز توسط مسیریابی گازهای ورودی و خروجی از طریق روتور به دست آمده است. موتور X1 دارای یک صفحه ورودی برای یک سمت محفظه، و یک صفحه خروجی به عنوان قسمت دوم محفظه آن است. هر صفحه دارای دریچه‌هایی است، که به گاز اجازه می‌دهد تا به محیط (از طریق یک منیفولد) داخل یک کانال درون روتور جریان یابد.

مکش

صفحه مکش دارای سه دریچه است. هوای تازه به طور محوری از منیفولد مکش از میان دریچه جریان می‌یابد. حداقل یکی از سه دریچه همیشه با کانال ورودی درون روتور درگیر است. بنابراین کانال ورودی روتور به طور پیوسته با هوای تازه از منیفولد ورودی تامین شده است. کانال ورودی اجازه جریان گاز به یکی از محفظه‌های کاری

از طریق دریچه روی سطح شعاعی روتور را می‌دهد. وقتی روتور می‌چرخد، دریچه در حال حرکت است، و فقط در معرض یکی از محفظه‌ها در زمان مشخص قرار گرفته است. وقتی فرآیند مکش شروع می‌شود، دریچه ورودی روتور ابتدا در معرض یک محفظه مشخص قرار گرفته است هنگامی که حجم آن حداقل است. موقعیت دریچه ورودی زمان باز و بسته شدن ورودی را تعیین می‌کند. با قرار گرفتن دریچه ورودی بنابراین آن زود یا دیر بسته می‌شود، حجم ورودی نهایی کوچکتر از حداکثر حجم انبساط محفظه خواهد بود، بنابراین تغییر هندسی ساده‌ای می‌تواند استفاده شود تا انبساط بیشتری در موتور بدست آید.

تخلیه

فرآیند تخلیه شبیه فرآیند مکش است، اما در جهت عکس اتفاق می‌افتد. صفحه خروجی سه دریچه دارد که به جریان محوری خروجی از کانال تخلیه در روتور اجازه می‌دهد تا به منیفولد خروجی سرانجام خروج از موتور جریان یابد. در همه زمان‌ها، حداقل یکی از سه دریچه درگیر با کانال خروجی در روتور است، اجازه جریان بدون وقفه را می‌دهد. در ادامه فرآیند انبساط درون محفظه، هنگامی که روتور می‌چرخد، یک دریچه خروجی روی سطح شعاعی روتور به محفظه باز می‌شود. وقتی حجم حداکثر است دریچه باز می‌شود. حرکت روتور باعث کاهش حجم می‌شود، بنابراین موجب جریان گازهای خروجی از محفظه، از طریق دریچه خروجی در روتور، از میان کانال تخلیه داخل روتور، و سرانجام به سمت منیفولد خروجی می‌شود، هنگامی که گاز از میان دریچه‌های صفحه خروجی عبور می‌کند.

تراکم

پس از مرحله مکش، وقتی دریچه ورودی روتور در یکی از محفظه‌های کاری بسته می‌شود، حرکت روتور موجب می‌شود که حجم در محفظه بعثت تراکم گاز کاهش یابد. سرانجام، در TDC، حجم محفظه به حداقل خواهد رسید، حداکثر گاز در حجم ثابت محفظه احتراق قرار گرفته، که اساساً یک دوره رکود درون محفظه است. CR بالا با داشتن محفظه احتراق کوچک بدست آمده است.

احتراق

مرحله تراکم پس از آن احتراق و انبساط است. وقتی روتور به TDC نزدیک می‌شود، در X1، سوخت با استفاده از یک فشار بالای سیستم تزریق سوخت متداول تزریق شده است. برای توسعه نمونه اولیه، ما از پمپ‌های اتوماتیک خارج از قفسه بوش و انژکتورها استفاده کرده‌ایم. در نزدیکی TDC، قوس محفظه با قوس روتور مطابقت می‌کند، و حجم بیش از 20 درجه از چرخش روتور تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در مدت این دوره، بشتر گاز در محفظه احتراق است. زمان زیادی برای تزریق سوخت وجود دارد، و موتور می‌تواند حداکثر سوخت را تحت شرایط حجم ثابت قبل از شروع انبساط مخلوط کند و بسوزاند. در موتور XMv3، سوخت و هوا از قبل مخلوط شده‌اند و یک CR کمتری با SI استفاده شده است. موتور همچنان انتظار می‌رود از روند طولانی مدت احتراق حجم ثابت استفاده کند.

انبساط

سرانجام، وقتی روتور به چرخش ادامه دهد، حجم منبسط شده است. فشار گاز به روتور اعمال می‌شود که به گشتاور ترمز تبدیل می‌شود. فرآیند انبساط ادامه می‌یابد تا اینکه حداکثر حجم انبساط بدست آید، و دریچه خروجی روتور باز شود. اگر دریچه‌های مکش و خروج به طور نامتقارن قرار گرفته باشند، نسبت انبساط موثر به طور قابل توجهی بیشتر از نسبت تراکم خواهد بود، اجازه می‌دهد که انرژی بیشتری از گاز به کار مفید تبدیل شود. این انبساط بیشتر همچنین دارای اثر کاهش دمای متوسط در محفظه، کاهش نیاز به سرمایه‌ش است. بعلاوه، فشار خروجی می‌تواند نزدیک اتمسفر باشد- بنابراین دارای دما و فشار کمتر از اگزوز موتور سنتی است.

آب بندی

آب بندی روتور در موتورهای دوار وظایف مشابهی را با رینگ‌های پیستون در یک موتور رفت و برگشتی انجام می‌دهند زیرا آنها یک آب بند برای گازهای حاصل از احتراق فراهم می‌کنند. شکل 6 آب بندی گازهای اصلی اجزای

موتور X1 را نشان می‌دهد. این‌ها شامل فیس سیل⁵ (کاسه‌نمدی که از ترشح و نشتی سیالات از اطراف محورهای دوار جلوگیری میکند) در هر طرف روتور، سه حداکثر آب بند و حلقه های O شکل ثابت در محفظه می‌شوند. فیس سیل‌ها درون شیارهایی روی سطح روتور با فنرهایی نصب شده‌اند. حداکثر آب بندهای دو تکه‌ای در موتور X1 برای عملکرد آب بندی گاز بهتر در مقایسه با حداکثر آب بند یک تکه ای استفاده شده اند. با وجود ابعاد متفاوت، آب بندها مشابه آب بندهای مزدا RX-8 هستند.

آب بندهای گاز در ابتدا با نیروی فنر قرار گرفته اند، اما در عمل، نیروهای گاز به مراتب بیشتر از نیروی فنر به آب بندها اعمال می‌شوند. از آنجاییکه حداکثر آب بندهای یک موتور دوار مرسوم در شکاف‌های شعاعی در هر راس روتور وارد می‌شوند، قسمت عمده نیرو که روی حداکثر آب بند کار می‌کند نیروی گریز از مرکز است، که یکی از محدودیت‌های عمده برای طراحی حداکثر آب بند در موتورهای معمولی دوار است. به هر حال، نیروی گریز از مرکزی روی حداکثر آب بند موتور X1 وجود ندارد زیرا حداکثر آب بند در محفظه قرار دارد که یک قسمت ثابت است. همچنین شیوه روغنکاری تغییر می‌کند، هنگامی که حداکثر آب بند ثابت می‌تواند با مقدار کمی از روغن به طور مستقیم اندازه گیری شده در موقعیت آب بند از طریق محفظه اصلی ثابت یا قسمت جانبی محفظه روغنکاری شده باشد.

سرمایش

فرآیند انبساط بیش از حد HEHC دمای متوسط سیلندر را کاهش می‌دهد و خروجی خنک تر است. به عبارت دیگر، دماهای احتراق بالاتر در حین احتراق حجم ثابت بدست آمده‌اند. لازم به ذکر است که حتی احتراق حجم ثابت، حداکثر دماها و فشارها در HEHC با مکش طبیعی کمتر از موتور دیزل با توربو شارژر است. سرمایش برای جلوگیری از گرمای بیش از حد اجزا و فشار سایش، بخصوص بعلت تنزل فیلم روغن در سطوح مشترک آب بند ضروری است. بر خلاف موتور وانکل⁶، احتراق در سه اتاق محفظه گسترش یافته است و هر یک از این اتاق‌ها همچنین یک مرحله

⁵ Face seal

⁶ Wankel

مکش سرد را می‌بینند، بنابراین مساله گرمایش محفظه انتظار می‌رود کمتر از گرمایش روتور باشد. تکنیک‌های سرمایش سنتی، برای مثال صندوق آب در محفظه و سرمایش روغن با گذرگاه‌هایی در روتور، می‌تواند مورد استفاده قرار گرفته باشد. نمونه اولیه X1 بدون سرمایش اجرا شد، همانطور که این نمونه اولیه فقط برای نشان دادن عملیات اساسی این چرخه طراحی شده بود موتور XMv3 از یک تکنیک سرمایش هوا استفاده می‌کند، هوا به طور محوری از طریق روتور در امتداد تعدادی از شیارها جریان می‌یابد. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در rpm 10000 و بارگذاری کامل با یک دفع حرارت 55 درصد از LHV سوخت را نشان می‌دهد، دمای روتور زیر 200C (حداکثر دمای روغن روغنکاری) با نرخ جریان 130CFM نگه داشته شده است.

چرخه زنی مداوم یک استراتژی کنترل است که ممکن است منحصراً برای موتورهای احتراق داخلی فشرده مناسب می‌باشد. اگر چنین کنترل استفاده شود، چرخه‌های بدون وقفه یک اثر خنک کننده اضافی بر روی موتور خواهند داشت.

تفاوت‌ها با موتور وانکل

موتور X برخی از مزایای ساختار موتور دوار مانند وانکل را به اشتراک می‌گذارد، برای مثال سادگی داشتن دو قسمت عمده متحرک؛ لرزش کم/روتور کاملاً متعادل؛ و مزیت نداشتن هیچ جرم در حال نوسان، بنابراین موجب کاهش نیاز به فلاپویل و ایجاد موتور پاسخگوتر می‌شود (شکل 7 را ببینید). به هر حال، همچنین اختلافات بسیاری وجود دارد:

1. چرخه ترمودینامیکی موتور وانکل چرخه اتو است، اما اجرای پایین تری نسبت به موتور پیستونی سنتی دارد؛ موتور X به عبارت دیگر، برای کار روی چرخه HEHC با مزایای چرخه، هم CI یا SI بهینه شده است.
2. موتور X همه گاز درون محفظه احتراق ایزوله شده را متراکم می‌کند. این محفظه احتراق می‌تواند کوچک باشد، منجر به CR بالاتر نسبت به موتور وانکل امکان پذیر است.

3. محفظه احتراق ایزوله شده می‌تواند یک هندسه تقریباً کروی داشته باشد یعنی یک سطح کم به نسبت حجم خواهد داشت. با توجه به این که موتورها بخش بزرگی از حرارت خود را در طول فرآیند احتراق از دست می‌دهند، موتور X یک سطح مناسبی را در طول این قسمت از چرخه خواهد داشت، که منجر به اتلاف انتقال حرارت کمتر می‌شود. اگر چه در طول انبساط سطح می‌تواند بزرگتر از موتور پیستونی عادی با اتلاف حرارت بیشتر باشد، ولی اکثر انتقال حرارت در طول احتراق و شروع مرحله انبساط اتفاق می‌افتد.

4. موتور X، شبیه یک موتور وانکل معکوس عمل می‌کند، که دارای حداکثر آب بندی‌ها است که در محفظه ثابت هستند، در حالیکه حداکثر آب بندها در موتور وانکل در روتور هستند. بنابراین، موتور X دارای بارگذاری گریز از مرکز آب بندها نیستند و اجازه اندازه گیری مستقیم روغنکاری آب بندها را می‌دهد. این روش در آزمایشگاه انجام شده است تا به طور قابل توجهی سایش موتور را کاهش دهد، در حالیکه روغن موتور را 10 برابر کمتر نسبت به موتورهای وانکل تامین می‌کند.

بازده

مزیت اصلی موتور X اکه برای کار بر روی چرخه HEHC بهینه شده است، استفاده از CR بالا، سطح کم در طول احتراق، احتراق طولانی مدت/حجم ثابت، و انبساط بیش از حد، و کنترل اشتعال بدون وقفه برای حفظ بازده بالا حتی در بارهای کم است.

اندازه و وزن

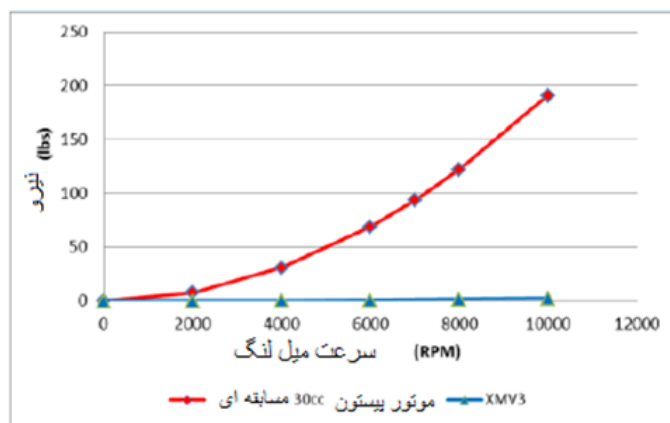
یک روتور از سه حفره درون محفظه تشکیل می‌شود. برای هر چرخش روتور، سه چرخه 4 مرحله‌ای به طور همزمان اجرا شده‌اند، که منجر به سه احتراق در هر دوران کامل روتور می‌شود. روتور به شفت با نسبت 3:2 متصل شده است، منجر به 1.5 احتراق در هر دوران کامل شفت می‌شود. بنابراین موتور فشرده با دو قسمت متحرک شبیه به 3 سیلندر موتور دیزل 4 مرحله‌ای رفتار می‌کند (شکل 8 را مشاهده کنید).

لرزش کم

روتور کاملاً روی مرکز دورانش بالانس شده است. روتور بر روی یک محور خارج از مرکز می‌چرخد، بنابراین می‌تواند با وزنه‌های تعادل نصب شده بر روی شفت در جهت مخالف متعادل شود. در X1، با داشتن 2 وزنه تعادل در دو طرف موتور انجام شده است. در XMV3، یاتاقان‌ها برای عمل به عنوان وزنه‌های تعادل دارای وزن هستند. نیروهای ارتعاشی و ممان‌های XMV3، در مقایسه با یک تجاری 30cc و یک موتور 4-مرحله‌ای (تک سیلندر) بررسی شده است، و در شکل 9 مقایسه شده‌اند. نیروهای ارتعاشی با دو مرتبه بزرگی کاهش یافته‌اند.

قابلیت چند سوختی

انواع مختلفی از تکنیک‌ها وجود دارند که قابلیت توانایی چند سوختی در موتور X را داشته باشند. این موتور یک CR بزرگ را با فرآیند سوختن طولانی مدت کوپل می‌کند. انواع مختلفی از سوخت تحت CI می‌تواند جایگزین شده باشد، اگر یک انژکتور سوخت مناسب توانایی تامین سوخت‌های متنوع را داشته باشد. موتور همچنین می‌تواند درج محفظه احتراق استفاده کند، که می‌تواند برای تعویض سریع حفره‌ها استفاده شود. بنابراین تغییر CR، هندسه محفظه احتراق، و انژکتورهای سوخت که می‌توانند به محفظه احتراق جفت شوند. متناوباً، یک محفظه احتراق می‌تواند یک پیستون کوچک برای تغییر CR در حین اجرا، همچنین فراهم کردن یک شمع درخشان، شمع جرقه و انژکتور سوخت قرار دهد.



شکل 9 نیروهای ارتعاشی مدل شده موتور پیستون 30cc تک سیلندر در برابر موتور دوار XMV3

سر و صدا

چهار دلیل اصلی سر و صدا در یک موتور دیزل 4 سیلندر وجود دارد:

(1) افزایش سریع احتراق در مدت احتراق

(2) دریچه مکش به علت تماس فلز با فلز به عنوان دریچه‌هایی باز و بسته می‌شوند.

(3) افت سریع فشار وقتی گاز‌های خروجی در سیلندر به اتمسفر باز هستند

(4) ضربه پیستون باعث ایجاد یک تماس فلز با فلز بین پیستون و سوراخ سیلندر می‌شود.

چرخه HEHC از فرآیندهای انبساط بیش از حد استفاده می‌کند، که در آن گاز ممکن است گسترش یافته به همه روش‌ها منبسط شود تا به فشار اتمسفر دست یابد، به طور قابل توجهی موجب کاهش سر و صدا اگزوز می‌شود. موتورهای X در آزمایشگاه بدون لوله اگزوز (هدرهای باز) اجرا شده‌اند، تفاوت کمی در سر و صدای اگزوز چه موتور در حال کار یا اشتعال باشد شنیده شده است. بعلاوه، موتور X دارای سر و صدای دریچه مکش یا ضربه پیستون نیست. سر و صدای احتراق را می‌توان با معرفی سوخت برای یک دوره مدت زمان طولانی‌تر کاهش داد (هم تزریق نرخ پایین برای مدت طولانی و یا داشتن تزریق چندگانه). این برای زمان ماندگاری طولانی در حجم TDC مجاز است. LPI به طور رسمی سطوح سر و صدا را اندازه‌گیری نمی‌کند، در حالیکه داینو و اجزای پشتیبان کننده در برخی موارد بلندتر از خود موتور هستند. به هر حال، به نظر می‌رسد موتور X آرام است، زیرا سر و صدای اشتعال قابل مقایسه با رانندگی است.

هزینه و دوام

به طور قابل ملاحظه‌ای، هسته موتور دارای فقط پنج قسمت اولیه است، که دو تا از آنها متحرک هستند. انتظار می‌رود تعداد قطعات کم هزینه، مخصوصاً در کار برای مونتاژ موتور تولید را کاهش دهد. نمونه‌های اولیه برای ساخت عمدتاً با فرز CNC طراحی شده‌اند، و توجه کمی به تکنیک‌های ریخته‌گری/ساخت در حجم بالا داده شده است. این کار برای آینده انجام می‌شود.

موتورهای وانکل دارای شهرت در حمل و نقل هوایی بدلیل قابلیت اطمینان هستند، در صورتی که شکست موتور بعید است، معمولاً یک روند آهسته‌ای دارد، که موتور توان کمتری را در طول زمان ایجاد می‌کند، در حالیکه موتور-های پیستونی به شکست فاجعه بار شناخته شده‌اند. به طور کلی سادگی موتور موجب دوام آن می‌شود، وقتی اجزای کمتری برای شکست وجود دارد و موتور به سادگی سرویس می‌شود. سایش اولیه اجزا در موتور X، مشابه وانکل دوار، دارای حداکثر آب بندی است. به هر حال، برخلاف موتور وانکل، حداکثر آب بند های موتور X ثابت هستند و در محفظه قرار گرفته‌اند. این آب بندها ممکن است ساخته شده باشند تا برای سرویس نیاز به جداسازی کامل قطعات موتور نباشد. بعلاوه، تکنیک روغنکاری مستقیم منحصر بفرد انتظار می‌رود از لحاظ تریبولوژی⁷ برای وانکل مطلوب باشد، بعلاوه موجب کاهش سایش اجزای آب بند شود. نمونه‌های اولیه موتور X فقط تحت آزمایش اولیه قرار گرفتند، و مقدار قابل توجهی از کار برای اثبات دوام طولانی مدت موتور باقی مانده است. مدیریت حرارتی از جمله نگهداری یک فیلم روغن خوب برای همه سطوح لغزنده (از جمله آب بند) در موتور، بسیار مهم خواهد بود، اما موضوعات مشابهی در موتورهای دوار تجاری تا حد زیادی مورد توجه قرار گرفته است.

اثر حرارتی

به عنوان یک چرخه با بازده بالاتر، HEHC اجازه می‌دهد تا انرژی بیشتری به کار مکانیکی تبدیل شود و کمتر به عنوان گرما از دست برود. فرآیند انبساط بیشتر چرخه HEHC دمای خروجی را کاهش می‌دهد. XMV3، که با هوا خنک شده است، هوای خنک را با جریان خروجی مخلوط می‌کند، به طور قابل توجهی دمای گاز خروجی را کاهش می‌دهد، که ممکن است در کاربردهایی خاص مطلوب باشد. دمای خروجی پایین تر ممکن است با سیستم‌های انتشار کاتالیزوری خاص سازگار نباشد و برای کارهای آینده مهم است.

⁷ Tribological

References

1. Blair, G., "Design and Simulation of Four-Stroke Engines," (Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc., 1999), doi:10.4271/R-186.
2. Norbye, Jan P. "The Wankel Engine", Bailey & Swinfen, 1971, <http://dx.doi.org/10.4271/R-186>.
3. Yamamoto, K., Rotary Engine, Toyo Kogyo Co., Japan, 1971.
4. Ohkubo, M., Tashima, S., Shimizu, R., Fuse, S. et al., "Developed Technologies of the New Rotary Engine (RENESIS)," SAE Technical Paper 2004-01-1790, 2004, doi:10.4271/2004-01-1790.
5. Muroki, T. and Miyata, J., "Material Technology Development Applied to Rotary Engine at Mazda," SAE Technical Paper 860560, 1986, doi:10.4271/860560.
6. Froede, W., "The NSU-Wankel Rotating Combustion Engine," SAE Technical Paper 610017, 1961, doi:10.4271/610017.
7. Shkolnik, N., "Internal Combustion Power System", US Patent 7,191,738, 2003.
8. Shkolnik, A. and Shkolnik, N., "High Efficiency Hybrid Cycle (HEHC) Thermodynamic Cycle", US Patent 8,365,698, 2007.
9. Shkolnik, A. and Shkolnik, N., "High Efficiency Hybrid Cycle (HEHC) X Engine", PCT Patent Application: US2012-0294747, 2012.
10. Nabours, S., Shkolnik, N., Nelms, R., Gnanam, G. et al., "High Efficiency Hybrid Cycle Engine," SAE Technical Paper 2010-01-1110, 2010, doi:10.4271/2010-01-1110.
11. Shkolnik, N. and Shkolnik, A., "Rotary High Efficiency Hybrid Cycle Engine," SAE Technical Paper 2008-01-2448, 2008, doi:10.4271/2008-01-2448.
12. Shkolnik, N. and Shkolnik, A., "High Efficiency Hybrid Cycle Engine", proceedings of the ASME Fall Conference on Internal Combustion Engines, ICEF2005-1221, 2005, doi:10.1115/ICEF2005-1221.
13. Shkolnik, A., Shkolnik, N., Nabours, S., Nickerson, M., Cho, K., Shah, H., Sapre, C., Louthan, L., Danner, B., and Phillips, E., "Development of the High Efficiency X1 Rotary Diesel Engine", 2012 Directions in Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, Michigan, 2012.
14. Cao, Y., "Thermodynamic Cycles of Internal Combustion Engines for Increased Thermal Efficiency, Constant Volume Combustion, Variable Compression Ratio, and Cold Start," SAE Technical Paper 2007-01-4115, 2007, doi:10.4271/2007-01-4115.
15. Heywood, J., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988.
16. Shimizu, R., Tadokoro, T., Nakanishi, T., and Funamoto, J., "Mazda 4-Rotor Rotary Engine for the Le Mans 24-Hour Endurance Race," SAE Technical Paper 920309, 1992, doi:10.4271/920309.
17. LiquidPiston 'X' Engine animation. Website URL: <http://liquidpiston.com/technology/how-it-works/>.
18. LiquidPiston XMv3 Engine video. Website URL: <http://vimeo.com/99002635>.
19. Shkolnik, N., and Shkolnik, A., "Cycloid rotor engine", US Patent # 8,523,546, 2013.
20. Shkolnik, N., and Shkolnik, A., "Hybrid Cycle Combustion Engine and Methods", US Patent # 8,794,211, 2014.
21. Li, W., Gu, F., Ball, A. D., Leung, A. Y. T., Phipps, C.E., "A Study Of The Noise From Diesel Engines Using The Independent Component Analysis", Mechanical Systems and Signal Processing Volume 15 Issue 6, Pages 1165- 1184, 2001, doi:10.1006/mssp.2000.1366.