

文章编号:0253-4339(2020)06-0001-11

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.06.001

基于超声速制冷效应旋流分离技术的研究进展

曾钰培^{1,2} 罗二仓^{1,2}

(1 中国科学院低温工程重点实验室 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 基于超声速制冷效应的旋流分离技术是一种从天然气中脱水、脱重烃及其他杂质的新方法。本文介绍了超声速旋流分离器典型结构和 Laval 喷管设计的研究进展,总结了单组分和双组分气体凝结相变理论,重点归纳了进出口参数和喷管结构参数对超声速流动凝结特性的影响,梳理了该技术在天然气液化和脱除酸性气体等领域的新应用,最后对超声速旋流分离技术的未来提出展望。

关键词 超声速制冷效应;旋流分离器;Laval 喷管;凝结特性;天然气

中图分类号:TE64;TB61⁺³

文献标识码:A

Research Progress in Swirl Separation Technology Based on Supersonic Refrigeration Effect

Zeng Yupei^{1,2} Luo Ercang^{1,2}

(1.Key Laboratory of Cryogenics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049,China)

Abstract Swirl separation technology based on the supersonic refrigeration effect is a new method to remove water, heavy hydrocarbons, and other impurities from natural gas. In this article, first, the typical structure of a supersonic swirl separator and Laval nozzle design are reviewed; thereafter, the condensation phase transition theories of one-component and two-component gases are summarized. Subsequently, the effects of inlet and outlet parameters and nozzle structure parameters on the condensation characteristics of supersonic flow are summarized; finally, new applications in the fields of natural gas liquefaction and acid gas removal are reviewed. Although many domestic and international scholars have conducted considerable research, some problems still remain, and future prospects for supersonic swirl separation technology have been proposed.

Keywords supersonic refrigeration effect; swirl separator; Laval nozzle; condensation characteristics; natural gas

天然气作为一种环境友好型清洁能源,已成为世界能源结构中的重要组成部分,在能源供应中发挥着重要的作用^[1-2]。我国天然气资源丰富,国土资源部公布的 2015 中国矿产资源报告显示,我国天然气剩余技术可采储量约为 4.545 18 万亿立方米^[3],具有很大的开发价值。天然气作为一种战略资源,必将受到越来越多的关注。

从气井中开采出的天然气是一种含有多种杂质的混合物,通常含有水、重烃、酸性气体(二氧化碳、硫化氢等)和其他杂质。这些气固杂质的存在会降低天然气的热值,导致其品质下降;各种杂质在天然气储存运输过程中会带来额外的能量消耗,给天然气的储运造成不小的压力;如果天然气中的酸性气体与

水发生作用,会造成工艺设备的腐蚀和运输管线的堵塞,具有较大的安全隐患。因此,必须对开采出的天然气进行加工处理,以满足安全储运和销售的要求。分离和净化是天然气加工工艺的关键技术,目前常用的方法有吸收法^[4]、吸附法^[5]和膜分离法^[6]。

基于超声速制冷效应的旋流分离器(以下简称为超声速旋流分离器)由旋流器、Laval 喷管、旋流分离段、扩压器等部分组成,天然气混合物在 Laval 喷管中绝热膨胀产生低温效应,水和重烃等杂质凝结液化,在旋流器巨大的离心力作用下发生气液分离,从而达到脱水除烃、净化天然气的效果。基于超声速制冷效应的旋流分离技术(以下简称为超声速旋流分离技术)具有结构紧凑、安全可靠、无需化学添加剂、

支持无人值守等优点,在天然气加工处理领域具有广阔的发展前景。

1 超声速旋流分离器典型结构研究进展

1989 年,超声速旋流分离技术就开始应用于空调系统空气中水分的分离过程。在超声速旋流分离技术的发展历程中,荷兰 Shell 公司和俄罗斯 ENGO 公司起到了重要作用,它们基于超声速旋流分离技术的优势,将其成功应用于天然气加工处理领域,实现天然气脱水、脱重烃等。根据不同的工作原理,超声速旋流分离器主要分为旋流器后置型和旋流器前置型两种典型结构。

荷兰 Shell 公司旗下的 Twister BV 公司所开发的“Twister I”^[7-9]是典型的旋流器后置型超声速旋流分离器(见图 1)。Shell 公司先后开展了“Twister I”的室内脱水性能实验和现场脱水性能试验^[9-11],研究发现:“Twister I”露点降可达 22~28 °C,脱水性能良好。国内学者也就旋流器后置型超声速旋流分离器开展了相关研究。刘恒伟等^[12-15]设计了国内第一台旋流器后置型超声速旋流分离器,并进行实验测试,结果显示:露点降可达 37 °C,具有良好的脱水性能,实现了回收部分轻烃的效果;曹学文等^[16]对喷管型面进行优化设计,开发了一种新型的旋流器后置型超声速旋流分离器,并将其应用到中原油田白庙气田现场试验中,结果显示:出口干气水露点为-7 °C,满足管线运输要求。

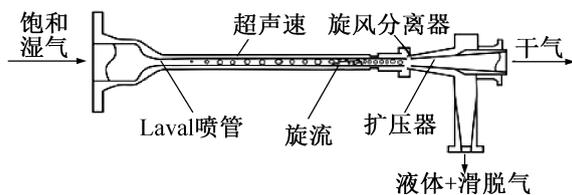


图 1 “Twister I”分离器结构

Fig.1 Structure of the “Twister I” separator

Twister BV 公司在“Twister I”的基础上又开发了带有中心体的“Twister II”^[17],这是典型的旋流器前置型超声速旋流分离器(见图 2)。ENGO 公司、Twister BV 公司^[9,18]开展了大量的试验,取得了良好的商业效果。国内许多学者也在此基础上进行了相关的研究工作。邱中华等^[19-23]提出了一种带有锥芯的旋流器前置型超声速旋流分离器并进行了室内实验,结果表明:重组分脱除率最大可达 52.1%,露点降达到 29 K,具有良好的脱水性能和重烃分离效果;文闯等^[24-27]设计了一种带有椭球形中心体的旋流器前置型超声速旋流分离器,室内实验结果表明:最大

露点降可达 34.9 K,脱水效果显著。

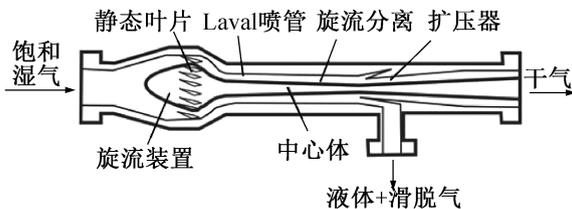


图 2 “Twister II”分离器结构

Fig.2 Structure of the “Twister II” separator

这两种类型的分离器的基本区别在于亚声速或超声速状态下具有不同的流型^[24]。在“Twister I”的 Laval 喷管中,流动均匀不会产生明显的激波,但当气体经过旋流器时,在超声速条件下发生了轴向速度与切向速度的转换,因此在旋流段会产生明显的斜激波且难以控制。目前的研究表明,当激波受到有效地控制时,装置具有优良的旋流分离性能,但压力回收能力会受到限制,能量损耗将会增大;对于“Twister II”分离器而言,在亚声速条件下发生轴向速度与切向速度的转换,因此不会产生斜激波,降低了分离器内的能量损耗,在 Laval 喷管的扩张段中气体以旋涡状态发展到超声速,旋流过程与冷凝过程同时进行,有效地减少了雾滴再蒸发,进而提高了分离效果。

2 Laval 喷管设计研究进展

Laval 喷管是超声速旋流分离装置的核心部件,由稳定段、收缩段、喉部及扩张段等组成。与膨胀机、涡流管和 J-T 阀等其他节流装置相比,Laval 喷管具有更好的制冷性能(见图 3)。气体通过 Laval 喷管绝热膨胀并在扩张段加速至超声速,温度和压力降低,形成低温低压环境,使天然气中的水分和重烃等凝结为液滴,经旋流器离心作用实现气液分离。超声速旋流分离器内凝结和分离特性受 Laval 喷管结构设计的影响很大,Laval 喷管性能主要取决于收缩段和扩

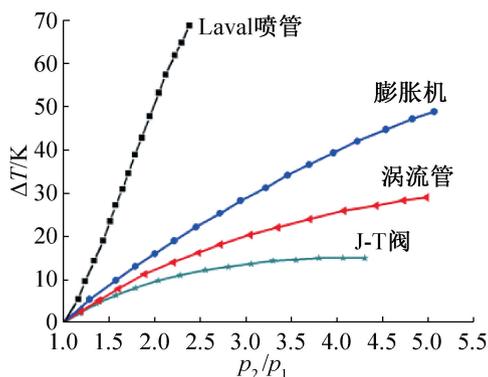


图 3 不同节流装置的制冷性能

Fig.3 Cooling performances of different throttle devices

张段设计^[28-29]。

收缩段把气流加速到声速,使天然气完成膨胀压缩过程,同时要保持气流良好的稳定性,不发生扰动。收缩段过渡曲线形状的设计有多种方法,常用的方法(见表 1)有:维托辛斯基曲线法、Batchelor-Shaw 法、双三次曲线法、五次曲线法、面积比法等。维托辛斯基曲线法可以获得稳定的气流分布和良好的制冷性能,因此应用较多^[30-31]。

表 1 收缩段常用设计方法^[33]

Tab.1 Common design methods of convergent tabulation^[33]

设计方法	特点
维托辛斯基曲线	流场过渡自然,涡流变小,可以在收缩段获得均匀的气流
Batchelor-Shaw	进口附近收缩更快,出口附近较平缓
双三次曲线	曲线变化均匀,流场气流加速均匀,而且进口端速度均匀平滑
五次曲线	流场气流加速均匀,出口收缩较大,气流均匀性差
面积比	该方法由气体动力学推到,假定截面流动参数均匀

扩张段使天然气的压力升高、温度降低,是一个制冷过程,在该段进一步将气流加速至超声速,相态发生改变。渐扩段过渡曲线形状的设计有多种方法(见表 2),包括:特征线法、富尔士法(Foelsch)、劳法(Lao)、面积比法、等斜率法等。由于等斜率法设计简单,且实际效果较好,因此应用较多^[32]。

表 2 扩张段常用设计方法^[33]

Tab.2 Common design methods of diverging tabulation^[33]

设计方法	特点
特征线法	多用于定常二维、平面和轴对称的无旋超音速流动问题
富尔士法(Foelsch)	喷管壁外型曲线有解析式 可计算,设计时工作量小
劳法(Lao)	利用变分法,其结果与特征线法结果相差不大
面积比法	基于气体动力学推导,理论严密
等斜率法	计算简单,实际效果较好

3 气体凝结相变研究进展

气体凝结成核是研究天然气高速膨胀凝结相变特性的重要理论基础。近一百年来,国内外许多学者就成核过程和液滴生长过程进行了理论和实验研究,得到了许多相关的理论和半经验模型,气体凝结相变

理论在科学进程中不断完善。

3.1 相变概述

相是物质存在的状态,相变是体系中从一相到另一相的变化过程。根据 J. W. Christian^[34] 提出的相变分类理论,按照相变过程中的成核特点可将相变分成均匀相变和非均匀相变。均匀相变是指在整个体系中都均匀的发生相变;非均匀相变指体系中只有处于某些特定位置的物质才发生相变。

天然气流经超声速分离器是典型的非平衡相变、凝结气体的超声速流动和传质过程。根据均质自发凝结理论,天然气在 Laval 喷管中高速膨胀后,部分气体处于过饱和状态,形成凝结核,液滴在凝结核表面生长。超声速条件下均质自发凝结过程可分为成核阶段和液滴生长阶段^[35]。

成核阶段:当蒸气分子达到饱和状态时,由于自由能障(体积自由能和表面自由能的总和)的限制,不是立即凝结,而是根据过热蒸气的性质继续膨胀。当过饱和度达到一定值时,蒸气分子会打破自由能障,蒸气开始转变为一定数量具有一定尺寸的凝结核,相应的半径称为临界半径。

液滴生长阶段:在实际的液滴生长过程中,当凝结核形成后,周围存在大量的分子。蒸气分子继续在凝结核表面凝结,液滴不断增大。蒸气分子向周围的气体释放潜热,这是一个典型的传热传质过程。

3.2 单组分气体凝结理论

经典成核理论(classical nucleation theory, CNT):20 世纪 20 年代,H. Flood^[36] 基于凝结核分布遵循玻尔兹曼分布的假设,提出初始单组分气体成核理论。在随后的研究中,相关学者对模型进行了改进和发展,最终得到经典成核理论^[37]。CNT 在推导过程中做了大量的假设,许多学者进行了不断的修正与完善。

内部一致经典成核理论(internally consistent classical theory, ICCT):为了解决自由能公式中存在的非一致性问题,基于 Katz-Wiedersich^[38] 动力学成核理论,S. L. Girshick 等^[39] 重新修正了自由能计算公式,推导了内部一致经典成核理论。M. M. Rudek 等^[40]、M. E. H. Van Dongen 课题组^[41-43]、G. Laman-na^[44]、程万^[45] 对 ICCT 进行了验证和修正。经过几十年的发展,CNT 和 ICCT 不断被完善和修正,但目前仍然没有一种理论能够完全适用于所有情况。

半现象学理论(semi-phenomenological theory, ST):半现象学模型是以统计力学为基础对微团分布进行描述的模型,其具有合理的参数,通过这些参数能计算出可测量的蒸气性质,如饱和蒸气压以及微团

的临界性质等。A. Dillmann 等^[46-47]提出了最早的半现象学模型,并且很好地预测了成核率,I. J. Ford 等^[48]、V. I. Kalikmanov 等^[49-50]、M. M. Rudek 等^[40]对半现象学模型进行了不断的验证和完善。

场均动力学成核理论(mean-field kinetic nucleation theory, MKNT):V. I. Kalikmanov^[51]将成核动力学方法与修正的 Fisher 热力学模型加以综合考虑,在半现象学理论的基础上,提出了场均动力学成核理论,并通过实验对比发现,MKNT 的理论与实验结果相符。S. Sinha 等^[52]也开展相关实验,验证了 MKNT 的正确性。

3.3 双组分气体凝结理论

在单组分气体凝结理论的研究基础上,许多学者也开创和发展了双组分气体凝结理论,但总体而言,关于双组分气体凝结理论的研究还相对较少,主要包括:双组分经典成核理论和类单组分半现象学理论。

双组分经典成核理论(binary classical nucleation theory, BCNT):H. Flood^[36]与 M. Volmer^[53]分别于 1934 年和 1939 年基于等分子波动理论提出了最初的双组分经典成核理论;在此研究基础上,H. Reiss^[54]将单组分经典成核理论扩展到双组分体系中,建立了双组分经典成核理论。在随后的研究中,D. Stauffer^[55]、G. J. Doyle^[56]、G. Wilemski^[57-59]、K. N. H. Looijmans 等^[60]就 BCNT 进行了不断的修正和完善。

类单组分半现象学理论:1995 年 V. I. Kalikmanov 等^[61]将单组分半现象学理论扩展到双组分体系,用一种单组分体系去等效替代双组分体系中由两种分子构成的微团性质,以此便可将单组分体系的成核理论运用到双组分体系中。但模型在推导过程中,多次采用了理想气体假设。S. N. H. Looijmans^[62]对比研究了半现象学理论模型和双组分经典成核理论模型,二者均在某些情况下取得了较好的预测结果,很难甚至没法评判二者孰优孰劣。

4 超声速流动凝结特性研究进展

气体在 Laval 喷管内高速膨胀至超声速,产生低温效应使气体凝结液化,因此超声速流动条件下气体在 Laval 喷管内的流动凝结特性研究具有重要意义。

1934 年,J. I. Yellott^[63]开展了喷管内过饱和蒸气流动实验研究,发现了过饱和度的极限位置,即 Wilson 点;1935 年,L. Prandtl^[64]在实验中观察到了喷管中的扰动现象,并利用流动可视化方法捕捉到了著名的“X-Shock”激波现象;1942 年,K. Oswatitsch^[65]最早将气体凝结过程与超声速流动过程进行耦合,探究了凝结对于流场参数的影响。上述工作对于高速

流体流动凝结研究具有里程碑式的意义。

近年来的研究发现,Laval 喷管进出口参数和结构参数对天然气超声速流动凝结特性具有重要影响,许多学者采用理论分析、数值模拟、实验研究等多种方式对此开展了广泛的研究,取得了丰硕的成果。

4.1 进、出口参数对超声速流动凝结特性的影响

刘恒伟等^[12]搭建了一台用于天然气脱水的超声速旋流装置,开展室内实验研究,结果表明:压损比(压力损失与入口压力之比)是影响脱水性能的关键因素。鲍玲玲等^[66]发现当压损比为 0.81 时,最大露点降可以达 28.12 °C;马庆芬等^[20]探究了湿气体的超声速流动凝结特性,发现操作参数(初始水蒸汽分压、初始压力和初始温度)对装置分离性能有重要影响;马庆芬等^[21]还利用液滴放大法开展了一系列研究,发现提高入口压力有利于增大相对湿度,入口温度对分离效率影响较小,获得的最佳分离效果为:乙醇去除率为 55%、露点降为 27 K;蒋文明等^[67]探究了入口参数对双组分自发凝结流动特性的影响,研究发现:对于一定膨胀率和长度的喷管而言,降低入口压力、提高入口温度或增加入口过饱和度,会得到更高的液相质量分数;刘兴伟等^[68]也发现入口压力和入口温度对凝结相变特性有很大的影响;文闯等^[27]设计了一套包含中心体的先旋流后膨胀型超声速旋流分离装置,并进行脱水性能研究,结果表明:提高压力恢复系数(出口压力与入口压力的比值),空气的水露点降会降低,干气出口水露点最低可达 -28 °C,露点降最大为 34.9 °C,脱水性能优良;曹学文等^[69]发现露点降随着压力恢复系数的增大而减小,当压力恢复系数在 20.6%~69.8% 的范围时,可获得的最大露点降为 34.9 °C (20.6%),可获得的最小露点降为 18 °C (69.8%)。

杨文等^[70-72]利用自行设计的 Laval 喷管对天然气超声速流动凝结特性进行数值模拟,研究显示:在出口马赫数一定的情况下,降低入口温度或提高入口压力将使凝结发生在更靠近喉部处,得到更大的液滴成核率最大值及气体湿度;增大比热比值(入口压力与入口温度之比),会导致压降及温降增大,或将使出口温度或出口压力低于三相点而可能导致气体无法液化。入口压力 2 MPa 对应的可用最低入口温度为 164 K,入口温度 180 K 对应的可用最高压力为 2.4 MPa;随着压比(背压与入口压力比值)的增大,产生了逐渐向喉部方向移动的激波,液化过程被破坏,湿度变为 0。入口压力 2 MPa、入口温度 180 K 情

况下,激波不进入喷管最大压比为 17%。

边江等^[73-79]设计了一种带有中心体的 Laval 喷管,探究了入口参数对天然气超声速旋流流动凝结特性的影响,结果显示:降低入口温度和增加入口压力,冷凝位置会向入口处移动,最大成核速率、液滴半径和出口湿度均增大;激波位置随着背压的增大而向喷管进口方向移动,不利于液化过程的进行;不同的入口气体组分,液化特性有很大差异。

4.2 结构参数对超声速流动凝结特性的影响

马庆芬等^[20]对含湿气体在超声速冷凝流动中的自发成核进行预测,探究了天然气超声速冷凝分离装置结构参数(旋流发生器高度、超音速喷管的长度、喷管出口与喉部的截面积比)的影响,研究发现:所有的结构参数都影响分离性能,而结构参数中只有旋流发生器高度对能耗有影响;蒋文明等^[80]探究了膨胀率对氮气和水蒸汽超声速不平衡凝结流动特性的影响,结果表明:在进口参数一定的情况下,增大膨胀率(沿喷管轴向每单位距离中气体压力降低的数值),极限过冷度将会变大,液滴成核率和液滴数增大,但液滴半径减小;杨文等^[81]也探究了喷管结构对凝结液化的影响,发现增大膨胀率,最大成核率、液滴数目及湿度(液化率)均随之增大,当膨胀率从 6 000/s 增至 12 000/s 时,成核率最大值增加 154.8%,液滴的数目增加 79.5%,喷管出口的湿度增加 51.7%。

文闯等^[26,82]对 Laval 喷管内的旋流流场进行了数值模拟,考察了喷管结构参数对超声速喷管旋流分离性能的影响,研究显示:增大喷管收缩比和收缩半角可以改善旋流分离性能,但当收缩半角大于 30°时,改善效果不再明显;喷管喉部圆柱段长度对旋流分离性能几乎没有影响;当喷管扩张半角小于 2°时,旋流分离性能较差,扩张半角在 2~6°时,旋流分离性能较好,扩张半角大于 6°,旋流分离性能下降。针对常规超音速分离器易产生冲击波、涡流等问题,边江等^[83]对喷管结构进行改进并开展天然气超声速流动

凝结特性数值模拟,研究发现:减小喷管扩张角、延长扩张段长度,提高了分离器的制冷性能和分离效率,可以实现更大范围的深度冷却。

5 超声速旋流分离技术最新应用

超声速旋流分离技术已经在天然气脱水除烃等领域得到了较多的应用,并取得了不错的商业价值。近年来,不少学者拓宽了超声速旋流分离技术的应用范围,已开展了利用超声速旋流分离技术进行天然气液化和脱除酸性气体等方面的研究工作。

5.1 天然气液化

孙恒等^[84-85]对天然气液化过程的参数进行分析,对利用 3S 分离器液化天然气进行了初步地探索。文闯等^[86]提出了采用超声速分离装置应用于天然气液化的可行性。

杨文等^[71]对自行设计的 Laval 喷管内天然气自发凝结流动过程进行数值模拟,探究了各种参数条件下天然气超声速自发凝结特性,研究发现:在不同的条件下,甲烷气体在喷管出口处湿度均低于 0.1,液化效率低。在此基础上,提出了采用多级超声速旋流分离装置和外加凝结核心等以提高天然气液化率的方法^[87],结果表明:当外界核心浓度为 $1 \times 10^{17}/\text{kg}$ 、外界核心半径为 $1 \times 10^{-9}\text{m}$ 时,喷管出口湿度比自发凝结过程湿度增加 82.17%,天然气液化效率得以提高;设计的两级液化装置所获得综合湿度为 0.107,与第 1 级单独使用时相比提高 155.13%,与第 2 级单独使用时相比提高 31.98%,展现出良好的天然气液化效果。

边江等^[75]提出了一种采用 Laval 喷管的新型天然气液化流程(见图 4),对超声速流动条件下甲烷-乙烷二元体系凝结特性进行理论和数值研究,探究了入口温度、入口压力、背压及组分构成等对天然气液化的影响,研究发现在相同条件下,Laval 喷管比节流阀更易液化天然气。边江等^[79,88]进一步研究了外界粒子对天然气超声速流动凝结特性的影响,将“逸度”引入到模型中以提高计算精度,利用修正的模型

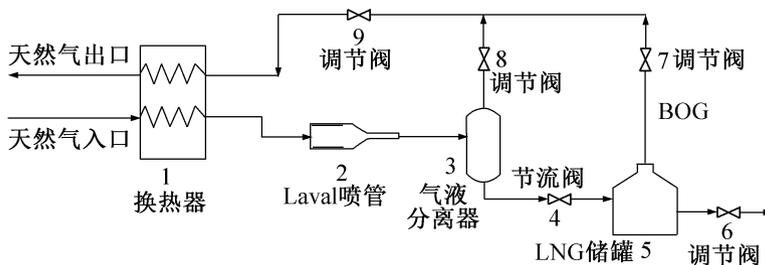


图 4 一种新型气体液化工艺^[75]

Fig.4 A new type of gas liquefaction process^[75]

探究了天然气超声速流动凝结特性,进一步阐明成核及液滴生长过程。

5.2 酸性气体脱除

孙文娟等^[89-91]提出将超声速旋流分离技术应用到天然气脱二氧化碳领域中,对 Laval 喷管内二氧化碳凝结特性进行研究,结果显示:气体在 Laval 喷管内高速膨胀,产生的低温效应为二氧化碳的液化提供条件;入口温度的降低、入口压力的升高和进气中二氧化碳含量的增加均有利于二氧化碳的液化脱除。此外,孙文娟等^[92]还研究了超声速分离器在含高浓度硫化氢的天然气处理中的潜在应用,探究了 H₂S 进料浓度、操作参数和喷管几何形状对凝结过程的影响,研究发现:在喷管内高速膨胀, H₂S 发生凝结;增加进料 H₂S 浓度,可实现更早的凝结且更多的 H₂S 被液化;提高入口压力和降低入口温度可促进 H₂S 的凝结;随着流量的进一步增大,增大膨胀比可以改善超声速喷管的凝结性能。

曹学文等^[93-94]对 Laval 喷管内二氧化碳、硫化氢的超声速流动凝结特性进行了研究,结果表明:喷管出口液滴半径可达到 1.46×10^{-7} m,出口湿度可达 0.093 5,在一定程度上验证了液化脱除 CO₂ 气体的可行性;在入口压力 5 MPa、入口温度 273 K 条件下,喷管出口气相中硫化氢摩尔分数可由 10% 降至 3.33%,但仍无法满足商品天然气要求,需要进一步研究。

边江等^[73,95-96]也对天然气超声速流动条件下二氧化碳凝结特性进行研究,首先修正了二氧化碳液滴的表面张力计算模型,利用分段函数的方法实现了二氧化碳表面张力的准确预测,分段函数的平均偏差可低于 0.95%,效果显著;此外探究了二氧化碳液滴和天然气在超声速分离器中的分离机理,提出可通过提高入口温度和降低入口压力的方法促进二氧化碳凝结液化。

在最近的研究中,文闯等^[97]提出了一种利用超声速流来捕获二氧化碳的方法,对超声速膨胀条件下二氧化碳相变过程的传热传质特性和流动凝结特性进行了详细的数值模拟,研究发现:所建立的 CFD 模型能较准确地预测与干气假设相反的静态温度分布,通过流动凝结模型可获得 18.6% 的二氧化碳质量分数,表明通过超声速分离技术对二氧化碳进行捕获是一种环保友好的新方法。

6 总结及展望

基于超声速制冷效应的旋流分离技术因其具有结构紧凑、安全可靠、无需化学添加剂、支持无人值守

等优点,在天然气加工处理领域已得到较多应用,成为近 20 多年来的研究热点。本文对超声速旋流分离器典型结构和 Laval 喷管设计研究进展进行了综述,总结了气体凝结相变理论的发展历程,归纳了超声速条件下气体流动凝结特性发展现状,重点探究了进出口参数和喷管结构参数的影响,随着研究的深入,超声速旋流分离技术已在天然气液化和脱除酸性气体等领域展现出发展潜力。超声速旋流分离技术在实际应用过程中,依然存在一定的局限性:1) 压力损失较大,入口压力与气相出口压力之比通常约为 1.35; 2) 入口温度较低,一般不宜高于 40 °C,适用于露点要求不是很低的场合; 3) 单台最小处理量约为 20×10^4 m³/d,不适用于流量较小的场合,且不能只考虑流量范围而无视压力条件; 4) 对气体介质中固体杂质要求较高,允许携带固体颗粒直径需小于 100 μm; 5) 变工况能力和容错性有待提高。以上局限性需在实际工业化应用中加以重视并逐步完善。

虽然国内外许多学者开展了大量的研究工作,但该技术仍然存在一些问题,因此本文对超声速旋流分离技术的未来发展提出以下展望:

1) 参考热声制冷技术、磁制冷技术用于天然气液化的研究报道,可以考虑将超声速旋流分离技术与低温技术相结合,挖掘在深冷领域的应用价值。

2) 目前的研究表明,超声速旋流分离技术用于液化天然气的液化率很低,除通过改变进出口参数、外加非均质凝结核心和采用两级分离装置等方法提高液化率之外,需要研究更为有效的措施以促进凝结过程,逐步达到工业化规模应用。

3) 关于 Laval 喷管内气体超声速流动凝结特性的研究大多采用数值模拟的方法,实验研究较少且多为模拟实验(用乙醇-水蒸汽等),如何安全地开展高压条件下天然气在 Laval 喷管内的超声速流动凝结特性研究是需要关注的问题。

4) 超声速旋流分离技术在天然气脱水、脱重烃领域已得到较多的应用,在液化天然气和脱除酸性气体中也已展现出发展潜力,拓宽更广的应用领域需要相关工业界和学术界共同努力。

5) 气体凝结相变理论是超声速旋流分离技术的重要理论基础,发展和完善单组分、双组分以及多组分气体凝结相变理论是进一步开展数值模拟和实验研究工作的重要基石。

6) 多元混合系统中不同可冷凝组分之间的相互作用以及外部杂质对冷凝和流动过程的影响尚不清楚,需要建立更加全面的数学模型来描述这些复杂的传热传质过程。

参考文献

- [1] LIN Wensheng, ZHANG Na, GU Anzhong. LNG (liquefied natural gas): a necessary part in China's future energy infrastructure [J]. *Energy*, 2010, 35(11):4383-4391.
- [2] AGUILERA R F. The role of natural gas in a low carbon asia pacific [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1795-1800.
- [3] 中华人民共和国国土资源部. 2015 中国矿产资源报告 [M]. 北京:地质出版社,2015.(Ministry of Land and Resources, PRC. 2015 China mineral resources report [M]. Beijing: Geological Press, 2015.)
- [4] KIM Y E, MOON S J, YOON Y I, et al. Heat of absorption and absorption capacity of CO₂ in aqueous solutions of amine containing multiple amino groups [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 122: 112-118.
- [5] FELLAH M F. Adsorption of hydrogen sulfide as initial step of H₂S removal: a DFT study on metal exchanged ZSM-12 clusters [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 144:191-196.
- [6] YE Wenyuan, LIN Jiuyang, MADSEN H T, et al. Enhanced performance of a biomimetic membrane for Na₂CO₃ crystallization in the scenario of CO₂ capture [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 498:75-85.
- [7] BROUWER J M, EPSOM H D. Twister supersonic gas conditioning for unmanned platforms and subsea gas processing[C]//Offshore Europe Conference. 2003.
- [8] BETTING M, HOLTEN T V, WILLINK C A. Nozzle for supersonic gas flow and an inertia separator; US, 6513345 B1[P]. 2003.
- [9] BETTING M, EPSOM H. Supersonic separator gains market acceptance [J]. *World Oil*, 2007, 254:197-200.
- [10] OKIMOTO F T, SIBANI S, LANDER M. Twister supersonic gas conditioning process [C]//The 9th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi, U.A.E, 2000.
- [11] OKIMOTO F, BROUWER J M. Supersonic gas conditioning [J]. *World Oil*, 2002, 223(8):89-91.
- [12] LIU Hengwei, LIU Zhongliang, FENG Yongxun, et al. Characteristics of a supersonic swirling dehydration system of natural gas [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2005, 13(1): 9-12.
- [13] 刘恒伟. 超音速分离管的研发及其流动与传热传质特性的研究 [D]. 北京:北京工业大学,2006.(LIU Hengwei. Research and development of supersonic separation tube and its flow and heat and mass transfer characteristics [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.)
- [14] 蒋文明,刘中良,刘恒伟,等. 新型天然气超音速脱水净化装置的现场实验研究 [EB/OL]. [2007-12-20]. [http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200712-](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200712-501)
501. (JIANG Wenming, LIU Zhongliang, LIU Hengwei, et al. Field experimental study on a new type of supersonic natural gas dewatering and purification unit [EB/OL]. [2007-12-20]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200712-501>.)
- [15] 蒋文明. 多组分凝结性超音速流传热传质理论及实验研究 [D]. 北京:北京工业大学,2010.(JIANG Wenming. Theoretical and experimental study on multicomponent condensate supersonic heat and mass transfer [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.)
- [16] 曹学文,陈丽,林宗虎,等. 超声速旋流天然气分离器研究 [J]. *天然气工业*,2007,27(7):109-111. (CAO Xuewen, CHEN Li, LIN Zonghu, et al. Study on supersonic cyclone gas separator [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(7):109-111.)
- [17] ALFEROV V I, BAGUIROV L A, FEYGIN V, et al. Method and apparatus for liquefying a gas: EP, 1131588 [P]. 2004.
- [18] ALFYOROV V, BAGIROV L, DMITRIEV L, et al. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components [J]. *Oil and Gas Journal*, 2005, 103(20):53-58.
- [19] 邱中华. 含湿气体在两相涡流管中自发冷凝与分离性能研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2008.(QIU Zhonghua. Study on the spontaneous condensation and separation of wet gas in two-phase vortex tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.)
- [20] 马庆芬,胡大鹏,邱中华. 超音速冷凝分离过程的自发成核影响因素分析 [J]. *石油化工*,2008,37(9):920-925.(MA Qingfen, HU Dapeng, QIU Zhonghua. Analysis of factors affecting spontaneous nucleation in supersonic condensation separation process [J]. *Petrochemical Technology*, 2008, 37(9):920-925.)
- [21] MA Qingfen, HU Dapeng, He Gaohong, et al. Performance of inner-core supersonic gas separation device with droplet enlargement method [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2009, 17(6):925-933.
- [22] 马庆芬. 旋转超音速凝结流动及其应用技术研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2009.(MA Qingfen. Research on rotational supersonic condensation flow and its application technology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)
- [23] 马庆芬,胡大鹏,邱中华,等. 超音速喷嘴涡流管气体分离性能的数值模拟与实验 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2011, 27(2):297-307.(MA Qingfen, HU Dapeng, QIU Zhonghua, et al. Numerical simulation and experiment of gas separation performance of vortex tube of supersonic nozzle [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2011, 27(2):297-307.)
- [24] 文闯,曹学文,吴梁红. 新型超声速旋流分离器设计及

- 数值模拟 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(4): 125-128, 132. (WEN Chuang, CAO Xuewen, WU Lianghong. Design and numerical simulation of a new supersonic cyclone separator [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2010, 34(4): 125-128, 132.)
- [25] 文闯, 曹学文, 杨燕, 等. 超声速旋流分离器内气液两相流流动特性 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 129-133. (WEN Chuang, CAO Xuewen, YANG Yan, et al. Flow characteristics of gas-liquid two-phase flow in supersonic cyclone separator [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2011, 35(4): 129-133.)
- [26] 文闯, 曹学文, 张静, 等. 基于旋流的天然气超声速喷管分离特性 [J]. 石油学报 (石油加工), 2011, 27(1): 150-154. (WEN Chuang, CAO Xuewen, ZHANG Jing, et al. Separation characteristics of natural gas supersonic nozzle based on swirl flow [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2011, 27(1): 150-154.)
- [27] 文闯, 曹学文, 杨燕, 等. 一种先旋流后膨胀型超声速分离器脱水性能实验 [J]. 石油学报, 2012, 33(2): 142-146. (WEN Chuang, CAO Xuewen, YANG Yan, et al. Experimental study on the dehydration performance of a hydrocyclone-expansion supersonic separator [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 142-146.)
- [28] JASSIM E, ABDI M A, MUZYCHKA Y. Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: part 1. real gas effects and shockwave [J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(15): 1757-1772.
- [29] JASSIM E, ABDI M A, MUZYCHKA Y. Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: part 2. nozzle geometry and vorticity [J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(15): 1773-1785.
- [30] 陈志敏, 肖志祥. 风能涡轮引信电机吹风装置的轴对称收缩段设计研究 [J]. 机械科学与技术, 2001, 20(3): 397-398. (CHEN Zhimin, XIAO Zhixiang. Study on design of axisymmetric contraction section of wind turbine fuze motor blower [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2001, 20(3): 397-398.)
- [31] 周刚, 汪家道, 陈皓生, 等. 小型高速水洞收缩段的优化设计 [J]. 船舶力学, 2009, 13(4): 513-521. (ZHOU Gang, WANG Jiadao, CHEN Haosheng, et al. Optimal design of shrinkage section of small high speed water tunnel [J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(4): 513-521.)
- [32] 庞会中. 新型超音速气体净化分离装置设计研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009. (PANG Huizhong. Design and research of new supersonic gas purification and separation device [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.)
- [33] 李增材, 孙恒, 黄启玉. 超音速分离管在天然气制冷液化领域中的研究进展 [J]. 低温与超导, 2012, 40(5): 1-4, 13. (LI Zengcai, SUN Heng, HUANG Qiyu. Research progress in the field of refrigeration and liquefaction of natural gas with supersonic separation tube [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40(5): 1-4, 13.)
- [34] CHRISTIAN J W. The theory of transformation in metal and alloys [M]. Oxford: Pergamon Press, 1975.
- [35] CAO Xuewen, BIAN Jiang. Supersonic separation technology for natural gas processing: a review [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2019, 136: 138-151.
- [36] FLOOD H. Tröpfchenbildung in übersättigten Äthylalkohol-Wasserdampfgemischen [J]. Zeitschrift für Physikalische Chemie A, 1934, 170: 286-295.
- [37] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics [M]. New York: Oxford University Press, 1995.
- [38] KATZ J L, WIEDERSICH H. Nucleation theory without Maxwell Demons [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1977, 61(2): 351-355.
- [39] GIRSHICK S L, CHIU C P. Kinetic nucleation theory: A new expression for the rate of homogeneous nucleation from an ideal supersaturated vapor [J]. Journal of Chemical Physics, 1990, 93(2): 1273-1277.
- [40] RUDEK M M, FISK J A, CHAKAROV V M, et al. Condensation of a supersaturated vapor. XII. The homogeneous nucleation of the n-alkanes [J]. Journal of Chemical Physics, 1996, 105(11): 4707-4713.
- [41] LUIJTEN C C M. Nucleation and droplet growth at high pressure [D]. The Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1998.
- [42] PEETERS P, HRUBY J, VAN DONGEN M E H. High pressure nucleation experiments in binary and ternary mixtures [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2001, 105(47): 11763-11771.
- [43] LAMANNA G, VAN POPPEL J, VAN DONGEN M E H. Experimental determination of droplet size and density field in condensing flows [J]. Experiments in Fluids, 2002, 32(3): 381-395.
- [44] LAMANNA G. On nucleation and droplet growth in condensing nozzle flows [D]. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2000.
- [45] 程万. 伴随凝结的无粘可压缩流动研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011. (CHENG Wan. Study on an inviscid compressible flow with condensation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.)
- [46] DILLMANN A, MEIER G E A. Homogeneous nucleation of

- supersaturated vapors [J]. *Chemical Physics Letters*, 1989, 160(1):71-74.
- [47] DILLMANN A, MEIER G E A. A refined droplet approach to the problem of homogeneous nucleation from the vapor phase [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1991, 94(5):3872-3884.
- [48] FORD I J, LAAKSONEN A, KULMALA M. Modification of the Dillmann-Meier theory of homogeneous nucleation [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1993, 99(1):764-765.
- [49] KALIKMANOV V I, DONGEN M E H V. Cluster approach to the kinetic theory of homogeneous nucleation [J]. *Europhysics Letters*, 1993, 21(6):645-650.
- [50] KALIKMANOV V I, VAN DONGEN M E H. Self-consistent cluster approach to the homogeneous kinetic nucleation theory [J]. *Physical Review E*, 1993, 47(5):3532-3539.
- [51] KALIKMANOV V I. Mean-field kinetic nucleation theory [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2006, 124(12):124505.
- [52] SINHA S, BHABHE A, LAKSMONO H, et al. Argon nucleation in a cryogenic supersonic nozzle [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2010, 132(6):1-11.
- [53] VOLMER M. *Kinetik der phasenbildung* [M]. Theodor Steinkopff, 1939.
- [54] REISS H. The kinetics of phase transitions in binary systems [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1950, 18(6):840-848.
- [55] STAUFFER D. Kinetic theory of two-component ("heteromolecular") nucleation and condensation [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1976, 7(4):319-333.
- [56] DOYLE G J. Response to the comment on "Self-nucleation in the sulfuric acid-water system" [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1981, 75(3):1585-1586.
- [57] WILEMSKI G. Composition of the critical nucleus in multi-component vapor nucleation [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1984, 80(3):1370-1372.
- [58] WILEMSKI G. Revised classical binary nucleation theory for aqueous alcohol and acetone vapors [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1987, 91(10):2492-2498.
- [59] WILEMSKI G. Some issues of thermodynamic consistency in binary nucleation theory [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1988, 88(8):5134-5136.
- [60] LOOIJMANS K N H, LUIJTEN C C M, HOFMANS G C J, et al. Classical binary nucleation theory applied to the real mixture n-nonane/methane at high pressures [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1995, 102(11):4351-4357.
- [61] KALIKMANOV V I, VAN DONGEN M E H. Quasi-one-component theory of homogeneous binary nucleation [J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5):4391-4399.
- [62] LOOIJMANS K N H. Homogeneous nucleation and droplet growth in the coexistence region of n-alkane/methane mixtures at high pressures [D]. Holland: Eindhoven University of Technology, 1995.
- [63] YELLOTT J I. Supersaturated steam [J]. *Trans. American Society of Mechanical Engineers*, 1934, 56:411-430.
- [64] PRANDTL L. General considerations on the flow of compressible fluids [C]//*Volta Congress*. 1935.
- [65] OSWATITSCH K. Kondensationserscheinungen in überschalldüsen [J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1942, 22(1):1-14.
- [66] 鲍玲玲,刘中良,刘杰. 湿气再循环超音速分离管脱水性能的试验研究 [J]. *石油机械*, 2017, 45(7):83-87. (BAO Lingling, LIU Zhongliang, LIU Jie. Experimental study on dewatering performance of supersonic separation tube for moisture recirculation [J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(7):83-87.)
- [67] 蒋文明,刘中良,邓展飞,等. 入口参数对双组分混合物自发凝结流动的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2010, 36(6):796-802. (JIANG Wenming, LIU Zhongliang, DENG Zhanfei, et al. Influence of inlet parameters on spontaneous condensation flow of two-component mixture [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2010, 36(6):796-802.)
- [68] 刘兴伟,刘中良,李艳霞. 超音速分离管中水蒸汽凝结相变的数值研究 [J]. *热科学与技术*, 2014, 13(3):198-205. (LIU Xingwei, LIU Zhongliang, LI Yanxia. Numerical study of vapor condensation phase transition in supersonic separation tube [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2014, 13(3):198-205.)
- [69] CAO Xuewen, YANG Wen. The dehydration performance evaluation of a new supersonic swirling separator [J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 27(3):1667-1676.
- [70] CAO Xuewen, YANG Wen. Numerical simulation of binary-gas condensation characteristics in supersonic nozzles [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 25:197-206.
- [71] 杨文,曹学文,徐晓婷,等. 高速膨胀天然气凝结流动特性 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2016, 32(1):73-81. (YANG Wen, CAO Xuewen, XU Xiaoting, et al. Characteristics of condensation flow of high-speed expanding natural gas [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2016, 32(1):73-81.)
- [72] 杨文,曹学文. Laval 喷管设计及其在天然气液化中的应用研究 [J]. *西安石油大学学报:自然科学版*, 2015, 30(2):75-79. (YANG Wen, CAO Xuewen. Design of Laval nozzle and its application in natural gas liquefaction [J]. *Journal of Xi'an Petroleum University: Natural Science*,

- 2015, 30 (2): 75-79.)
- [73] BIAN Jiang, JIANG Wenming, HOU Danyang, et al. Condensation characteristics of $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ mixture gas in a supersonic nozzle [J]. Powder Technology, 2018, 329: 1-11.
- [74] BIAN Jiang, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. A new liquefaction method for natural gas by utilizing cold energy and separating power of swirl nozzle [J]. Aiche Journal, 2020, 66(2): 1-13.
- [75] BIAN Jiang, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle [J]. Energy, 2018, 159: 706-715.
- [76] BIAN Jiang, CAO Xuewen, TENG Lin, et al. Effects of inlet parameters on the supersonic condensation and swirling characteristics of binary natural gas mixture [J]. Energy, 2019, 188(12): 1-9.
- [77] 边江, 曹学文, 杨文, 等. 入口压力对天然气超声速液化特性的影响 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 1-7. (BIAN Jiang, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Effect of inlet pressure on supersonic liquefaction characteristics of natural gas [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(3): 1-7.)
- [78] 边江, 曹学文, 杨文, 等. 入口温度对天然气超声速液化性能的影响 [J]. 制冷学报, 2019, 40(1): 107-113. (BIAN Jiang, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Effect of inlet temperature on supersonic liquefaction performance of natural gas [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(1): 107-113.)
- [79] BIAN Jiang, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Condensation characteristics of natural gas in the supersonic liquefaction process [J]. Energy, 2019, 168: 99-110.
- [80] 蒋文明, 刘中良, 姜娟娟, 等. 膨胀率对氮气和水蒸汽超声速凝结特性的影响 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(6): 88-92, 96. (JIANG Wenming, LIU Zhongliang, JIANG Juanjuan, et al. Effect of expansion rate on the supersonic condensation characteristics of nitrogen and water vapor [J]. Journal of Xi'an Petroleum University: Natural Science, 2012, 27(6): 88-92, 96.)
- [81] 杨文, 曹学文, 赵联祁, 等. 超声速旋流分离器内天然气液化过程研究 [J]. 石油机械, 2015, 43(5): 87-91. (YANG Wen, CAO Xuewen, ZHAO Lianqi, et al. Study on the process of natural gas liquefaction in a supersonic cyclone separator [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(5): 87-91.)
- [82] WEN Chuang, CAO Xuewen, YANG Yan, et al. Supersonic swirling characteristics of natural gas in convergent-divergent nozzles [J]. Petroleum Science, 2011, 8(1): 114-119.
- [83] BIAN Jiang, JIANG Wenming, TENG Lin, et al. Structure improvements and numerical simulation of supersonic separators [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2016, 110: 214-219.
- [84] 孙恒, 朱鸿梅, 舒丹. 3S 技术在天然气液化中的应用初探 [J]. 低温与超导, 2010, 38(1): 17-19. (SUN Heng, ZHU Hongmei, SHU Dan. Preliminary study on application of 3S technology in natural gas liquefaction [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2010, 38(1): 17-19.)
- [85] 孙恒, 舒丹, 朱鸿梅. 采用 3S 分离器的天然气液化过程的参数分析 [J]. 低温与超导, 2016, 38(3): 25-27. (SUN Heng, SHU Dan, ZHU Hongmei. Parameter analysis of gas liquefaction process using 3S separator [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2016, 38(3): 25-27.)
- [86] WEN Chuang, CAO Xuewen, YANG Yan, et al. An unconventional supersonic liquefied technology for natural gas [J]. Energy, Education, Science and Technology, 2012, 30(1): 651-660.
- [87] 杨文, 曹学文, 王迪, 等. 提高喷管内天然气液化效率的方法 [J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(2): 71-82. (YANG Wen, CAO Xuewen, WANG Di, et al. Methods to improve the efficiency of natural gas liquefaction in nozzle [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2016, 32(2): 71-82.)
- [88] BIAN Jiang, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Effects of external particles on the liquefaction property of natural gas in a Laval nozzle [J]. Powder Technology, 2018, 339: 894-902.
- [89] 孙文娟, 曹学文, 杨文, 等. 喷管制冷作用在天然气脱酸气中的应用研究 [J]. 低温与超导, 2016, 44(12): 72-76. (SUN Wenjuan, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Application of nozzle cooling in natural gas deacidification [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2016, 44(12): 72-76.)
- [90] 孙文娟, 曹学文, 杨文, 等. 超声速喷管在天然气脱碳中的应用初探 [J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2017, 42(2): 101-105. (SUN Wenjuan, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Application of supersonic nozzle in natural gas decarburization [J]. Natural Gas Chemical Industry (C1 Chemistry and Chemical Industry), 2017, 42(2): 101-105.)
- [91] 孙文娟, 曹学文, 杨文, 等. Laval 喷管内二氧化碳凝结过程研究 [J]. 石油学报(石油加工), 2017, 33(4): 763-770. (SUN Wenjuan, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. Carbon dioxide condensation in Laval nozzle [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2017, 33(4): 763-770.)
- [92] SUN Wenjuan, CAO Xuewen, YANG Wen, et al. CFD modeling on non-equilibrium condensation process of H_2S in $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{S}$ mixture expansion through supersonic nozzles

- [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 170: 53–63.
- [93] 曹学文,赵西廓,孙文娟. 超声速喷管内 CO₂ 气体凝结特性研究 [J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(6):1–7. (CAO Xuewen, ZHAO Xikuo, SUN Wenjuan. Study on CO₂ condensation characteristics in supersonic nozzle [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(6): 1–7.)
- [94] 曹学文,王春智,孙文娟,等. 天然气中硫化氢超声速凝结特性 [J]. 石油学报(石油加工),2019, 35(4): 721–729. (CAO Xuewen, WANG Chunzhi, SUN Wenjuan, et al. Supersonic condensation characteristics of hydrogen sulfide in natural gas [J]. Journal of Petroleum (Petroleum Processing Section), 2019, 35(4):721–729.)
- [95] JIANG Wenming, BIAN Jiang, WU Ao, et al. Investigation of supersonic separation mechanism of CO₂ in natural gas applying the discrete particle method [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2018, 123:272–279.
- [96] JIANG Wenming, BIAN Jiang, LIU Yang, et al. Modifica-

tion on the CO₂ surface tension calculation model under low temperature and high pressure condition [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2016, 38(5):671–676.

- [97] WEN Chuang, KARVOUNIS N, WAHHER J H, et al. An efficient approach to separate CO₂ using supersonic flows for carbon capture and storage [J]. Applied Energy, 2019, 238:311–319.

通信作者简介

罗二仓,男,研究员,中国科学院理化技术研究所,010-82543750,Email:ecluo@mail.ipc.ac.cn。研究方向:新型制冷技术、热声热机及其应用。

About the corresponding author

Luo Ercang, male, professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, +86 10-82543750, Email: ecluo@mail.ipc.ac.cn. Research fields: new refrigeration technology, thermoacoustic engine and its application.