

超临界二氧化碳动力循环及压气机关键技术

Supercritical Carbon Dioxide Power Cycles and Critical Compressor Technologies

■ 南希 马宁 唐方明 朱江楠 马慧文 / 中国航空发动机研究院
徐威阳 廖乃冰 柳山林 / 中国航发湖南动力机械研究所

超临界二氧化碳 (sCO₂) 动力循环因具有整体发电系统体积小、功率响应快、循环热效率高、适用的热源温度范围宽等优点,近年来,相关研究及应用在美国、欧洲、日本和韩国等国家和地区掀起热潮。未来,sCO₂动力循环除了在地面发电领域占据重要位置,还将为空间动力、航空发动机、核动力潜艇等国防武器装备提供紧凑高效、清洁低廉的热功转换解决方案。

以超临界的CO₂为工质的热功转换循环称为sCO₂动力循环,包括各类闭式布雷顿循环、用于余热回收高效利用的朗肯循环和以纯氧直燃为核心的半开式布雷顿循环(Allam循环)三大类。sCO₂动力循环主要由压气机、热源、涡轮、换热器、控制系统、密封系统等组成,其压气机工作在CO₂临界点附近,此区域内工质的密度高、黏度小、等熵压缩功耗低,循环过程中压气机压缩功只占涡轮输出功的30%,相对于氦气轮机循环的45%和燃气轮机循环的50%~60%,具有高功率密度的明显优势,可广泛应用于工业余热回收发电、中小型舰船动力、分布式热电联供等领域的高效发电。同时,sCO₂具有优良的换热特性,由于流体工质在超临界态下无相变,与热源换热时不存在“夹点”,因此换热效率高。论证表明,sCO₂闭式动力循环具有更紧凑的结构,未来或将局部代替氦气动力循环满足空天动力飞机更高效的预冷需求。

兆瓦级sCO₂动力循环

压力和温度均分别高过临界压力和

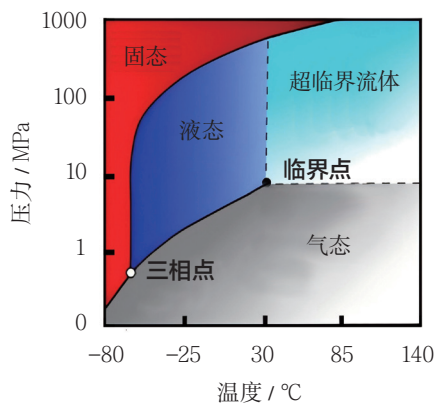


图1 CO₂热力学物性图

临界温度的流体称为超临界流体(见图1)。此时,流体工质不再有明显的相变。纯CO₂的临界点在7.38MPa、31.1°C,利用超临界的CO₂作为循环工质,最直观的优点在于可获得尺寸紧凑的核心机部分。图2给出GE航空航天公司对sCO₂动力循环与当前主流动力循环的主要应用领域及循环热效率的对比。可见,在热源温度400~800°C之间,sCO₂动力循环不仅在天然气、煤等传统化石能源的转化和利用方面有循环效率高、清洁安全、成本低等优势,在核能、太阳能光热、生物质气化等新能源热功转换方面更是大有可为。

sCO₂动力循环概念的提出始于20世纪60年代,美国率先提出了其在核反应堆上应用的初步概念及方案论证,但是以下几个技术因素制约了它的发展。首先,当时的加工工艺难以满足轮盘和叶片一次性整体加工的需求,直到20世纪90年代中期,五轴加工的广泛使用使得叶轮制造工艺得以突破,才开始商业化产品的研发。其次,sCO₂动力循环依赖回热器来提高循环效率。当堆芯出口温度在500°C以上时,回热器的回热量约为堆芯释热量的2倍,普通回热器技术难以胜任,近10年发展出来的超紧凑式回热器技术使得sCO₂动力循环有了实现的可能。第三,干气密封技术的发展使得高压高速的sCO₂动力循环密封问题有了合适的解决方案。此外,镍基合金等材料解决了普通碳钢容易与CO₂中的碳原子发生置换反应的难题,高速气浮轴承和高速电机等技术为兆瓦级小型sCO₂动力循环提供了高效结构方案。上述关键技术的突破为sCO₂动力循环概念注入了新的生命,使之具备了产业化的条件。

目前,美国、英国、德国、芬

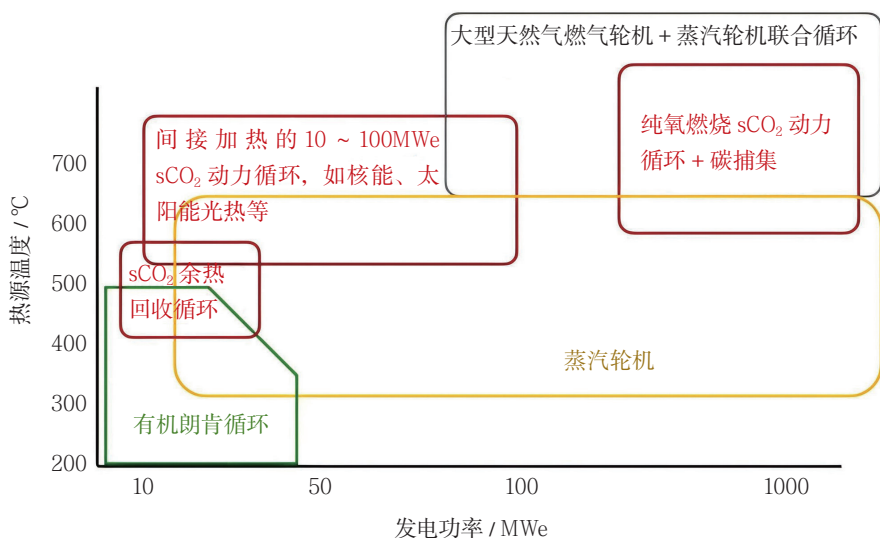


图2 sCO₂动力循环热源温度、功率与主流动力循环的对比

兰、日本及韩国等多个国家均开展了sCO₂发电技术的研究，部分国家已经完成了样机制造和试验，逐渐解决了其中压缩、轴承、密封等技术难题。美国一路领先，其能源部(DOE)自2000年左右起分别在核能、太阳能及化石燃料sCO₂动力循环开展部署。2004年，麻省理工学院(MIT)率先系统地研究了sCO₂闭式循环在核能中的应用。随后，美国桑迪亚国家实验室在2011年公布了世界第一套sCO₂闭式循环样机，证明了sCO₂动力循环系统的启动、加速、发电、关闭过程可以被成功地控制。日本东京工业大学、韩国先进科技研究所也都做了小功率级别的示范样机。国内中国航发湖南动力机械研究所(中国航发研所)、西安热工研究院、中国科学院工程热物理研究所、中国核动力研究院等也开展了系统的示范搭建。

sCO₂动力循环在核能领域的应用

目前，核反应堆绝大部分采用蒸汽朗肯循环发电。随着核能技术的不断发展，核反应堆的运行温

度已大幅提高。传统的压水堆运行温度在300℃左右，而新开发的各种堆型第四代核反应堆堆芯温度可达到500~900℃。当热源温度在400~750℃时，sCO₂动力循环的效率将高于蒸汽朗肯和氦气布雷顿循环。在铅快冷堆试验中，sCO₂在稳态和瞬态均具有良好的安全性能。在反应堆出口温度560℃时，循环热效率可高达43.2%；当堆芯出口热源温度在500~900℃时，热效率最高可达55%。核反应堆本身具有冷却需求，水、氦气等工质通常被用来作为核反应堆的冷却工质。理论研究表明，sCO₂既可以作为循环工质进行高效率发电，又可以作为间接冷却工质消除钠水反应的潜在危险，其布雷顿循环是适用于第四代核反应堆最为理想的能量转换系统。

美国、法国、日本、韩国等国家均围绕sCO₂动力循环在核能高效利用方面开展了系统初步设计。美国DOE核能创新项目支持MIT开展sCO₂动力循环在第四代核反应堆高温气冷堆中的应用研究，设计了堆芯热功率

为2400MW的sCO₂直接冷却布雷顿循环的核反应堆系统。美国桑迪亚国家实验室提出中等功率(200~400MW)的sCO₂动力循环系统，核反应堆出口温度在650℃时，可实现45%~50%左右的热效率。韩国先进技术研究所进行了sCO₂与钠快冷堆KALIMER-600的耦合设计，并与韩国原子能研究所联合开展了热功率为1.3MW的示范试验。sCO₂动力循环配合不同堆型，也可作为核潜艇、核航母和大型长航时核能飞行器要求设备体积紧凑且功率变化灵活的军用推进动力。

sCO₂动力循环在余热回收领域的应用

余热回收是sCO₂动力循环的主要应用领域。目前蒸汽轮机是主流余热回收的动力循环方式。已有的工业烟气余热回收的发电量在1~25MW区间，其烟气的余热温度在100~600℃之间。航空发动机尾气余热回收理论发电量在500kW~2MW区间，余热温度为500~600℃。

热源温度低时，sCO₂朗肯循环将比布雷顿循环获得更高的循环效率。美国Echogen公司开发的EPS系列是世界上第一个兆瓦级sCO₂余热回收发电机组。全球著名的叶轮机机械公司德莱赛兰与其合作，开发了8MW的sCO₂朗肯循环发电系统EPS100，并于2014年成功完成了全套装置的出厂测试。其产品结构紧凑，可实现整体撬装，热源温度覆盖350~550℃。测试表明，当热源温度为410℃时，可将余热出口温度降至80℃，循环效率达到22%，与双压锅炉的蒸汽轮机效率相当。采用超紧凑高效印刷电路板式换热器，达到15MW换热功率仅占地(1.5×1.5×0.5)m³，是相同换热功

率的蒸汽换热器体积的1/15。

中国航发动研所开发了涡轴发动机排气余热回收的百千瓦级sCO₂闭式布雷顿循环的原理样机并实现设计转速运转。试验表明，闭式循环样机达到设计目标，突破了高功率密度压气机、轻质高效紧凑换热器、旋转动密封等关键技术，并拟进一步开展兆瓦级方案设计。

sCO₂压气机设计

压气机作为sCO₂动力循环的核心部件，其性能直接决定系统效率与可靠性。在sCO₂动力循环系统中压气机需在高压、高转速及近临界区极端物性波动下稳定运行，这对其气动设计、密封及材料等均提出了新的挑战。

sCO₂压气机技术难点

在sCO₂高效动力循环的实现中，高功率密度sCO₂压气机技术是难点之一。与传统空气工质的离心压气机的设计理念和设计方法截然不同，其难度体现在以下几个方面。

第一，sCO₂压气机的压缩功和气动效率与进口状态密切相关，这是与传统空气工质压气机显著不同的气动特点。为使循环达到高的综合热效率，离心式sCO₂压气机需要尽可能降低压缩功，此时要求sCO₂压气机的进气条件不仅需尽量靠近CO₂工质的临界点，且还需要处于密度大的类液态区。此状态下，sCO₂压气机流体已经严重偏离理想气体假设，目前成熟的基于传统理想气体工质的压气机一维设计方法、三维数值模拟方法等均不再适用，必须开发与之相适的设计方法与数值模拟方法。目前，国内外针对sCO₂流场模拟方法已经有了一些研究成果，但气动设计方法仍多采用传统

空气工质的设计方法和损失模型，导致试验效率远达不到理论设计期望。同时，当压气机进口条件处于偏液态的近临界区域时，压气机极易发生流场参数波动现象，但是对此类气动不稳定现象的流动机理和控制方法仍缺乏全面深入的认识。因此，在实践层面，现阶段大多将压气机进口放在偏离临界点且偏气态区域，以最大程度避免压气机气动不稳定的产生。但这样一来，sCO₂压气机就偏离了最高效热力循环所要求的工作范围。

第二，sCO₂压气机通常尺寸小且转速很高，百千瓦发电量级的sCO₂压气机叶轮外径只有不到30mm，兆瓦发电量级的压气机叶轮外径也仅有40~50mm。为避免振动引起的叶轮损坏，叶轮叶尖间隙占叶高的相对百分比将比常规空气工质的离心叶轮大1倍以上。尺寸效应不仅引起气动性能的损失，对旋转密封也造成很大困难。2022年，美国西南研究院发表了10MW太阳能光热sCO₂动力循环主压气机的试验结果，其试验用压气机是两级离心式压气机中的第一级，压气机设计流量为55kg/s，进气总温为37℃，总压为8.52MPa，其闭式叶轮采用钛合金3D打印而成，表面抛光处理后，粗糙度(Ra)保持不超过3.2μm，最大程度减小泄漏和气动性能损失，可达到试验气动效率的80%。

第三，sCO₂闭式布雷顿循环系统试验仍是较难课题。美国桑迪亚国家实验室对主压气机的测试转速仅达到设计转速的92%，即65000r/min，最高压比达到1.65，为设计压比的90%。高压环境下压气机内部存在严重的流动损失，导致气动效率仅有60%~70%。东京工业大学的

试验最高转速只达到70%的设计转速，且在试验中发现压气机和涡轮中存在严重的鼓风损失，直接消耗了将近1/3的涡轮出功。韩国SCIEL压气机采用分流背靠背结构，其试验转速更低，仅达到50%设计转速，压比和效率均低于数值模拟结果。可见，鼓风损失是sCO₂压气机的一个技术难点，必须通过有效密封手段最大程度减少泄漏和鼓风损失。

sCO₂压气机关键技术

整体来看，sCO₂循环发电系统在全球范围内还是一个新课题。sCO₂离心压气机作为sCO₂循环发电系统的核心部件之一，其研究也处于探索阶段。由于试验设施的建设难度较大，目前为止，仅有美国、日本、韩国和中国完成了系统或部件级的试验。现阶段的研究多以三维数值仿真为主，开展压气机设计及优化。当前国内外公开的具有试验值的几例典型sCO₂压气机设计指标和试验值如表1所示。

除气动设计难度大外，sCO₂压气机的密封和轴承设计也是sCO₂动力循环必须突破的关键技术。因主机体积功率密度高，百千瓦功率量级的闭式循环通常多采用全封闭的T-A-C结构（见图3），即压气机-电机-涡轮同轴工作，由此带来轴向力平衡难题。美国桑迪亚国家实验室在试验初期对压气机轴向力平衡方式进行了探索研究。最初采用最大载荷约为9000N的滚珠轴承，发现在大载荷下，轴承寿命只能维持10~20h；后期采用了径向和轴向均以CO₂为润滑工质的气浮轴承，并对压气机运行进行了优化，使轴向力平衡，提高了压气机运行寿命。

中国航发动研所完成了系统试

表1 典型sCO₂离心压气机性能指标及试验结果

研究机构	美国桑迪亚国家实验室	日本东京工业大学	韩国原子能研究所	中国科学院工程热物理研究所	美国西南研究院	
设计值	循环功率 / MWe	250	10	500	1	10
	设计年代 / 年	2010	2010	2021	2019	2022
	压气机布局	单级离心	单级离心	单级离心	单级离心	双级离心
	流量 / (kg / s)	3.53	1.2	12.55	16.3	55
	进口总温 / °C	32.15	34.85	36.85	35	36.85
	进口总压 / MPa	7.69	8.23	7.94	8	8.52
	转速 / (r/min)	75000	100000	36000	40000	27573
	等熵效率 / %	66.5	80	80	80	80
	压比	1.83	1.46	1.75	2.5	3.2
	叶轮外径 / mm	37	30	170	94	116
试验值	流量 / (kg / s)	1.8	1.1	12.5	16	55
	转速 / (r/min)	65000	69000	36000	27000~29200	27000
	等熵效率 / %	60~70	≈ 48	≈ 84	75~80	80
	压比	1.58~1.65	1.41	1.75	1.58~1.65	1.8(进口级)
	试验状态	系统试验	系统试验	部件试验	系统试验	部件试验

验的300kW功率量级sCO₂闭式布雷顿循环的系统试验，并在此基础上开展了发电功率3MWe的方案设计。中国航空发动机研究院（中国航发研究院）针对该3MWe循环功率用sCO₂高稳定性压气机和高效换热器完成了方案设计。

针对CO₂在近临界点呈现极强真实气体效应而导致传统气动设计

方法适用性差的难题，中国航发研究院面向超/跨临界流体工质自主开发了以一维气动设计、离心压气机叶型设计与三维流场数值仿真方法为主的压气机设计系统。在一维设计方面，基于相关软件物性数据库，开发了sCO₂压气机一维气动设计程序。该程序能够准确获取不同工况下sCO₂的物性参数，进而精确推导离心

压气机出口速度三角形，为后续离心叶轮造型程序提供可靠的输入数据。在三维数值仿真方面，针对sCO₂压气机近真实气体效应下的进口边界条件，以总焓、总熵为桥梁，构建了二阶精度两层牛顿迭代法求解总温、总压，可完成所有真实气体的总参数真实求解。此方法既能够提高对超/跨临界流体工质压气机三维流场的仿真精度，还兼顾了计算速度与稳定性，具有较高的工程实用价值。在此基础上，结合自主开发的离心叶片造型程序，在保证设计工况进出口气流角不变的前提下对叶型中弧线角度分布进行了优化，并通过三维数值模拟完成了对该3MWe循环功率用sCO₂压气机优化方案的数值分析，如图4所示。仿真结果表明，该压气机在裕度满足要求的同时，设计点等熵效率提升了2.39%。通过对3MWe循环功率用sCO₂压气机的优化设计，中国航发研究院首次完成了对自主开发的超/跨临界流体工质压气机设计系统的适用，结果表明该系统具有较高的可信度与工程实用价值。

此外，中国航发研究院在高效换热器设计方面开展了不同强化换

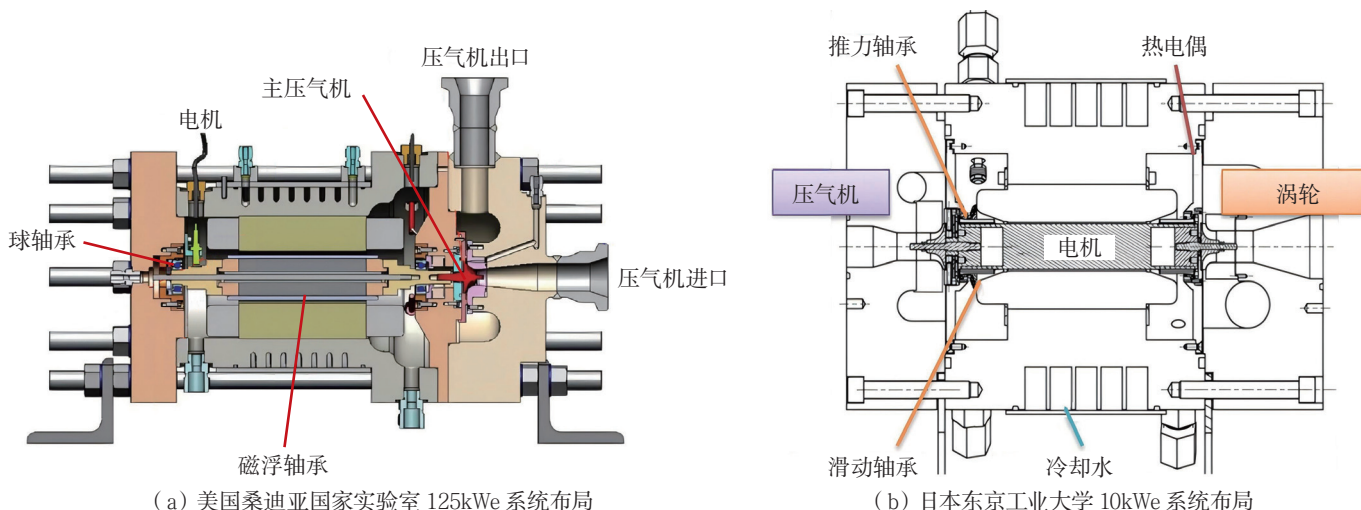


图3 sCO₂闭式循环T-A-C结构

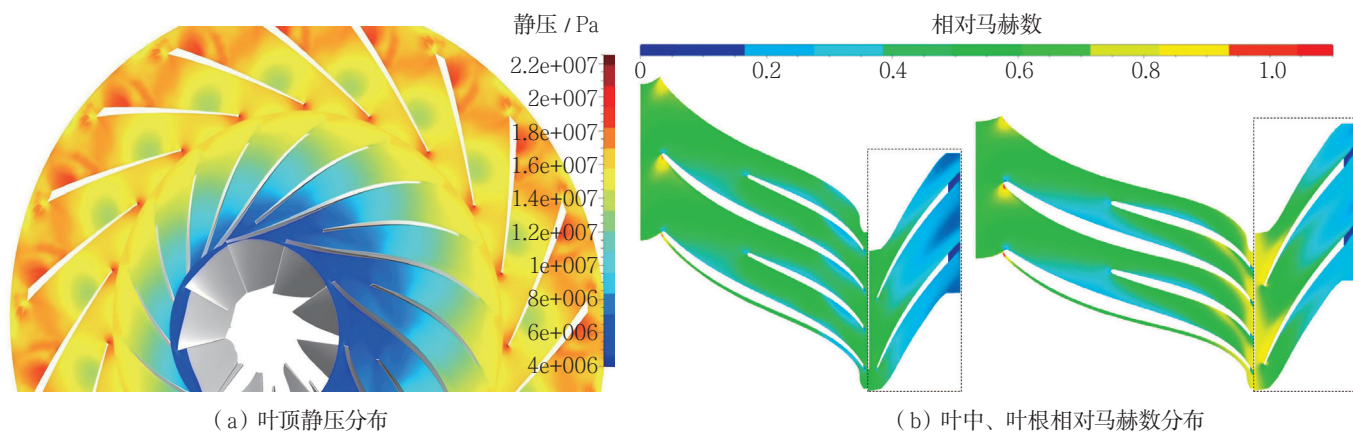


图4 3MWe简单布雷顿循环主压气机设计工况仿真结果

热结构形式下的 $s\text{CO}_2$ 工质传热性能研究。研究表明，在考虑低阻力流动时，平直肋和优化翼形肋结构的优势明显，但换热能力相对较差；在考虑强化传热时，虽然圆柱形肋和Z形肋结构的努塞尔数很高，但同时流动阻力造成的压力损失过高，因此翼形肋在传热强化场景中有综合更好的表现。基于此，完成了3种高效换热器方案设计（见图5）及数值仿真评估。仿真结果表明，3种换热器回热度均高于0.908，可满足该3MWe循环系统指标。3种换热器在相同换热功率下，间断S形肋通道和翼形肋通道的阻力损失显著低于Z形通道，而翼形肋通道的换热能力远好于间断S形肋通道。但在紧凑度上，Z形通道优于翼形肋通道。

基于上述研究结果，中国航发研研所后续拟开展兆瓦级系统试验，并将持续突破超紧凑换热器、高效

动密封、高效压气机、涡轮部件设计等关键技术。

结束语

总体来说， $s\text{CO}_2$ 循环动力在世界范围内属于前沿课题，国外已经通过百千瓦功率的试验验证了该类动力循环原理的可行性，并探索了相关关键技术。在此基础上，近年涌现了兆瓦级系统和部件试验，试验结果令人振奋。国内对该类动力循环关注很早，但工程实践上仍处在原理性研究阶段。作为对比，一个航空发动机型号从设计到成熟应用需要30~50年时间，而对于 $s\text{CO}_2$ 发动机在成熟应用、市场推广方面仍需要大量的理论研究与技术验证。综合市场需求和国外开展的示范验证来看，发电功率在10MW量级将是未来几年的主力研究对象；作为关键核心部件的 $s\text{CO}_2$ 压气机，基于传

统工质压气机/泵的设计理论（主要是经验公式及损失模型等）、数值模拟方法等在 $s\text{CO}_2$ 压气机中可能不再适用，迫切需要能够形成高效、稳定的设计方法以最大程度地发挥 $s\text{CO}_2$ 物性在节省压缩功、提升循环整体功率密度方面的优势。

近年来， $s\text{CO}_2$ 动力循环及其衍生的超临界流体循环在舰艇、航空发动机乃至空间动力等方面的应用可能性验证也逐渐展开。开展系统的 $s\text{CO}_2$ 闭式循环优化设计、突破一系列关键技术并提升其技术成熟度，将为该类型动力循环在传统能源领域及未来应用领域提供技术支撑。

航空动力

（南希，中国航空发动机研究院，研究员，主要从事压气机流动稳定性、气动设计及叶轮机械数值模拟方法研究）

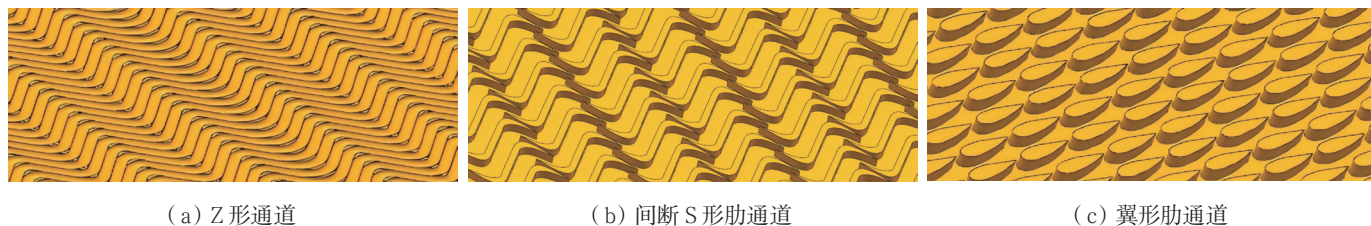


图5 3种结构形式换热器