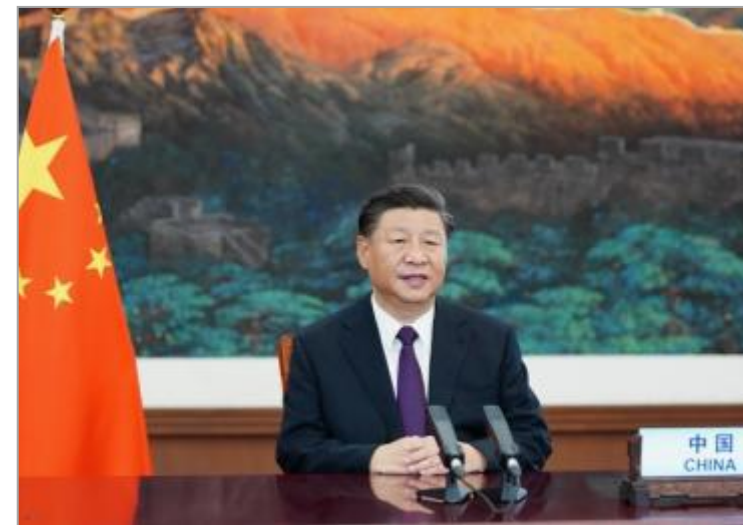


压缩式热泵低碳技术及应用

张治平

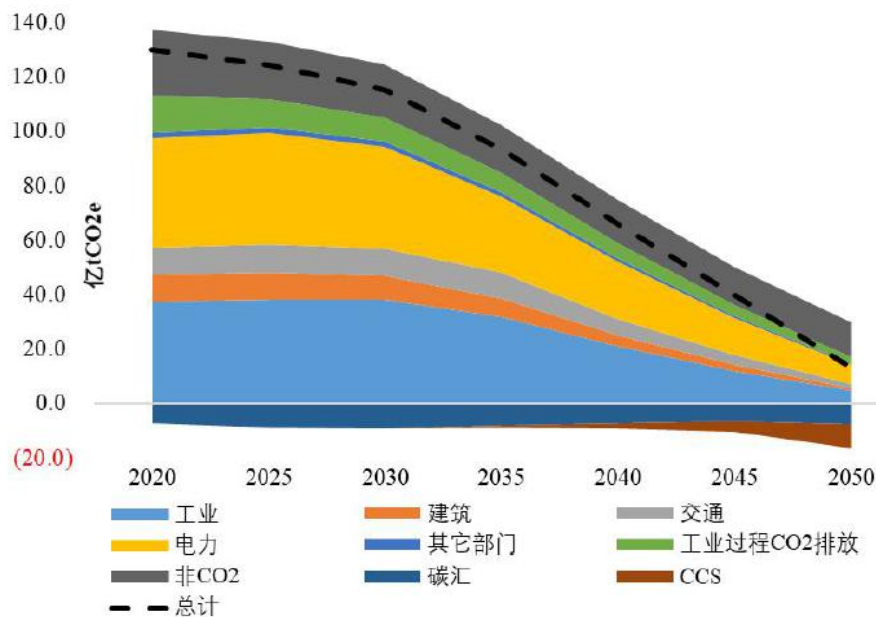
珠海格力电器股份有限公司
空调设备及系统运行节能国家重点实验室
2021.4 上海

- **2015年《巴黎协定》**：到2030年，我国单位GDP的CO₂排放比2005年下降**60~65%**，非化石能源占一次能源消费达到**20%**左右，森林蓄积量比2005年增加**45亿m³**左右
- **2020年9月22日**，习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布：力争在2030年前CO₂排放达到峰值，努力争取2060年前实现**碳中和**；
- **2020年12月12日**，习近平主席在气候雄心会议宣布：到2030年，我国单位GDP的CO₂排放比2005年下降**65%以上**，非化石能源占一次能源消费达到**25%**左右；森林蓄积量比2005年增加**60亿m³**左右，风电、太阳能发电总装机容量达到**12亿kW**以上；



■ 清华大学气候变化与可持续发展研究院：

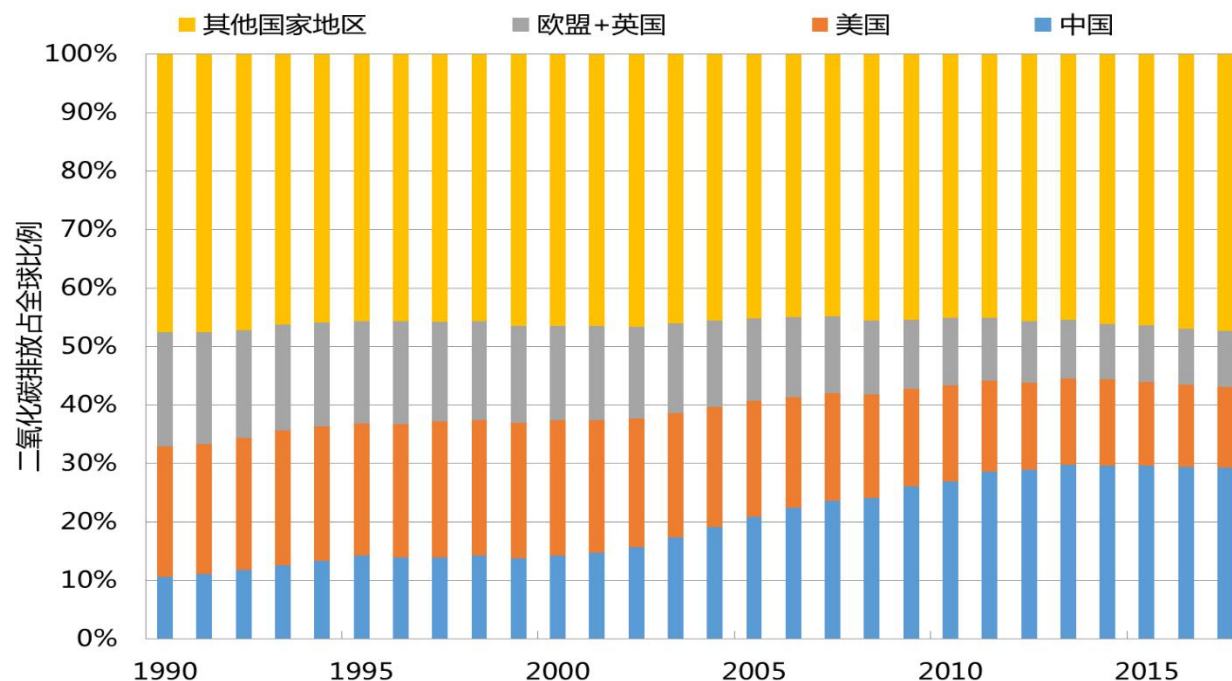
- 2060年实现碳中和，实际上就是努力实现以1.5°C目标为导向的长期深度脱碳转型路径
- 2050年CO₂净零排放，全部温室气体减排90%
- 2050年后加大非CO₂温室气体减排，加强碳汇吸收和CDR技术，全部温室气体净零排放



	2020	2030	2050
能源消费二氧化碳排放	100.3	104.5	14.7
工业过程二氧化碳排放	13.2	8.8	2.5
非二氧化碳温室气体排放	24.4	26.5	12.7
农林业增汇	-7.2	-9.1	-7.8
CCS+BECCS	0.0	-0.3	-8.8
净排放	130.7	130.4	13.3

■ 挑战1：减排量大

- 我国CO₂排放总量超过112亿吨，约占全球29%，为美国的2倍多，欧盟的3倍多；实现碳中和所需的碳排放减量远大于其他经济体

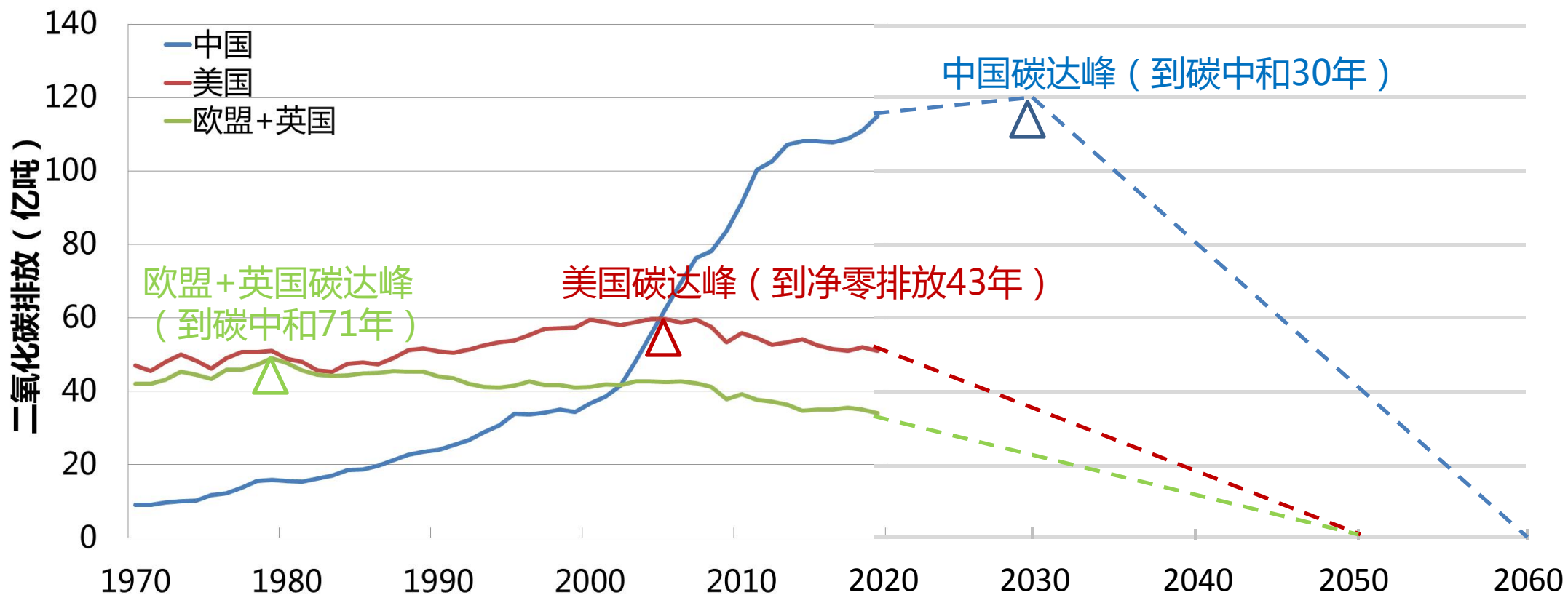


各经济体碳排放占比 (1990-2018)

全球CO₂排放总量约
400亿吨

■ 挑战2：时间间隔短

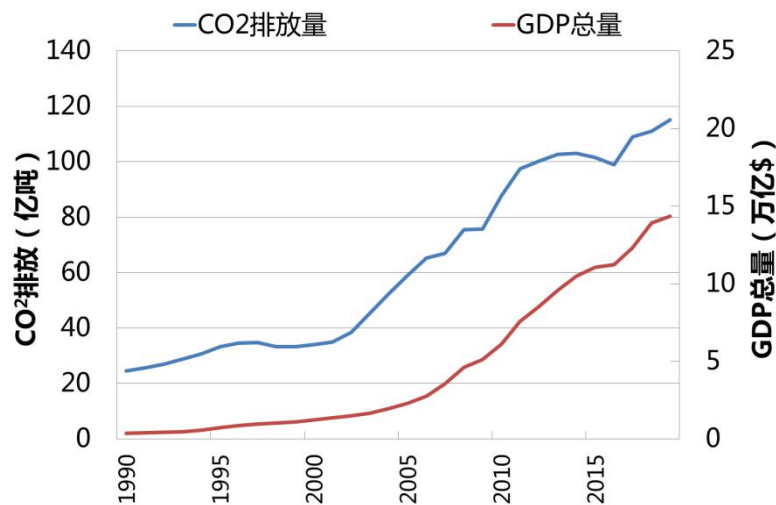
➤ 我国碳达峰到碳中和的时间为30年，远短于美国与欧盟，带来巨大的挑战与机遇



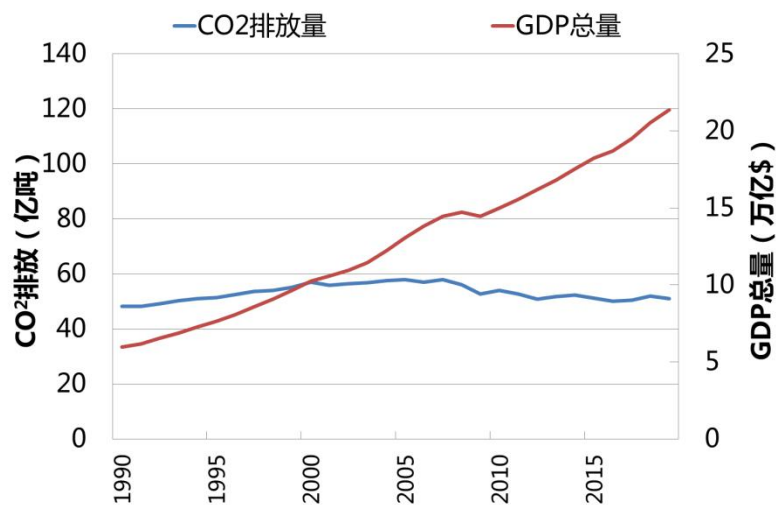
数据来源：https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=50_GHG;

■ 挑战3：与经济发展的矛盾

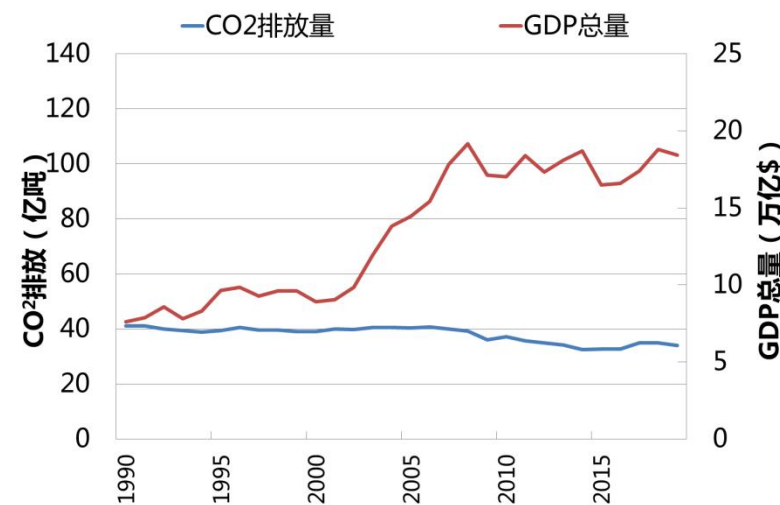
- 欧美国家已实现经济发展与碳排放脱钩，我国尚处于上升期，需解决控制碳排放与经济发展的矛盾，特别是2050年GDP为2020年3.5倍时，单位GDP碳排放任务更重



中国



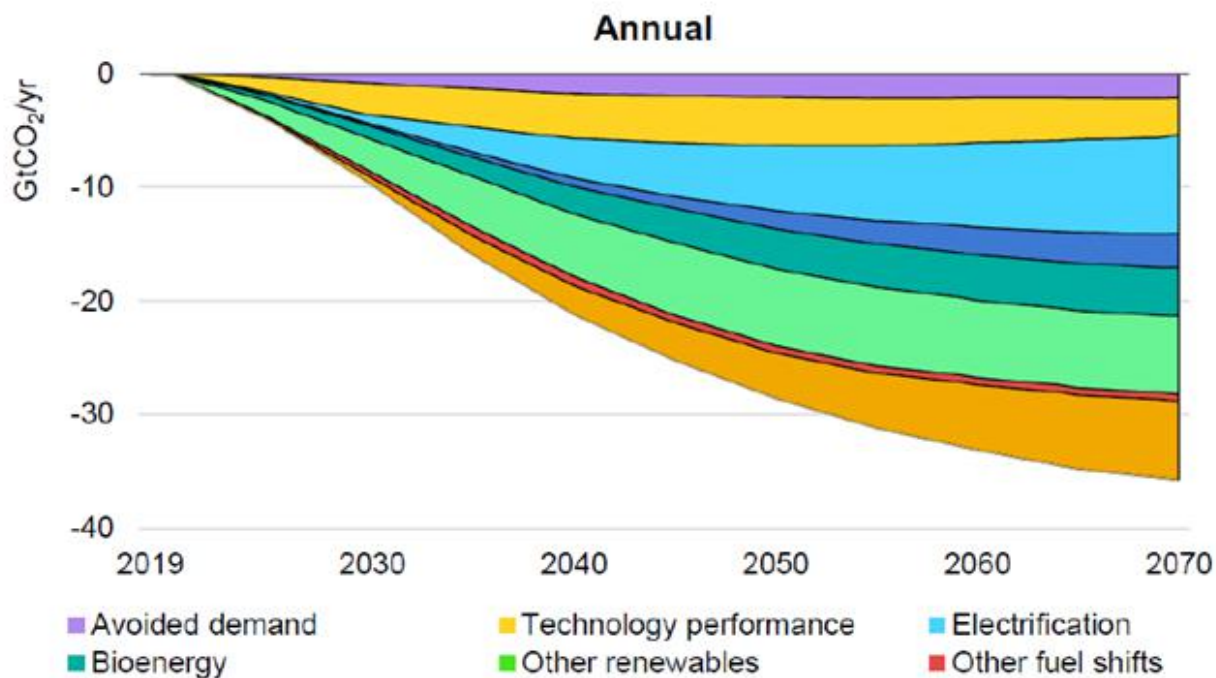
美国



欧盟+英国

■ 机遇：科技创新

- 实现碳中和，需要显著提升能效水平、实现清洁能源替代、电气化、发展CCUS碳捕获、利用与封存技术，科技创新是重要支撑



2020-2070累计减排量



能效提升：38%

技术进步+燃料转换带来的效率提升



电气化、生物质与氢能：37%



CCUS：15%

■ 压缩式热泵低碳发展路径探讨

技术驱动:拓展热泵应用

- 三缸双级转子压缩机
- 双级离心压缩机
- 双级螺杆压缩机
- 复叠式空气源锅炉

.....

多能互补:降低化石能源使用

- 自然冷源、自然通风
- 蓄能蓄冷、能量回收
- 光伏直驱空调

.....

低碳技术:提升热泵效率

- 永磁变频电机
- 直驱技术
- 变频变容
- 高效传热

.....

温室气体减排

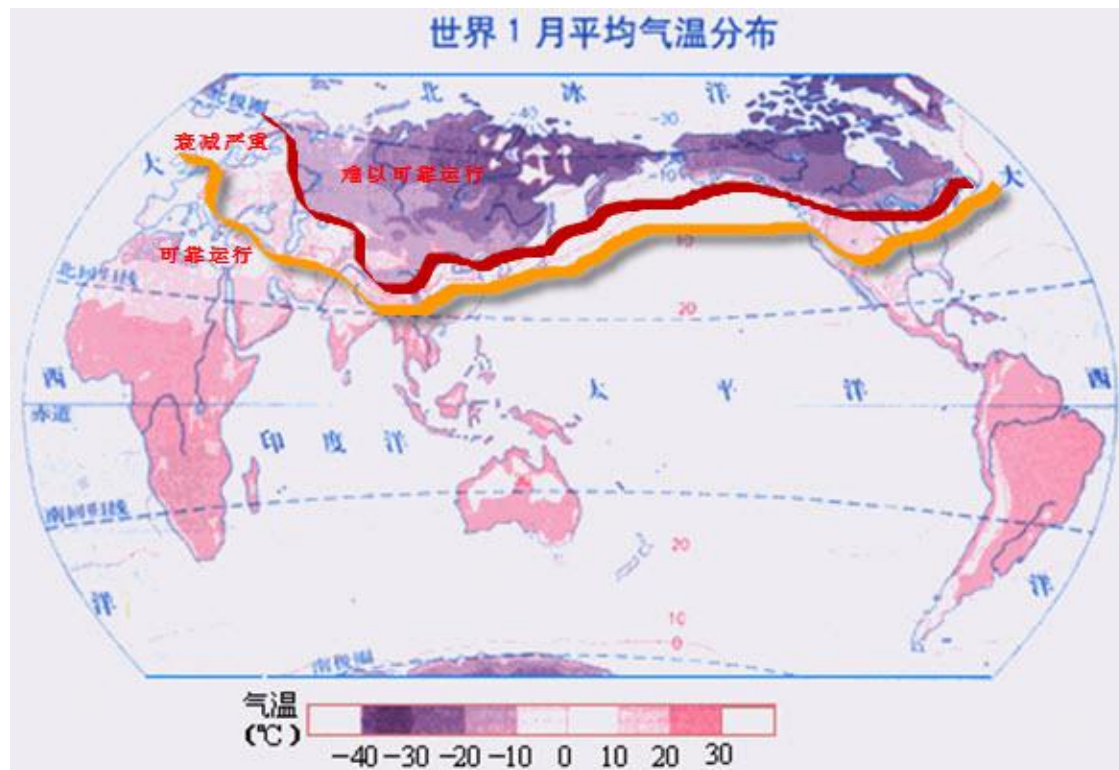
- 低GWP冷媒研发应用
- 冷媒回收.....



■ 压缩式热泵低碳技术：热泵压缩机

- 压缩式热泵常用于寒冷地区，压比高，传统热泵无法工作或效率衰减严重
- 如何提高热泵压缩机的**可靠性与效率**是压缩式热泵面临的主要难题

国家	地区	月平均气温℃			
		11月	12月	1月	2月
俄罗斯	雅库茨克	-33.8	-42.5	-44.5	-40.9
	杜金卡	-25.8	-29.3	-33.4	-31.8
	赤塔	-20	-28.6	-32.5	-29.9
美国	阿拉斯加 费尔班克斯	-26	-28.1	-25.8	-18.7
蒙古	乌兰巴托	-25.2	-31.8	-33	-30.6
	达尔汗	-29.9	-35.5	-38.5	-35.1
加拿大	育空河地区	-25.4	-33.8	-37.5	-29.2
	温尼伯	-9.2	-19.2	-23.6	-20.6

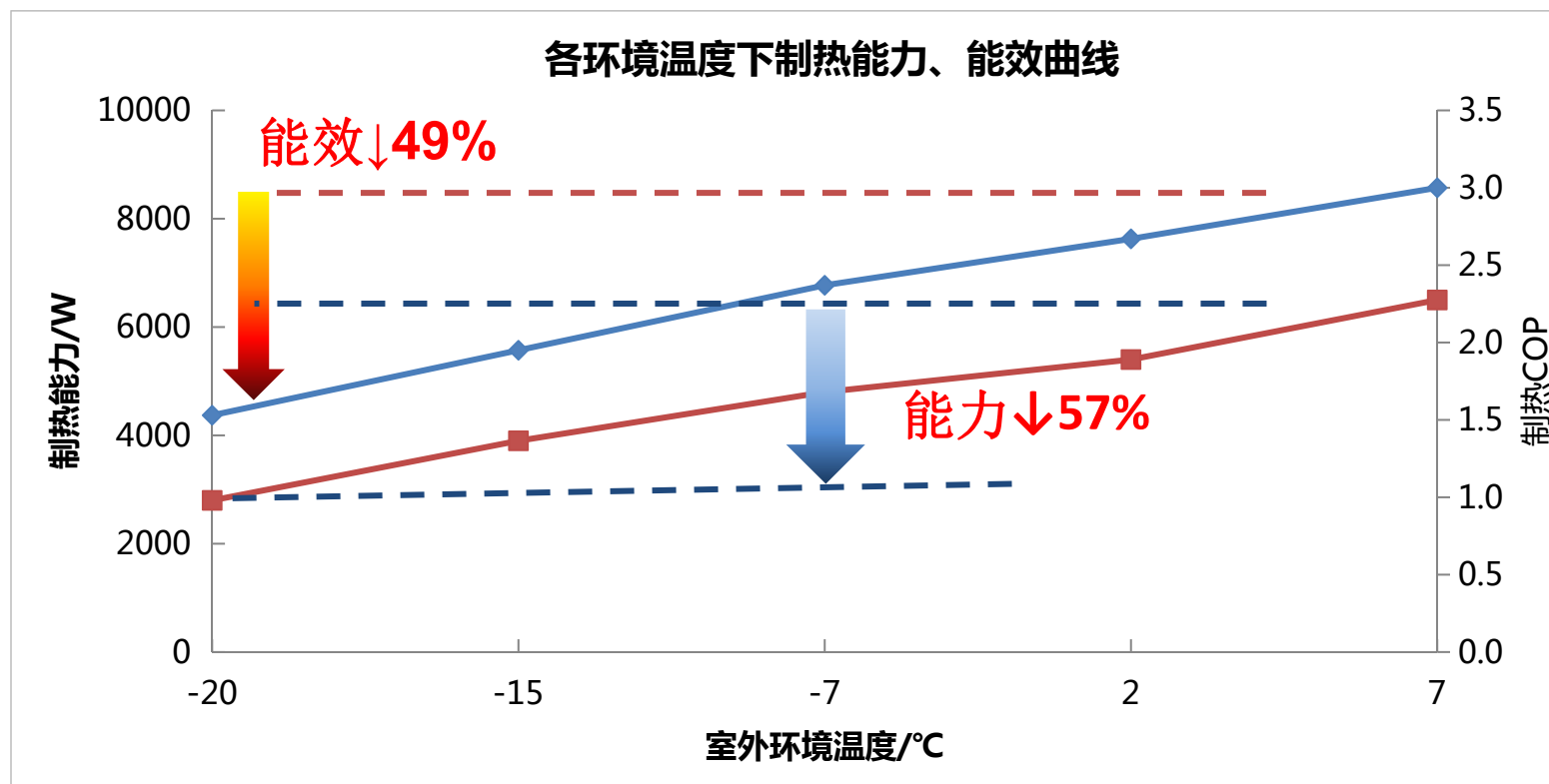


■ 三缸双级转子压缩机

- 当环境温度为 -20°C 时，相比 7°C ，其制热量相比额定工况下降57%，COP下降49%
- 当环境温度低于 -25°C 时，绝大部分空气源热泵不能运行；

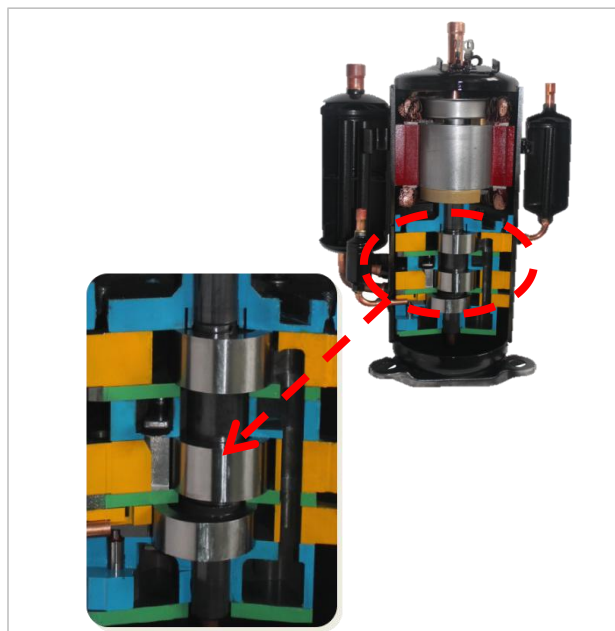


单级转子压缩机

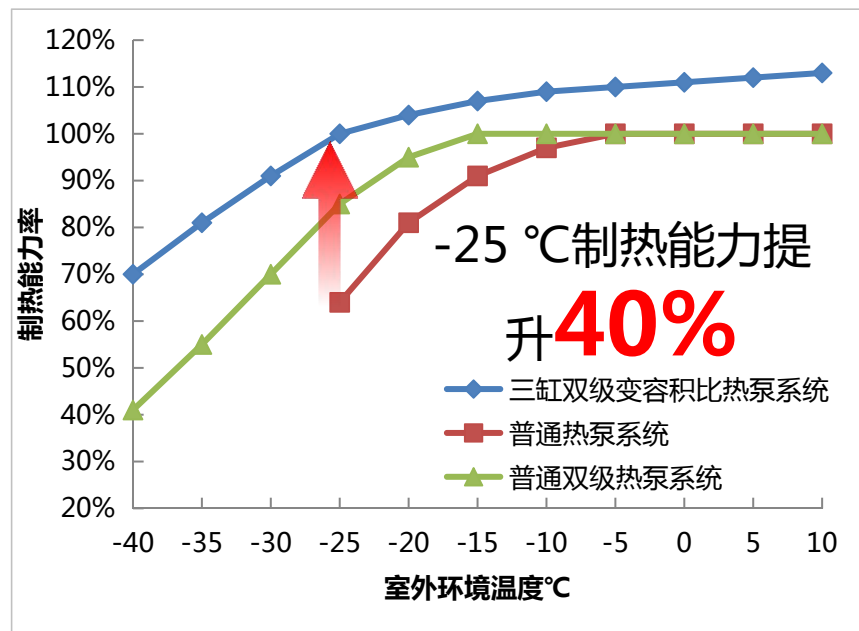


■ 三缸双级转子压缩机

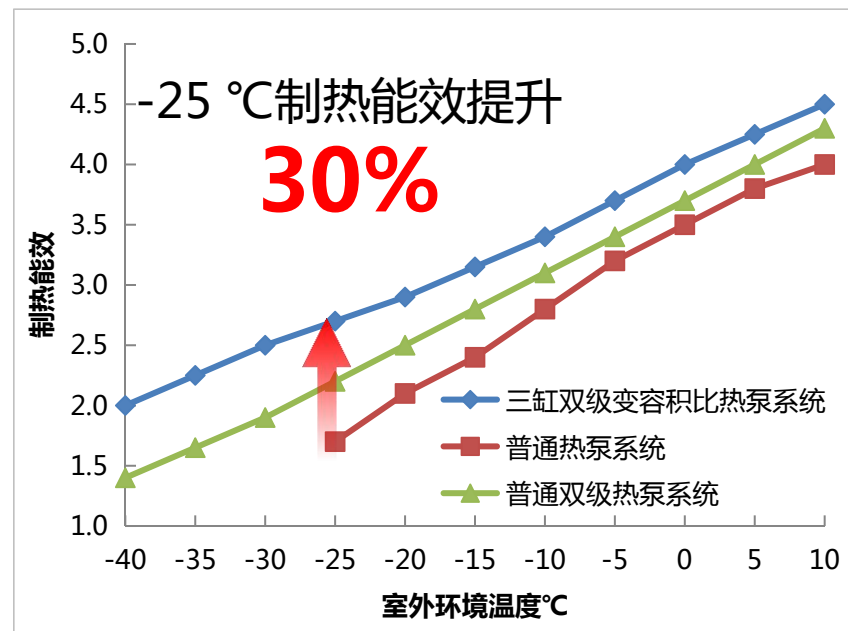
- 三缸双级压缩机具有两个低压缸，在高环境温度时一个低压缸吸气，一个低压缸空转
- 在低温环境时，双个低压缸同时吸气，增大吸气量，提升低温下制热量及能效，-25°C环境下，制热量相比常规热泵**提升40%**，制热能效相比常规热泵**提升30%**



三缸双级压缩机



制热能力对比



制热能效对比

■ 三缸双级转子压缩机

应用案例：蒙古乌兰巴托 北纬47°,东经107°

气候类型：严寒气候、应用区域：蒙古地区 应用场景：蒙古包



室外温度：-10 °C ~ -30°C，室内温度16°C ~ 21°C，机组可靠运行；

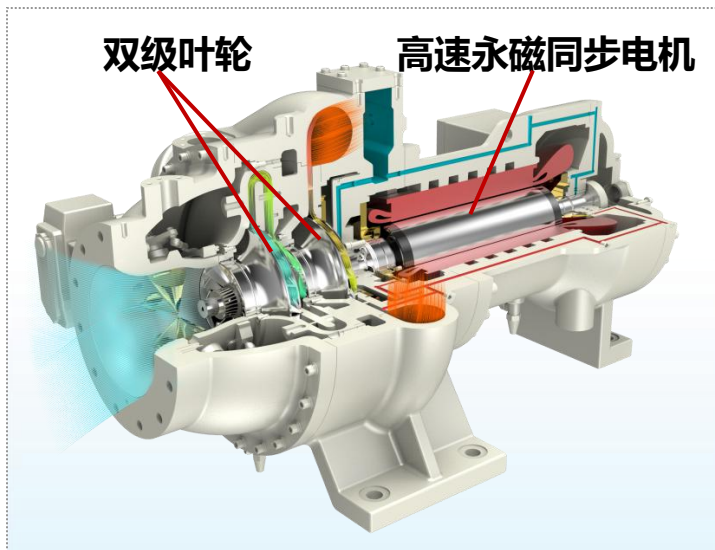
室外温度-10 °C，机组能效3.56；室外温度-30 °C，机组能效1.62；

■ 多级离心式热泵

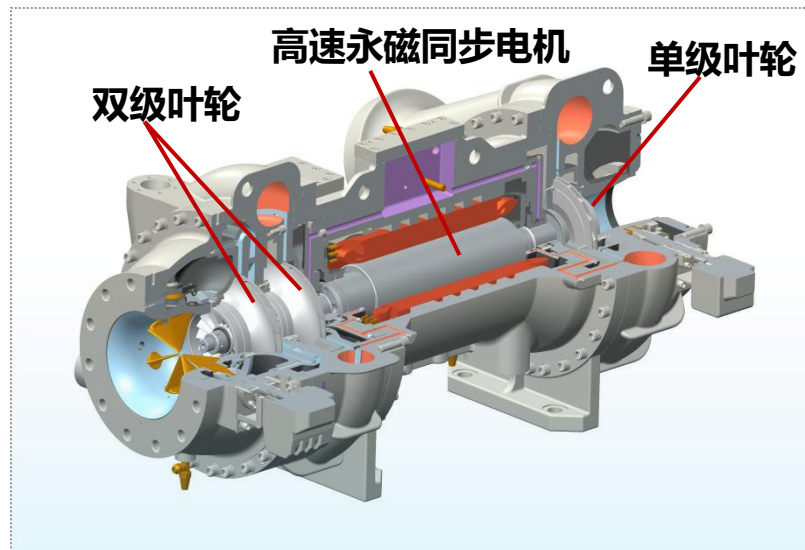
- 单级压缩压比一般低于3.0，双级压缩压比一般低于4.0，更高压比需要采用多级压缩
- 热源侧进水温度30°C，出水温度20°C情况下，单级压缩热水出水温度约50°C，双级压缩热水出水温度可达到65°C，多级压缩热水出水温度可达到80°C。

	单级压缩	双级压缩	多级压缩
热源侧出水温度	20°C	20°C	20°C
使用侧出水温度	50°C	65°C	80°C
压比	2.5	3.7	5.1
制热COP	7.5	5.2	3.6

压比对比表



双级变频离心压缩机



多级变频离心压缩机

■ 多级离心式热泵

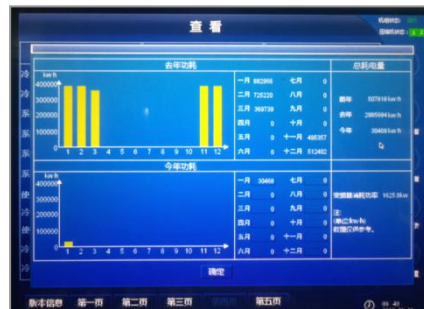
应用案例：辽宁鞍山市鞍山钢铁集团公司

余热：热源侧30°C余热

需求：60°C以上热水，18万平方米供暖（9MW供热量）



格力永磁同步变频离心式热泵机组



采暖季功耗统计



系统运行曲线

➤ 现场测试：威凯检测技术有限公司

热源进水温度：32.4°C；

热水出水温度：62.6°C；

制热量：9675kW；

功率：1451.6kW；

COP：6.67

➤ 环保经济效益分析：

工程投资回收期约1.7年。

	2017采暖季	2018采暖季
消耗电能（万度）	242.9	296.8
电费（万元）	145.7	178.1
年节省运行费用（万元）	250	218
节省标煤（吨）	3500	4200
减排二氧化碳（吨）	9450	11500

备注：2017采暖季运行时间17.12.15-18.03.15；

2018为首个采暖季，运行时间18.11.15-19.03.15。

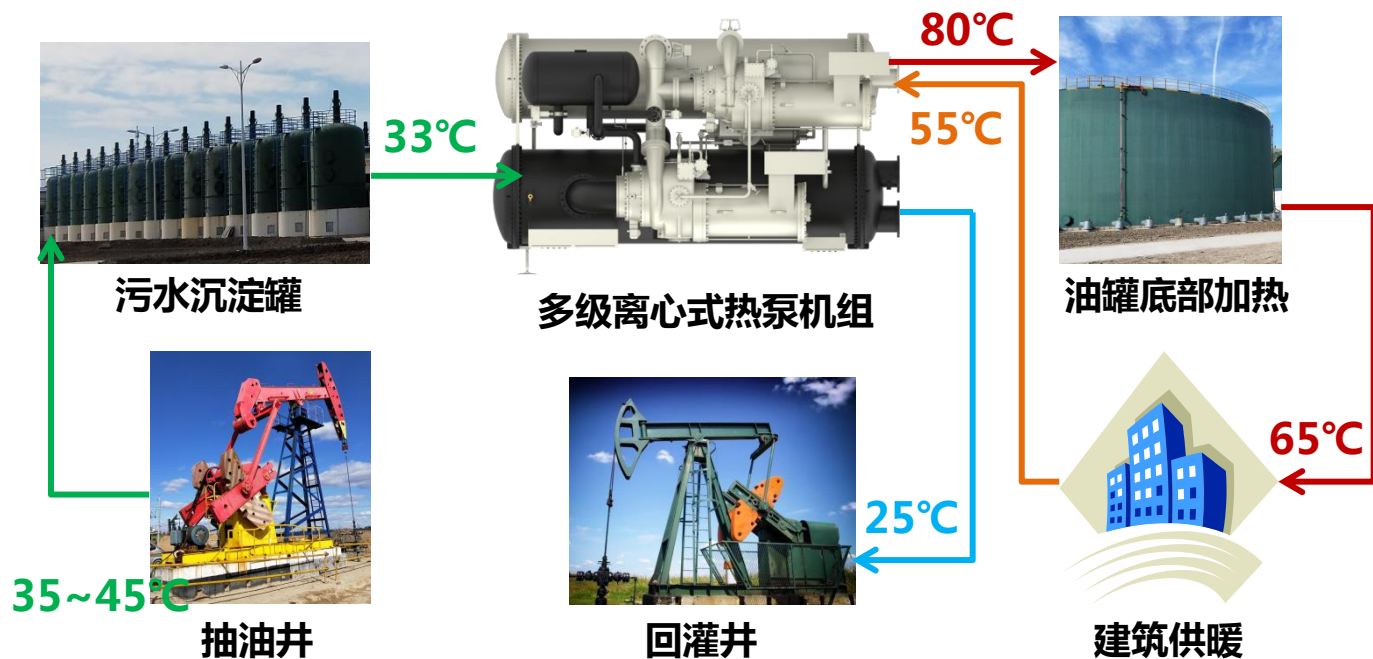
■ 多级离心式热泵

应用案例：大庆油田供暖改造项目，

- 采用3台1400RT**多级压缩**离心式热泵机组，替代原有锅炉房，机组制取**80°C**的热水，为油罐底部加热和厂房供暖，制热**COP4.0**，为降低燃煤污染起到良好的示范作用。



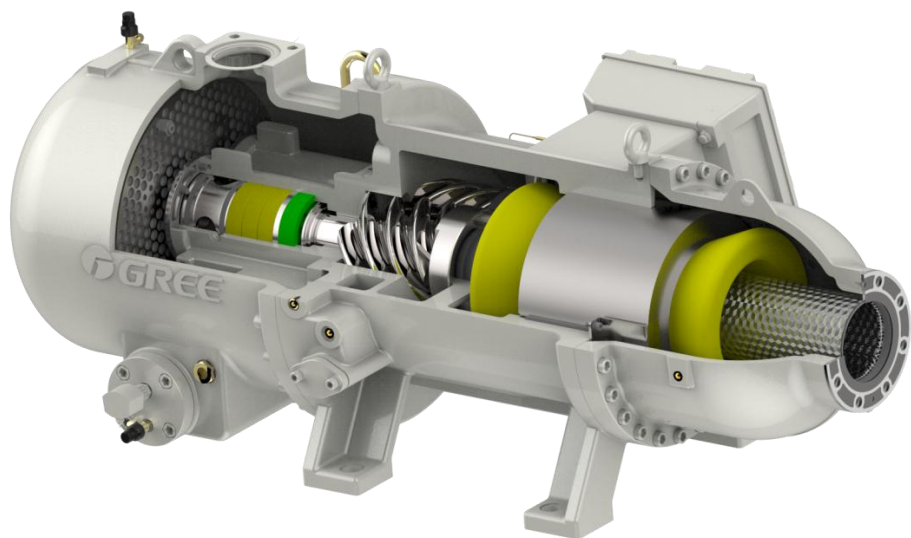
格力多级压缩离心式热泵机组



大庆油田供热系统流程图

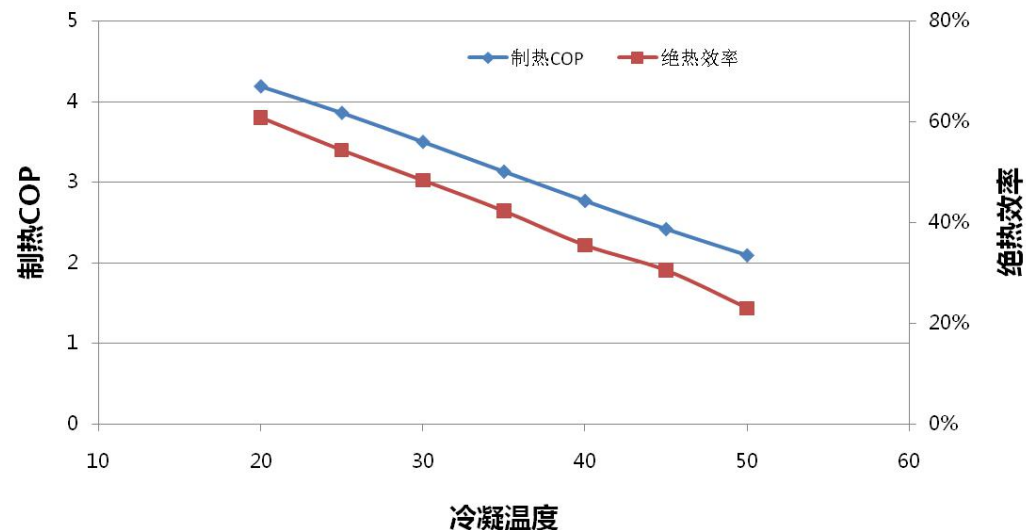
■ 双级螺杆压缩机

- 单级螺杆最大容积比为5.0，-20°C严寒地区，外压比远大于10，
- 欠压缩机及泄漏损失严重，效率低，排气温度高
- 单级螺杆机难以满足-20°C严寒地区制热需求



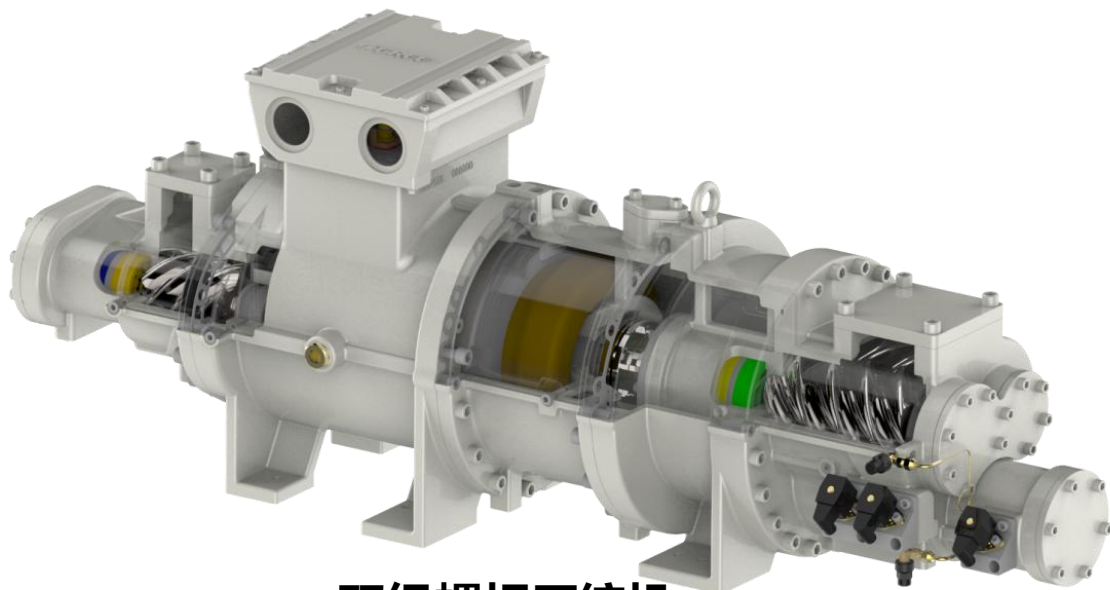
单级螺杆压缩机

COP和绝热效率随冷凝温度的变化



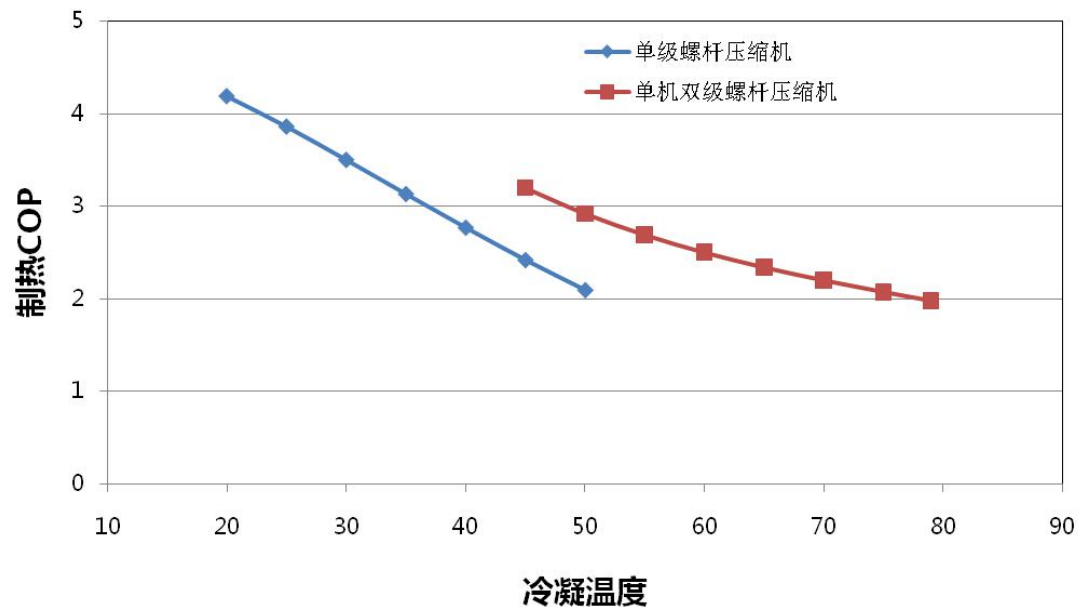
■ 双级螺杆压缩机

- 采用双级压缩，最大压比可达15，满足-30°C/60°C制热需求
- 最佳压比分配，单级泄漏损失低，有效提升绝热效率8%
- 中间补气冷却，排气温度显著降低，提升系统循环效率；
- -20°C环境下相比单级螺杆**制热温度提高30°C**，制热能效提升**36%**



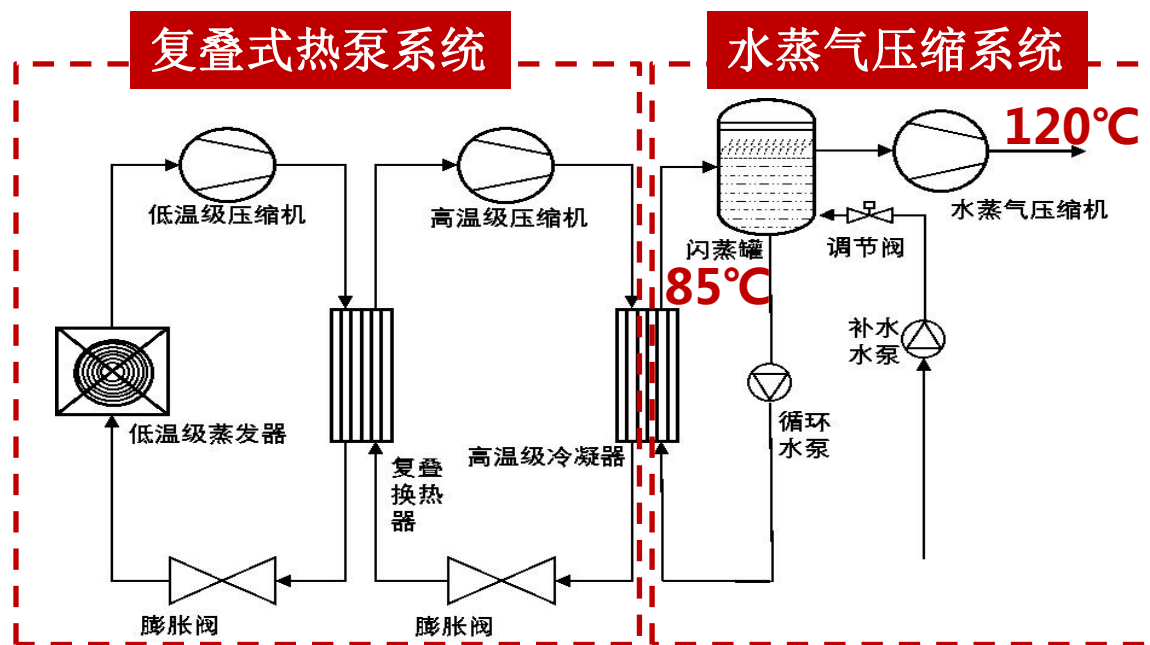
双级螺杆压缩机

制热COP随冷凝温度的变化



■ 复叠式空气源蒸汽热泵

- 利用热泵技术提取空气源中的热量可解决燃料锅炉的污染问题
- 复叠式热泵系统通过多级换热可将闪蒸罐前水温度加热至85°C以上
- 水蒸气压缩机将闪蒸后蒸汽压缩至120°C以上，可广泛用于采暖、制药、酿酒、能源、化工等领域



复叠式空气源蒸汽热泵

■ 复叠式空气源蒸汽热泵

应用案例：山东济南力诺科技园蒸汽供应项目

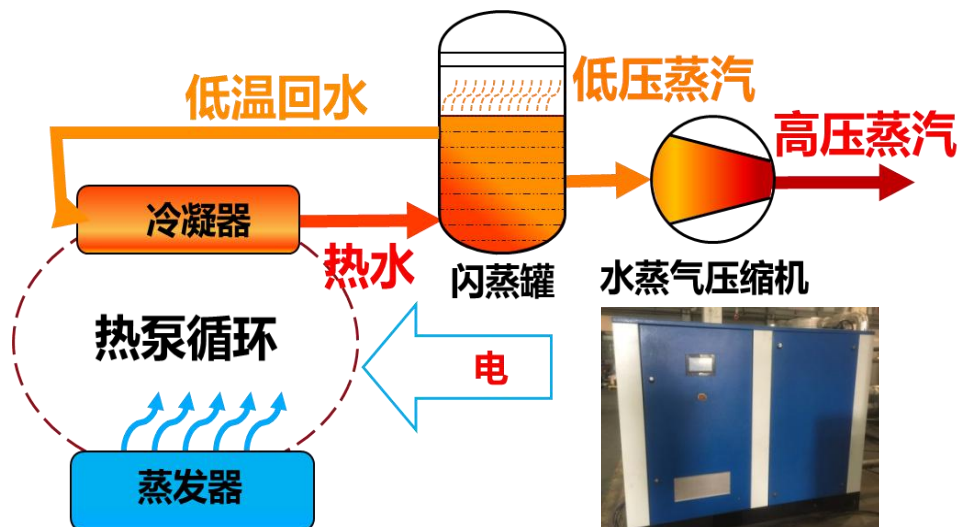
3台60kW的复叠空气源热泵机组获取高压蒸汽用于酿酒，与原来电锅炉相比，预计每年节省**115.2万度电**（节省40%），折合成标煤为465.4吨（等价）



山东济南力诺科技园蒸汽供应项目



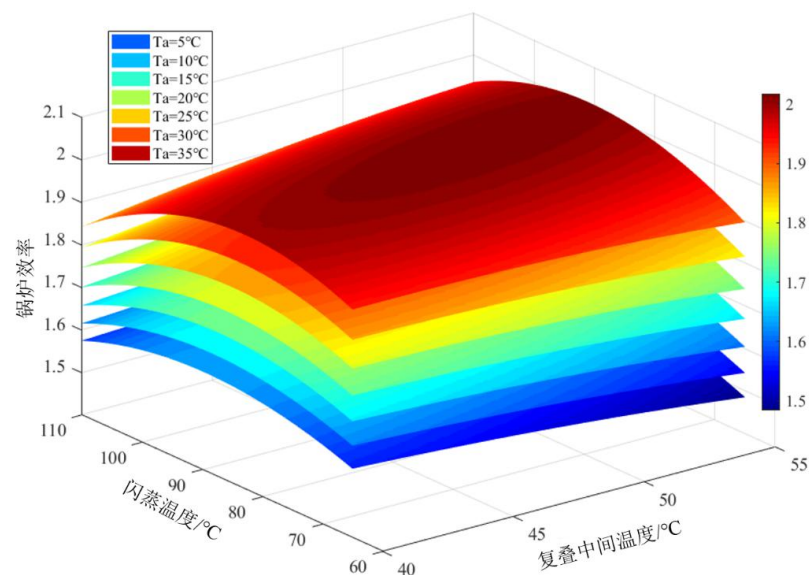
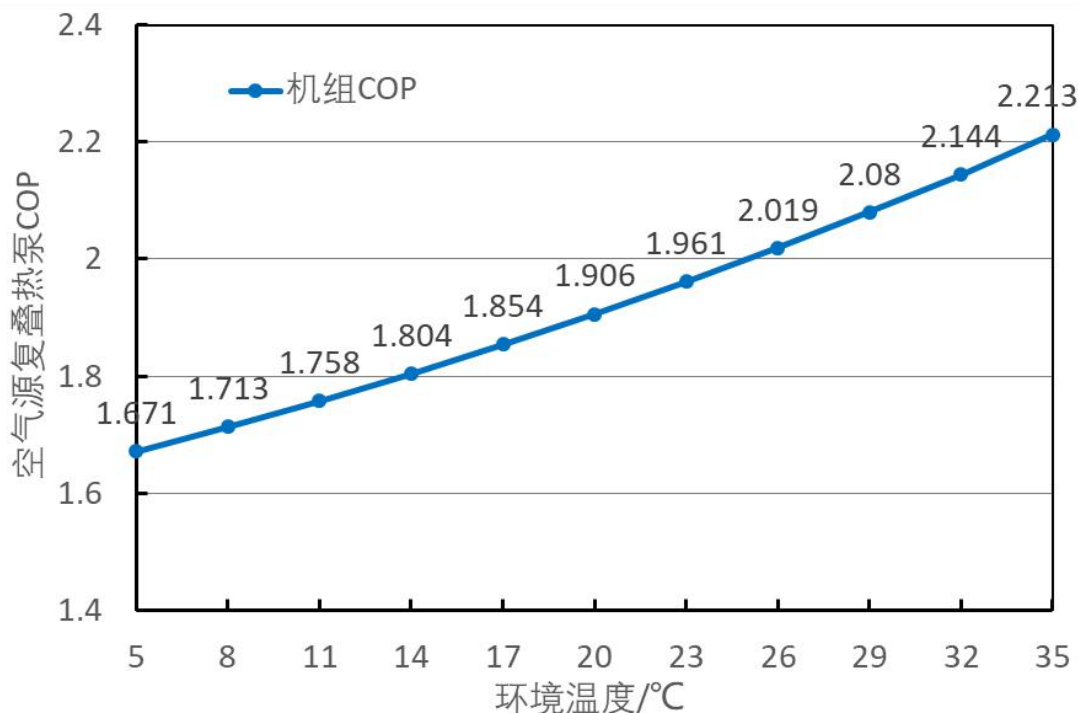
热泵蒸汽酿酒



蒸汽压缩系统

■ 复叠式空气源蒸汽热泵

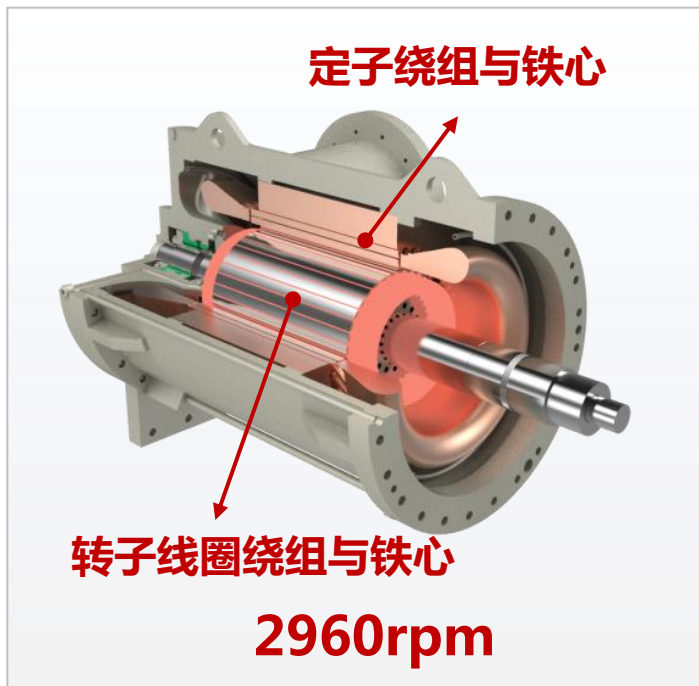
应用案例：山东济南力诺科技园蒸汽供应项目



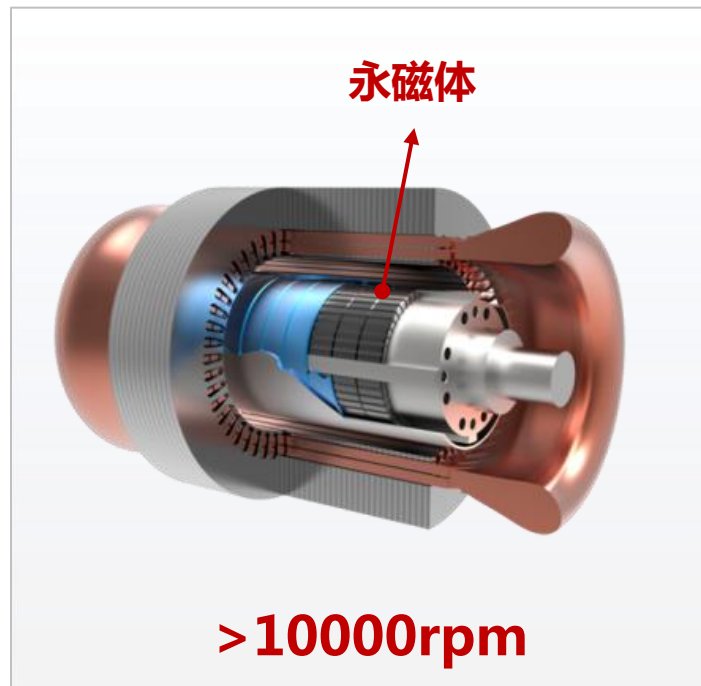
数据来源：Yan H. Z., Hu B., Wang R. Z., et al., Air-Source Heat Pump for Distributed Steam Generation: A New and Sustainable Solution to Replace Coal-Fired Boilers in China. *Advanced Sustainable Systems*, 2020. 4(11).

■ 永磁电机

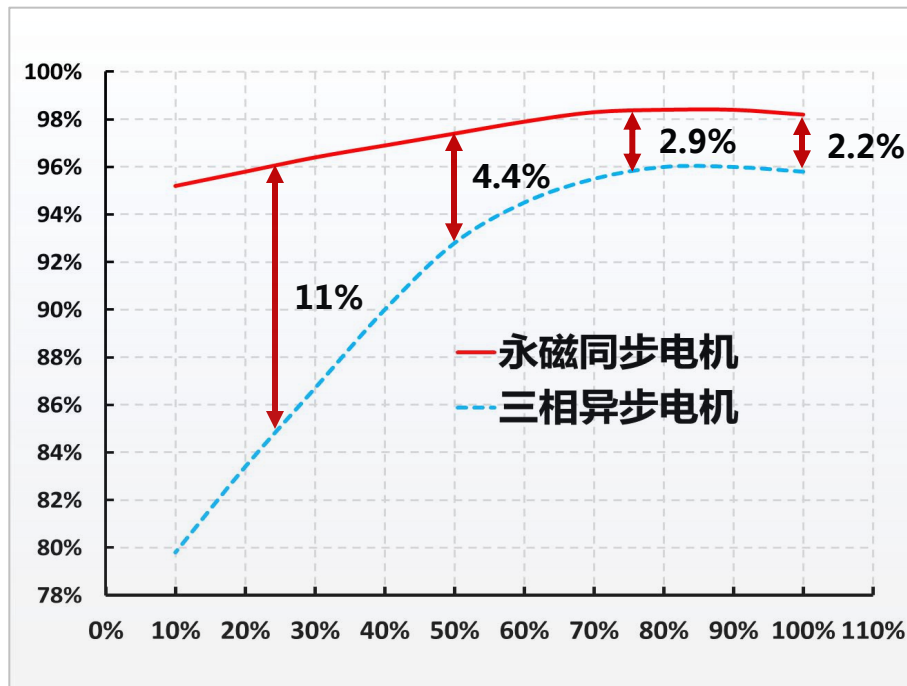
- 永磁同步电机、无励磁损耗，额定工况效率高达98%以上
- 永磁电机部分负荷运行效率衰减小，全工况效率达96%以上，相比异步电机效率提升显著
- 小型转子、涡旋压缩机已实现永磁化，大型离心、螺杆压缩机永磁化需加快应用



三相异步电机



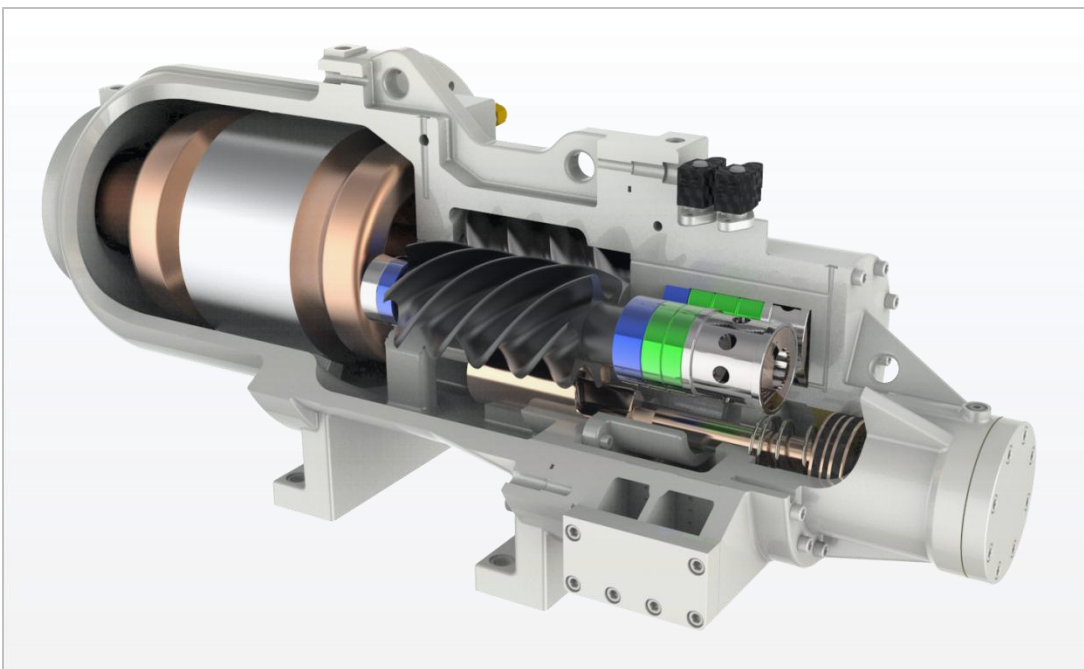
高速永磁同步电机



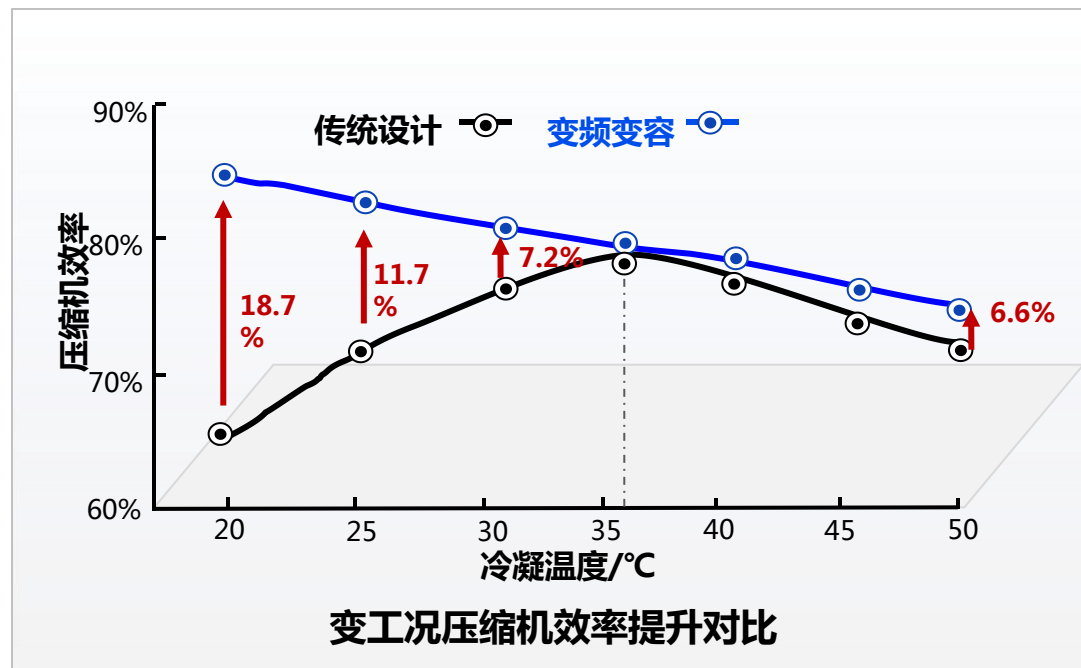
电机效率对比

■ 变频变容——螺杆压缩机

- 热泵工况极端压比大，随环境温度变化压比变化大，存在过/欠压缩问题
- 永磁变频变容螺杆压缩机转速调节流量，滑阀调节压比
- **能力与压比完全独立调节**，无过欠压缩，全工况效率提升15%以上



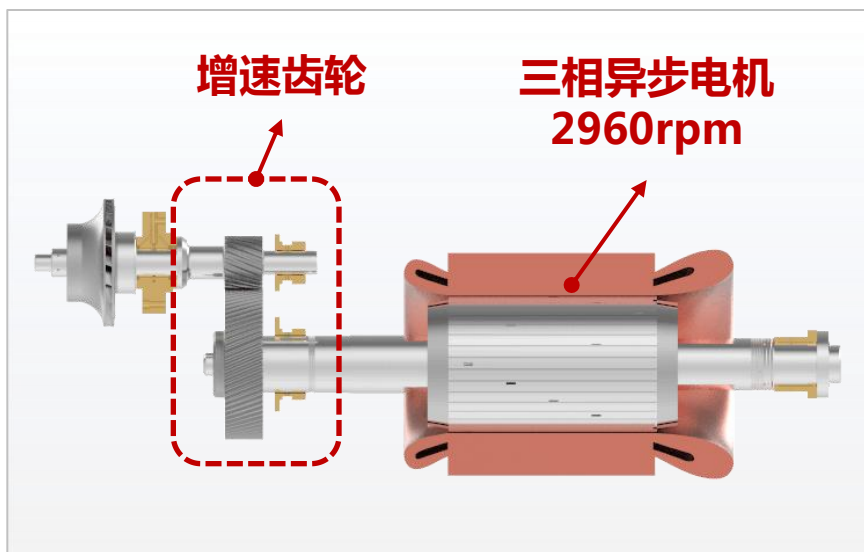
永磁变频变容螺杆压缩机



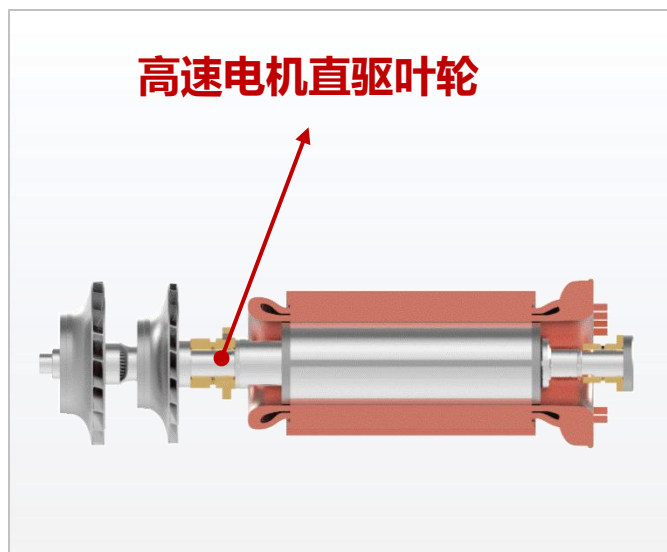
容量调节滑阀 vs 压比调节滑阀

■ 高速直驱结构——离心压缩机

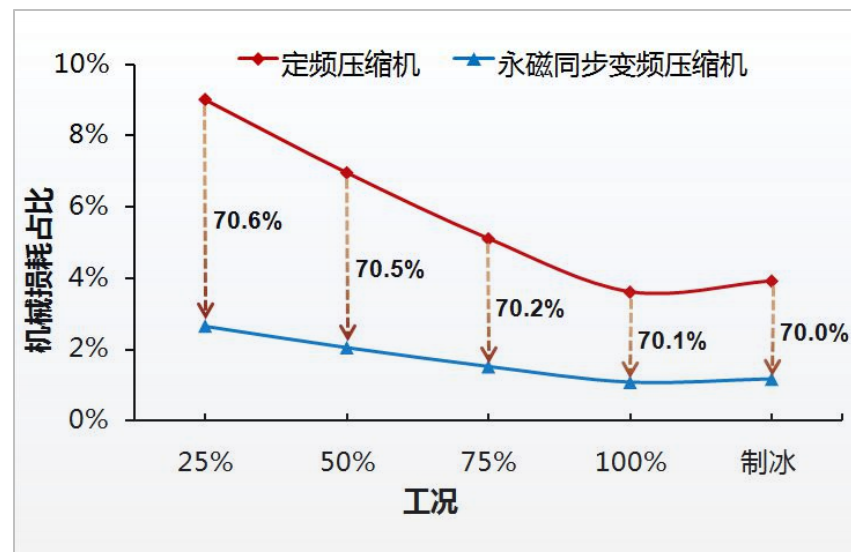
- 传统齿轮增速离心机体积大、噪声大、摩擦损耗大
- 采用高速电机直驱叶轮结构，减少齿轮传动机构，压缩机重量体积降低60%，压缩机噪声降低8dB (A)，机械损失降低70%



齿轮传动离心压缩机结构图



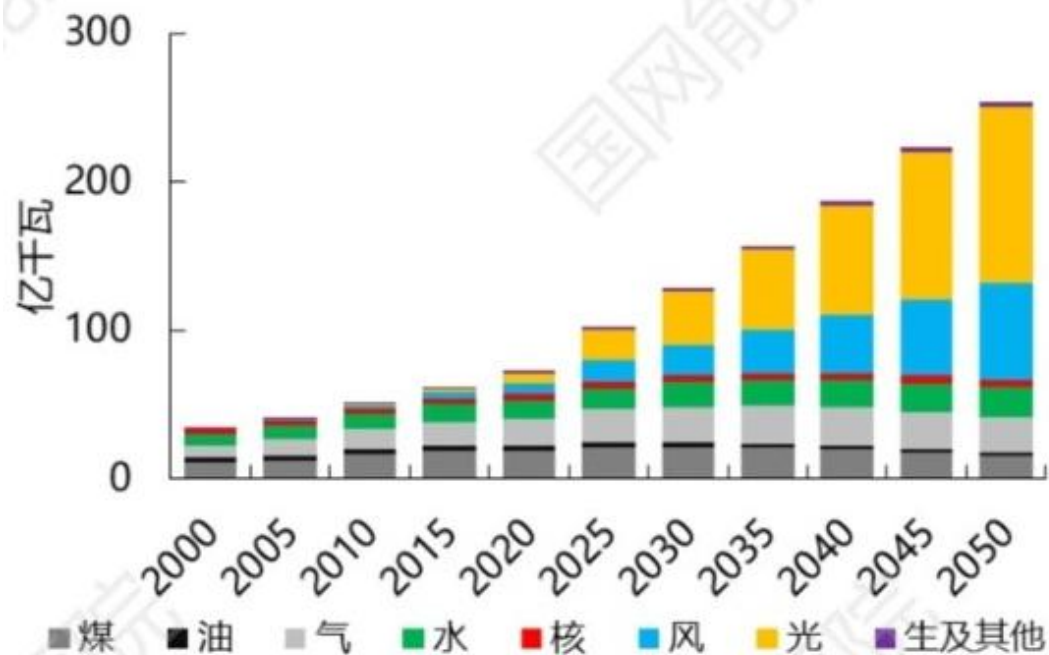
高速直驱离心压缩机结构图



机械损耗对比

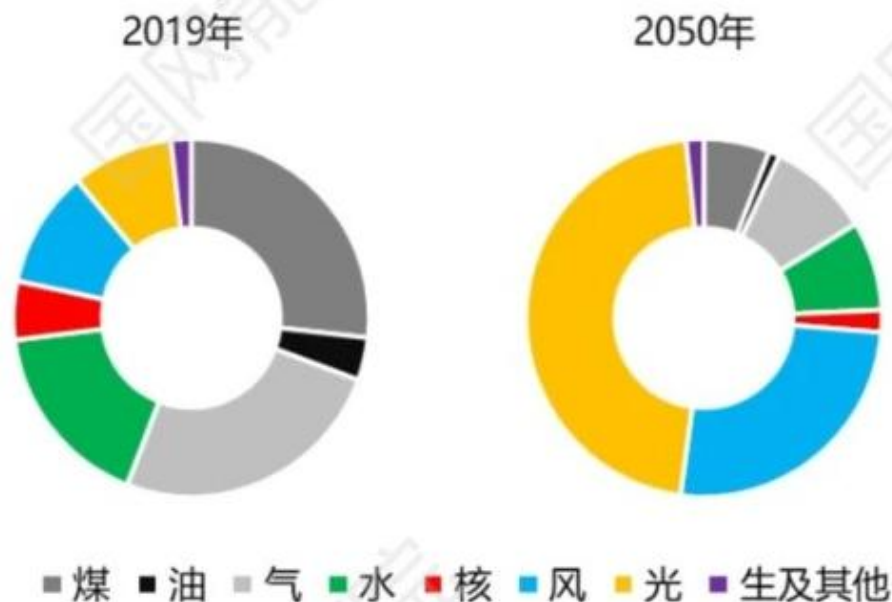
■ 未来能源发展方向

- 全球发电装机快速增长，2050年发电总装机约251亿千瓦
- 2050年光伏、风电、水电等可再生能源发电装机占比超过**80%**，规模达到200亿千瓦



2000-2050年全球发电装机分品种变化

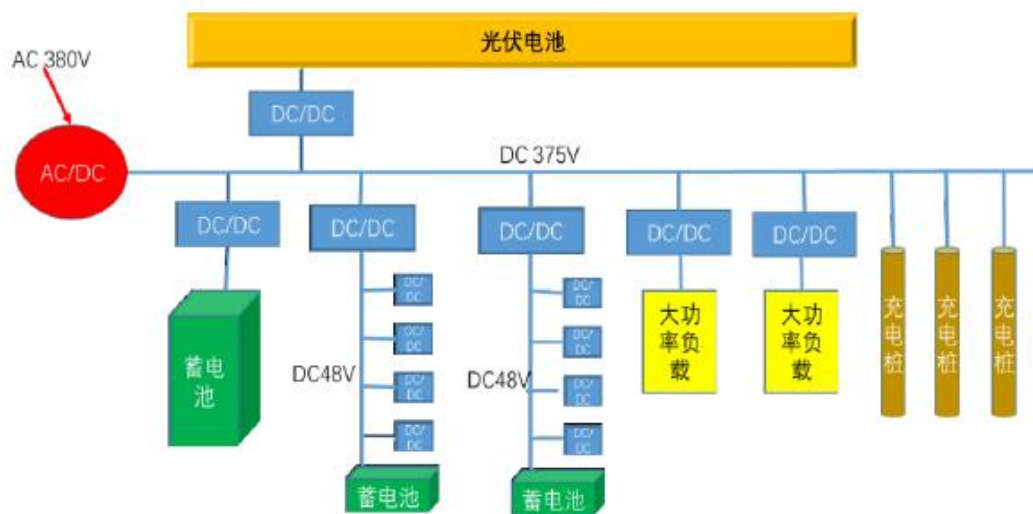
数据来源：全球能源分析与展望2020



2019、2050年全球发电装机分品种结构变化

■ 全电气化的光、储、直、柔建筑用能系统

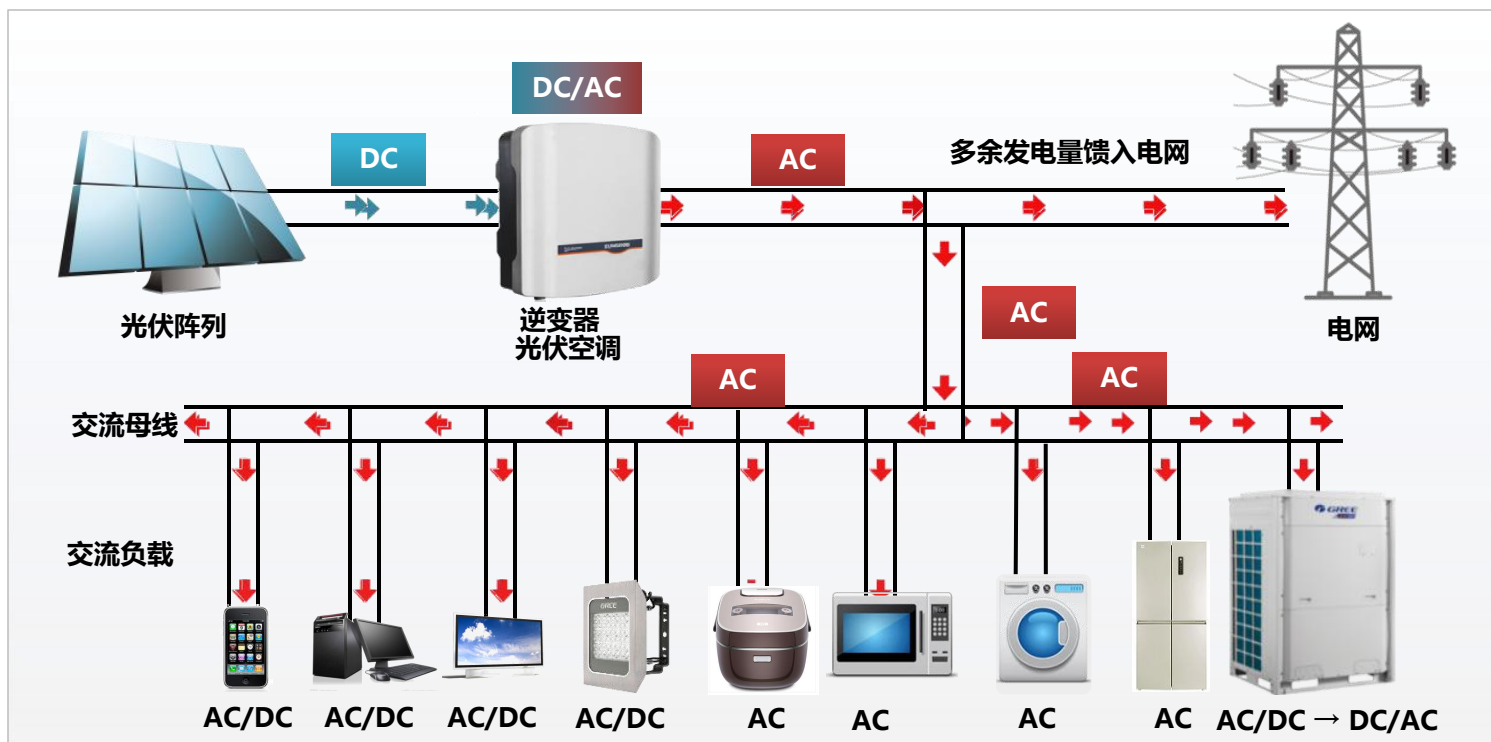
- **建筑用能全电气化**：建筑采暖，生活热水，医院消毒、洗衣等蒸汽需求，炊事等；
- **建筑用电设备全直流化**
- **分布蓄电常态化**：柔性用电方式，吸纳光伏发电和电网低谷电，与周边智能充电桩联动
- **建筑表面全光伏化**



大同能源革命馆

■ 基于**光伏直驱空调**的微网系统

- 光伏直驱空调代替原有的光伏逆变器，直接驱动空调，效率提升6%，省设备；
- 以光伏空调为能源调度中心，多于电量可供其它设备使用、储存或上网，无缝对接



基于光伏直驱空调的微网系统



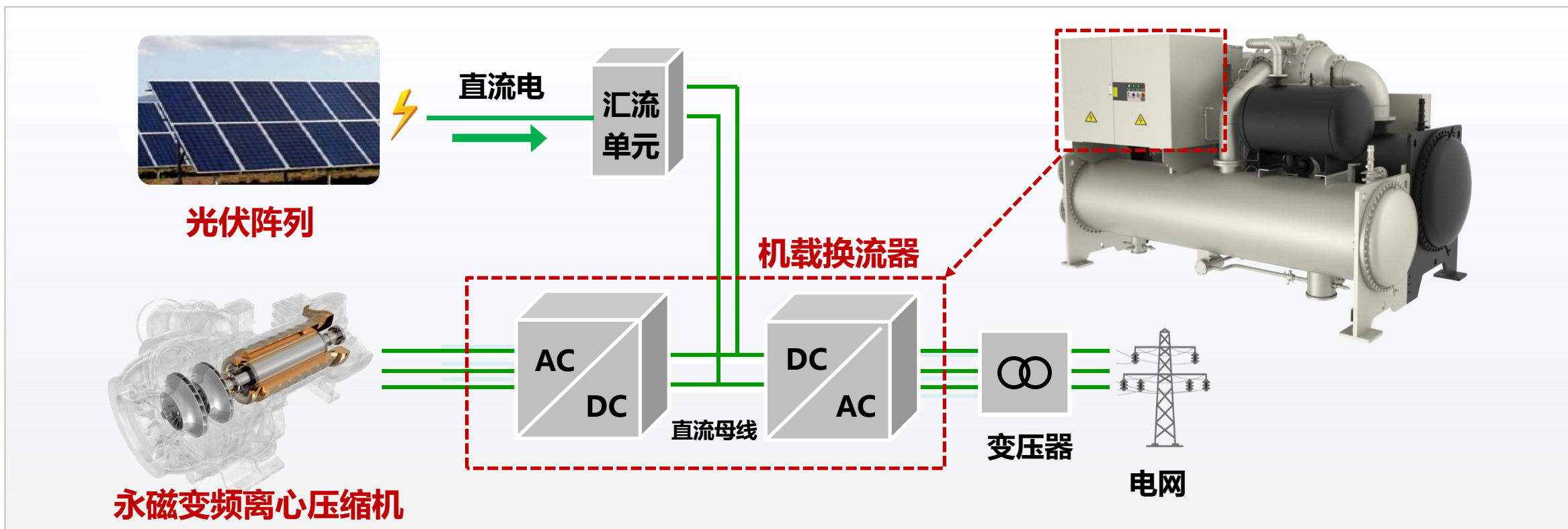
基于光伏空调的直流建筑

多能应用：降低一次能源使用量

■ “零能耗建筑”：光伏直驱变频离心机

格力首创

- 利用太阳能，助力绿色建筑
- **全球首创**光伏直驱变频离心机，光伏直流电直接驱动离心压缩机



多能应用：降低一次能源使用量

■ “零能耗建筑”：光伏直驱变频离心机

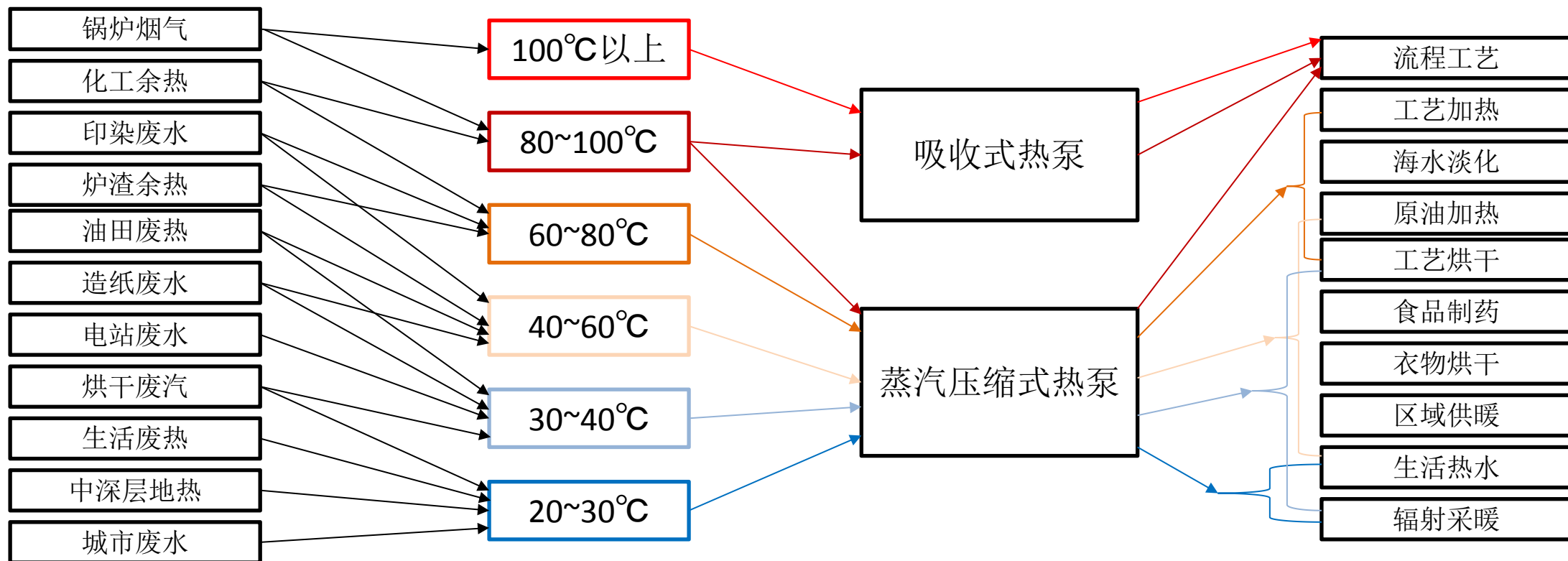
格力首创

- **省设备**：省去光伏逆变器设备，设备及工程总体投入**降低10%**
- **效率高**：无传统光伏发电3次电能转换，能量损耗减少**6%~8%**



■ 工业余热、废热利用

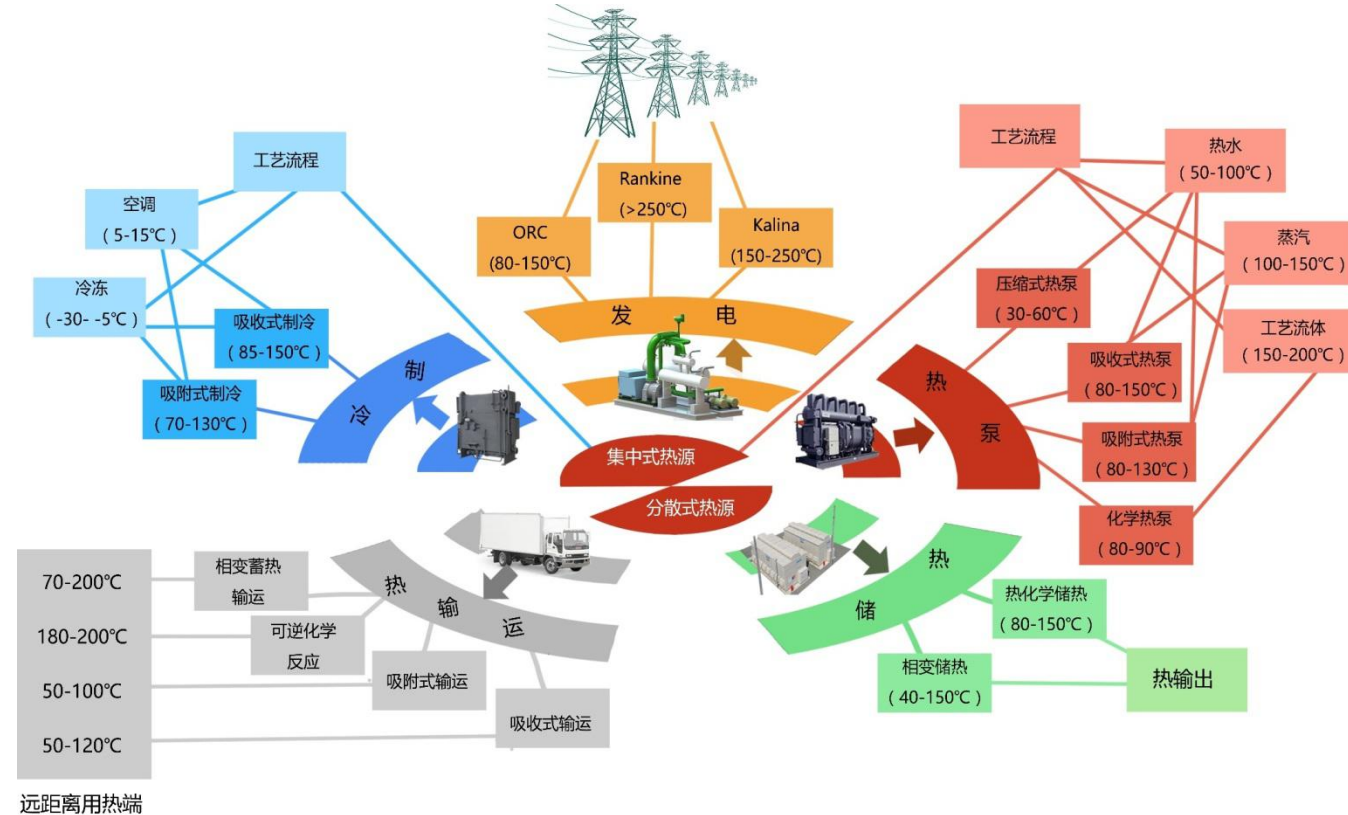
➢ 冬季供暖期内北方集中供暖地区的低品位工业余热量约有40亿GJ，若仅回收20%，可为至少40亿m²建筑提供基础负荷的热量，占未来北方供暖地区建筑的1/5



工业余热梯级利用与实现方法

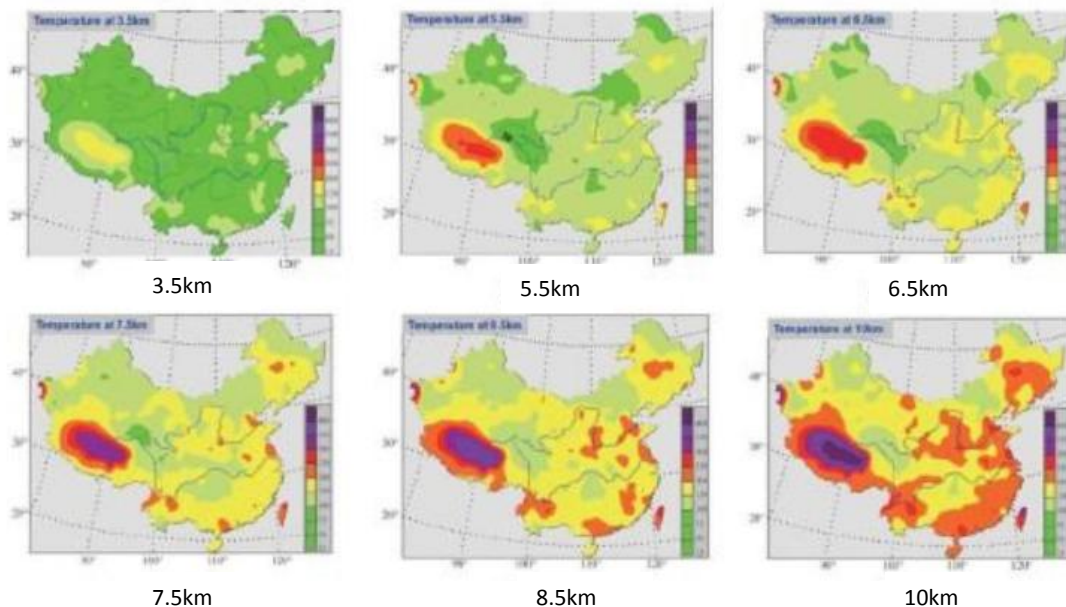
■ 工业余热的网络化利用（十三五重点研发项目）

➢ 针对工业余能，研究效率高、容量大、可靠性与热适应性好的热泵、制冷、发电及能量储运技术，并通过**余能网络化**利用对系统进行高质化集成，最终实现工业余能的高效利用

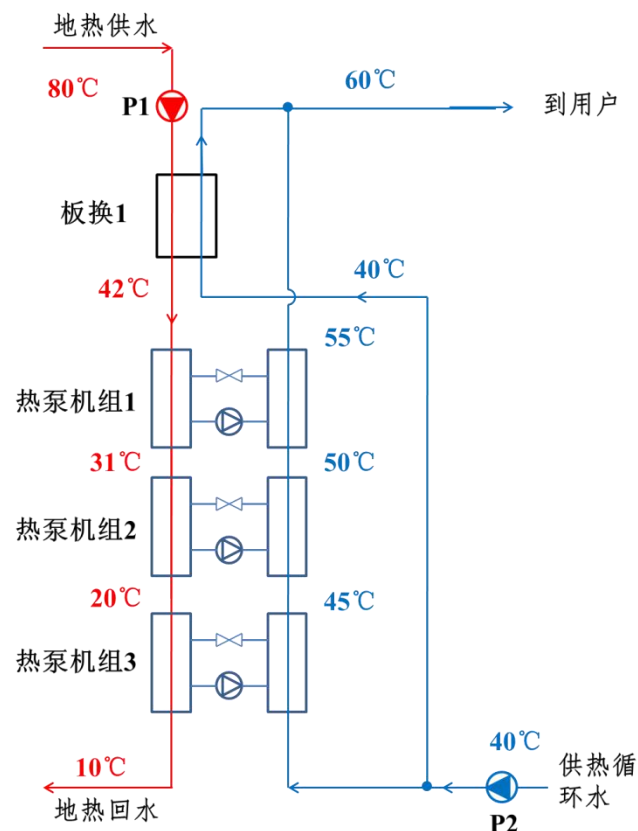


■ 中深层地热利用

- **水温高**：地下1.5~3km处，水温达80°C以上，可与压缩热泵形成梯级利用；
- **单孔取热量大**：单孔取热量配合500~600kW热泵机组，可承担1.2万m²以上居住建筑供暖需求，节省大量占地面积；

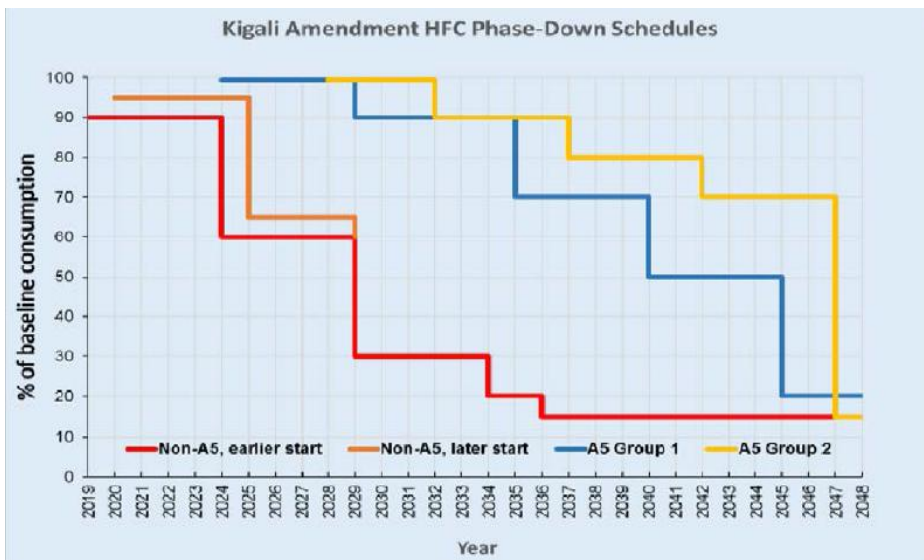


我国地热资源分布情况



■ 非CO₂温室气体减排目标

- 《京都议定书》规定了五种非CO₂温室气体，即甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟碳化物（PFCs）及六氟化硫（SF₆）
- 《基加利修正案》对制冷系统含氟气体减排起至关重要的积极作用



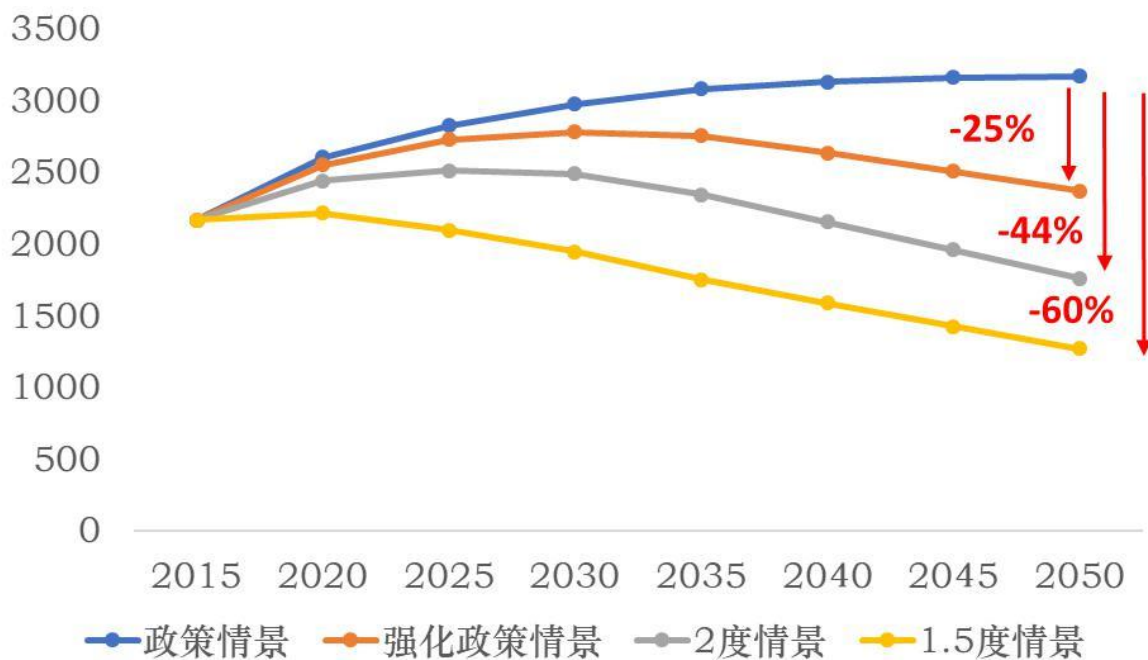
	N-A5 Parties: Group 1		N-A5 Parties: Group 2	
Baseline Years	2011, 2012 & 2013		2011, 2012 & 2013	
Baseline Calculation	Average consumption of HFCs in 2011, 2012, and 2013 Plus 15% of 1989 HCFC baseline consumption		Average consumption of HFCs in 2011, 2012, and 2013 Plus 25% of 1989 HCFC baseline consumption	
Reduction steps				
Step 1	2019	10%	2019	5%
Step 2	2024	40%	2024	35%
Step 3	2029	70%	2029	70%
Step 4	2034	80%	2034	80%
Step 5	2036	85%	2036	85%

	Article 5 Parties Group 1		Article 5 Parties Group 2	
Baseline Years	2020, 2021 & 2022		2024, 2025 & 2026	
Baseline Calculation	Average production/consumption of HFCs in 2020, 2021, and 2022 plus 65% of HCFC baseline production/consumption		Average production/consumption of HFCs in 2024, 2025, and 2026 plus 65% of HCFC baseline production/consumption	
Freeze	2024		2028	
Reduction steps				
Step 1	2029	10%	2032	10%
Step 2	2035	30%	2037	20%
Step 3	2040	50%	2042	30%
Step 4	2045	80%	2047	85%

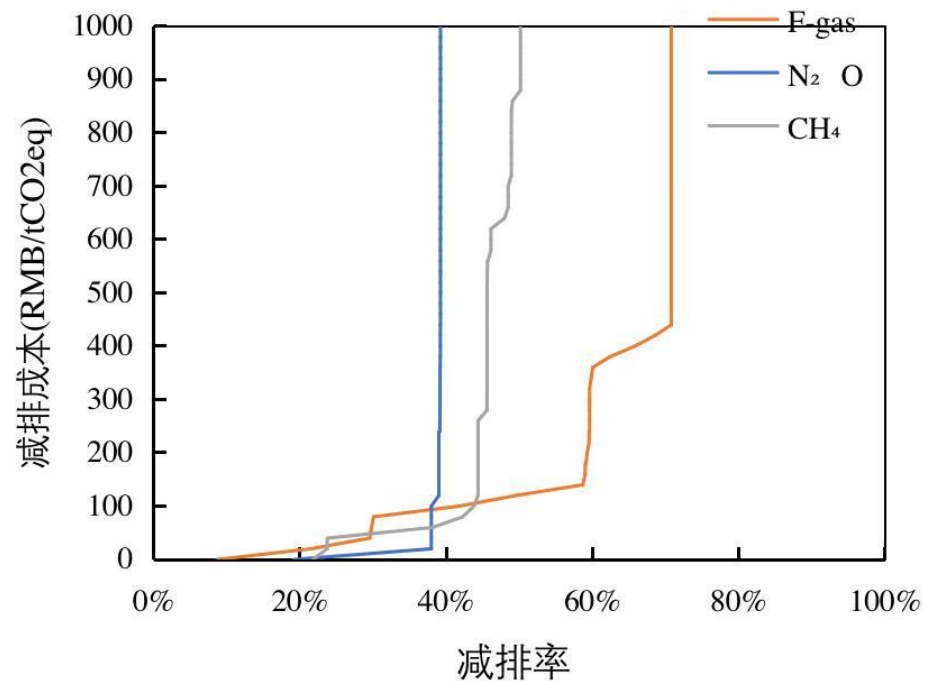
基加利修正案对于发达国家及发展中国家氢氟碳化物HFCs削减的规定

■ 清华大学气候变化与可持续发展研究院：

- 到2050年，非CO₂温室气体排放可能仍超过10亿t CO₂e
- F-gas减排率达到65%后，减排成本急剧增加，带来巨大挑战



非二氧化碳减排边际成本曲线（2050）

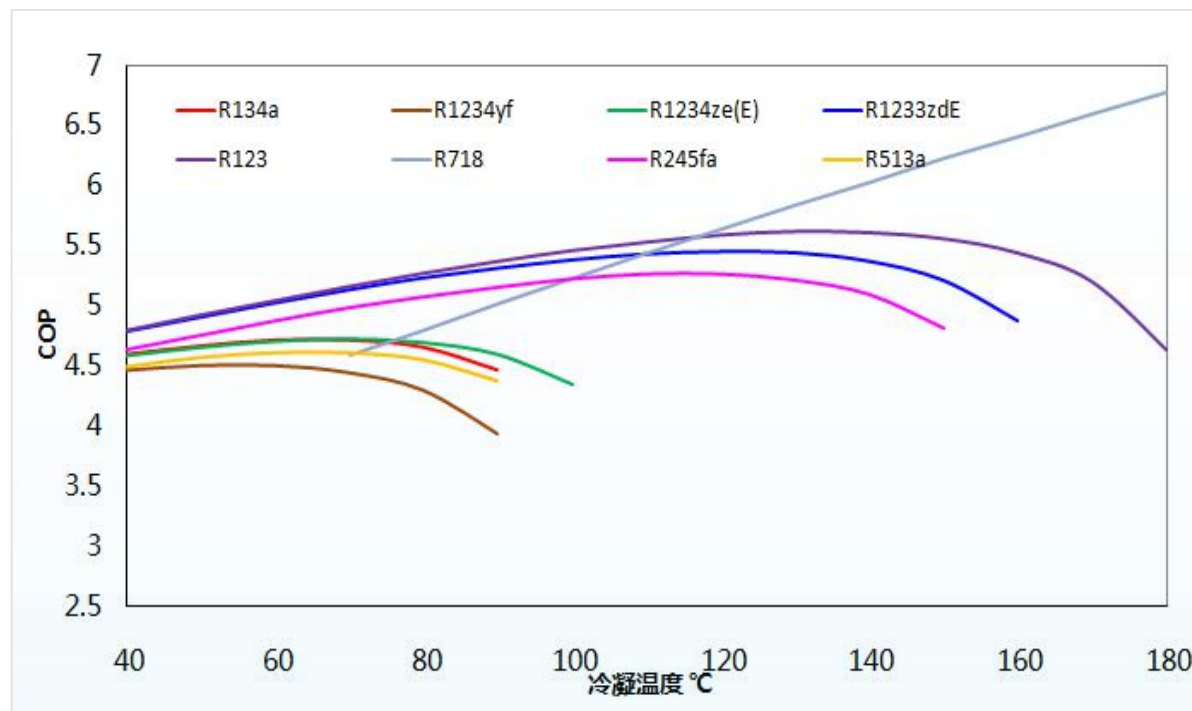


■ 主要空调设备冷媒替代路径

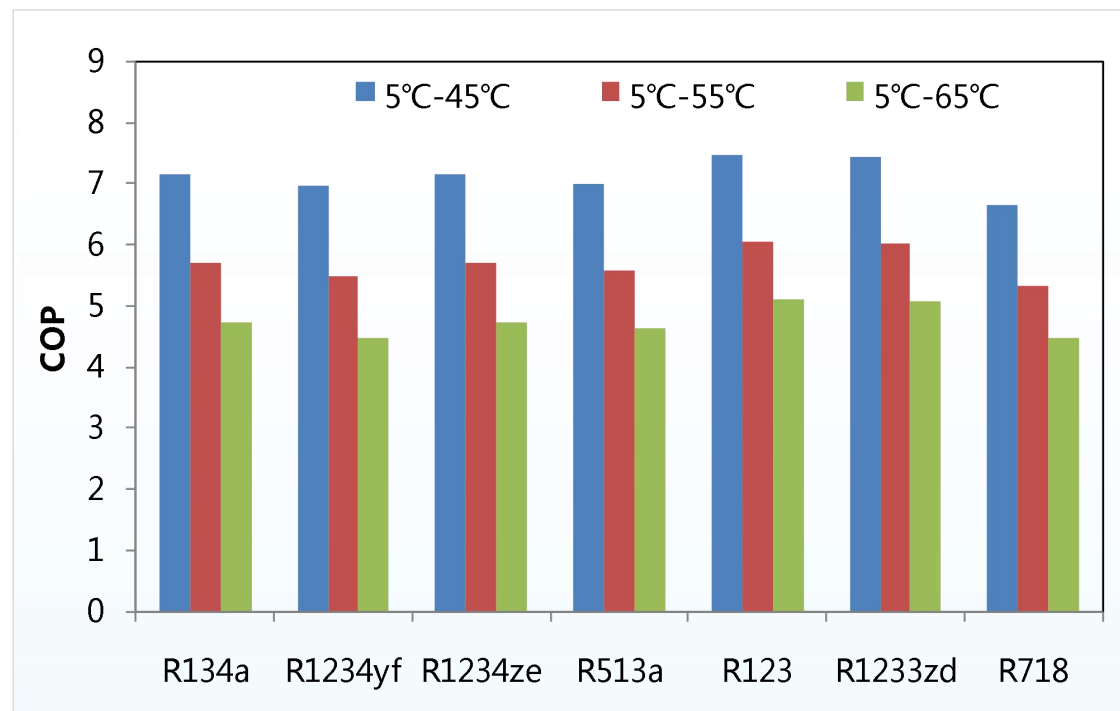
机组	被替代物	近期成熟替代物	潜在和长期替代物
家用空调器 单元式空调机 多联式空调机组	HCFC22 (GWP=1810)	R410A (GWP=2100)	HFC32 (GWP=675) ; HC290 (GWP<1)
工商用冷水 (热泵) 机组	HCFC22 HCFC123 (GWP=79)	涡旋和螺杆式: R410A和HFC 134a 离心式: HFC134a (GWP=1360)	HFC32, HFO1234yf (GWP<1) 、 HFO1234ze(E) (GWP<1) 、 HCFO1233zd(E) (GWP=1)
汽车空调	CFC12 (GWP=10300)	HFC134a	CO ₂ (GWP=1)

■ 主要空调设备冷媒替代路径

- 在制热工况，R134a的替代制冷剂与其性能相仿；
- **R123及其替代制冷剂R1233zd(E)**在高温下性能优势明显，特别适用于热泵工况。



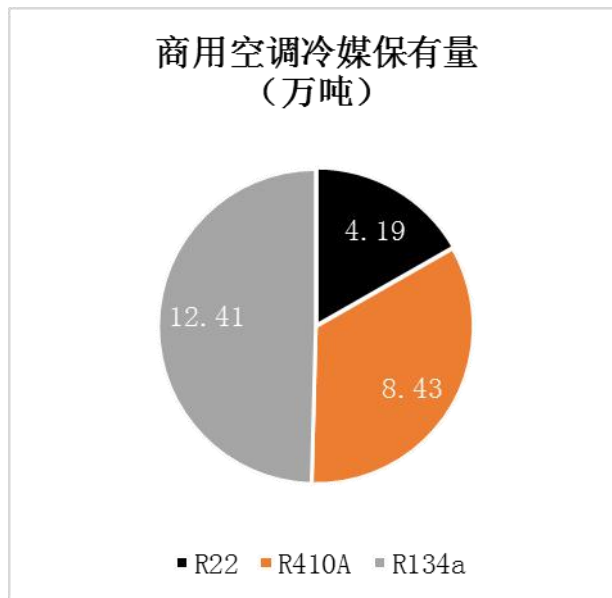
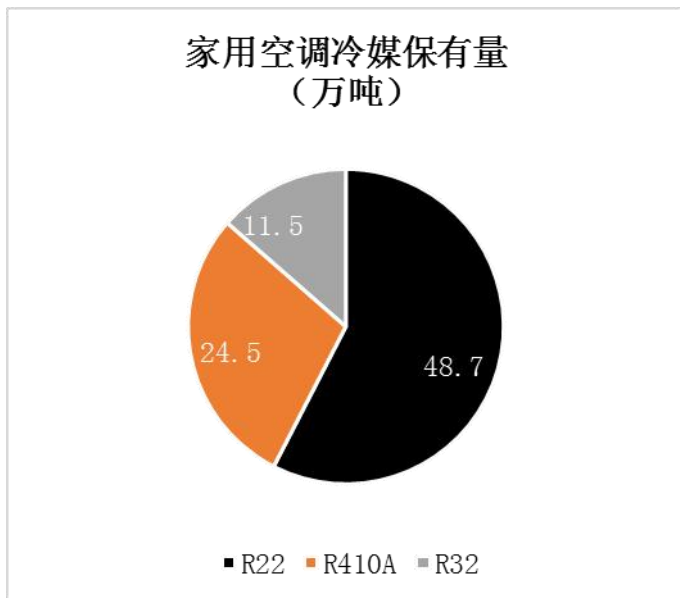
60°C温升下现有及其替代制冷剂制热工况性能对比



现有及其替代制冷剂制热工况性能对比

■ 存量制冷设备冷媒减排

- 存量冷媒总CO₂当量达**20.9亿吨**，其回收、无害化处理是减少二氧化碳排放的有效措施
- 由于数量多、安装分散，在安装、使用、维修、移机等过程中易产生泄漏，回收较困难



领域	现有冷媒存量
家用空调	保有量6.93亿台，冷媒保有量84.7万吨，CO ₂ 当量 14.7亿吨
商用空调	冷媒保有量25.03万吨，CO ₂ 当量 4.3亿吨
汽车空调	保有量2.7亿辆，基本采用R134a，冷媒保有量13.5万吨，CO ₂ 当量 1.93亿吨

■ 存量制冷设备冷媒减排

- **出台对应的法律法规、政策**：加大对制冷产品回收处理的监管，规范废旧制冷产品和制冷剂的回收、拆解和再利用；
- **建设更多具有资质的资源回收再生公司**：进行统一归集、处理，解决空调安装分散，制冷剂回收不规范等难题；
- **研发智能化冷媒回收设备，实现制冷剂无害化处理或再利用**。实现冷媒种类自动识别、压力自动检测、冷媒回收效率 $\geq 99\%$ ，解决空调分散，冷媒回收难，技术要求高等问题

- 碳中和是我国未来发展的基本政策，各行业都面临挑战与机遇，科技创新为第一生产力；
- 制冷空调行业低碳路径主要有四个方向：
 - **拓展压缩式热泵的应用**，减少燃料锅炉污染；
 - **提升核心部件效率**，研究永磁电机、直驱技术、高效传热技术等高效技术，提升空调运行效率，降低空调运行能耗；
 - **通过多能利用，降低一次能源使用量**。推广基于光伏直驱空调的微网系统；充分利用工业余热、地热、空气能等，减碳潜力巨大；
 - **推进环保冷媒替代，落实制冷产品冷媒回收**，降低非CO₂温室气体排放。

敬请指导!