

GOLD
SPONSOR



Stock Code: 688333



希禾增材
ADDIREEN

UnionTech 联泰
创见你所想



众远新材料
ZHONGYUAN ADVANCED MATERIALS

3D打印换热器及散热器 白皮书

(第四版)

Version ID:20260601

底图: Sintavia

前言

增材制造（3D打印）技术为热交换器件的设计与制造带来创新解决方案。该技术打破传统制造对复杂几何的约束，使拓扑优化、晶格填充、随形冷却流道等设计成为现实，显著提升换热面积与流体动力学效率，推动散热器、换热器从功能组件向功能-结构一体化系统演进。铜、铝、钛、镍基高温合金及复合材料等热管理关键材料的工艺突破，进一步拓展了材料选择的灵活性。

近三年来，3D打印热交换方案由技术验证加速向工程化迈进。AI算力基础设施液冷散热市场爆发，为3D打印液冷板打开应用空间；光模块功耗攀升亦催生创新需求；新能源汽车领域，电驱动壳体、电池模组端板及功率模块散热基板等已在赛车与高性能平台实现验证；航空航天与国防领域，3D打印换热器已获得装机验证，实现减重30%以上、换热效率提升50%以上。

产业生态亦加速成型：增材制造热交换器开发企业推出专用工艺包，设计软件集成热-流-固耦合拓扑优化模块，导热合金材料创新持续推进，后处理与质量检测标准体系初步建立。

本白皮书系统梳理3D打印技术在换热器及散热器领域的应用现状、技术路径与发展趋势，聚焦下游需求痛点，深入剖析结构、材料与工艺创新如何为热交换产品提供差异化方案，为热设计、产品开发及制造工程等领域的业界同仁提供参考与洞察。

感谢本白皮书合作伙伴的支持。更多信息请参考3D科学谷网站：www.3dsciencevalley.com

3D科学谷市场研究团队 · 2026年

全球市场洞察

细分市场潜力规模与活跃厂家

3D打印热交换器全球市场规模及渗透率

汽车



- 2024年全球电动汽车销量1360万台，预计2030年每年超5000万辆
- 电池热管理需保持20°C至35°C最佳工作温度，性能版热负荷50-100千瓦

3D打印热交换器市场

\$8.47→\$23.42亿美元 (2025-2033)

CAGR 13.4%



发电/能源与HVAC

- 替代传统管壳式换热器，促进发电装备轻量化、模块化、高效化演进。
- 3D打印热交换器优化鳍几何形状和集成歧管设计，冷却能力提高15-20%。
- 住宅空调系统制冷剂充电减少20-25%，每年每单元节省200-400美元。

电子与数据中心



- 云基础设施运营商实施先进热管理：Equinix、Digital Realty、阿里云
- 5G基础设施电信设备制造商（爱立信、诺基亚、华为）为更高功率密度设计先进冷却系统

全球换热器市场

(总市场，3D打印渗透率约1.7%→5.3%)

\$197 → \$546 亿美元 (2025-2036) | CAGR 8.0%



化工与加工行业

- 特种化学品制造商和精细化学品生产商采用3D打印热交换器用于传统设计受限应用。
- 石化炼油全球日加工量超9000万桶，提高设计效率转化为巨大运营成本节约。
- 设备使用寿命10-15年，为更换和升级周期创造安装基础机会。

全球竞争格局：国际标杆引领、国内产业链完整布局

企业	国家/地区	特点与优势领域
Conflux Technology	澳大利亚	行业标杆，覆盖汽车、航空、电子全领域
Exergetica	法国	紧凑型换热器设计与增材制造
GE Aerospace	美国	航空发动机与热管理系统，UPHEAT项目
Mott Corporation (IDEX)	美国	多孔金属/过滤技术，微通道热管理
PrintSky (AddUp)	法国	航空航天与高端制造
Renishaw	英国	精密测量与金属PBF增材制造设备
Sintavia	美国	航空级增材制造，3D打印换热器
EOS / AMCM	德国	金属PBF设备龙头，换热器应用方案

中国市场格局

国际厂商：EOS、3D Systems等在中国市场具有影响力，主要提供增材制造设备与核心零部件解决方案。

国内产业链：铂力特、华曙高科为设备端龙头；希禾增材以绿激光技术攻克铜等高反材料打印难题；联泰科技凭借深厚的增材制造积累，积极进行热交换器金属增材制造布局；倍丰智能为热管理应用提供设备与导热材料集成方案；南方增材为多种材料工艺及服务；大族聚维、美光速造为绿光铜打印新锐；汉邦科技为设备及应用方案商；众远新材料、中航迈特、中体新材、有研增材等企业为材料端支撑；中国企业从材料、设备到工艺、打印服务各环节协同，构成完整3D打印换热器产业链。

各领域增材制造热交换器发展驱动力

航空航天

飞行器减重需求，如波音787、空客A350
比传统铸造或钎焊方案轻40-50%

电力

超临界CO₂循环和核能紧凑型
换热器紧凑型换热器；
替代传统管壳式换热器

汽车制造

集成化设计、减少零件数量

半导体设备

晶圆处理设备散热

电子冷却

高性能计算数据中心GPU散热
需求

医疗器械

手术仪器定制化热管理

化工处理

复杂内部流道设计提升热交换
效率

暖通空调(HVAC)

点阵结构、拓扑优化设计

增材制造热交换应用的战略发力点

增材制造热交换制造商

继续深耕技术护城河，重点突破铜合金、高导热铝合金等增材制造的材料体系和工艺参数优化，建立从专用粉末，到优化工艺和后处理的完整技术链条。

传统热管理企业

积累增材制造技术能力。可以与专业增材制造企业建立战略合作，降低技术转型风险。密切关注行业成本曲线，提前布局。

3D打印设备企业

液冷散热是一个高附加值、高增长潜力的细分市场。开发面向热管理应用的专用设备和工艺包，为下游应用企业提供“交钥匙”解决方案。

消费电子品牌

随着技术成熟和成本下降，高端游戏PC、工作站等产品有望率先规模化应用3D打印散热组件。品牌方与专业增材制造企业建立早期合作关系，在产品中探索3D打印散热的差异化卖点。

航空增材制造热交换器需求与挑战分析

需求侧驱动力

机队规模增长
飞机更新换代

燃油效率与
CO₂排放要求
日益严格*

新一代
集成化设计

电动与混动
推进系统需求

增材制造技术
扩展

传感器化与预
测性维护



供给侧挑战

轻量化与高热效率、
低压降难以同时满足

特种材料供给挑战

复杂芯体
内部缺陷检测

在紧凑、高负载空间
内的集成



汽车增材制造热交换器需求与挑战

电动汽车 电池热管理

需要精密冷却系统，保持电池在最佳工作温度范围（-20°C至60°C）；高性能车型峰值功耗50-100 kW。

轻量化与传热效率 提升

增材制造电池冷却板相比传统铝设计减重25-35%，传热效率提高20-30%。

自动驾驶电子冷却

激光雷达、雷达和计算系统的复杂电子冷却需求，推动集成热管理解决方案。

挑战与限制

成本竞争力

传统制造技术持续降低成本，可能缩小增材制造的竞争优势

驱动力与需求

混合动力热管理

需同时管理内燃机和电动机热负荷的复杂热交换器。

质量认证需求与标准缺乏

相关质量认证路径的监管延迟可能减缓采用率。

缩短交付周期

OEM采购策略倾向模块化、可定制设计。

材料新需求

陶瓷和聚合物复合热交换器作为专业应用的新兴细分市场；
电动汽车比燃油车多需30%铝材用于热管理。

先进涡轮增压系统

效率导向的传统发动机需要增加表面积的热交换器。

技术人才短缺

增材制造领域熟练劳动力短缺，可能制约制造能力增长并推高人力成本

数据中心与高性能计算对3D打印热交换器的需求与挑战

功耗增长驱动 先进散热方案

2030 E: 1050 TWh

芯片级热负荷激增

英伟达H100/H200等AI加速器热负荷超500 W，远超传统风冷能力。

微通道设计成为刚需

增材制造能经济地实现100-300微米宽、湍流优化的流体通道。

挑战与限制

成本竞争力

传统制造技术持续降低成本，可能缩小增材制造的竞争优势

功率密度提升 倒逼液冷

单机架功率从5-7 kW增至20-40 kW，液冷（含浸入式和两相冷却）成为必然选择。

监管延迟

电子冷却领域虽无航空级认证严格，但行业标准和质量验证仍需时间。

头部企业已行动

微软Project Denali、Facebook开源设计、Equinix、Digital Realty、AWS等均在部署先进冷却技术。

边缘计算带来新需求

5G基站、自动驾驶计算平台、边缘节点创造分散化的定制热交换器需求。

技术人才短缺

增材制造领域熟练劳动力短缺，可能制约制造能力增长并推高人力成本。

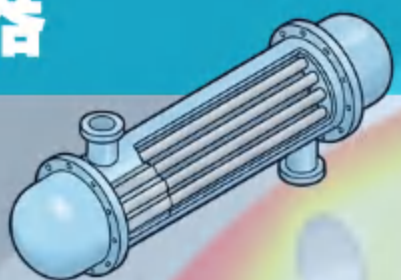
换热器



多样化的热交换器-按传热表面构造分类

Tubular
Heat Exchangers

管式热交换器



壳管式

适用壳体内径 ≤ 60 in.、
设计压力 $\leq 3,000$ psi

套管式

由两根同心圆管构成，
结构最简单。

盘管式

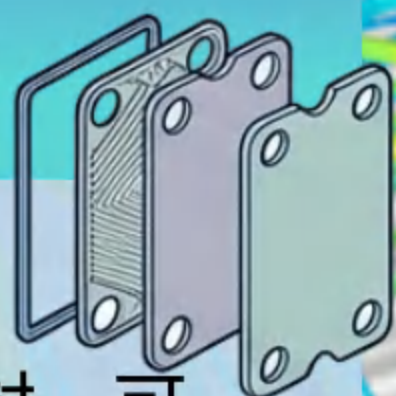
管结构，属于管式换热器子类。

微通道扁管式

采用挤压多孔扁管，内含
多条水力直径 < 1 mm 的微
通道；外部可设翅片形成
管翅结构。

Plate
Heat Exchangers

板式热交换器



垫片板式

板片间以垫片密封，可
拆洗。

钎焊/焊接板式式

板片间通过钎焊或焊接
密封，耐压高于垫片式。

螺旋板式

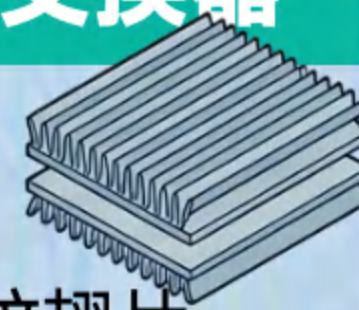
两张金属板卷成螺旋流
道。

印刷电路板式

由薄板蚀刻半圆形/矩形微
通道后堆叠扩散焊而成；
水力直径 $0.1-2$ mm。属于
一种新型微通道换热器。

Extended Surface
Heat Exchangers

扩展表面式热交换器



板翅式

在平板间夹设波纹翅片
形成流道；面积密度高
($> 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$)，多用于
气-气换热。

管翅式

在管外阵列设置翅片，
翅片通过钎焊、焊接或
机械固定于圆管、扁管
或椭圆管。

微通道板翅/管翅式

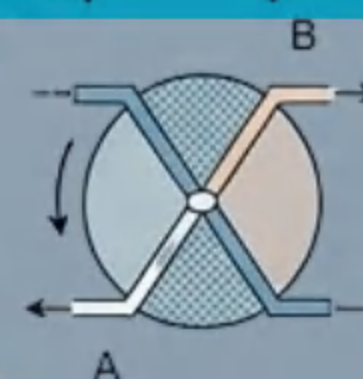
采用挤压微通道扁管替代
传统圆管，外部设翅片。

Regenerative
Heat Exchangers

回热式热交换器

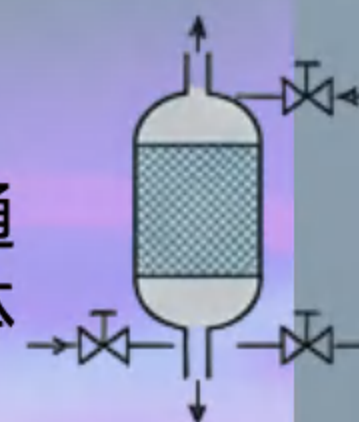
旋转式

蓄热体旋转交替
通过热、冷流体。



固定矩阵式

蓄热体固定，通
过阀门切换流体
流向。



按传热表面构造分类-管壳式换热器

根据所采用的补偿措施，管壳式换热器可分为几种主要类型：

①

固定管板式换热器

管束两端的管板与壳体联成一体，结构简单，但只适用于冷热流体温度差不大，且壳程不需机械清洗时的换热操作。当温度差稍大而壳程压力又不太高时，可在壳体上安装有弹性的补偿圈，以减小热应力。

②

浮头式换热器

管束一端的管板可自由浮动，完全消除了热应力；且整个管束可从壳体中抽出，便于机械清洗和检修。浮头式换热器的应用较广，但结构比较复杂，造价较高。

③

U型管式换热器

每根换热管皆弯成U形，两端分别固定在同一管板上下两区，借助于管箱内的隔板分成进出口两室。此种换热器完全消除了热应力，结构比浮头式简单，但管程不易清洗。

④

涡流热膜换热器

涡流热膜换热器采用最新的涡流热膜传热技术，通过改变流体运动状态来增加传热效果，当介质经过涡流管表面时，强力冲刷管子表面，从而提高换热效率。

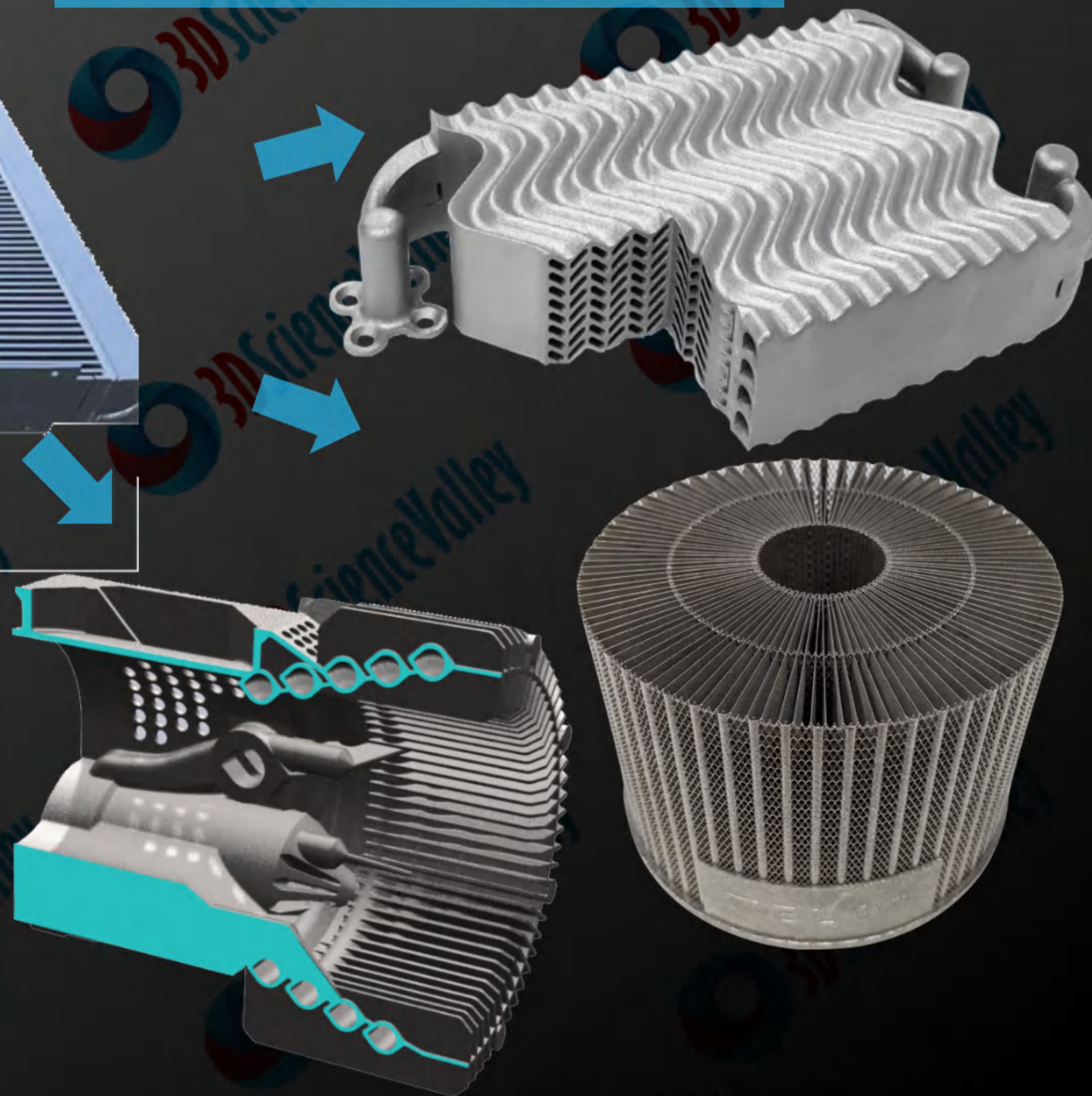
按传热表面构造分类-板翅式热交换器

3D打印实现更为自由的表面和内部通道

板翅式热交换器

Plate Fin Heat Exchanger

翅片的主要作用是强化传热，也有增强两金属板强度的作用，在这种热交换器中相邻两通道之间的热交换，一部分通过平板传递热量，但绝大部分热量是通过波纹翅中传递的，因为平板之间均有波纹翅片，因而大大增加了传热面积，所以它的单位体积内的传热面积比一般管式热交换器大10倍以上。通过各通道之间的不同组合，可得到逆流、错流等形式的热交换器。它具有单位体积传热面积大、传热效率高、流体阻力小、热容量小、结构紧凑及同时允许几种介质进行热交换等优点。

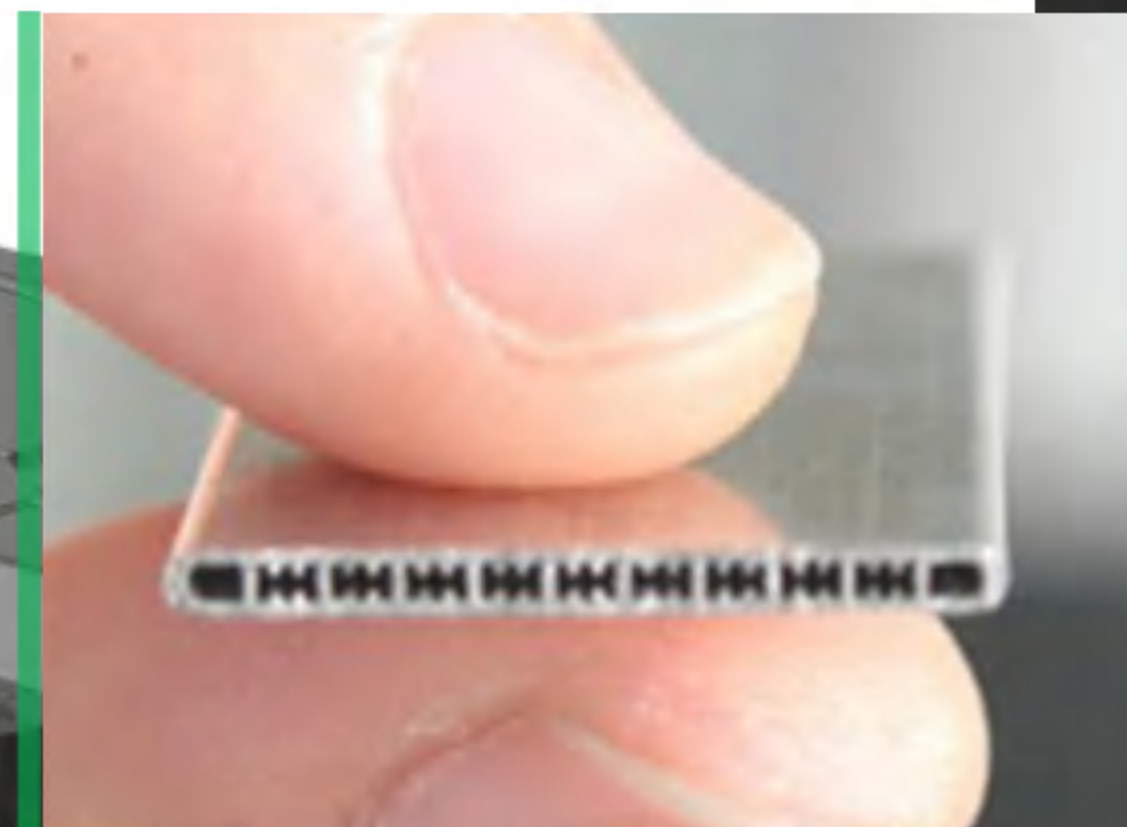


按传热表面构造分类-微通道换热器

微通道换热器

Micro-tunnel Heat Exchanger

微通道换热器，就是通道当量直径在10-1000 μm 的换热器。这种换热器的扁平管内有多条细微流道，在扁平管的两端与圆形集管相联。集管内设置隔板，将换热器流道分隔成数个流程。



微通道换热器按外形尺寸可分为微型微通道换热器和大尺度微通道换热器。

微型微通道换热器是为了满足电子工业发展的需要而设计的一类结构紧凑、轻巧、高效的换热器，其结构形式有平板错流式微型换热器、烧结网式多孔微型换热器。

大尺度微通道换热器主要应用于传统的工业制冷、余热利用、汽车空调、家用空调、热泵热水器等。其结构形式有平行流管式散热器和三维错流式散热器。由于外型尺寸较大(达1.2m $\times$ 4m $\times$ 25.4mm[13])，微通道水力学直径在0.6~1mm以下，故称为大尺度微通道换热器。国内市场最先将微通道技术产业化的是汽车空调行业。

多样化的热交换器-按材料分类

ASTM A36碳钢

热导率 $52.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；密度 7.85 g/cm^3 ；弹性模量 200 GPa ；含碳量 $0.25\text{--}0.29\%$ 。

典型应用：

通用换热器、电厂换热器、炼油厂换热器壳体。

AISI 1020碳钢

热导率 $51.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；密度 7.70 g/cm^3 ；含碳量 $0.18\text{--}0.23\%$ ；抗拉强度 $410\text{--}790 \text{ MPa}$ 。

典型应用：

通用换热器、电厂换热器、锅炉换热器。

304不锈钢

热导率 $16.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；密度约 $8,000 \text{ kg/m}^3$ ；比热容约 $500 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ 。

典型应用：

换热器设备、换热器管束、食品/制药用换热器。

316L不锈钢

热导率 约 $16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ @ 20°C ；可稳定用于 -196°C 至 800°C 环境。

典型应用：

化工换热器、海水淡化换热器、食品/制药用换热器。

C11000铜

热导率 $385 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；铜纯度 99.9% ；电导率 $101\% \text{ IACS}$ 。

典型应用：

HVAC换热器、冷凝器、炼油厂水冷冷凝器/冷却器。

C70600铜镍

热导率 $50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；含铜 90% 、镍 10% ；在海水环境中可维持结构完整性 $15\text{--}20$ 年。

典型应用：

海水淡化换热器、船舶冷凝器、HVAC换热器。

C71500铜镍

热导率 $40 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；含铜 70% 、镍 30% ；耐海水腐蚀及抗生物污损性能优于C70600。

典型应用：

蒸汽冷凝器、换热器管、海水冷却换热器。

TZM

热导率 $126 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；含钼 $\geq 99.2\%$ 、钛 0.50% 、锆 0.08% ；在 1100°C 以上拉伸强度约为纯钼的两倍。

典型应用：

高温换热部件、火箭喷嘴（热交换）、高温炉加热元件。

多样化的热交换器-按材料分类



3003铝合金

热导率 190–200 W/m·K;
含锰1.0–1.5%; 密度2.73 g/cm³。

典型应用:

汽车换热器、空调换热器、
电子散热器。

6061 铝合金

热导率167 W/m·K @25°C;
屈服强度276 MPa; 密度
2.70 g/cm³。

典型应用:

汽车换热器、空调换热器、
电子散热器。

AlSi10Mg铝合金

热导率 130–150 W/m·K;
含硅9.0–11.0%、镁
0.2–0.45%; 密度2.67 g/cm³。

典型应用:

电子散热器、汽车换热器、
空调换热器。

Ti-6Al-4V钛合金

热导率 7.1–7.3 W/m·K;
抗拉强度862–1200 MPa。
在宽pH范围及氧化环境中
腐蚀速率<0.1 mm/年。

典型应用:

塔顶冷凝器、冷凝器管束、
海水淡化换热器。

Inconel 718镍合金

热导率 11.4 W/m·K
@20°C; 熔点
1260–1336°C; 密度8.19 g/cm³。

典型应用:

核电蒸汽发生器管束、高
温换热器、石化换热器。

Hastelloy C276

热导率 9.9 W/m·K; 密度
8.89 g/cm³; 熔点
1323–1371°C; 耐强氧化剂
及湿氯气。

典型应用:

高温换热器、石化换热器、
核电蒸汽发生器管束。

Monel 400

热导率 21.8 W/m·K; 含
镍约63%、铜28–34%。

典型应用:

海水淡化厂换热器、海洋
工程换热器、核电蒸汽发
生器管束。

纯钨

热导率 170–175 W/m·K;
熔点约3410°C; 密度
19.25–19.35 g/cm³。

典型应用:

核聚变堆偏滤器、高温炉
热交换部件、等离子体面
材料。

多样化的热交换器-按材料分类

碳化硅 (SiC)

抗拉强度 250 MPa @1500°C; 热膨胀系数 $5.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; 热导率约 25 W/m·K @1500°C; 在高温氧化环境中会氧化。

典型应用:
高温燃气轮机换热器。

氧化铝 Al_2O_3

抗拉强度 13 MPa; 热膨胀 $8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; 热导率 6 W/m·K @1500°C。

典型应用:
高温反应器换热器、高温换热器构造材料。

石墨

热导率 119 W/m·K; 耐蚀性优异。

典型应用:
化工腐蚀环境换热器。

特种聚合物

热导率 7.1–7.3 W/m·K; 抗拉强度 862–1200 MPa。在宽pH范围及氧化环境中腐蚀速率 < 0.1 mm/年。

典型应用:
低温换热器、腐蚀环境换热器、低成本换热器。

热交换器制造工艺

制造工艺

机械加工

卷制与成型

焊接

钎焊（真空、盐浴）

扩散焊

光刻

激光微加工

共挤出与流延成型

增材制造

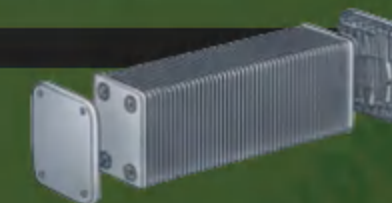
典型热交换器类型

壳管式换热器

壳管式换热器

壳管式换热器（管对管板、壳体、结构框架）；板翅式换热器端盖

板翅式换热器



印刷电路板式换热器（PCHE）；微通道换热器

微通道换热器



微通道换热器

SiC高温换热器（ $>1000^{\circ}\text{C}$ ）

微通道、管壳/板翅式设计的一体化改造、复杂弯曲无支撑通道等

增材制造技术及热交换器制造应用

增材制造工艺	典型材料	特点
电化学沉-ECAM 工业规模级	高纯度纯铜 (>99.95%); 可直接在硅、陶瓷、PCB 表面成形	室温无热应力, 可加工 纯铜; 具量产潜力; 尺寸限于模块级, 主要用于制造中等尺寸的芯片散热模块或集成冷板。
电化学沉-ECAM 微纳研究级	纯铜、金、镍、银、铂	亚微米级极致精度: 尺寸仅限微米至毫米级。
激光粉末床熔融- LPBF	镍合金、钛合金、铝合金、纯铜、铜合金	商业化最成熟的增材制造工艺, 尤其适合 TPMS等复杂结构; 纯铜打印成本、效率仍有提升空间。
电子束粉末床熔融-EPBF	纯铜、TiAl、钨合金	纯铜吸收率80%, 真空热床无裂纹; 高粗糙度致流体压降大。
粘结剂喷射-BJ	316L不锈钢、铜合金、纯铜	无硬支撑, 生坯打印快, 可承高压; 脱脂烧结周期长, 设计时需考虑收缩率。
定向能量沉积- DED	GRCop铜合金、IN625/718镍合金、NASA HR-1铁-镍基高温合金	尺寸限制小, 可实现双金属梯度界面 不适合制造紧凑型微通道换热器。

散热器

散热器

散热器是一种将热量从固体或液体介质传递至环境空气、实现热量耗散且不回收的换热设备。其与广义换热器的核心区别在于热量的最终去向：散热器将热量排至空气（耗散），而换热器则在两种工艺流体之间传递热量（回收或再利用）。从这个意义上讲，所有散热器都属于换热器，但并非所有换热器都是散热器。

按材质划分，散热器主要包括：铸铁散热器、钢制散热器，以及铝/铜、复合型散热器（钢铝复合、铜铝复合、不锈钢铝复合等）和搪瓷散热器等其他材质。

在微电子领域，伴随摩尔定律推动集成电路集成度不断提高，高热流密度已成为共性挑战，微通道结构、液冷技术及高密度翅片正逐步取代传统散热结构，成为行业主流趋势。

各领域典型散热器

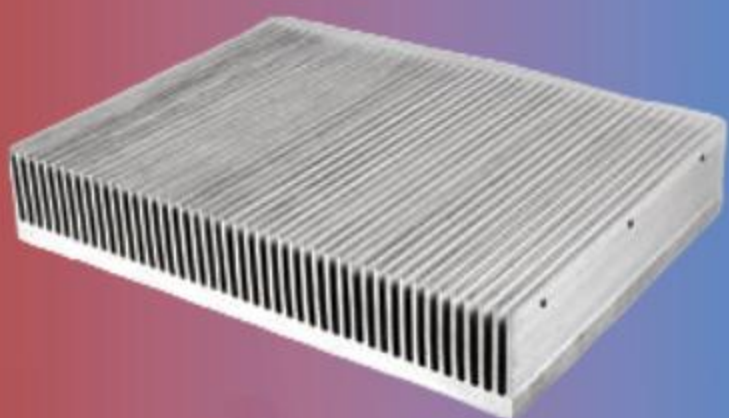
领域	发热元件（热源）	典型散热器
航空电子	处理器芯片、TR组件、红外探测器	液冷板、微通道冷板、高密度翅片散热器
医疗器械	医疗检测芯片、基因循环仪加热元件	小型液冷板、精密翅片散热器
IT通讯	CPU/GPU、功率放大器（PA）、光模块	强制对流翅片散热器、热管/均温板复合散热器
消费电子	手机/电脑/平板/可穿戴设备主芯片	微型翅片散热器、均温板、薄型热管
风力发电	IGBT模块、发电机轴承、齿轮箱润滑油	大功率液冷板、油-空翅片散热器
汽车/电动汽车	逆变器IGBT、电池电芯、车灯LED芯片	液冷板、翅片式电池冷板、一体化散热模组
太阳能	逆变器IGBT	大功率翅片散热器、自然对流散热器
LED灯	LED芯片	铝制翅片散热器（自然/强制对流）
机车牵引	IGBT、整流二极管、电气柜功率模块	高可靠性液冷板、强制风冷散热器
电气	变频器IGBT、电气柜功率器件	翅片散热器、风冷/液冷复合散热器

风冷散热器传统制造方式

铝挤

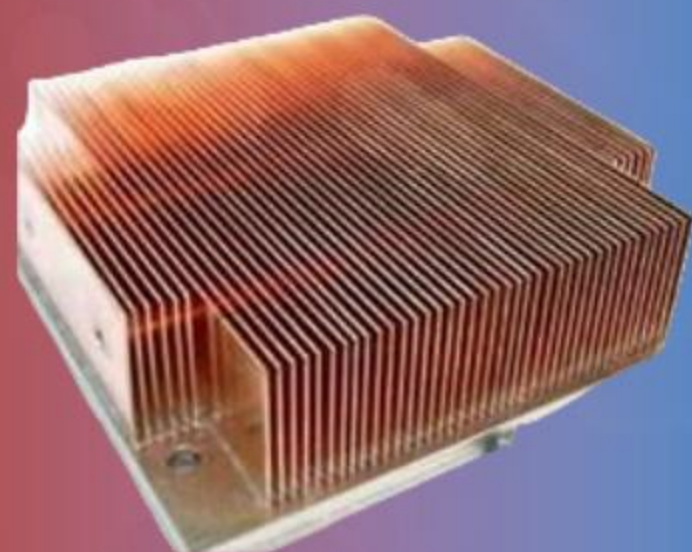
技术相对简单，适合大批量制作整体式散热器。

性能优劣通常以翅片的高度与翅片间隙的比值（高宽比）来衡量。



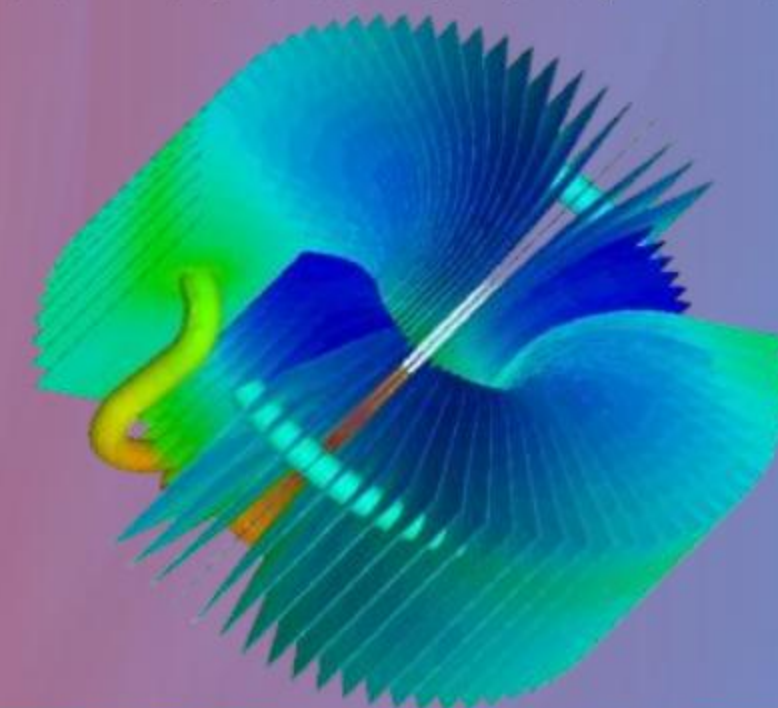
焊接

将独立的翅片与基板通过焊接工艺连接。散热性能主要取决于焊接工艺质量。



焊接串翘（穿FIN）

将翅片穿入基板开槽中，再通过机械胀接或焊接固定。结合了机械连接与焊接的优点，提高翅片与基板的结合紧密度。



焊接扣翘（扣FIN）

将翅片通过扣压方式固定在基板上，必要时辅以焊接加固。

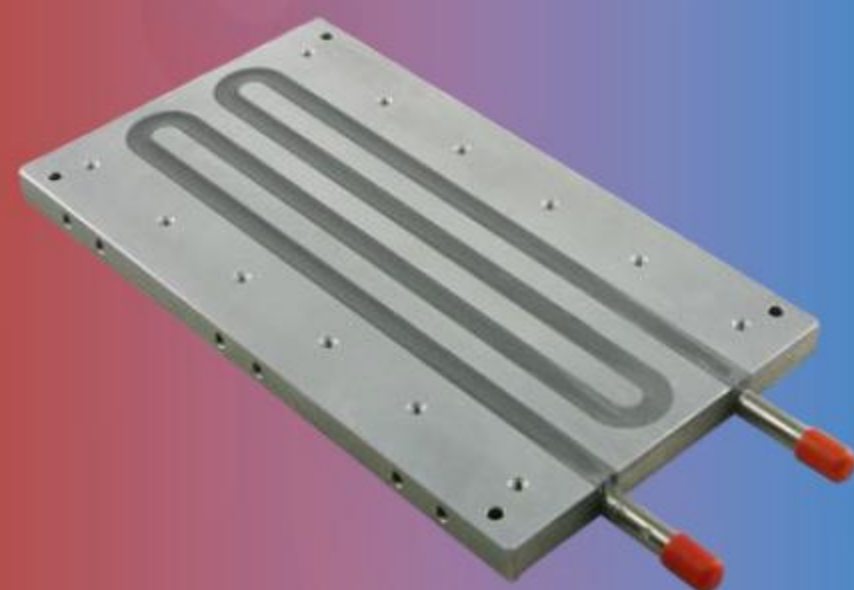
利用机械咬合+焊接双重固定，兼顾散热性能与结构稳定性。



液体散热器传统制造方式

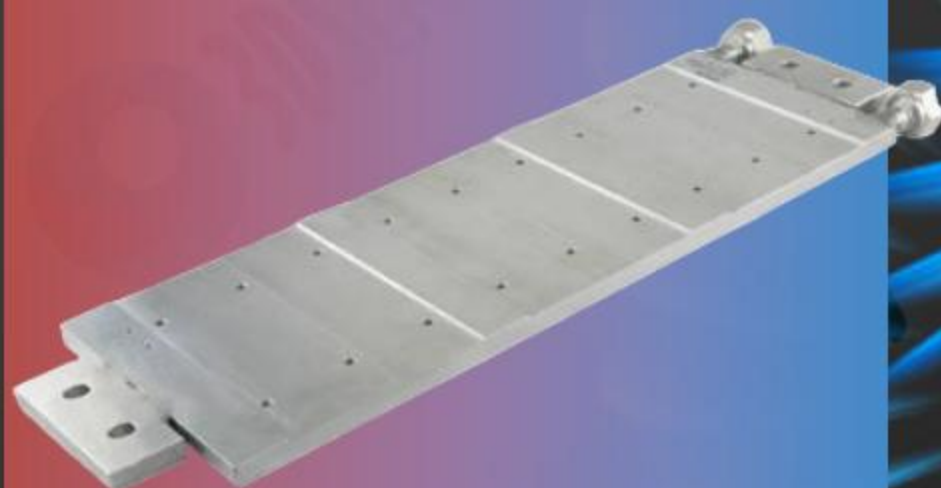
压管式

将金属管压入基板的预留槽内，通过机械变形使管壁与基板紧密贴合。



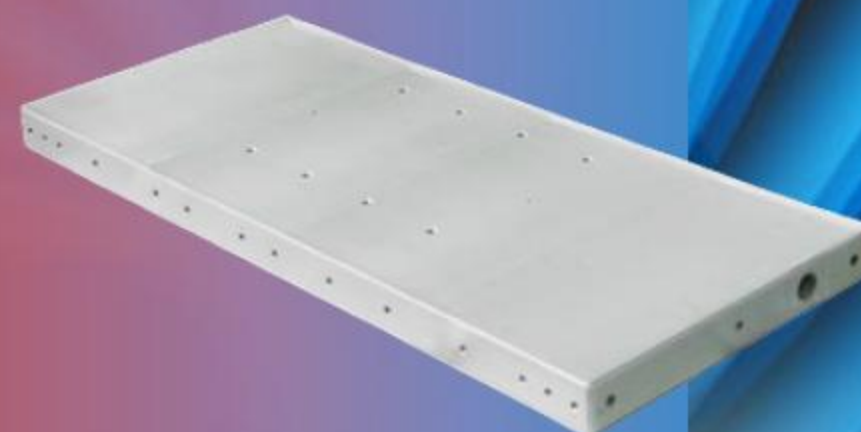
搅拌摩擦焊

在金属板中铣削出流道后，将盖板通过搅拌摩擦焊方式焊接密封。



钻孔式

在实心金属块上通过钻孔加工出相互连通的流道网络，早期为主要加工方式。



通用制造技术涉及焊接、钎焊、扩散焊、机械加工、光刻、激光微加工及增材制造等工艺。这些技术在板翅式换热器、印刷电路板式换热器（PCHE）及微通道换热器中均有应用，详细说明请参见本白皮书第一章的“热交换器制造工艺”。

电子产品散热技术

空气冷却

强制对流

依靠空气受热自然上升

自然对流

翅片散热器+风扇

液体冷却

直接液体冷却

液冷板，冷却液不接触发热元件

间接液体冷却

浸没式冷却，发热元件浸入绝缘冷却液

相变传热

热管/均温板

利用工质蒸发-冷凝循环

相变冷却

喷雾冷却、池沸腾

射流冲击冷却

高速流体垂直冲击热表面

微通道传热

水力直径10-1000 μ m的微通道结构

热电制冷

帕尔贴效应，可主动制冷至室温以下

电子散热器

在电子产品设计中，提高性能和增加可靠性必须要求电子产品具有良好的散热性，降低产品造价也需要有良好的散热解决方案。通过采用合适的散热技术和散热方案，可能减少银、铜等贵金属材料的使用，在更低的成本下实现同样的散热效果。

提升电子产品性能与可靠性电子系统故障平均间隔时间随温度倒数呈指数增加。温度越低，故障平均间隔时间越大，因此温度的降低有助于提高系统的可靠性。温度的降低也会降低电子产品失效概率，与温度有关的失效通常被分为机械失效、腐蚀失效和电气失效，具体如下：

散热器的失效类型

机械失效

包括过度变形、屈服、裂隙、断裂或者两片材料结合处的分离。

腐蚀失效

包括金属和键合点腐蚀和封装中应力腐蚀。

电气失效

指影响设备性能的失效。

全球散热器典型制造商

Boyd (含Aavid Thermalloy)

台達電子 (Delta Electronics)

酷冷至尊 (Cooler Master)

建准电机 (Sunonwealth)

奇鋁科技 (AVC)

海盗船 (Corsair)

猫头鹰 (Noctua)

Asetek

恩杰 (NZXT)

曜越科技 (Thermaltake)

中国散热器制造商

PC/消费电子散热领域

九州风神、超频三、万景华科技、乔思伯

工业/电力电子/新能源散热领域

维创散热器、武汉倍沃得、株洲中车奇宏散热、凯盛散热器、富利电子散热器、速热科技、祥博传热、祺峰动力

电子散热（热沉）领域

九州风神科技、吉欧德散热器、同裕电、颂德五金电子

散热器市场的增长引擎已从通用风冷转向高性能液冷。

中国散热器行业正从规模扩张向质量竞争转型，一批国家级专精特新企业凭借持续研发投入，在高效散热材料、微通道结构、流体仿真等高端领域构筑技术壁垒，并积极向新能源储能、数据中心等新兴领域拓展。

热交换产品细分市场规模

热交换器市场规模—航空航天—火箭部件热交换器市场规模

市场概览

2026年市场规模
13.3亿美元



7.9% 2026—2030
复合年增长率 (CAGR)



2030年市场规模
18.0亿美元

主要增长驱动力

- 商业航天任务激增（2023年增长30%，预计2028年翻倍）；
- 再生式、微通道、印刷电路等先进热交换器技术普及；
- 对轻量化、紧凑型、高压高温环境适应性的需求提升；
- 增材制造热交换功能/组件加速落地。

关键技术趋势

低温兼容材料应用扩大
紧凑型高压结构设计成为主流
3D打印航空航天热交换器进入实用阶段

典型应用

推进系统
热管理系统
发动机组件热管理优化

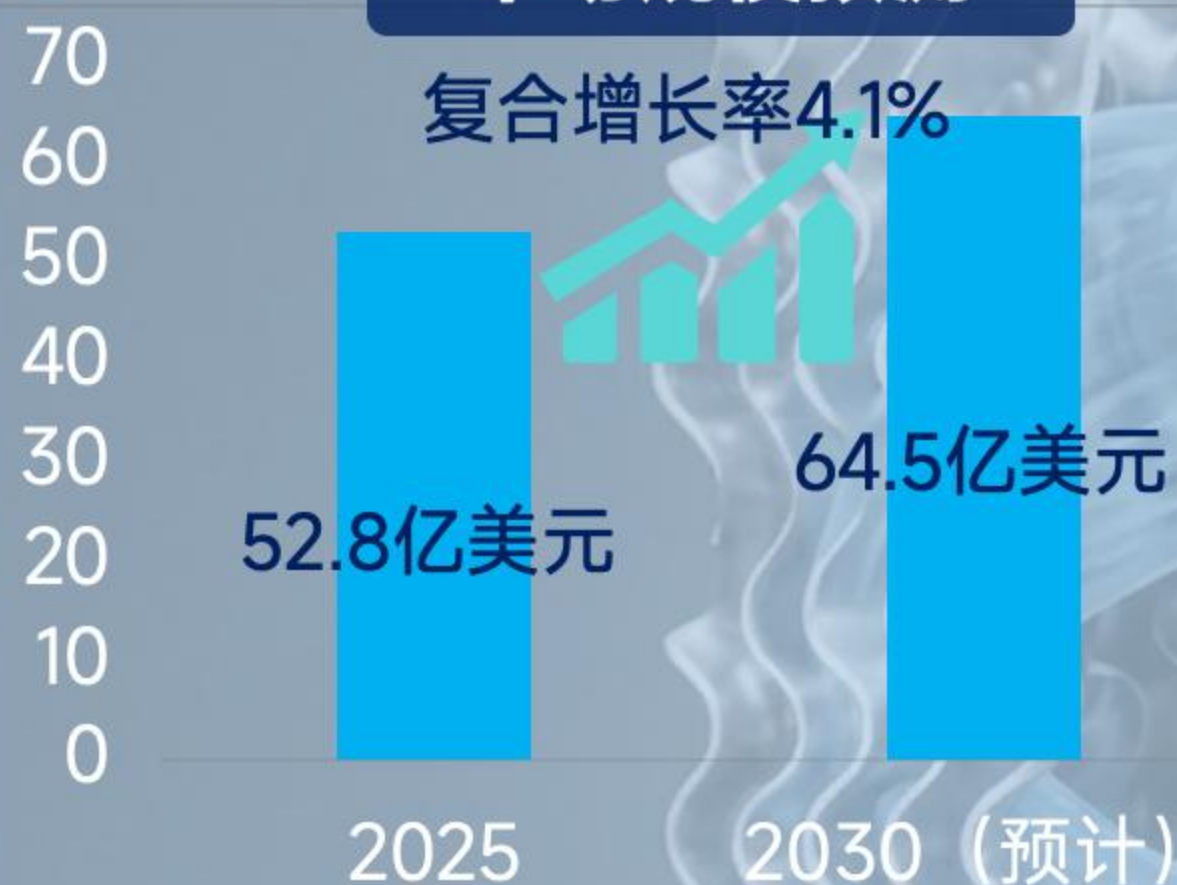
主要材料

铝合金 不锈钢
钛合金 高温合金

热交换器市场规模—航空航天—飞机热交换器市场规模

市场规模预测

复合增长率4.1%



增长最多的材料
钛合金



增长最快的地区
中东与非洲

主要驱动因素

提高燃油效率及
轻量化的需求

航空交通量增加

装备现代化的需求

政策法规影响

更加严格的
安全与环保法规



OEM与MRO采用
先进热管理系统

增加可靠性，减少
排放，并确保不同
机型的合规性

热交换器市场规模—数据中心冷却

全球市场预测

2024年
8.7亿美元

→

2030年
107.0亿美元

年复合增长率：51.93%



中国市场预测

2025年
3.7163亿美元

→

2030年
8.393亿美元

年复合增长率：17.45%

主要驱动因素

全球市场

AI/HPC工作负载激增：现代AI机柜功耗从传统服务器的5-10kW跃升至20-130kW

PUE合规压力：各地政府对数据中心能效的强制性要求

液冷技术成熟：PUE可低至1.03-1.08

中国市场

AI服务器密度：现代AI机柜功耗20-130kW，传统空气冷却已无法满足

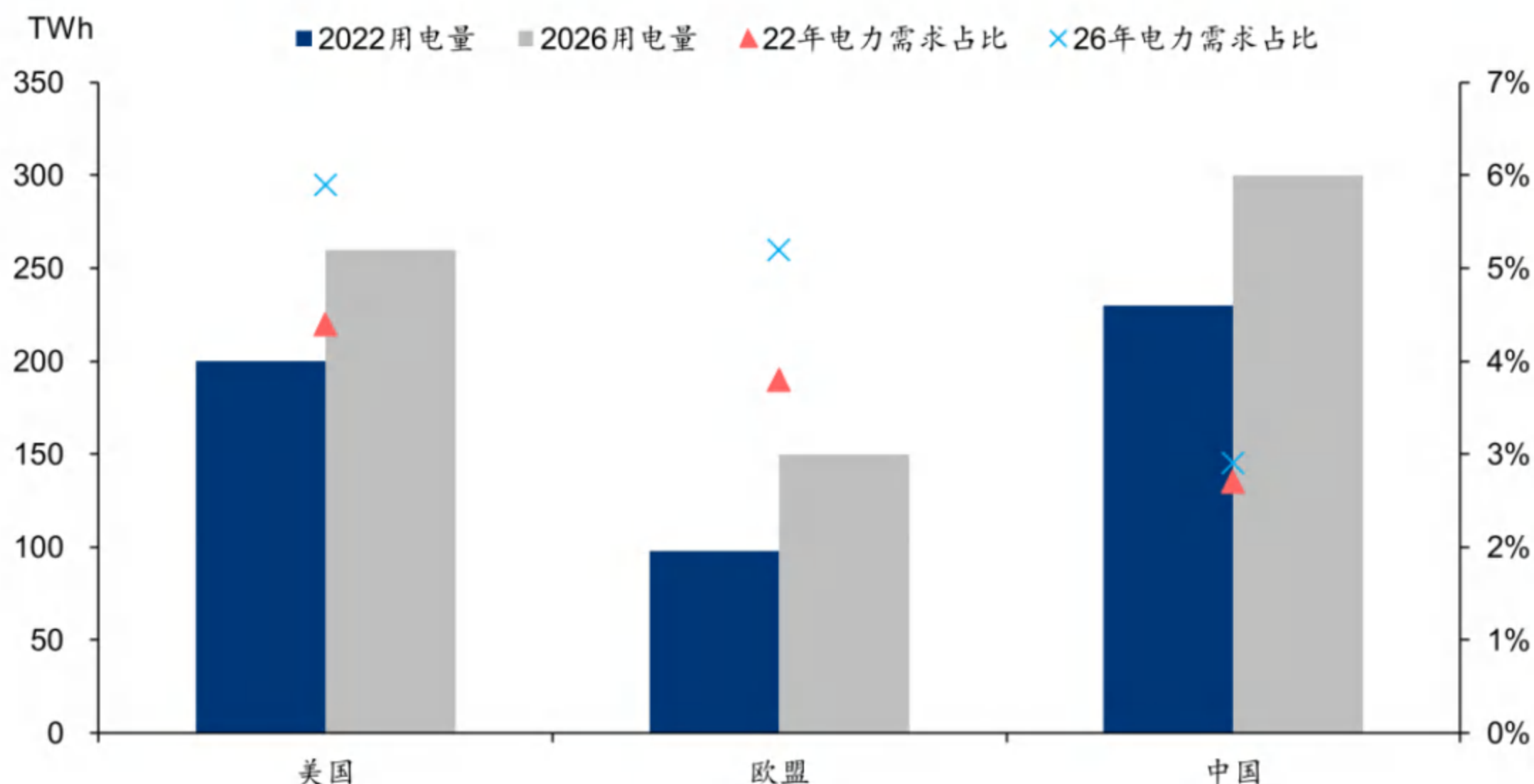
政策要求PUE：北京/上海要求新建数据中心PUE<1.3，液冷是唯一可行路径

东数西算工程：国家级算力枢纽全面推动液冷技术应用

运营商集采：2026年国内新建智算中心100%液冷覆盖

数据中心用电量及能效法规为液冷技术带来机遇

2022与2026年全球主要区域数据中心用电量及需求占比



资料来源：IEA，华泰研究

数据中心的用电量呈现快速增长趋势，从2022年的200TWh(约占美国电力需求的4%)增加到2026年的近260TWh，占总电力需求的6%。

欧盟2022年数据中心运营数达1240个，用电量略低于100TWh，占欧盟总电力需求约4%，IEA预测到2026年欧盟数据中心部门的用电量将达到近150TWh。

根据国网能源研究院估计，2030年中国数据中心行业的电力需求将比2020年翻一番，达到400TWh；根据IEA预测，2026年中国数据中心行业电力需求将达300TWh。

❄️ 液冷技术凭借低至1.05–1.15的PUE（电能使用效率）表现（远超风冷的1.4–1.8），已成为应对全球严苛能效法规（如欧盟、德国及中国京沪等地要求 $PUE \leq 1.3$ ）的核心方案，为数据中心满足合规要求并降低能耗成本提供了关键的升级路径。

❄️ 液体冷却系统固有的废热回收能力使数据中心从纯能源消费者转变为循环能源经济贡献者。

数据中心冷却系统制造商

核心部件供应商

冷却系统集成商

Schneider Electric 施耐德电气

Vertiv 维谛技术

Delta Electronics 台达电子

Envicool 英维克

CoolIT Systems

LiquidStack

Gigabyte 技嘉科技

GRC

Iceotope

高澜股份

英维克 Envicool

高澜股份

申菱环境

依米康

中科曙光

工业富联

浪潮信息

川润股份

飞龙股份

中石科技

冷却分配单元 CDU

Vertiv 维谛、Delta 台达电子、CoolIT Systems LiquidStack、Schneider Electric 施耐德电气、Nidec 尼得科、英维克、高澜股份、申菱环境、依米康等

冷板 Cold Plate

Vertiv、CoolIT Systems、英维克
中科曙光、科创新源、奕东电子等

换热器 Heat Exchanger

Gates 盖茨、GF、同星科技、三花智控、盾安环境等

快接头与连接方案 Quick Coupling

Southco 索斯科、英维克

在核心零部件市场中，海外企业份额居于前列，国内企业凭借成本优势、快速响应能力、定制化服务等，抢占海外竞争对手市场份额，有望实现对外资品牌的替代。

液体冷却系统核心部件价值量分布

冷板

40-50%
价值量占比

CDU冷却分配单元

30-40%
价值量占比

快接头

约10%
价值量占比

集液器/歧管

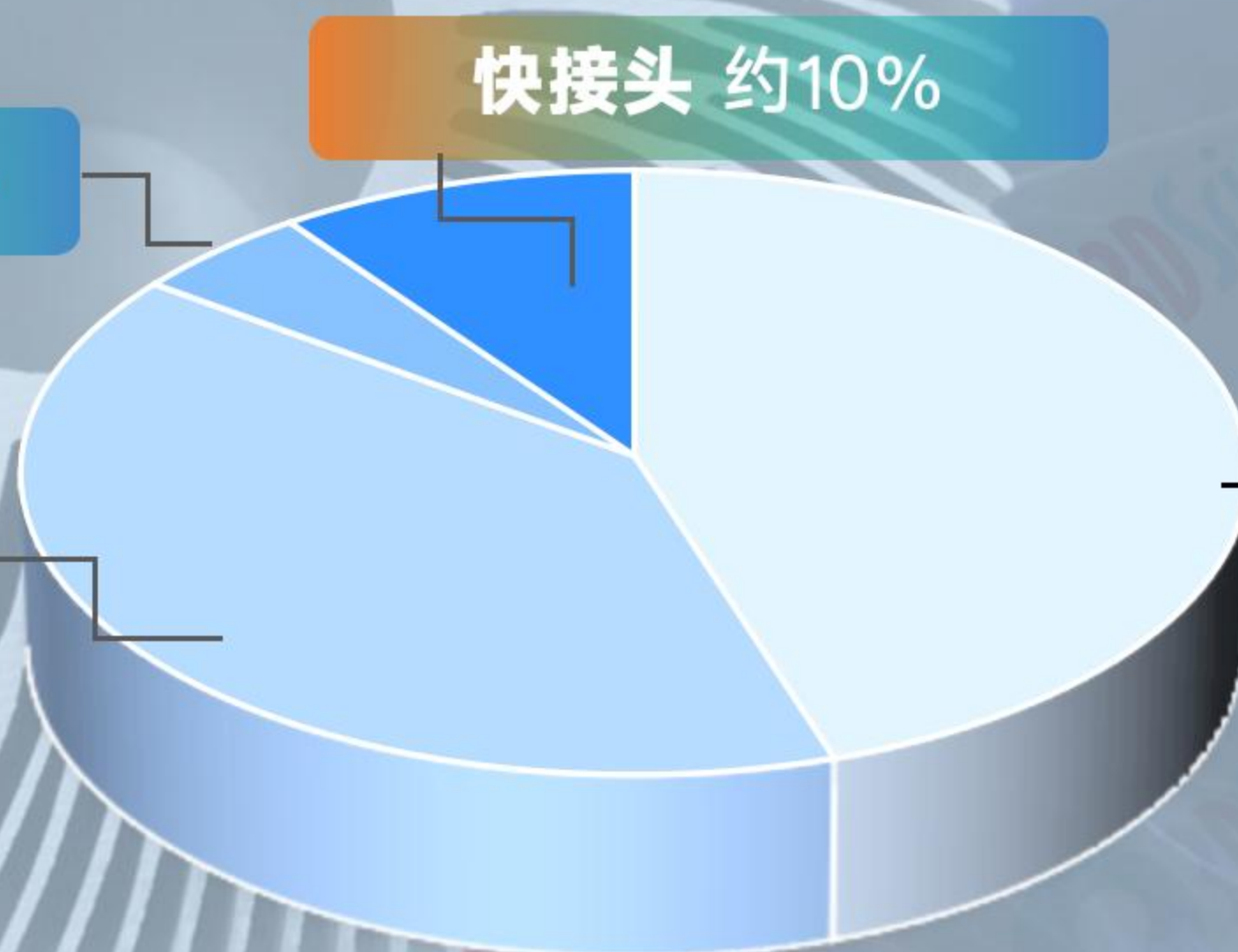
约5%
价值量占比

集液器/歧管 约5%

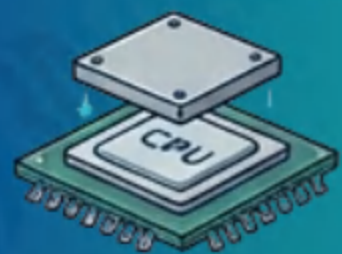
快接头 约10%

CDU 30%-40%

冷板 40%-50%



数据中心液体冷却技术发展趋势



直接芯片冷却/冷板

热阻 0.01-0.05°C/W

机架密度 60-100 kW

主流方案，可移除芯片60-80%热量



单相浸没式

矿物油或合成流体

机架密度 100-120 kW

消除空气移动设备，节省空间30-40%



两相浸没式

流体沸腾、冷凝相变

机架密度 150+ kW

极限散热，废热回收温度更高（45-60°C）



市场趋势

31亿 美元

领导市场：单相液冷是市场领导者，2025年市场规模估值为31亿美元。



大型数据中心

20-500+MW

主要场景：大型数据中心是主要落地场景。



标准组织推动

标准驱动

OCP、ASHRAE等行业标准组织持续推进标准化，显著降低技术采用风险和定制工程成本。

液冷不再是可选技术，而是应对AI与高密度计算时代热密度与能效双重挑战的基础设施核心方案。

热交换器市场规模—发电装备

全球核电热交换器市场规模



2031年（预）
2.79亿至2.86亿美元

2024年
1.67亿至1.91亿美元

燃气轮机联合循环电站热交换设备

系统环节	主要热交换设备
废热回收与蒸汽发生	余热锅炉（包含蒸发器、过热器、省煤器）
蒸汽轮机循环	凝汽器、高压加热器、低压加热器、除氧器
燃气轮机辅助与调节	回热器、中间冷却器、进气冷却器、各类（润滑油、发电机）冷却器
前沿技术	超临界二氧化碳（sCO ₂ ）热交换器

全球活跃企业

传统热交换器巨头

Alfa Laval (瑞典)
Kelvion Holding (德)
Danfoss (丹麦) / SPX FLOW (美)
IHI Corporation (日)
Xylem (美)
API Heat Transfer (美)
Chart Industries (美)

扩散焊PCHE专业厂商

Heatric (英) — Meggitt/Parker
Kobe Steel (日)
Vacuum Process Engineering
陕西智拓 — 扩散焊PCHE
衡水中科衡发 — 微通道
兰石重装换热公司

增材制造热交换器厂商

中国核动力研究设计院
Conflux Technology
3D打印气体-液体/液体-液体

超临界二氧化碳热交换器制造

GE — UPHEAT项目
900°C / 250 bar, 镍基超合金
中国核动力研究设计院-超碳一号工程
兰石重装换热公司
陕西智拓
Heatric
Kobe Steel
VPE — SMR & sCO₂专用

* 参考来源：

QYResearch/Future Market Insights / Dataintel
ARPA-E / 企业公告 / 工信部

热交换器市场规模—汽车热交换

市场增长



主要技术与创新

- ▶ 先进材料：纳米工程复合材料和高温合金应对极端热负荷。
- ▶ 增材制造与生成式设计驱动的仿生结构、晶格结构设计。
- ▶ 多功能热交换器同时冷却多个系统，提升空间和能源效率。
- ▶ 传感器和智能控制系统实现实时热管理。

驱动因素

车辆电动化带来了产品结构性替代与高价值量热管理系统的渗透。

电池冷却系统、发动机散热器、冷却器、水冷冷凝器、空调冷凝器、蒸发器、油冷器（变速箱油及发动机油）、中冷器、废气热回收。

热交换器主要包括：管翅式 / 翅片管式、管带式/条板式、板式等类型。

板式热交换器预计呈现出最高增长率。这类热交换器具有紧凑、高换热效率以及支持多流体热管理能力。

混合动力汽车（HEV）热交换细分市场预计在预测期内占据第二大份额。

铝及铝合金凭借其综合性能优势，在汽车热交换器领域占据绝对主导地位。

汽车用热交换器发展方向

方向一

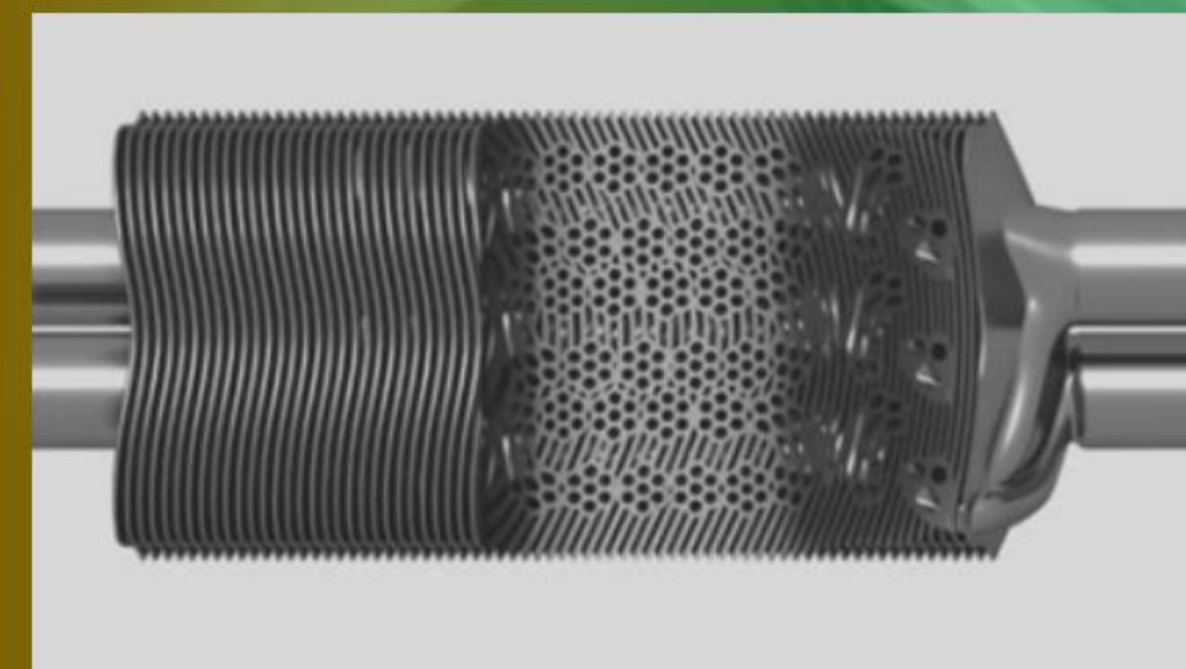
对于新型的清洁能源车辆，对散热器设计提出了较高的要求，希望在结构上更加紧凑，以满足新时期车辆的工作要求；

方向二

模块化设计将成为散热器设计的主流，在冷却系统中实现模块化设计可以对整车热循环系统进行设计优化；

方向三

新材料新技术的发展催生散热效率高的散热器材料，在小型化和轻型化汽车发展领域将大有作为，节能效果明显。



图片来源：APworks



汽车换热器、散热器代表性制造商企业

国内

浙江银轮机械股份有限公司
山东同创汽车散热装置股份有限公司
一汽富奥汽车零部件股份有限公司散热器分公司
山东厚丰汽车散热器有限公司
贵州贵航汽车零部件股份有限公司永红散热器公司
东风马勒热系统有限公司
南宁八菱科技股份有限公司
浙江时代汽车零部件有限公司
重庆上方汽车配件有限责任公司

国际

翰昂 (Hanon Systems)
德国贝洱 (Behr)
马勒 (Mahle)
美国摩汀 (Modine)
日本东洋 (Toyo)
日本电装 (DENSO)
康奈可 (Calsonic Kansei)
格朗吉斯Gränges
法雷奥 (Valeo)

3D打印的优势

增材制造带来换热器设计革新

从制造约束设计到性能驱动设计

1

从宏观经验公式到多尺度拓扑优化

2

3

从分体制造后组装到一体化集成

4

从均匀流动分布到热点匹配定制

传统制造条件下，换热器与散热器的边界较为清晰，这一边界的形成很大程度上源于传统制造工艺无法在一体化零件中同时实现复杂内部流道和高密度外部翅片。而3D打印-增材制造技术正打破这一边界。

参考资料：Scheithauer, U. et al., OAPEN Library, 2019.、3D科学谷

底图：Velo 3D

增材制造带来热交换产品性能提升

热性能：更高热流密度、更低热阻

温度均匀性：消除局部热点

流动阻力：高效换热与低能耗兼顾

3D打印 散热器与换热器 精华应用案例

芯片及数据中心散热应用

希禾增材 532 nm 绿光铜材料增材制造解决方案

高吸收率

15–60 μ m 小光斑

> 1000 mm/s 高速扫描

> 99.5% 致密成形

高吸收率

提升铜 / 铜合金能量耦合效率，实现稳定熔池。

小光斑

支撑微通道、TPMS、薄壁复杂结构精细成形。

高扫描速度

拓宽高速成形窗口，提升推力室等大尺寸结构制造效率。

高致密成形

保障纯铜导热性能与铜合金热端结构可靠性。

绿光解决方案让铜材料从高反难加工进入到高效、精密、可靠制造阶段。

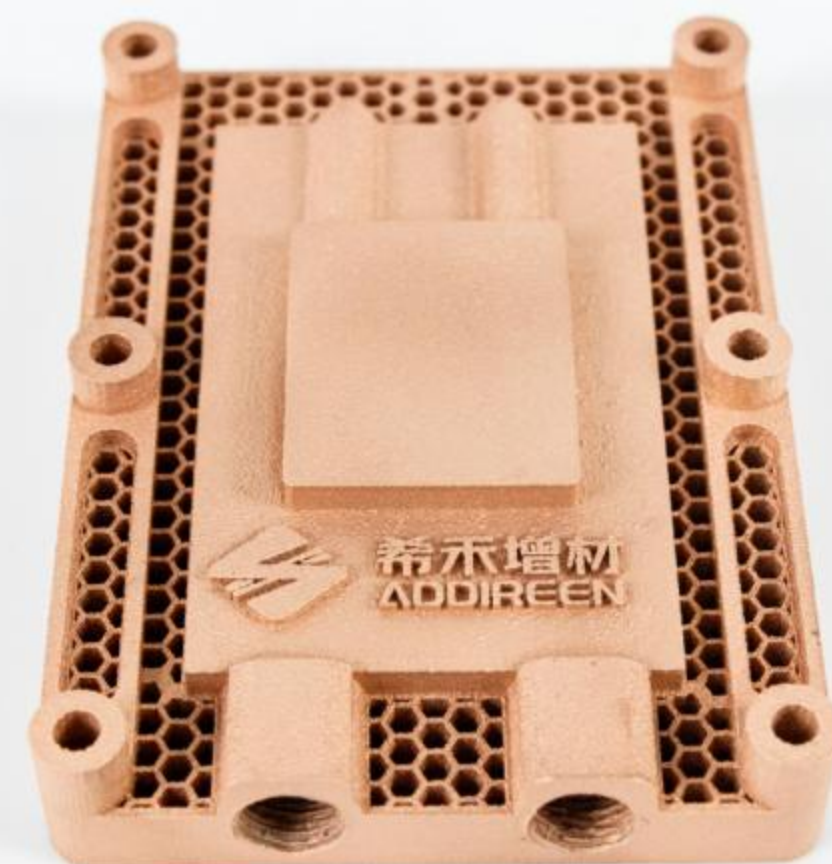


希禾增材
ADDIREEN

典型应用

◀ 铜合金推力室/航天热端结构

纯铜液冷板/TPMS 热管理结构

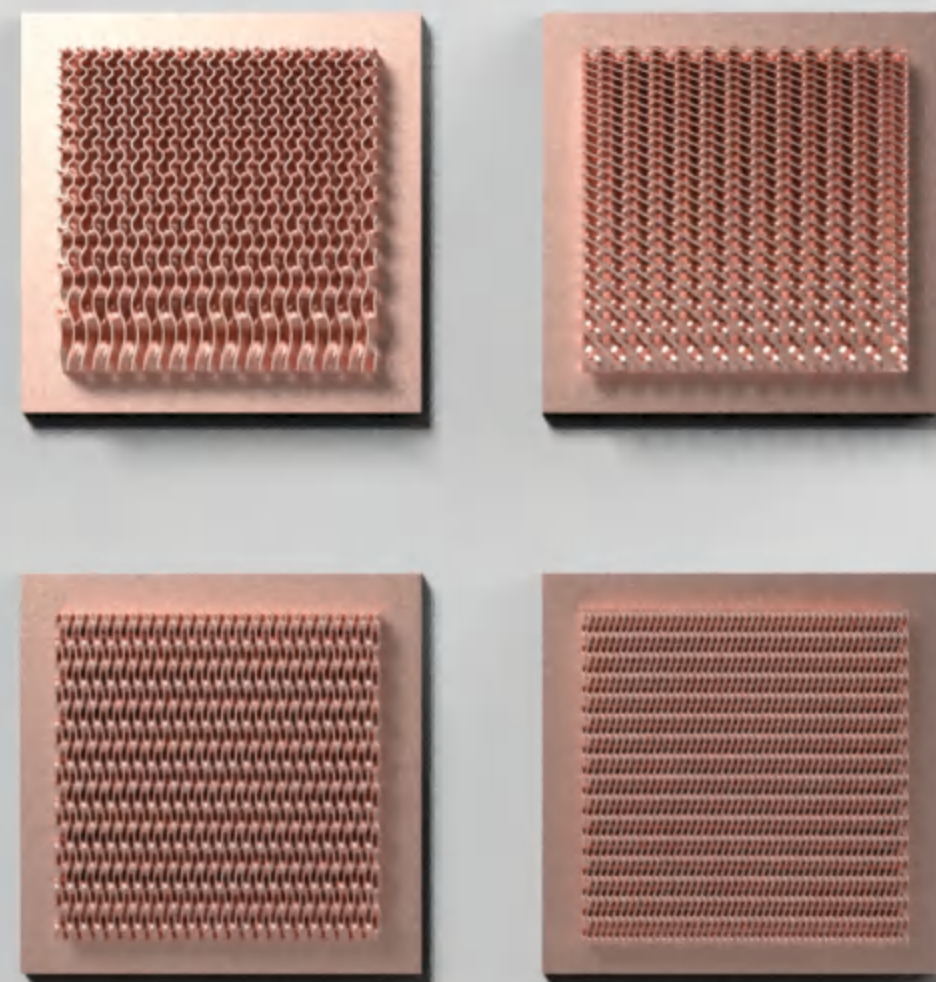


芯片及数据中心散热应用

在冷板的设计中，内部几何结构会直接影响流体的流动路径和温度分布，诸如峰值温度、流场均匀性及运行可靠性等关键指标，均与前期的设计选择紧密相关；这些关键指标会直接影响液冷板产品的性能。

铂力特产品设计团队引入“**梯度化极小曲面**”换热结构,开发了四款3D打印纯铜冷板设计方案。

- 可显著改善冷板表面温度的均匀性；
- 当流体按照预设方向流过冷板时，该结构能进一步增强换热效果，提升传热效率，从而增强整体的散热性能。
- 该结构应力分布均匀，无明显薄弱环节，具备良好的机械承载能力，不易发生翘曲或过度变形，结合3D打印的工艺特点进行制造，可为芯片散热领域提供高效的解决方案。



3D打印极小曲面冷板样件 ©铂力特

尺寸：50mm×50mm×7mm；材料：纯铜
满足芯片模组的紧凑安装需求

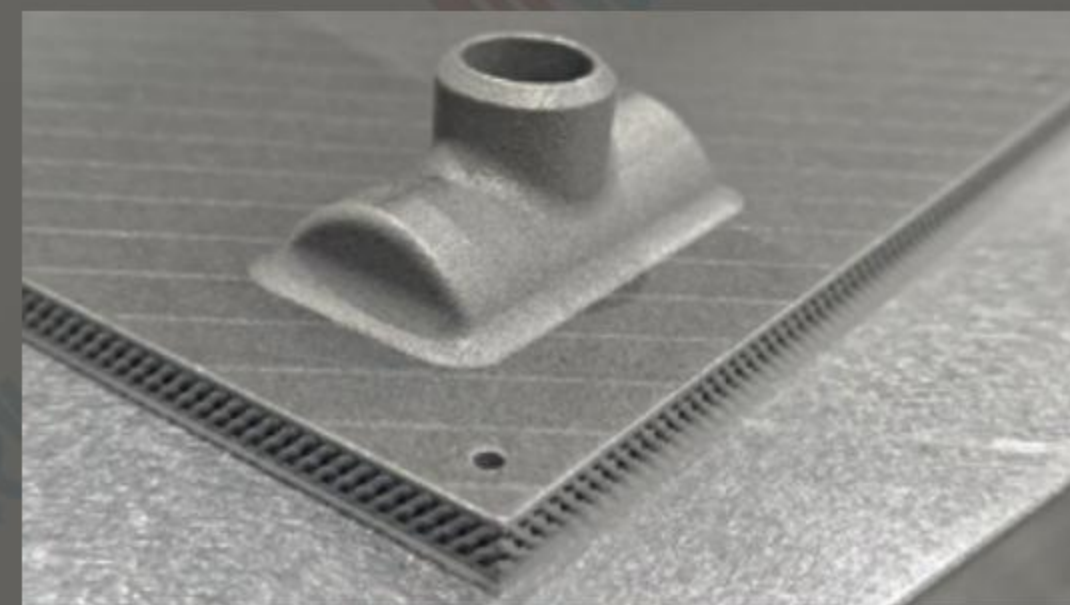
增材制造设备：BLT-S210
打印层厚精细至20μm，保证细小特征成形，提升了冷板表面及内部流道的精度与质量，为整体换热性能的优化打下良好基础。

冷板增材制造应用

联泰科技冷板增材制造专项方案

对某型号传统板翅冷板以增材制造设计思维（DFAM）进行再设计，使用相同外形尺寸和相同流通过程，在保证高强度和耐压力的同时，重量减轻25%左右。

对两种冷板施加相同的表面热负荷、流量和入口温度，增材制造/3D打印冷板表面平均温差减小了71.6%，同功率同流量下总传热系数提高2.7倍。



联泰科技换热器/散热器增材制造解决方案

UnionTech 联泰
创见你所想

设备	Muees系列金属3D打印设备，支持多激光配置；配套智能化粉末管理系统，集吸粉、筛粉、送粉为一体，大大提升粉末利用率，减少人工。
全栈式自研智慧平台	搭载Polydevs/BP/MSCON，覆盖前处理、模块化工艺包、3D打印全流程数字化管理。

铝合金增材制造换热器/散热器应用



仿生树齿状散热器

优势：用户采用众远新材料ZY6061铝合金，通过3D打印仿生设计制造复杂流道结构，在相同体积内大幅增加散热表面积，突破传统加工对流道形状的限制，综合导热效率提升达10%。



众远新材料
ZHONGYUAN ADVANCED MATERIALS

ZY6061

ZY6063

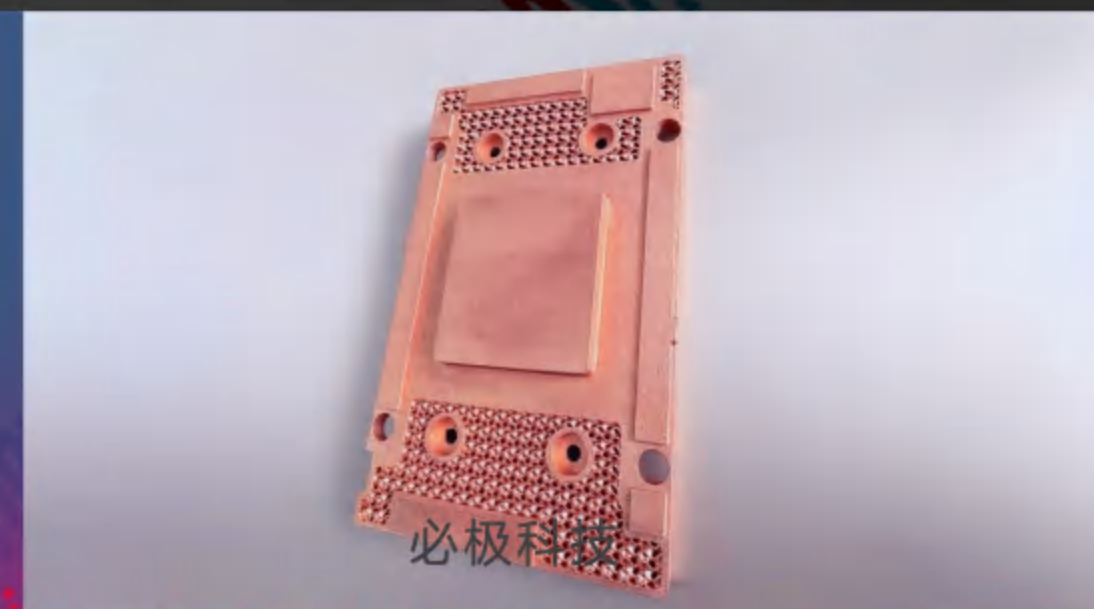
ZYDL

材料：ZY6061是众远新材料于2022年推出的3D打印无裂纹、高导热、可阳极氧化6061铝合金，该牌号至今服务于多种热管理应用场景。

更多导热材料：众远新材料自研ZY6063（导热系数达 $200\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）、ZYDL(导热系数达 $190\text{W/m}\cdot\text{K}$)高导热铝合金，为用户制造结构散热一体化部件提供更丰富的材料选项。

芯片及数据中心散热应用

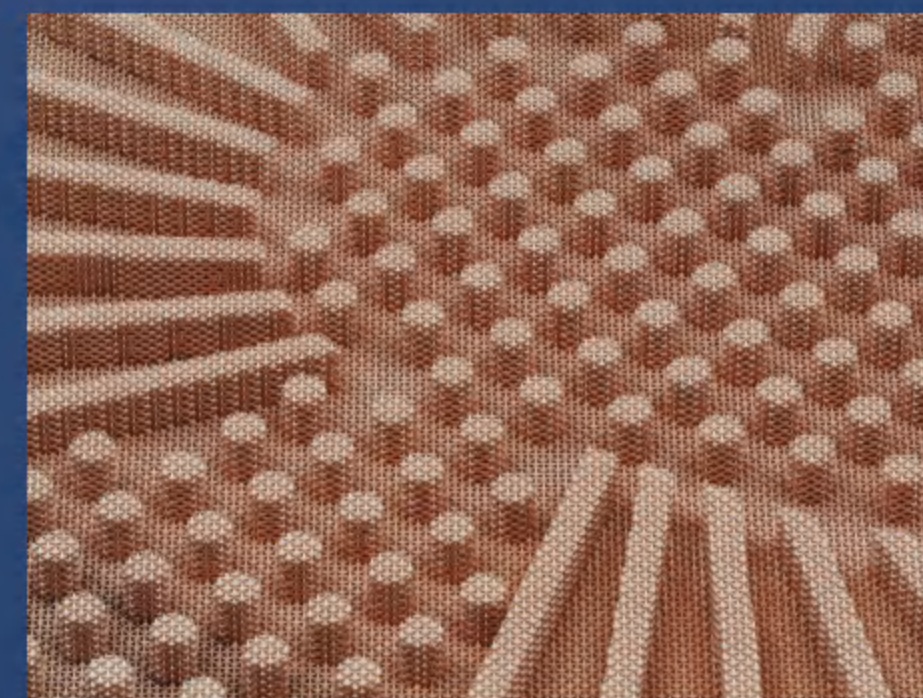
广东必极科技开发的铜金属3D打印一体化水冷板可应用于AI服务器GPU芯片冷却，无需钎焊，100%零泄漏，其内部采用TPMS微通道晶格结构设计，能够解决单个芯片1500W的散热需求。



定制化热交换器开发企业TEMISTh正通过增材制造技术开发液冷冷板。TEMISTh公司表示，创新的冷板式液冷技术，能够在CPU/GPU的发热核心进行精准捕获，直接将芯片的热量转化为45-60°C的稳定温水。

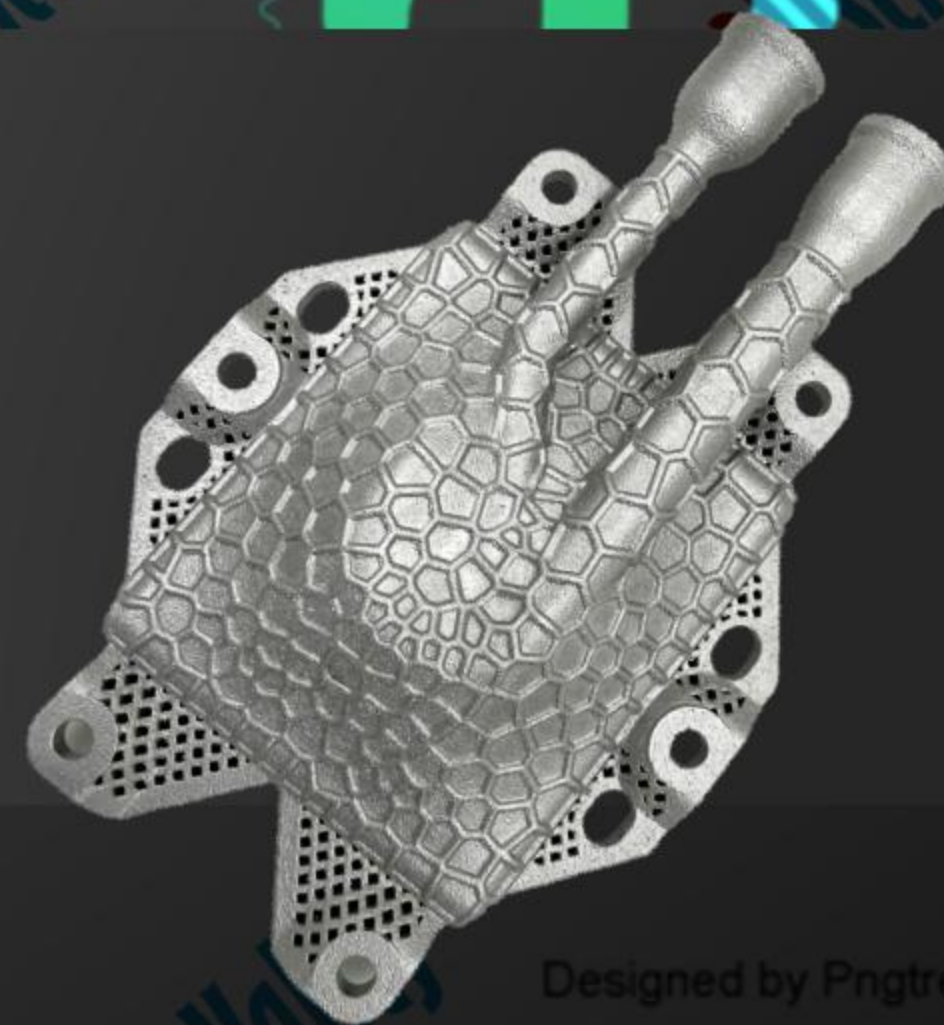
Wiwynn 纬颖联合增材制造企业Fabric8Labs 联合展出了3D打印下一代液冷散热冷板。包括：

- 双面冷板：同时冷却AI加速器(最高4kW) 和垂直供电芯片；3D打印微通道设计，预计提升40%散热性能。
- 两相冷板：使用环保介电流体，利用相变增强传热；3D打印吸液鳍片设计，减少泄漏。

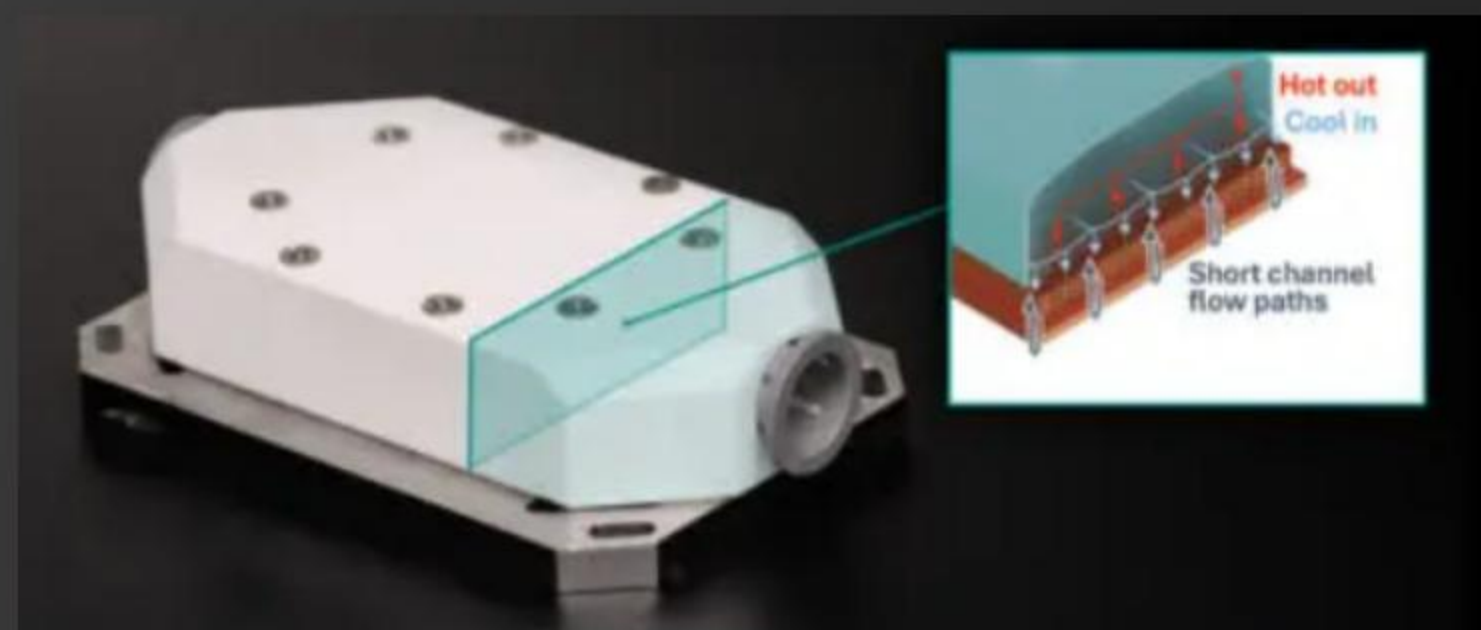


芯片及数据中心散热应用

丹麦技术研究所与Heatflow公司携手两家国际合作伙伴，共同研发并测试了一款适用于数据中心和高性能计算机的3D打印冷却组件。该方案采用被动式两相冷却技术，实测冷却能力达600瓦，较原定400瓦目标提升50%。



美国HRL实验室发布消息称推出了一项名为Low-Chill™的突破性单相直接液冷技术，该技术能够实现现代数据中心前所未有的GPU和机架功率密度散热，且无需承担双相冷却系统的成本和复杂性，并支持低耗水冷却架构。



消费电子散热

技嘉早2026年6月发布了PC机主板X870E AORUS INFINITY NEXT，专为最新AMD Ryzen 9950X3D2处理器打造，搭载64相供电设计，整合低轨卫星与数据中心级Quad OptiMOS技术，最高可提供5,120安培总电流。

该主板采用火箭推进器等级散热材料，其创新的AI Gyroid M.2散热结构仅能通过3D金属打印实现，最高可提升44%的散热表面积。搭配3D打印均热板与蜂巢式金属背板，形成了从供电区域、固态硬盘区域到背板的立体化散热架构。



来源：GIGABYTE 技嘉



来源：Paul's Hardware

汽车热交换器应用



一体化均热板电机壳体

汽车流体管理系统开发商Martinrea利用LPBF增材制造技术，和Equispheres公司的AlSi10Mg铝合金粉末，将多孔毛细吸液芯与全致密壳体一体打印，在电动车电机壳体内直接集成两相均热板被动散热与微通道液冷主动散热的复合功能，无需外部热管。

- 冷却液泵送功耗与压降降低 >60%
- 绕组最高温度降低 18°C
- 整体温度均匀性提升（最大温差减少 39°C）

工业领域热交换器应用

2024年，中国核动力研究设计院增材孵化项目：增材超高压换热器完成263MPa水压试验，试验一次成功。该换热器将用于山东朴素公司冰粒射流清洗装置，填补了国内相关技术的空白。

增材换热技术充分发挥增材优势，与传统管壳式换热器相比，重量体积可降低80%以上，与国外的高效换热技术相比，也在轻量化与减阻方面具有明显技术优势。

来源：中国核动力研究设计院/中国核能行业协会

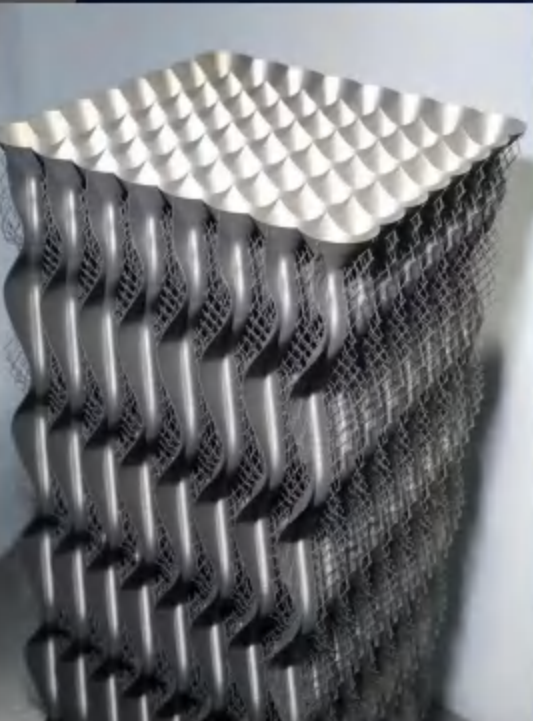


2026年，由中国核动力研究设计院研制的医用同位素试验堆增材制造池水冷却器完成出厂验收，各项性能指标均达到设计要求。该设备由核动力院设计所总体设计，二所负责工艺研究和制造工作，是核动力院首台自主供货的增材制造换热设备。

增材制造具有解放设计、微区冶金、快速制造等技术优势。采用增材制造技术的换热设备可以突破传统制造方式的限制，一体化成型复杂流道结构，显著增加单位体积内的换热面积，实现极致轻量化与高换热效率，是支撑先进核能发展的关键技术之一。

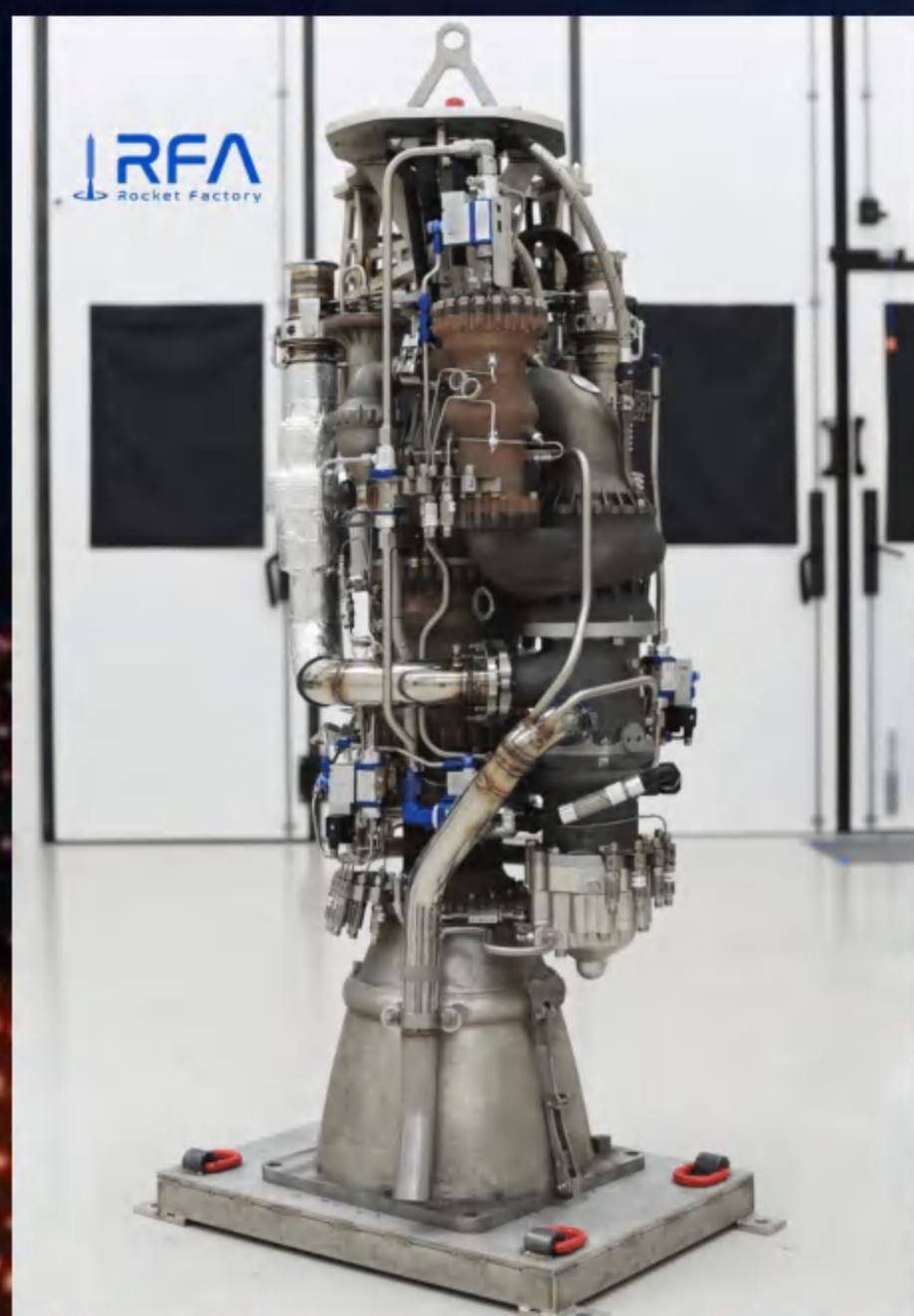
来源：中国核动力研究设计院

高温环境下的热交换器应用



船舶发动机，尤其是燃气轮机和部分高性能柴油机，其热交换器接触的工质温度可高达数百度，在这样的环境中，镍基高温合金的耐高温性和耐腐蚀性体现出了优势。再结合增材制造设计，热交换器能够在相同的体积和重量下，实现翻倍的散热能力。

Sintavia公司开发的船舶发动机3D打印镍基高温合金热交换器尺寸达460×460×1000毫米。



左图：Helix 火箭发动机
来源：RFA

Conflux与RFA合作开发火箭发动机气体管道热交换器

使用材料

Monel K-500（镍铜合金，添加铝和钛，兼具耐腐蚀性与高强度）

制造工艺

增材制造，配合多次迭代的打印参数优化、CT扫描和显微分析，以及专门开发的热处理工艺和精密机加工。

设计方案

定制化集成热交换器，取代传统螺旋通道系统，采用薄壁鳍片结构，结合计算流体动力学（CFD）高速流动模拟进行优化布局。

热管理性能

用于加热液氦至高温，作为推进剂储箱的增压气体；在相同换热量下实现更低压降；通过优化流动分布和热效率，保持结构完整性。

技术创新

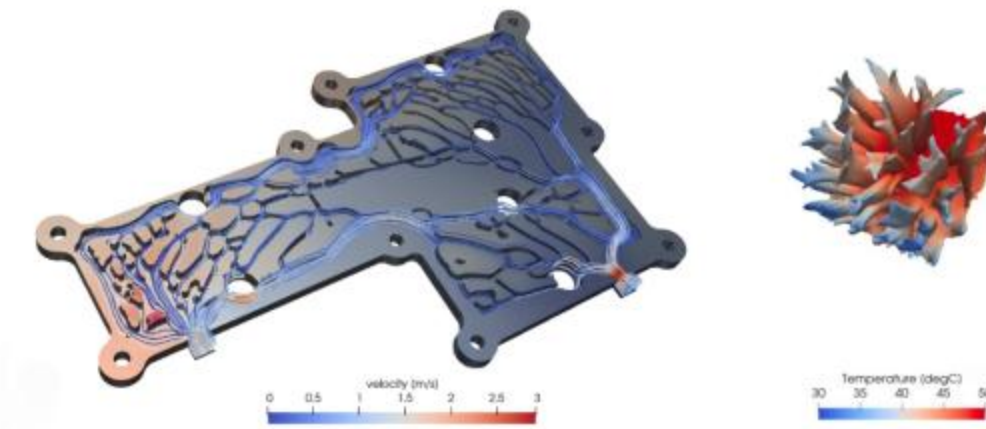
① 高速氧流动CFD模拟新方法；② Monel K-500增材制造工艺参数优化（解决微裂纹和孔隙率问题）；③ 薄壁结构热处理工艺开发

增材制造、生成式设计、先进材料集成散热解决方案

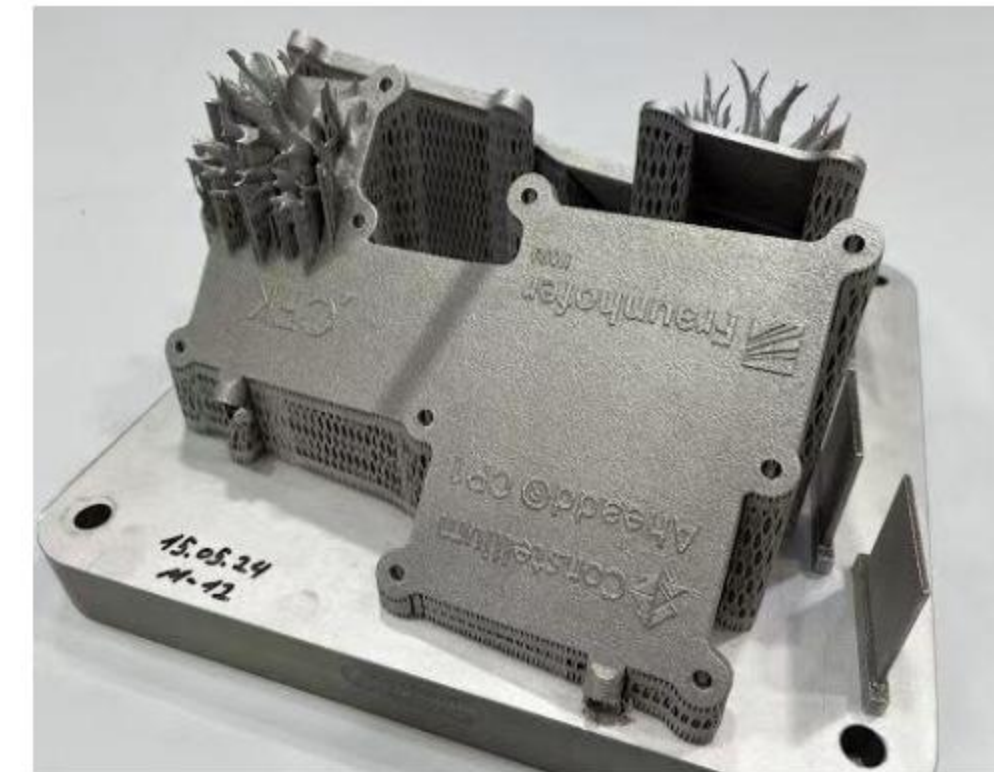
Fraunhofer IWU研究所通过生成式设计与LPBF增材制造技术以及相比AlSi10Mg导热性能更优的铝合金材料Aheadd® CP1所集成的解决方案来验证是否能缩短开发时间、降低成本并交付性能更优的冷板。

材料	层厚	激光功率	热处理时间	打印时间缩减
CP1	90 μm	700 W	400°C下4小时	快30%
AlSi10Mg	25–50 μm	可变	13小时（多步T6工艺）	–

属性	Aheadd® CP1	AlSi10Mg
热导率 (W/m·K)	210	170
极限抗拉强度 (MPa)	340	320
断裂伸长率 (%)	13%	10%
密度 (kg/m^3)	2700	2670
热处理时间 (小时)	4	13
打印时间缩减	快30%	–



ToffeeX生成式设计
冷板CFD仿真结果



3D打印冷板
材料：CP1铝合金

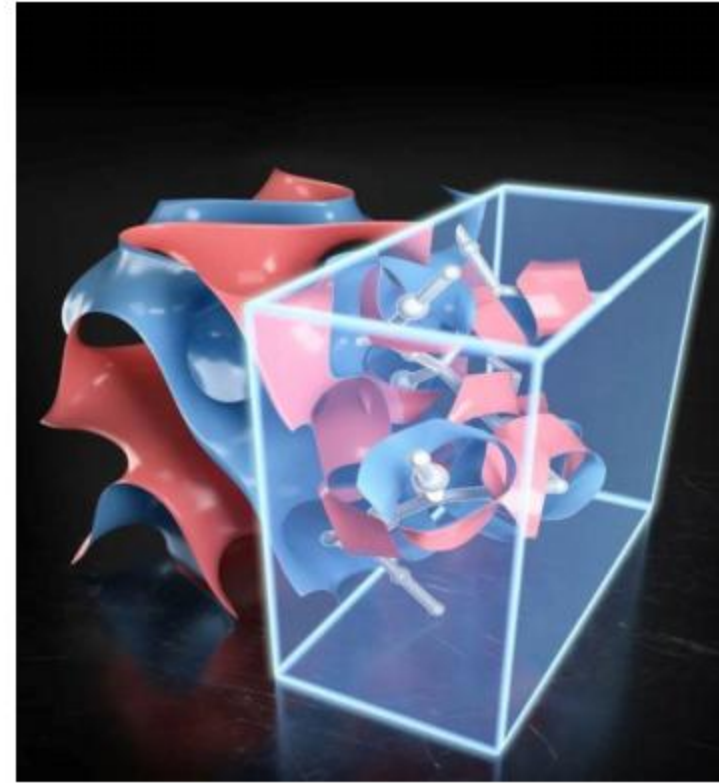
更快的设计迭代与工程流程：设计迭代速度提升3倍——从使用CAD时的每天1次迭代提升至每天3次迭代。
制造效率提升：从设计到生产的周期缩短至2个月以内，而行业标准通常为6个月以上。
散热性能提升：散热能力提升6%，降低了CPU/GPU的工作温度，提高了可靠性。
成本降低与可扩展性：由于构建时间和能耗减少，打印成本降低25%。

TPMS热学超材料研究

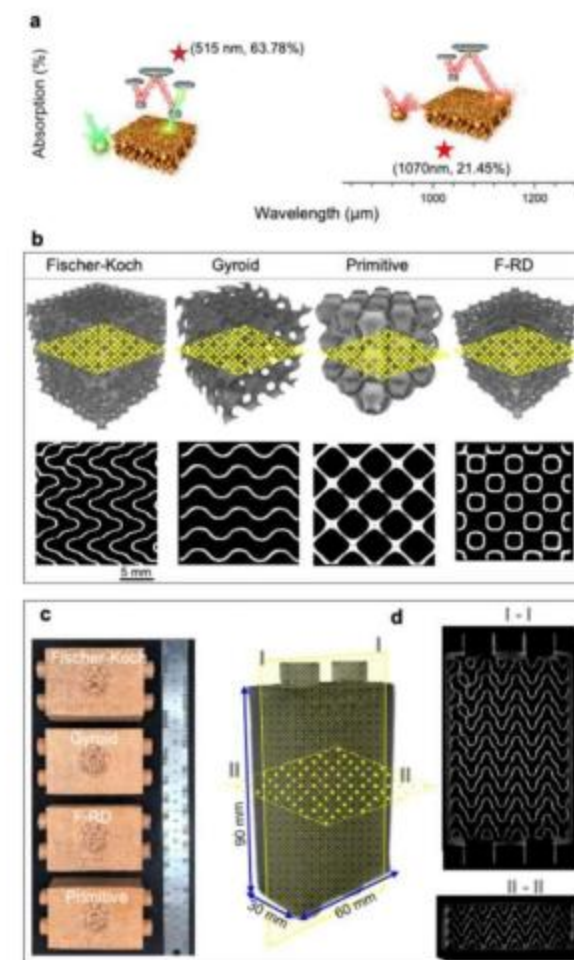
芯片、边缘计算模块、服务器乃至机器人系统，都面临更高热流密度带来的散热挑战。如何在有限空间里把热量更快带走，已经成为先进电子系统发展的关键问题。

TPMS结构内部具有连续、交织而复杂的流道网络，因此一直被认为很适合用来做高性能换热器。但过去大多数研究主要在单位胞层面比较不同结构，很难真正解释：这些结构到底为什么散热好，性能差异又源自哪里。

为解决这个问题，上海交通大学的研究团队提出了一种新的思路：把TPMS继续往下拆，拆到比单位胞更小、更本征的层级，也就是子单元（sub-unit cell，即尺度小于晶胞的结构基本构元）。



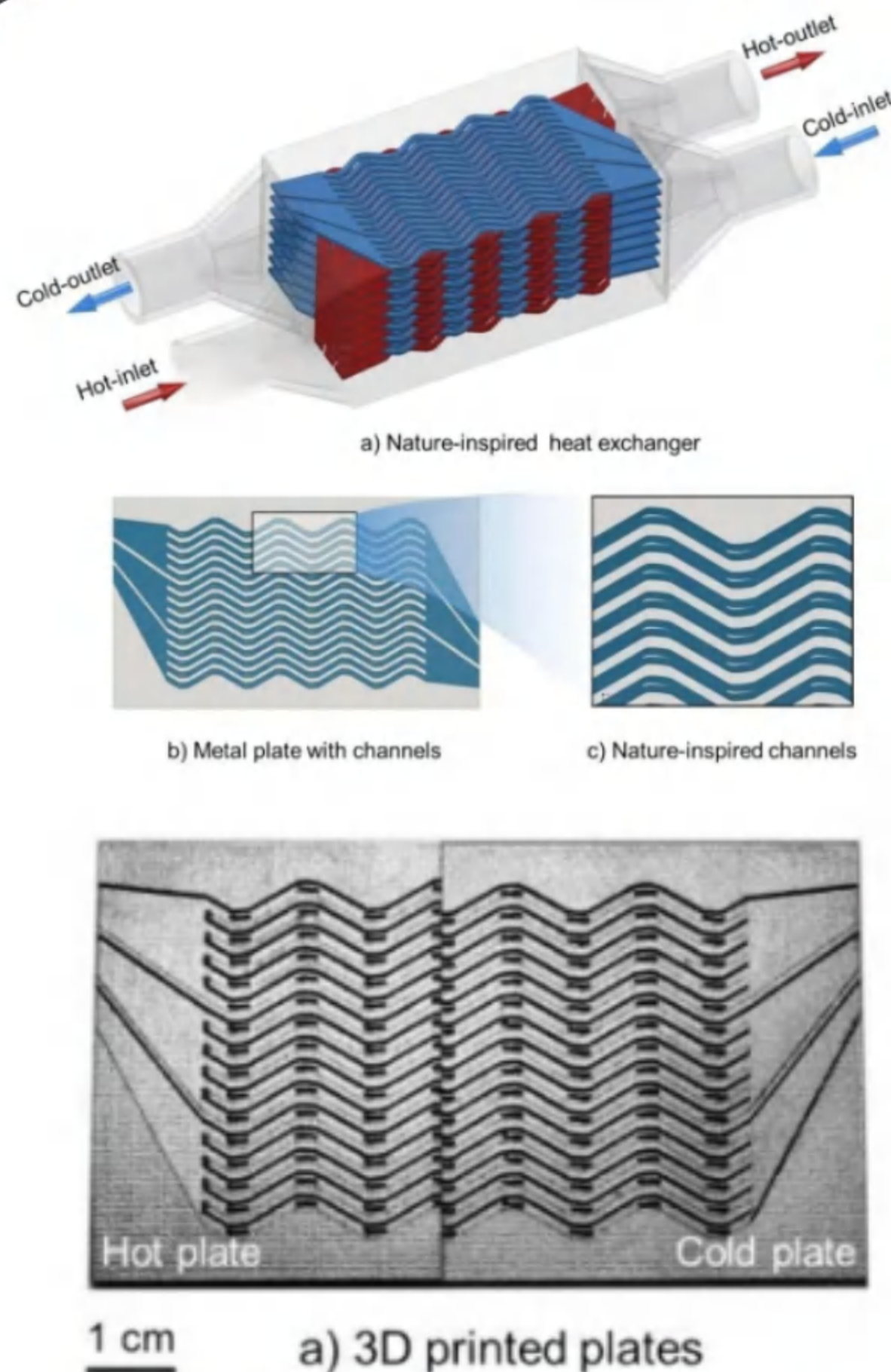
图：子单元示意图(本征传热单元 Sub-unit cell)。



图：采用绿激光选区熔化（GL-PBF）技术制备高质量纯铜TPMS结构，展示其复杂三维流道的高精度成形能力及良好的结构完整性。

自然启发式微型通道换热器3D打印研究

受江河中沙洲的启发，来自西安交通大学等高校的研究团队提出了一种新型仿生通道。研究人员通过3D打印技术制备了该仿生通道换热器与传统锯齿形通道换热器。高温空气-空气流动与传热实验表明：仿生通道换热器在平均传热率提升1.5%的同时，显著降低了34.85%的压降。在转角处增设的翼型翅片有效缓解了因流动分离、再附着和碰撞产生的流动阻力，从而实现了更高的努塞尔数和更低的范宁摩擦因子。与倾斜角为 15° 的锯齿形通道相比，仿生通道的努塞尔数高出59%。



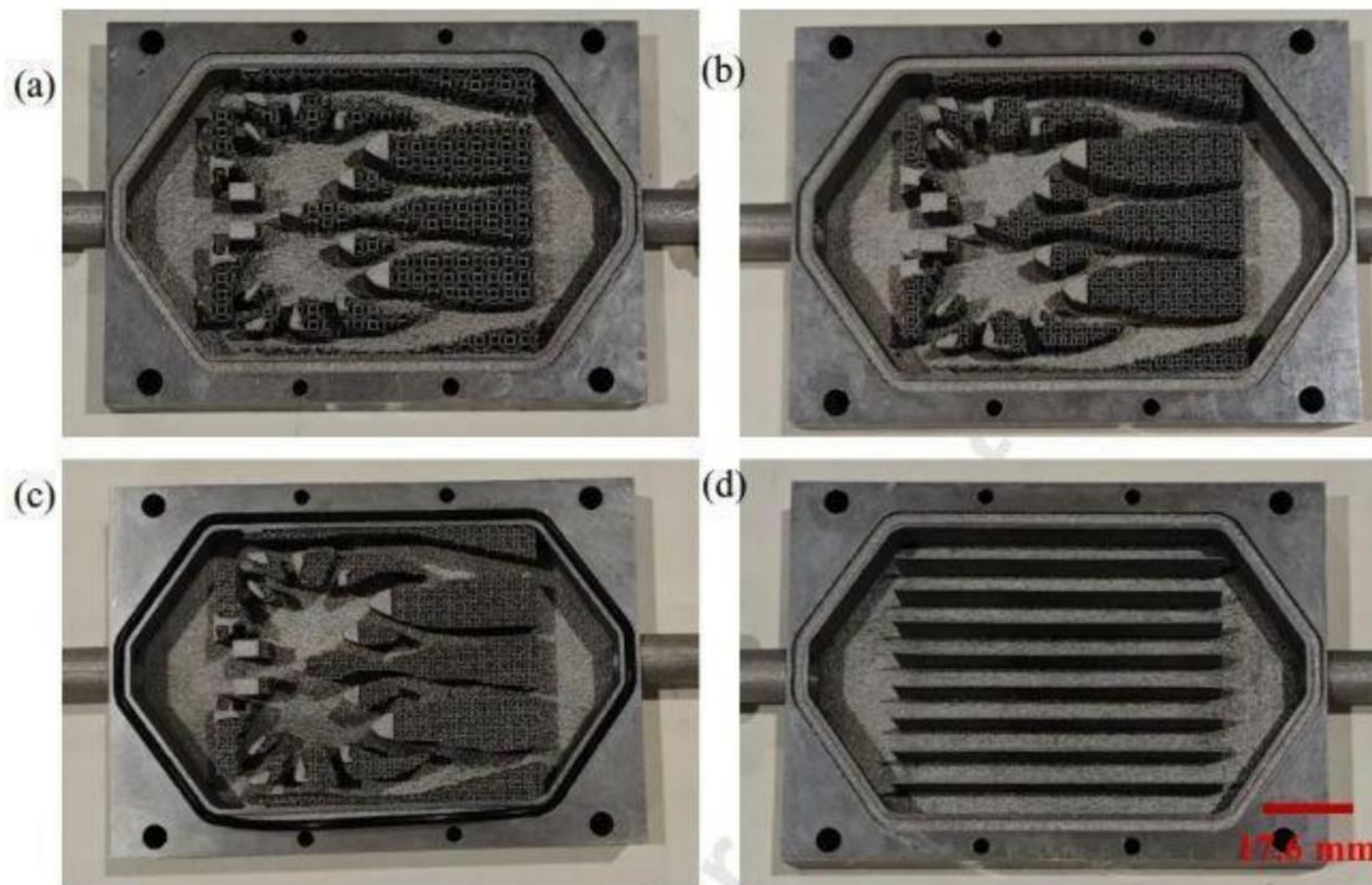
图：换热器总体布局及板片结构。

图：采用3D打印技术制作的板片及换热器整体。

Experimental study on thermal-hydraulic performance of a nature-inspired mini-channel heat exchanger manufactured by 3D printing
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124309>

多材料拓扑优化设计研究

南洋理工大学与北京航空航天大学的联合研究团队针对高热流电子器件热管理需求，搭建多材料拓扑优化（MMTO）设计框架，将增材可制造的Rhombi-Octet晶格结构与拓扑优化结合，制备出宏观拓扑一致、晶格尺寸不同的L1/L2/L3三种散热器。并通过实验验证了MMTO结合增材制造用于高热流器件散热的可行性。

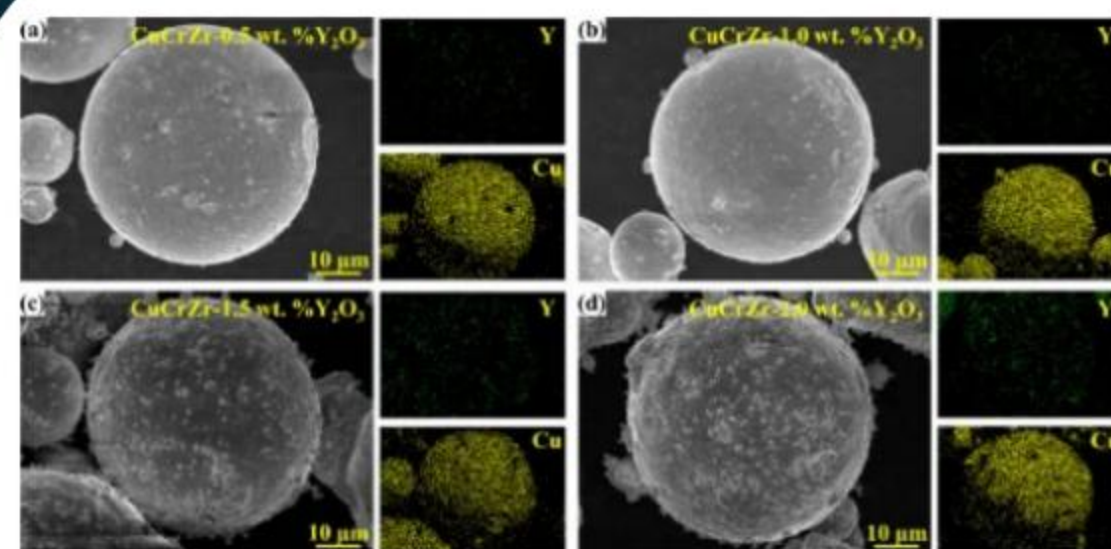


图：增材制造的MMTO散热器：（a）MMTO L 1，（b）MMTO L 2，（c）MMTO L 3，（d）直翅片。

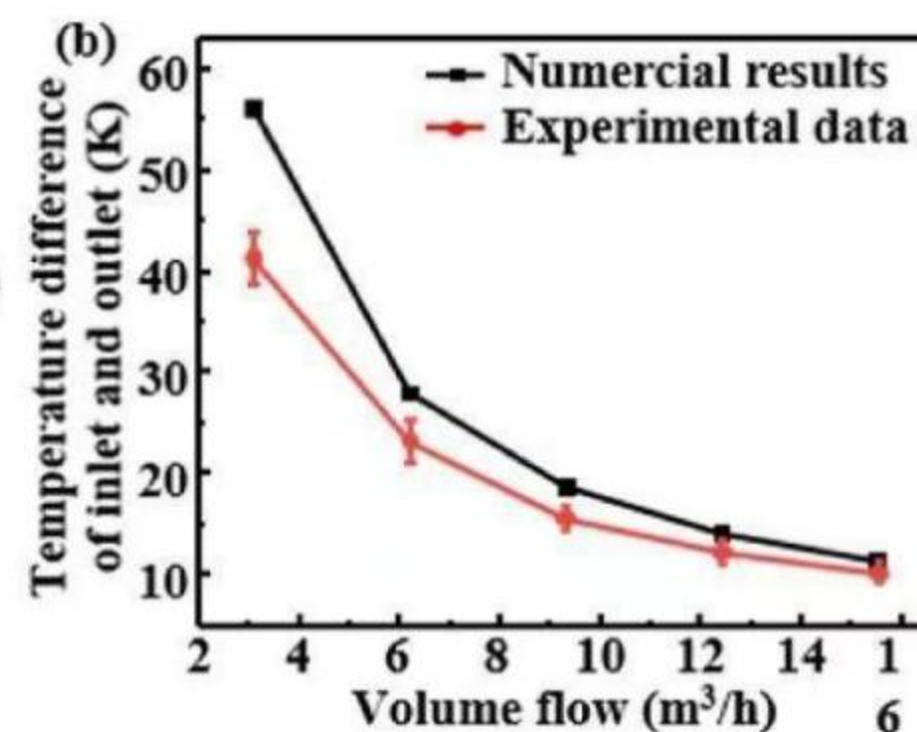
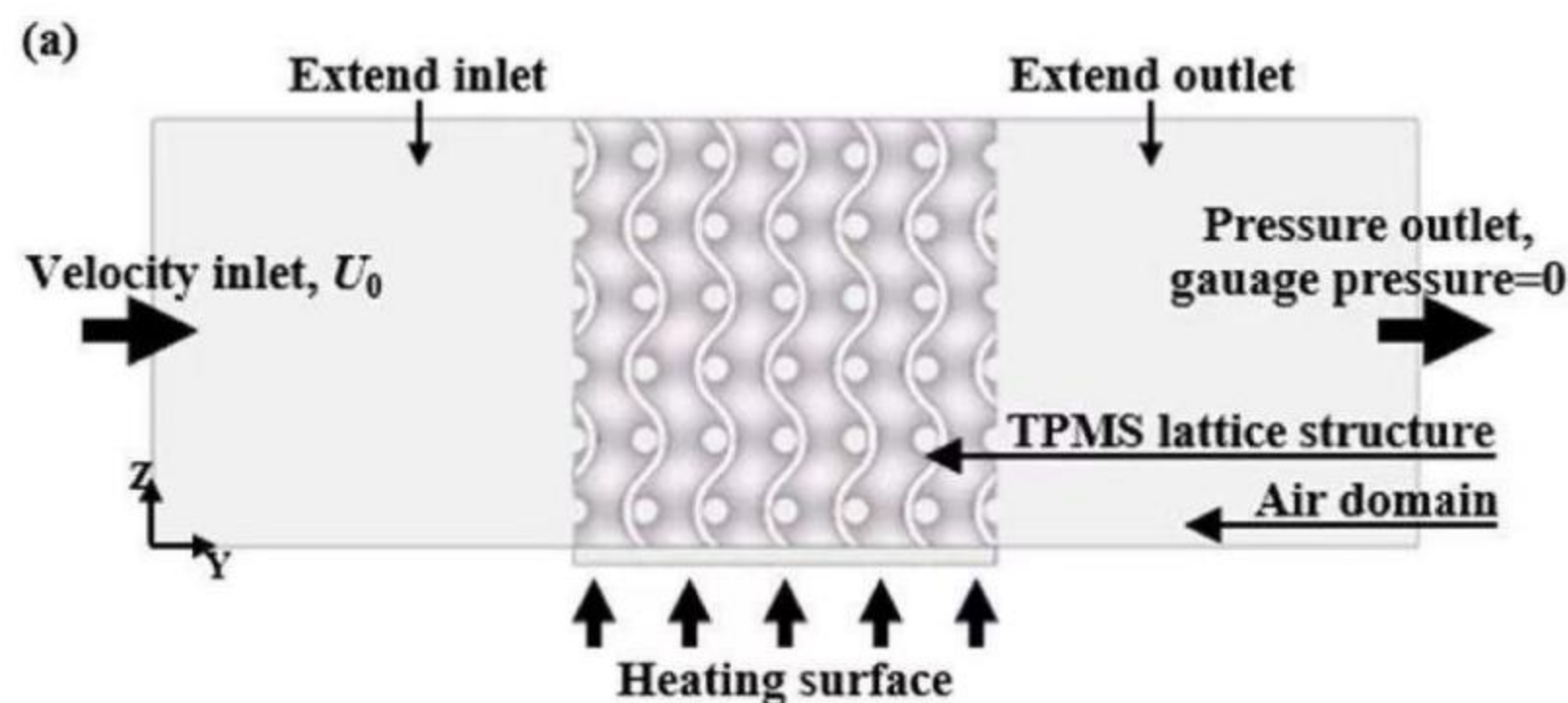
增材制造热交换应用新型合金材料研究

华中科技大学研究团队提出了一种结合材料成分和宏观结构设计的优化方法。通过激光粉末床融合3D打印技术制造了由氧化物弥散强化（ODS）CuCrZr合金组成的三周期最小表面（TPMS）点阵结构。

该研究为基于L-PBF技术制备的晶格结构设计提供了新思路，实现了轻量化、高承载与高效散热性能的一体化整合。



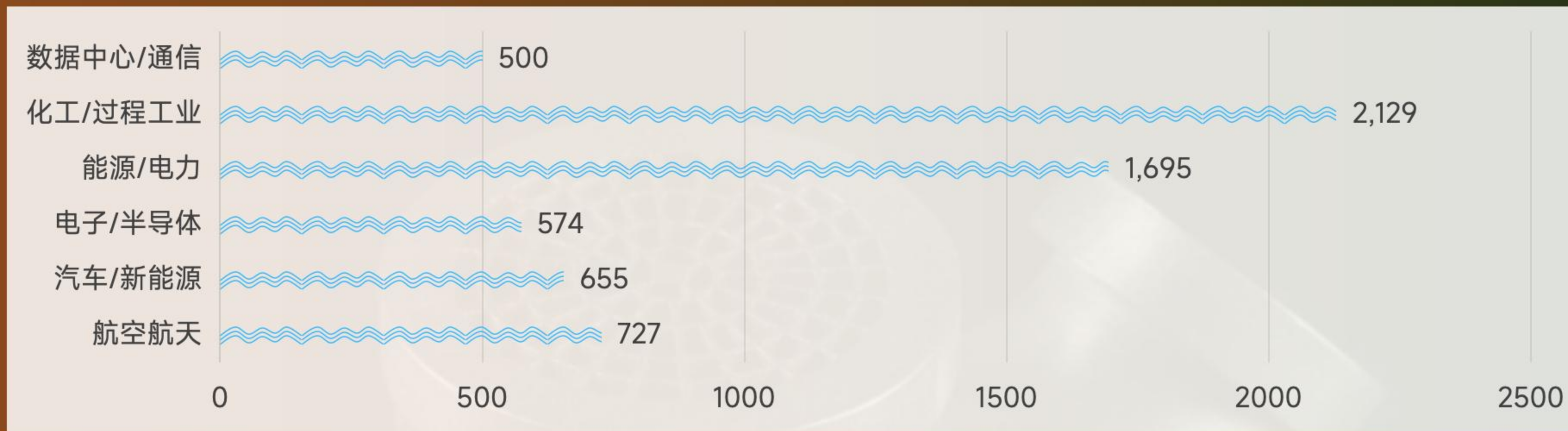
图：研究团队制备了四种具有不同 Y_2O_3 掺杂水平的CuCrZr- Y_2O_3 复合材料。



图：换热有限元模拟与试验

透过知识产权布局 看3D打印技术应用

3D打印热管理专利分布领域及申请数量



检索范围：Google Patents全球专利数据库，时间：2024年1月至2026年6月

典型技术方案



电子/半导体

芯片液冷板、均热板、微通道散热器

能源/电力

太阳能集热器、储能系统、换热器流道优化

汽车/新能源

电池热管理、电机冷却、车灯模具随形水路

化工

反应器内构件、催化剂载体、混合换热结构

航空航天

微通道换热器、再生冷却通道、涡轮叶片冷却结构

数据中心/通信

服务器冷板、光模块散热、液冷系统组件

典型3D打印技术方案及活跃企业/机构—航空航天

根据专利检索，航空航天是3D打印热交换技术最早且最深入的应用领域之一。这一领域对散热器件的性能要求极为苛刻，高温燃气环境下的再生冷却、涡轮叶片内部的气膜冷却、火箭发动机喷管的热防护等场景，传统制造工艺难以满足复杂内部通道的制造需求。

典型的技术方案包括：

火箭发动机再生冷却通道的一体成型，将燃料通道直接集成到推力室壁中，实现主动冷却；

涡轮叶片内部复杂气膜冷却孔的3D打印制造，提高冷却效率并延长叶片寿命；

航空换热器微通道结构的增材制造，实现紧凑化和轻量化。

活跃企业/机构

NASA、SpaceX、GE Aviation, Airbus、SAFRAN, 中国航天科技集团、航天科工集团、哈工大、北航等。

典型3D打印技术方案及活跃企业/机构—新能源汽车

根据专利检索，新能源汽车电池热管理是增长最快的细分方向。随着电动车电池包能量密度不断提升，热管理系统的散热能力成为制约性能和安全的因素。

典型的技术方案包括：

动力电池冷却板的3D打印制造，采用仿生流道设计实现电池模组间的均匀散热；

电机壳体集成冷却水道的一体成型，减少装配工序并提高可靠性；

车灯模具随形水路的3D打印制造，通过贴合模具轮廓的冷却通道大幅缩短注塑周期。

活跃企业/机构

德国FEV Group、大众集团，中国智新科技、江苏科技大学等。值得注意的是，汽车领域的3D打印热交换专利正在从模具随形水路向功能部件，如：电池冷板、电机冷却壳体，快速扩展。

典型3D打印技术方案及活跃企业/机构—电子与半导体

根据专利检索，该领域专利覆盖了从芯片封装到系统级散热的多个层级。随着AI芯片、高性能计算芯片功耗的急剧攀升，电子散热已成为3D打印热交换技术最具商业潜力的应用领域之一。

典型的技术方案包括：

芯片级微通道液冷板的3D打印制造，通过亚毫米级精密流道实现高效散热；

均热板（Vapor Chamber）内部毛细结构的选区激光熔化制造，实现梯度化设计以提高传热效率；

高导热铜合金散热器的一体成型，结合TPMS晶格结构增大散热面积。

活跃企业/机构

COMPUTEX
TAIPEI
广州众山新材料、苏州西帝摩、
纯钧新材料、苏州元脑、
广东深度智冷、英维克、
胜蓝科技、中航光电、
Intel Corporation、联想、
鸿日达科技、广东深度智冷、
汕头大学

.....

典型3D打印技术方案及活跃企业/机构—能源与电力

根据专利检索，该领域专利涵盖太阳能热利用、风能热管理、储能系统、电网设备冷却等多个细分方向。

典型的技术方案包括：

太阳能集热器吸收器的3D打印制造，通过优化流道结构提高光热转换效率；

相变储能换热器微通道结构的增材制造，增强传热传质性能；

超导磁体冷却系统的微通道换热器制造，满足极端低温环境下的热管理需求。

活跃企业/机构

江南大学

厦门大学

西安热工研究院

厦门徕泽丰科技 等

该领域的技术创新主要集中在微通道换热器和多孔介质传热结构的优化设计上。

典型3D打印技术方案及活跃企业/化工

根据专利检索，3D打印在该领域的应用不仅限于换热器本身，还延伸到反应器内构件、催化剂载体、混合器等过程设备。

典型的技术方案包括：

微反应器内部复杂混合-换热结构的3D打印制造，实现过程强化；

催化剂载体的多孔结构增材制造，通过精确控制孔道结构提高催化效率；

换热器内部强化传热构件，如涡流发生器、导流片的一体成型，提高换热系数。

活跃企业/机构

南京工业大学

山东大学

北京化工大学 等

该领域的特点是高校专利占比较高，产学研转化仍有较大空间。

数据中心、5G通信基站等设施3D打印散热应用场景

**数据中心服务器
CPU/GPU液冷板**

主要应用场景。
广州众山、纯钧新材料、苏州西帝摩、英维克等企业均有专利布局。

光模块散热

随着400G/800G高速光模块的普及，光模块功耗已从几瓦跃升至数十瓦，传统散热方式难以为继。广东深度智冷等企业进行了3D打印液冷散热的专利布局。

通信设备热管理

5G/6G基站等通信设备的热管理需求也在驱动3D打印散热技术的应用。进行专利布局的代表性企业包括：胜蓝科技-均温板应用。

服务器机箱/结构散热

通过3D打印技术将散热功能集成到机箱结构中。使得独立散热器件向集成化散热结构演进。进行专利布局的代表性企业包括：苏州元脑。

数据中心、5G通信基站等设施现阶段3D打印散热技术边界

尺寸

目前主流设备尺寸足以覆盖大多数服务器CPU/GPU液冷板（通常为100mm-300mm尺度）尚不适用大型数据中心冷却分配管、整柜级液冷系统等超大尺寸部件。

材料

铜合金和铝合金为主。有企业尝试突破单一材料的边界，在金刚石铜复合材料基底上3D打印铜合金散热结构，这是材料边界探索的方向之一。

精度与效率的权衡

业界正探索微米级结构精确成型技术，并通过优化分区域扫描加工策略，在保证关键区域精度的同时提高整体成型效率。

从专利分布来看，当前3D打印液冷板的流道尺寸多在0.1-1mm范围，壁厚在0.2-0.5mm范围。这一精度水平能够满足绝大多数数据中心散热器件的需求，但对于需要亚毫米级精密流道的极端高功率场景（如热流密度超过500W/cm²的AI训练芯片），3D打印的精度边界仍然是一个需要持续突破的技术方向。

以上分析基于该领域企业在2024年之后申请或公开的专利文件，仅供行业技术讨论与参考。

数据中心、5G通信基站等设施热管理3D打印应用竞争力分析

结构自由度突破

代表性专利：

广州众山新材料
CN120640655A
脉网仿生结构流道

纯钧新材料
CN121442637A
三维均热板，微通道多方向延伸

广东深度智冷
CN121878930A
多层垂直互联结构

一体化制造价值

代表性专利：

苏州西帝摩
CN121732809A
阵列微结构液冷板

英维克
CN118317581A
两相微小通道一体化冷板

胜蓝科技
CN121423616A
高气密性均温板

分梯度设计能力

代表性专利：

苏州元脑
CN120519750A
基于热流密度的分区梯度设计，高热区、低热区晶格孔隙率不同。

中航光电
CN119419182A
微通道上游、下游具有不同换热面积

快速迭代与定制

代表性专利：

广州众山新材料
CN121218535A
根据热源位置设计换热块的分布形式以及形状。

软件与设计 材料与后处理

DFAM为增材制造而设计人工智能应用-生成式设计

Generative Design

生成式设计

Generative Design

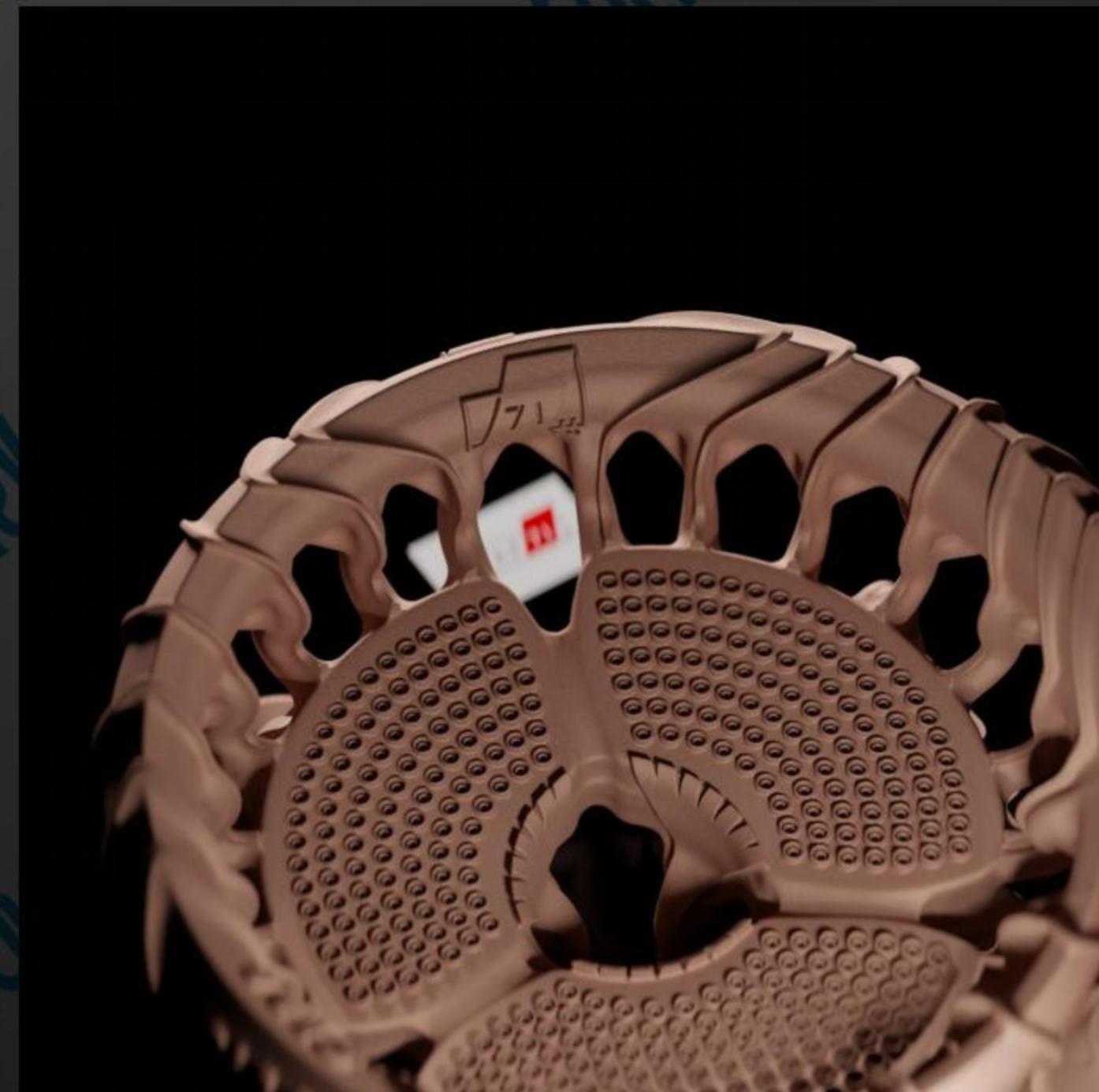
是根据一些起始参数通过迭代并调整来找到一个（优化）模型。

VS

拓扑优化

Topology Optimization

是对给定的模型进行分析，常见的是根据边界条件进行有限元分析，然后对模型变形或删减来进行优化。



|||||||智能化设计|||||||

SIEMENS



TPMS三重周期最小曲面

平滑的无限
曲率曲面

将3D空间
分为两个连
续相

三重周期最小曲面 (TPMS)

可实现自支
撑制造

表面积更大
的复杂结构

应用

骨科



换热器



轻量化结构



TPMS复杂结构工业级网格化前处理及高通量批量仿真

SynaCore的网格前处理核心优势

工业级速度 Industrial Speed

- 百万级网格秒级生成，支持超大规模装配体
- 基于 Google Tests 可复现的测试套件验证
- 多线程并行网格剖分加速

自动化修复 Auto Repair

- 非流形边（non-manifold edges）自动检测
- 智能拓扑修复逻辑，自动重建正确表面
- 无需人工预处理有缺陷的 STL 输入文件
- 保证仿真级网格质量与计算精度

用于处理复杂的设计

适用于具有内部流道、晶格结构及自由曲面的复杂CAD模型实现自动网格生成。

自适应细化

基于应力集中、热梯度及几何复杂度的动态网格密度调整。

优化计算速度

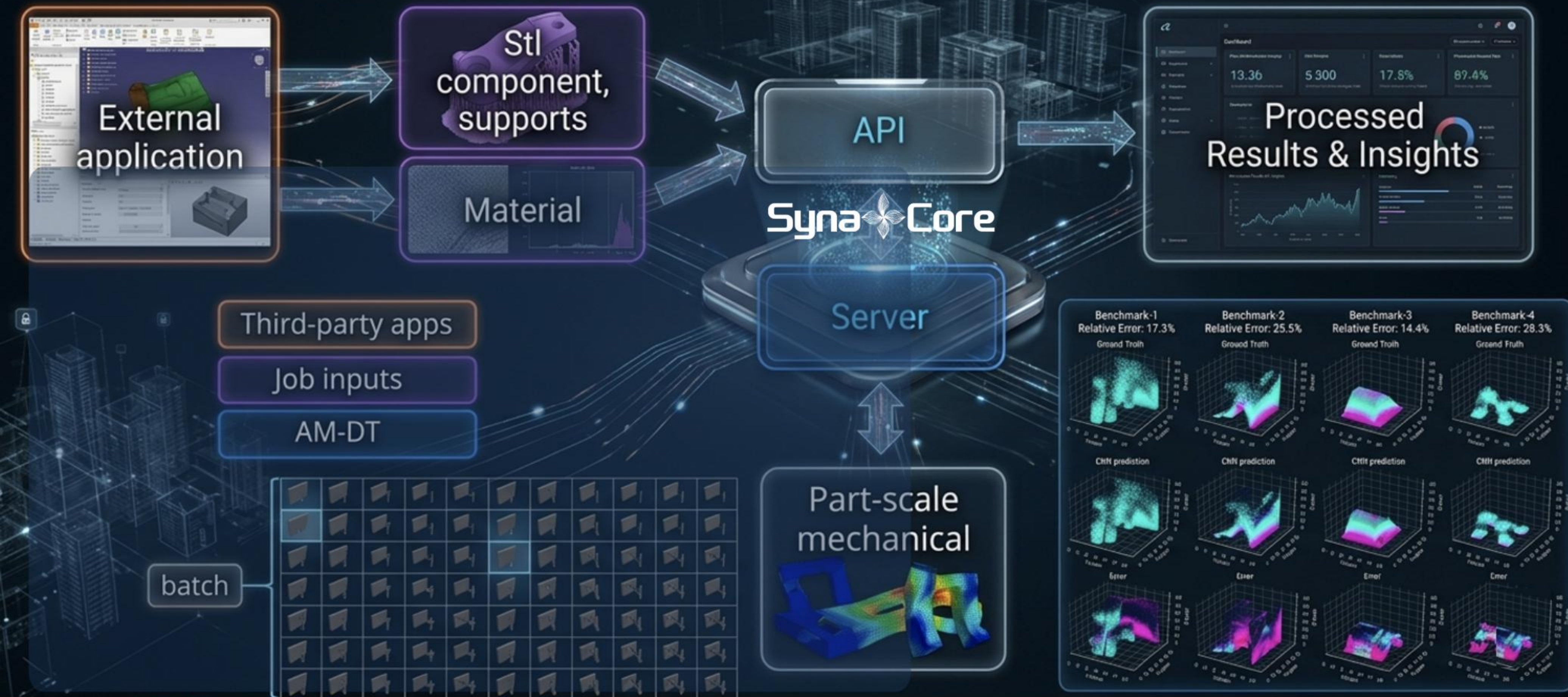
优化网格拓扑，在精度与求解器性能之间取得平衡，计算时间缩短。

SynaCore Advanced Mesher

高通量批量仿真

SynaCore AM-DT通过API支持上百个零件的一次性装载进行24/7自动运行+并行计算的高通量仿真，真正满足工业制造需求

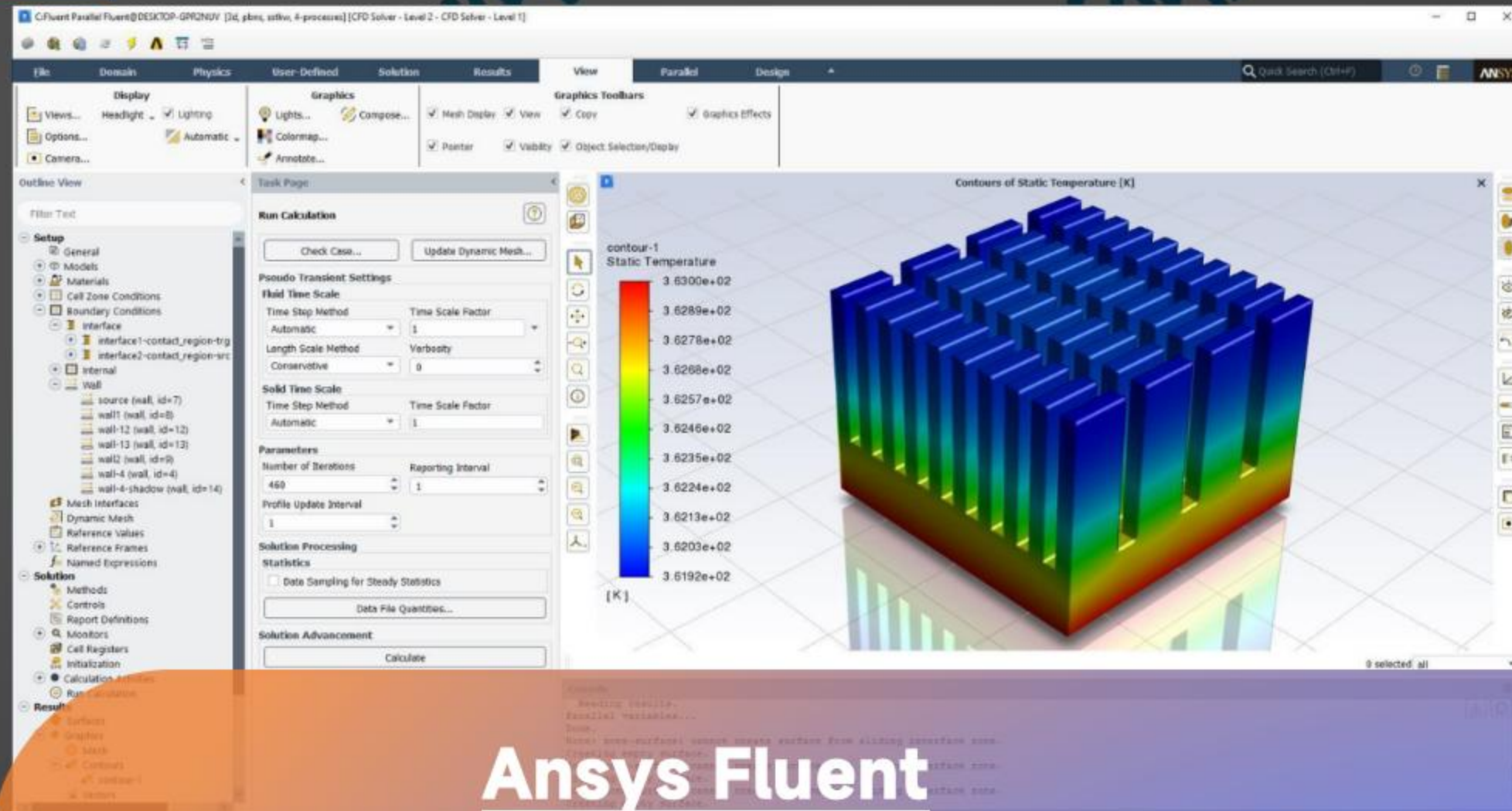
Automated Scripting



液冷冷板关键设计驱动因素及对系统复杂性的影响

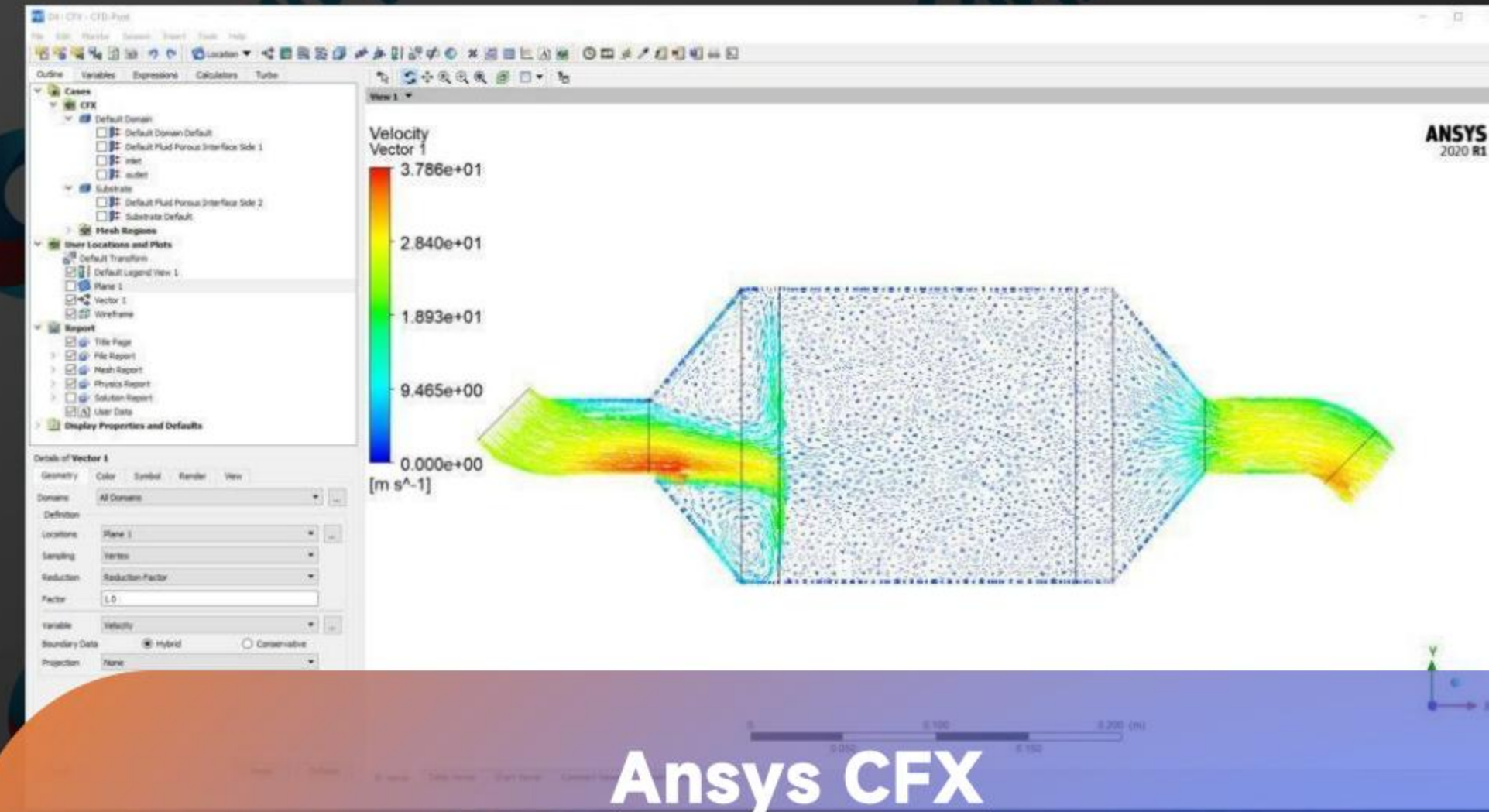
设计驱动因素	可能条件	设计影响	产生的复杂性
热通量分布	均匀 局部热点 强烈非均匀	决定是需要基本流路还是需要局部冷却	低→高
表面温度限制	单一全局限制 按组件/区域变化	需要热分区、定制流体路径	低→中-高
温度均匀性要求	无需均匀性 局部均匀性 (按组件类型) 全局均匀性	驱动使用平行流路、逆流或多层路由	中→高
冷却剂流速 (固定与灵活)	受系统约束固定 设计期间可调	固定流速需要更精确地优化通道网络	中
最大允许压降	严格约束 中等约束	限制允许的翅片密度、路径复杂性	中→高
组件占位面积约束	均匀分布的组件 不对称或成簇布局	影响流体分布对称性、通道调整	低→中
安装、进口/出口约束	灵活的端口放置 固定的端口/安装孔	影响回路路由自由度和可制造性	中→高

通用CFD流体仿真软件



热交换器相关功能：
 宏观换热器模型（NTU模型与效率模型）
 散热器集总参数建模
 GPU求解器支持VOF多相换热瞬态仿真
 Fluent Web界面支持形状优化与多孔介质分析
 丰富的湍流与辐射传热模型

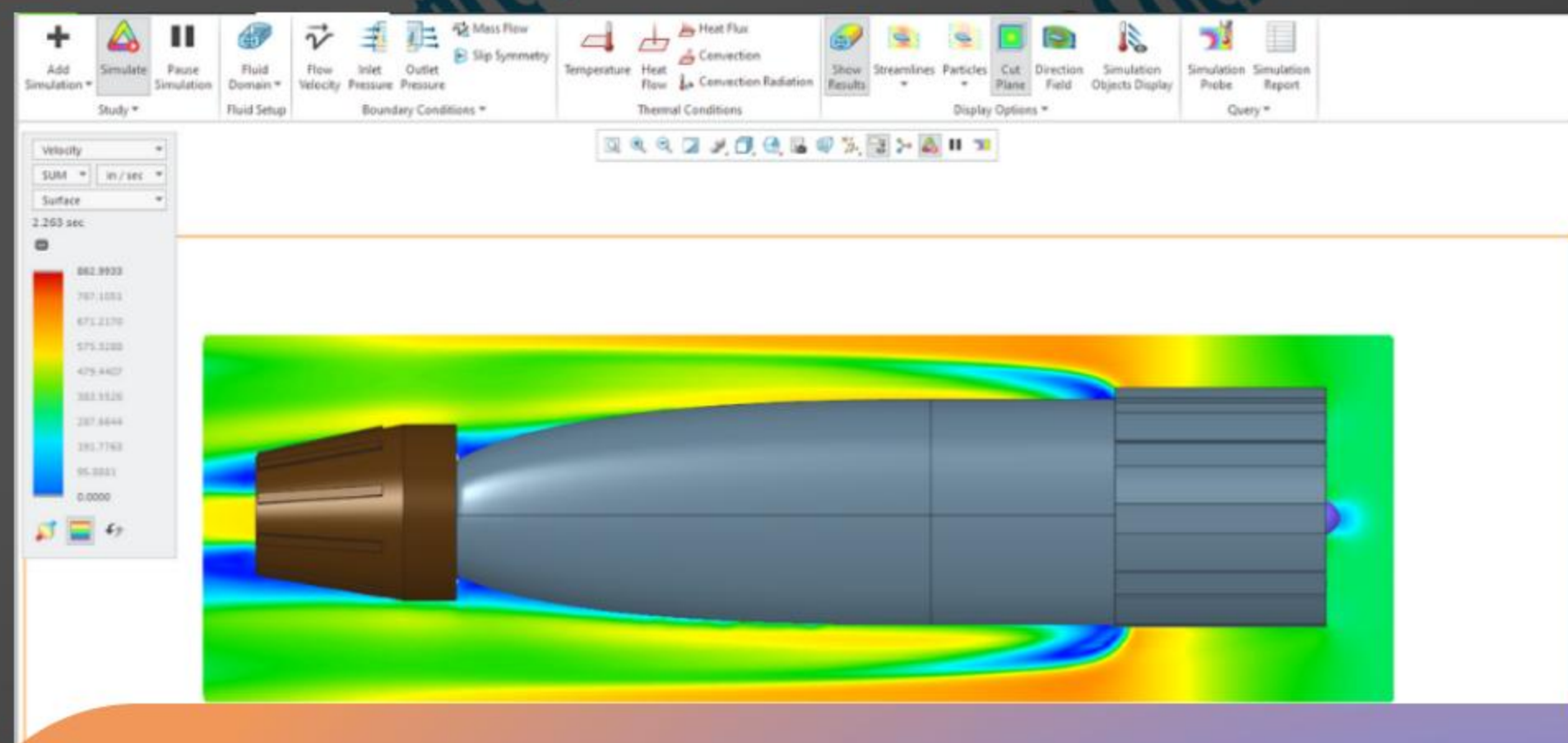
应用领域：
 航空航天、汽车、能源、电子散热、化工



热交换器相关功能：
 共轭传热（CHT）技术联合流体与固体导热计算
 全隐式多网格耦合求解器，收敛快
 通用网格界面（GGI）支持非一致网格连接
 薄挡板导热计算
 叶轮机械专用附加模块与快速设计工具

应用领域：
 涡轮机械、核电、HVAC

通用CFD流体仿真软件



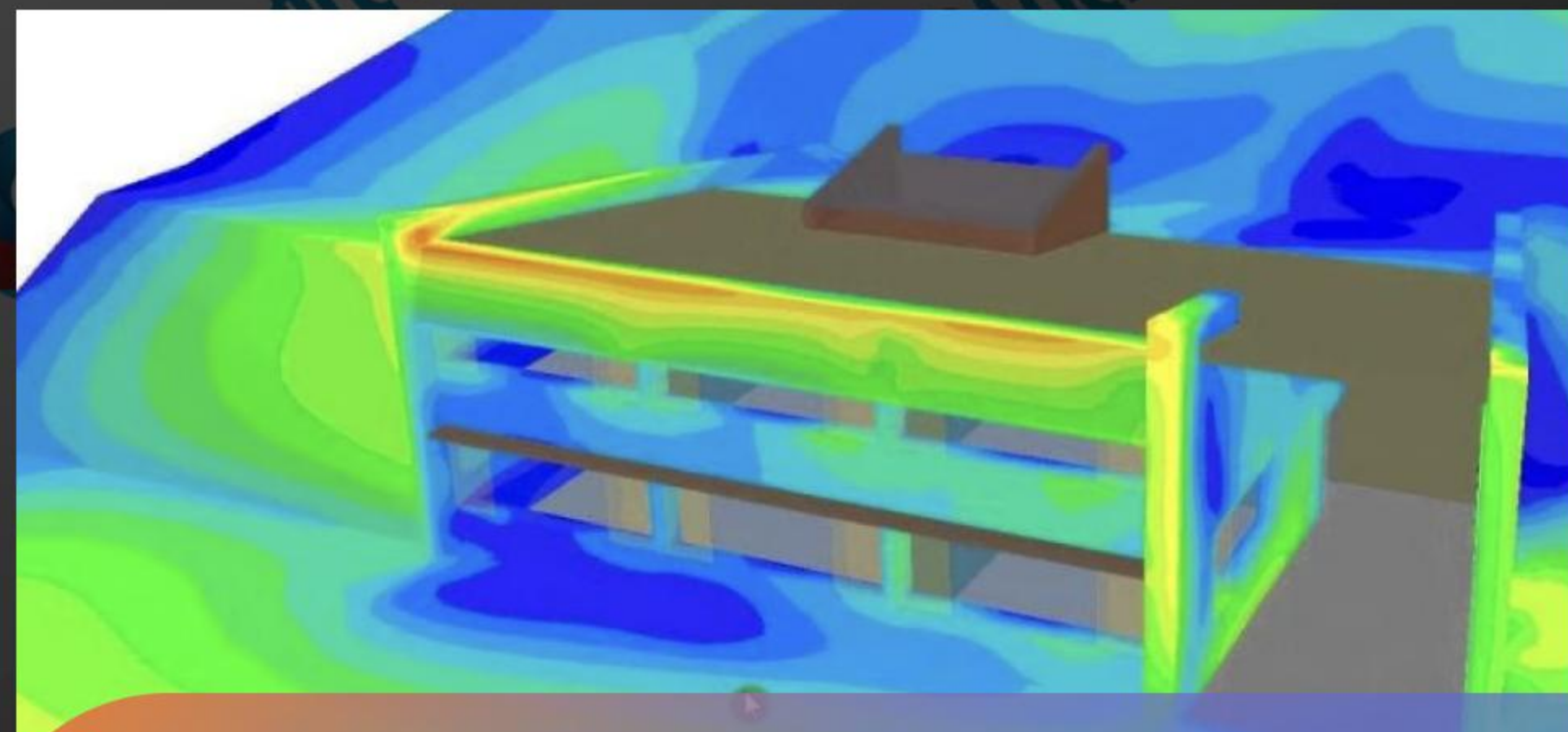
Autodesk CFD

热交换器相关功能:

3D流体流动与共轭传热模拟
空气对空气换热器能量平衡计算
设计研究支持多方案对比
自然对流（浮力）功能
自由表面运动与热影响分析

应用领域:

AEC建筑通风、产品设计、HVAC、电子封装



PHOENICS

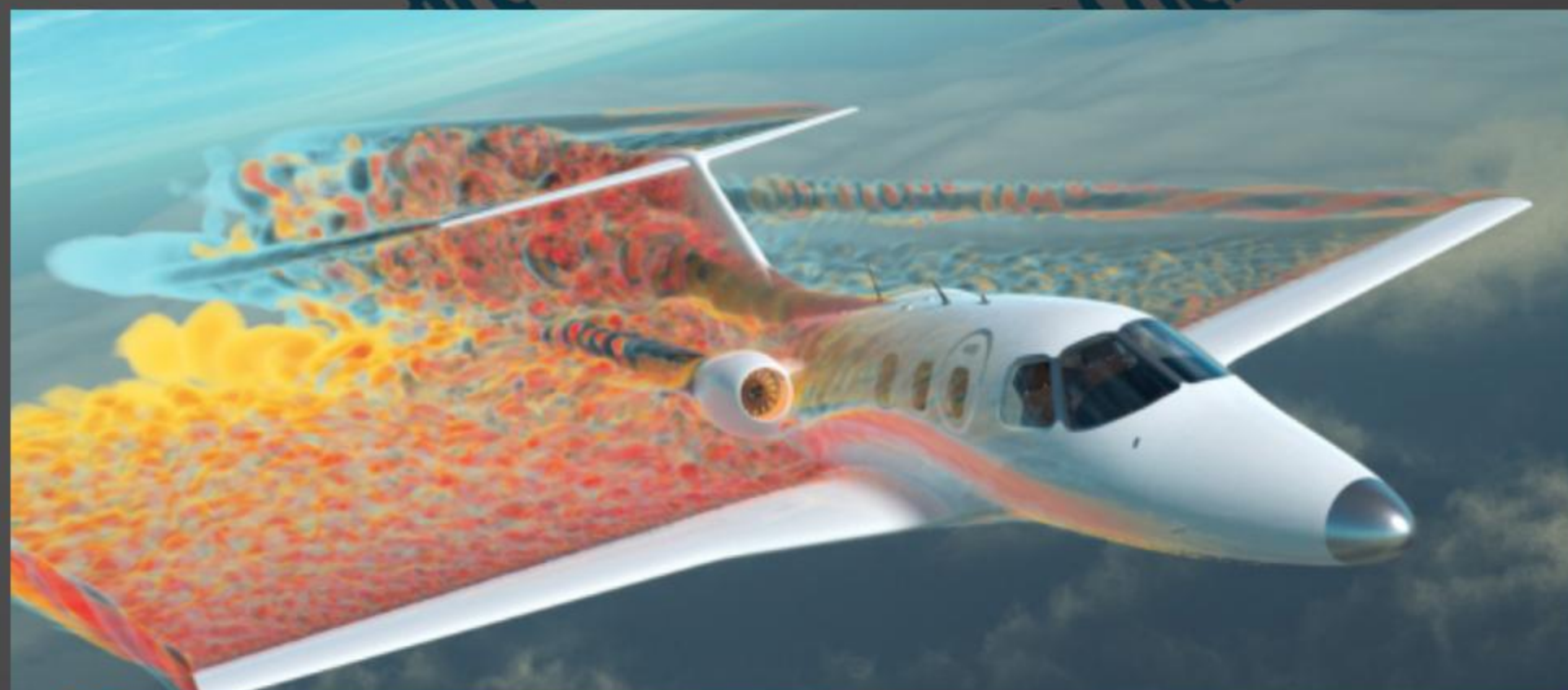
热交换器相关功能:

VOF相变模型（蒸发、沸腾、冷凝）
膜态沸腾与容积沸腾区分
Spalart-Allmaras一方程湍流模型
非牛顿流体建模（拟塑性流体）
增强的入口湍流边界条件

应用领域:

建筑环境、暖通空调、消防排烟、风环境

通用CFD流体仿真软件



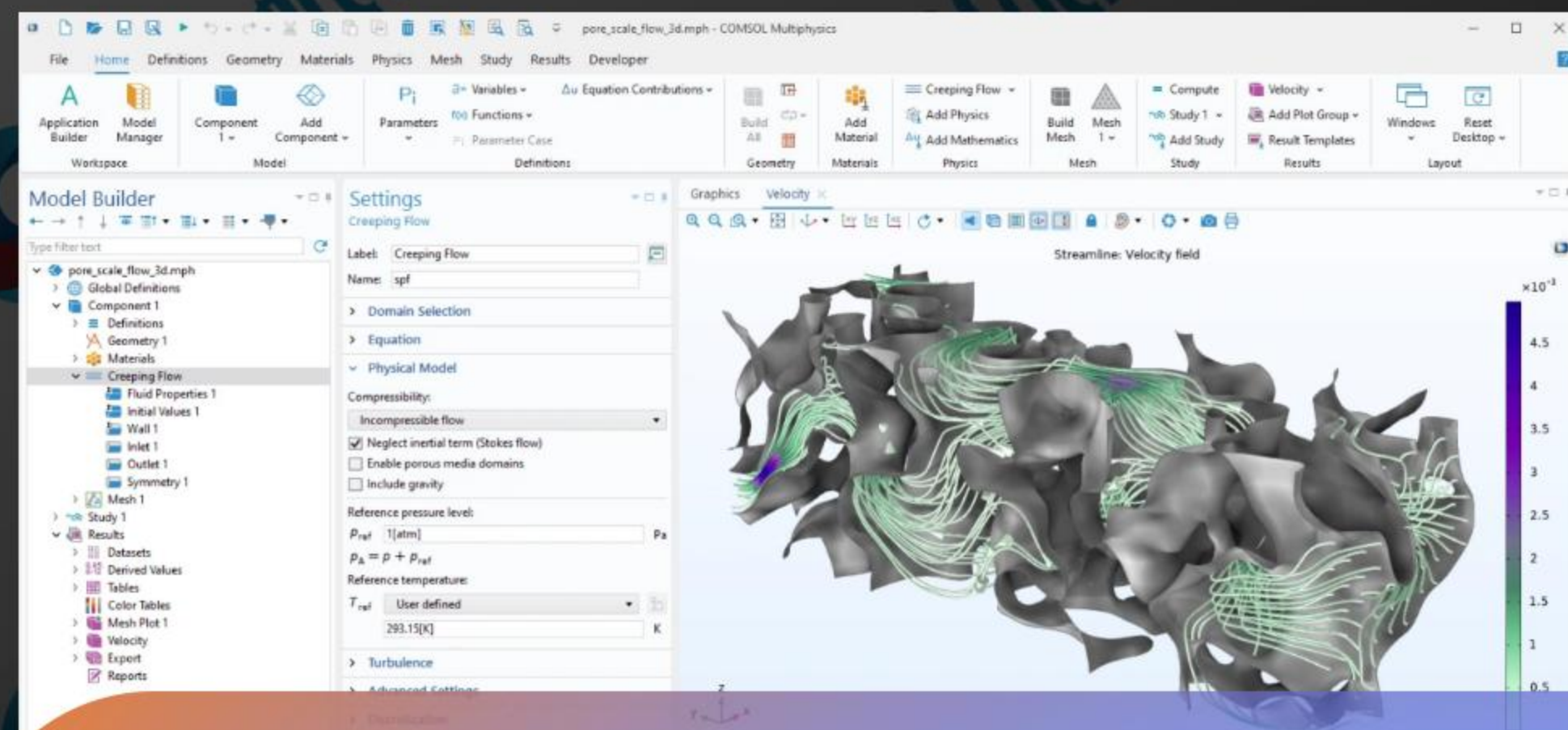
Siemens STAR-CCM+

热交换器相关功能：

GPU加速共轭传热（2502版本新增原生CHT）
 双流换热器精确仿真建模
 混合多状态多相自动转换功能
 流固耦合与结构性能分析

应用领域：

汽车、船舶、航空航天、电池热管理



COMSOL Multiphysics

热交换器相关功能：

CFD模块支持单相/多相流与共轭传热
 全面RANS湍流模型 + LES/DES支持
 形状与拓扑优化自动生成换热器几何
 电子散热仿真内置散热器几何零件库
 流固耦合（FSI）与电流体动力学

应用领域：

微流体、MEMS、电子热管理、生物医学

电子散热 - 计算流体力学CFD软件

Ansys Icepak

专注于电子系统散热仿真的专业工具，可模拟电路板、散热器、电源等复杂电子组件的三维结构，计算其在各种工作条件下的温度分布和散热效果。

主要功能

- 模拟热传导、对流和辐射等多种热交换过程
- 与Ansys家族（HFSS、Maxwell、Mechanical）无缝协同
- 实现电、热、结构等多物理场联合仿真
- 先进的建模技术和网格划分算法
- 提供大量结构化建模模块（IC、散热器、风扇等）
- 多维度可视化后处理分析

应用场景

异形散热组件设计（航天定制化散热器、不规则风道），需要多物理场扩展分析的应用（热应力、电磁兼容性分析）。

电子散热 - 计算流体力学CFD软件

Simcenter Flotherm

专门针对电子器件/设备热设计开发的仿真软件，从底层设计即聚焦于电子产品热管理问题，对PCB、封装、散热器、风扇等典型结构具有高度抽象支持。

主要功能

SmartPart技术缩短热分析流程

丰富的元器件库、EDA和MCAD数据处理

自适应网格自动划分技术

自动参数扫描、响应面分析和遗传算法优化

紧凑型热建模技术用于系统级仿真

支持液冷等多种散热方式模拟

应用场景

消费电子、通信设备、服务器等标准化产品的快速散热分析（手机主板、笔记本散热模块），产品设计初期的多方案对比筛选。

数字孪生驱动的智能合金设计-加速3D打印热管理新型合金开发

AI Alloy

SynaCore

Material Setup

Material

Custom Ni Alloy

Save Load Reset Copy to New

Thermal Mechanical

Add thermal property Remove thermal property

	Temperature [C]	Density [kg/m3]	Thermal conductivity [W/mK]	Specific heat [J/kgK]
1	27	8376.62	47.93	678.749
2	37	8372.97	47.93	678.749
3	47	8369.32	47.93	678.749
4	57	8365.68	47.93	678.749
5	67	8362.03	47.93	678.749
6	77	8358.38	47.93	678.749
7	87	8354.72	47.93	678.749

Powder Size Distribution

D10 D50 D90

18 33 56

μm μm μm

Powder Shape Distribution (%)

50 35 15

sphere satellite ellipsoic

Base plate (z=0)

rigid springs

100.0e6

rigid springs

Check input consistency

OK Cancel

SynaCore发布的集成于其AM-DT数字孪生软件内部的AI Alloy智能合金设计模块，以AI驱动计算材料科学内核，率先在工业级数字孪生平台上实现合金"成分-工艺-性能"的全流程数字化预测，终结了传统材料研发依赖数十年试错实验的漫长周期。

高精度成分预测

依托每个合金系数千个训练数据点，精准捕捉合金成分与材料性能之间的复杂非线性关系；

虚拟实验闭环

与AM-DT的数字孪生环境深度融合，实现"设计-模拟-虚拟验证"全流程数字化。

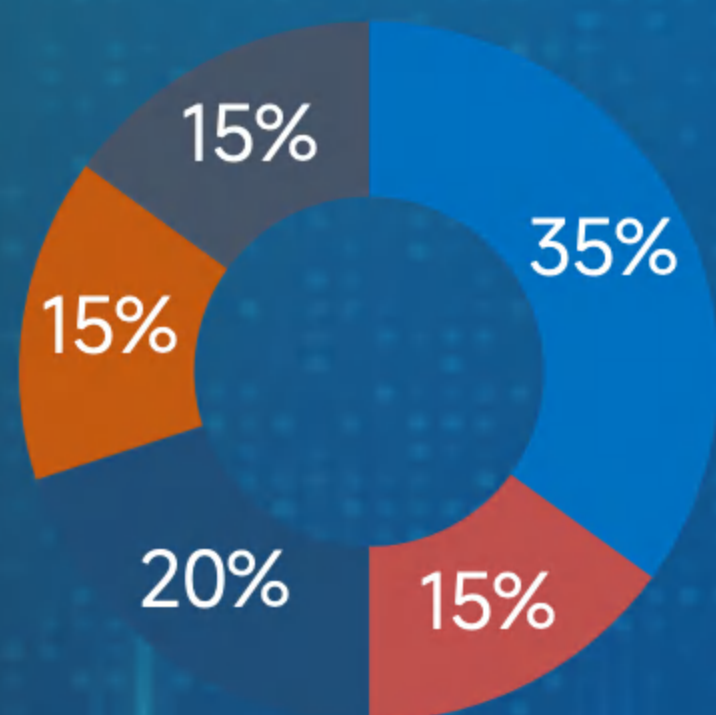
增材制造热交换器典型材料

材料类别	主要牌号	热导率W/(m·K)	工作温度	典型应用
铝合金	AlSi10Mg, AlSi7Mg, Al-Mg-Sc-Zr, AlSi12, Al2139, 6061, 6063, 7075	140-218	-100~250°C	航空/汽车/电子换热
铜合金	GRCop-42, CuCrZr, CuCr1Zr, CuNi2SiCr, C101, C110	300-398	-200~750°C	火箭发动机/高功率散热
镍基合金	Inconel 718, Inconel 625, Hastelloy X, Monel K500	9.9-17	-253~1200°C	航空发动机/化工/核能
钛合金	Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V ELI, Ti-3Al-2.5V	6.7-8	-250~400°C	航天/海洋/航空
不锈钢	316L, 304L, 316Ti, 17-4PH, 15-5PH	15-18	-270~500°C	化工/食品/核能换热
陶瓷	AlN, Al ₂ O ₃ SiC	30-270	-200~1600°C	极端高温/电绝缘换热
聚合物	PEEK, PPSU, PA12	0.25-20	-50~250°C	电子绝缘散热/轻量化

增材制造热交换器材料分类框架

金属材料占90%以上市场份额，选材遵循"温度-热导率-强度"三角平衡原则。

金属材料市场份额分布



■ 铝合金 ■ 铜合金 ■ 镍基合金 ■ 钛合金 ■ 不锈钢

非金属材料（陶瓷+聚合物）占比 <10%，在超高温、电绝缘、轻量化等特定场景具有不可替代性。

温度区间	典型材料	依据
< 250°C	铝合金 铜合金	前者适用热导率优先，兼顾轻量化；后者适用高散热性能需求。
250~500°C	不锈钢 钛合金	钛合金：高比强度和耐腐蚀；不锈钢：对强度要求高但对重量不敏感的场所。
500~800°C	镍基合金 GRCop-42	前者适用对导热无特殊要求的承力高温部件；后者适用需要快速导出热量的高温部件。
> 800°C	陶瓷 Hastelloy X	前者是极端高温下的首选；后者是连接镍基合金与陶瓷的过渡材料。
电绝缘需求	陶瓷 PEEK	满足中等温度区的绝缘+轻量化/导热需求。

增材制造热交换器材料关键性能指标

热物理性能 — 决定换热效率的核心指标

热导率	材料传导热量的能力，直接决定换热速率
比热容	单位质量材料升高1°C所需热量，影响蓄热能力
热膨胀系数	温度变化引起的尺寸变化率，影响热循环稳定性
熔点	材料形态转变温度，决定最高使用温度上限
热扩散率	热导率/(密度×比热容)，反映温度传播速度

工艺性能 — 增材制造可打印性的关键

激光吸收率	材料对激光能量的吸收效率
粉末流动性	粉末均匀铺展的能力，影响打印均匀性
热裂敏感性	冷却过程中产生微裂纹的倾向
氧含量	粉末中氧含量对最终性能的影响程度

力学性能 — 承载能力与服役可靠性保障

抗拉强度	材料抵抗拉伸断裂的最大应力
屈服强度	材料开始塑性变形的应力阈值
疲劳性能	循环载荷下的抗裂纹扩展能力
蠕变抗力	高温长期载荷下抗缓慢变形能力
延伸率	断裂前可承受的塑性变形程度

环境适应性 — 耐腐蚀与长期稳定性

耐腐蚀性	抵抗化学介质侵蚀的能力
抗氧化性	高温环境下抵抗氧化的能力
流体相容性	与换热介质的化学稳定性
抗辐照性	核辐射环境下保持性能的能力

材料选择

散热片材质是指散热片所使用的具体材料。每种材料其导热性能是不同的，按导热性能从高到低排列，分别是银，铜，铝，钢。不过如果用银来作散热片会太昂贵，故最好的方案为采用铜质。虽然铝便宜得多，但显然导热性就不如铜好（大约只有铜的百分之五十多点）。常用的散热片材质是铜和铝合金，二者各有其优缺点。铜的导热性好，但价格较贵，加工难度较高，重量过大（很多纯铜散热器都超过了CPU对重量的限制），热容量较小，而且容易氧化。而纯铝太软，不能直接使用，都是使用的铝合金才能提供足够的硬度，铝合金的优点是价格低廉，重量轻，但导热性比铜就要差很多。有些散热器就各取所长，在铝合金散热器底座上嵌入一片铜板。对于普通用户而言，用铝材散热片已经足以达到散热需求了。

五种特殊材料的3D打印及热性能比较

Property		Silicon Carbide	Inconel 718	Haynes 214	Inconel 601	SS304
可3D打印性	Printability	2	5	1	4	4
	Density	5	2	2	2	3
密度	Thermal conductivity	5	2	4	2	3
	Expansivity	5	3	2	2	1
导热系数	Yield Strength	4	5	3	2	1
	Ductility	1	4	3	4	5
膨胀	Oxidation resistance	5	3	4	2	1
	Corrosion resistance	5	3	4	2	1
屈服强度	Creep & rupture strengths	5	4	2	2	1
	Fatigue	4	3	5	3	2
延展性	Sustainability	1	4	3	4	5
	Cost	1	2	3	4	5
抗氧化性	Total	273	264	243	226	223
耐腐蚀性能						
蠕变和破裂强度						
疲劳						
可持续性						

增材制造热交换器内部通道粉末清除后处理技术

从左向右设计自由度增强

强设计约束

强设计自由度

	压缩空气/手动	低压冷喷/干冰	超声波	机械振动/离心	化学溶解
原理	高压气体吹扫/ 机械敲击	高速颗粒冲击清 理	空化效应剥离松 散粉末	多轴振动/旋转使 粉末流出	自限性反应选择性 溶解粉末
主要优势	成本低、设备简 单	无残留、不损伤 表面	设备常见、可批 量处理	自动化、一致性 好，行业主流	可清除烧结粉末， 不伤薄壁，提升光 洁度
主要局限	视线限制，难清 死角，效果依赖 经验	严格视线限制， 可能压实深层粉 末	能量随距离衰减， 弯曲处效果骤降	难清除已烧结的 顽固粉末	设备与化学试剂投 入高，需专有配方
设计约束	强约束：通道需 直、大、可达	强约束：介质须 直线可达	中等：通道不宜 过细(<1mm)过曲	较弱：允许弯曲 与细孔，需避免 完全盲端	弱约束：基本不受 几何限制

注：信息仅供参考，实际生产中或不同工艺组合使用

换热器、散热器 相关标准

当前标准体系特点

基础标准较为完善：ISO/ASTM联合发布的增材制造基础标准体系（52900系列）已覆盖术语、设计、材料、工艺、鉴定等核心环节，国标、团标也已建立起相关基础标准。

材料标准快速跟进：我国在铜及铜合金粉（GB/T 41882-2022）、铝合金粉（GB/T 44239-2024）、不锈钢粉末（GB/T 46187-2024）等热管理关键材料领域已建立国家标准，基本覆盖了散热器/换热器的主流3D打印材料。

专用产品标准缺失：目前尚无专门针对3D打印换热器或散热器的国际标准或国家标准。现有的散热器/换热器通用标准（如GB/T 151、GB/T 13754）主要针对传统工艺产品，未充分考虑3D打印带来的复杂流道、薄壁结构、一体化集成等新特征。

团体标准率先突破：中国工业环保促进会归口的《金属3D打印超薄散热器技术要求》是目前国内唯一专门针对3D打印散热器的标准，已通过专家审查，填补了专用标准空白。该标准对超薄散热器的壁厚、流道宽度、设备精度等关键参数做出了明确规定。

地方标准尚属空白：目前各省市尚未出台专门针对3D打印换热器/散热器的地方标准。

增材制造标准列举

标准号	名称	适用范围说明
T/CIEP 0112—2026	金属3D打印超薄散热器技术要求	规定了金属3D打印超薄散热器的一般要求、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输与贮存
GB/T 41882-2022	增材制造用铜及铜合金粉	热管理关键材料标准
GB/T 44239-2024	增材制造用铝合金粉	热管理关键材料标准
GB/T 46187-2024	增材制造材料 不锈钢粉末	不锈钢（316L等）用于耐腐蚀换热器
GB/T 39252-2020	增材制造 金属材料 粉末床熔融工艺规范	金属材料粉末床熔融工艺规范
ASTM F3301-18a	Standard for Additive Manufacturing — Post Processing Methods — Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion	粉末床熔融金属零件的热处理后处理要求
ASTM F3302-18	Standard for Additive Manufacturing — Finished Part Properties — Standard Specification for Titanium Alloys via Powder Bed Fusion	PBF钛合金成品的性能要求
ISO/ASTM 52911-1:2019	Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals	激光粉末床熔融（LPBF）金属工艺的专项设计规范

换热器、散热器标准列举（非3D打印）

标准号	名称	适用范围说明
GB/T 13754-2017	供暖散热器散热量测定方法	供暖散热器散热量测定方法，适用于热媒为水的散热器
GB/T 151-2014	热交换器	管壳式热交换器通用标准
GB/T 43891-2024	非金属化工设备 不透性石墨换热器传热系数和流阻性能测试方法	石墨换热器传热系数和流阻性能测试方法
T/CIEP 0111—2026	AI服务器用微通道水冷板(MLCP)技术规范	AI服务器用微通道水冷板的技术规范
T/CIEP 0115—2026	微通道液冷板(MLCP)热工性能与可靠性测试方法	微通道液冷板热工性能与可靠性测试方法
T/CASME 913-2023	发动机散热器	发动机散热器的技术要求、试验方法、检验规则等



三维科学·无限可能

“为行业提供深具国际影响力的增材制造咨询及内容营销服务平台。”

3D科学谷

Provide the industry AM consulting service and content marketing service with international influence.

3D Science Valley

- 本书为3D科学谷服务行业应用市场研究类项目，书中包含的数据、部分内容来源于网络或其他公开资料，版权归原作者所有。任何以盈利为目的使用，所产生的后果由使用者自己承担。
- 本书中所有引用的数据已标明出处，如任何个人或单位认为内容存在侵权之处，请及时与我们联系，3D科学谷将及时给予处理。
- 3D科学谷力求内容的严谨性，但限于时间和人力因素，书中难免有不足之处，如存在失误、失实，敬请您不吝赐教、指正。我们热忱欢迎各界专业人士免费加入3D科学谷交流平台。
- 本书内容仅作参考之用，不构成任何投资建议，仅供读者参考。