

工艺与设备

天然气管网压力能用于废旧橡胶粉碎的 制冷装置

熊永强^{1,2}, 华 贲^{1,2}, 罗东晓^{2,3}, 徐文东^{1,2}

(1. 华南理工大学强化传热与系统节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640;
2. 华南理工大学天然气利用研究中心, 广东 广州 510640; 3. 广州市煤气公司, 广东 广州 510640)

摘要:介绍了一种利用回收高压天然气调压过程的压力能为废旧橡胶低温粉碎提供冷源的制冷装置。在此制冷装置中, 高压天然气被分成 2 股, 其中一股通过气波制冷机降压产生低温, 用于另一股高压天然气的预冷; 预冷的高压天然气依次通过气波制冷机和透平膨胀机降压, 能够产生 -100℃ 以下的低温, 再利用循环氮气作为冷媒为废旧橡胶粉碎提供冷源。此方法不仅能够使高压天然气的压力能得到有效的回收利用, 而且能够降低废旧橡胶低温粉碎的成本。

关键词:压力能; 废旧橡胶; 低温粉碎; 天然气管网

中图分类号: F416.22; TH145.41

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2007)01-0049-04

A refrigeration process for tire rubber comminution with pressure energy recovered from natural gas pipelines as power

XIONG Yong-qiang^{1,2}, HUA Ben^{1,2}, LUO Dong-xiao^{2,3}, XU Wen-dong^{1,2}

(1. Key Lab of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of the Ministry of Education, SouthChina University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Research Center of Natural Gas Utilization, SouthChina University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangzhou Gas Company, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A refrigeration process for tire rubber cryogenic comminution with the pressure energy recovered from natural gas pipelines with high pressure as power is introduced. In the process, high-pressure natural gas was split into two portions, and one portion of high-pressure gas was expanded to lower pressure in a gas wave refrigerator to produce cryogenic energy used to cool the other portion of high-pressure gas. The cold portion of high-pressure gas was expanded to low pressure in a gas wave refrigerator and an expander orderly, and it could produce a chilling condition lower than -100℃ which was used to tire rubber comminution. It could not only recover the pressure energy of high-pressure gas, but also reduce the cooling cost for tire cryogenic comminution.

Key words: pressure energy; tire rubber; cryogenic comminution; natural gas pipelines

随着我国天然气产业的迅速发展,“西气东输”工程的建成供气、“川气东送”工程以及沿海液化天然气(LNG)站线等大型项目的规划建设,我国将在 2015 年前建成“两横两纵”的天然气管道共计 12 374 km,干线管道将由 2000 年的 10 638 km 增加为 23 012 km^[1]。由于采用高压输气可以减小输送管道管径,从而节省管材和施工费用,故当前世界上天然气的长输管道均采用高压输送,国外长输管道的输送压力多数都在 10 MPa 以上^[2]。我国天然气的长输管道也均采用高压输气,如“西气东输”和“陕-京二线”等的输气压力都达到了 10 MPa。

高压输气管网中蕴藏了大量的压力能。上游的天然气通过高压管网输送到各城市或大型用户,在各地的天然气接收门站或调压站中,需根据用户的用气压力要求对高压天然气进行降压。目前,日本通过利用天然气压差发电来回收管网的压力能,而国内天然气的压力能主要用于燃气的储气调峰^[3-4]。近来,王松岭等^[5]提出针对天然气管网压力能的联合循环系统,利用高压天然气膨胀制冷,将其用于燃气轮机的进气冷却,以提高发电效率,为燃气发电中利用高压天然气压力能提供了一种新的思路。对于天然气主要的下游用户之一的城市燃气,

收稿日期:2006-09-04;修回日期:2006-11-10

作者简介:熊永强(1978-),男,博士研究生,020-87112044, yqxiong1978@163.com;华贲(1937-),男,教授,博士生导师,主要从事过程能量综合优化及能源高效利用方面的研究。

储气调峰只能利用一部分压力能。为此笔者提出一种利用高压天然气压力能的制冷装置,为废旧橡胶的低温粉碎提供冷源,这样不仅使高压管网的压力能得到有效的回收利用,而且能够降低橡胶低温粉碎的成本,促进循环经济的发展。

1 废旧橡胶的低温粉碎

2004 年我国生胶消费量达 410 万 t,成为世界橡胶消费量的第一大国^[6]。橡胶工业的高速发展,同时产生了大量的废旧橡胶。2004 年我国轮胎产量达到 2.4 亿条,产生的废旧橡胶高达 300 万 t,同时,我国又是一个生胶资源短缺的国家,几乎每年生胶消耗量的 45% 需要进口,而且这种情况在短时期内不会有根本转变,因此废旧橡胶材料的回收利用,对充分利用再生资源,摆脱自然资源匮乏,减少环境污染等都有重要的意义。

废旧橡胶的回收利用方式目前主要有热能利用、再生胶生产和胶粉制备 3 种方法。由于不会产生二次污染,发达国家普遍采用的是将废旧橡胶直接粉碎制成胶粉而加以回收利用。废旧橡胶的粉碎有常温粉碎和低温粉碎 2 种方法。常温粉碎法是在常温下通过机械剪切力对橡胶块(片)进行挤压、切割,使其成为具有一定粒度的胶粉^[7-8]。常温粉碎法的优点是其设备简单,处理量大,缺点在于制造的胶粉粒径较大,获得精细胶粉的难度大。低温粉碎法就是先将橡胶冷却到玻璃化温度以下,使之变脆,然后再利用机械粉碎制成精细胶粉^[9]。目前,国外主要采用液氮喷淋法来冷冻橡胶,橡胶被冷冻到 -70°C 时就可以完全脆化,利用 -196°C 的液氮来冷冻橡胶,过程的冷 ■ 损失很大,每生产 1.0 kg 胶粉需耗用 1.0 ~ 1.5 kg 液氮,由于生产成本较高,液氮冷冻法不适合在中国市场推广。国内已成功开发了空气涡轮制冷技术,利用压缩空气在涡轮中膨胀产生 -80°C 以下的深冷空气,用于冷冻橡胶。由于橡

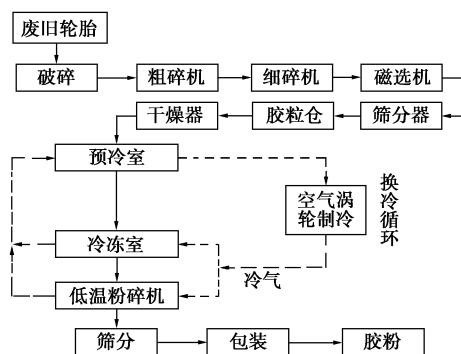


图 1 空气涡轮制冷用于粉碎废旧轮胎工艺流程

胶冷冻过程的冷 ■ 损失减少,利用空气涡轮制冷法制备胶粉的电耗低于 1 000 kWh/t,成本较液氮冷冻法大为降低^[10]。图 1 所示为空气涡轮制冷粉碎废旧轮胎的工艺流程示意图,空气涡轮制得的冷空气主要用于低温粉碎机、胶粒的冷冻和预冷。高压天然气的膨胀制冷原理同空气涡轮制冷法一样,由于不需耗能来压缩气体,所以制冷费用较低,而且作为城市燃气使用的天然气量非常大,可为废旧橡胶的冷冻和粉碎提供大量廉价的冷能,可以进一步降低精细胶粉的生产成本。

2 天然气管网压力能用于废旧橡胶粉碎的制冷装置

高压天然气经门站降压之后才能进入城市燃气中压管网,天然气压力降低,体积膨胀并对外做功,与此同时天然气的温度降低,从而产生冷能。热力学原理中理想气体绝热膨胀过程熵的关系式为:

$$\Delta S_{1-2} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

当理想气体进行等熵膨胀时 $\Delta S_{1-2} = 0$,则膨胀后气体的温度:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (2)$$

式中: T_1 为高压气体的进气温度, T_2 为膨胀后的气体温度, P_1 、 P_2 分别表示气体膨胀前、后的压力, R 为通用气体常数, C_p 为恒压摩尔热容。由此可见,当中压管网压力 P_2 一定时,高压天然气膨胀的制冷温度 T_2 主要受高压管网压力 P_1 和进气温度 T_1 影响。

25.0°C 的高压甲烷气等熵绝热膨胀至 0.5 MPa (等熵效率为 0.8),当甲烷气体压力波动时,膨胀制冷的温度变化如图 2 所示。

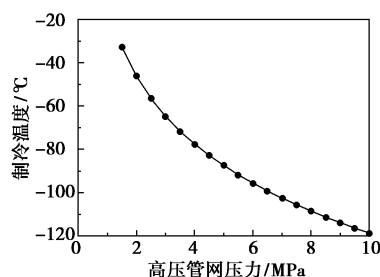


图 2 高压天然气压力对膨胀制冷的影响

高压管网压力越高,则膨胀制冷的温度越低。当高压甲烷的压力为 4.0 MPa 时,等熵膨胀可获得 -77.6°C 的低温。如果将 4.0 MPa 的高压天然气在膨胀前进行预冷,使膨胀机的进气温度降低,就可以

获得温度更低、品位更高的冷能。进气温度与制冷温度关系如图3所示,系统进气温度越低,则膨胀制冷的温度也越低。当高压天然气被预冷到 -5.0°C 时, 4.0 MPa 的高压天然气降压到 0.5 MPa 能产生 -100.7°C 的低温,当其预冷到 -20.0°C 时,可得到 -112.3°C 的深冷低温。

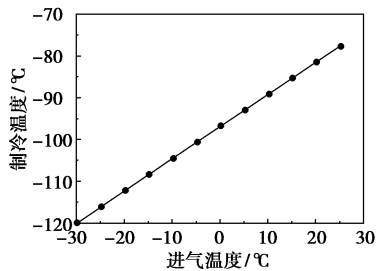
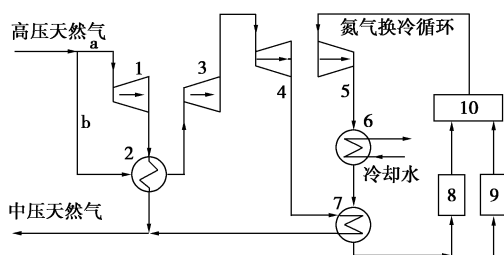


图3 进气温度对膨胀制冷的影响

根据上述原理,笔者提出如图4所示的一种回收高压天然气压力能用于废旧橡胶粉碎的制冷装置。



1,3—气波制冷机;2,7—板翅式换热器;4—透平膨胀机;5—氮气压缩机;6—水冷却器;8—粉碎机;9—冷冻室;10—胶粒预冷室

图4 用于橡胶粉碎的高压天然气压力能制冷装置流程图

流程主要包括3部分:高压天然气预冷、压力能制冷和冷能利用。

(1)高压天然气预冷。上游输送到调压站的高压天然气被分成a、b 2股,其中a股通过气波制冷机膨胀到中压(如 0.5 MPa),形成低温的中压天然气;在板翅式换热器中,b股高压天然气与经气波制冷机产生的低温中压天然气进行热交换,高压天然气获得冷量,温度降低,与此同时中压天然气被加热到 0°C 以上。

(2)压力能制冷。由于城市燃气的用气负荷随时间变化波动很大,从而导致上游的供气压力也有较大的波动,用气高峰期时的供气压力最低,用气低谷时供气压力最高。由于压力波动会导致膨胀机的制冷效率大大降低,为了保证获得较高的制冷效率,先将预冷的高压天然气在气波制冷机中膨胀到较低的压力(低于上游供气的最低压力),然后再进入膨

胀机中将压力降到要求的范围,从而产生深冷的中压天然气。

(3)冷能利用。由于天然气的可燃性,为防止发生事故,使用氮气作为载冷剂;在板翅式换热器中,深冷的中压天然气同循环氮气交换热量,中压天然气获得热量而被加热到 0°C 以上,同时氮气被冷却到 -70°C 以下;此低温氮气输送到废旧橡胶粉碎装置,一部分送入胶粒冷冻室与胶粒换热,使胶粒硬化,另一部分送到低温粉碎机中,用于抵消粉碎时产生的摩擦热;从胶粒冷冻室和低温粉碎机出来的氮气温度仍然很低,为了充分利用这些剩余的冷量,将这些低温氮气输送到胶粒预冷室用于胶粒的预冷,最后氮气的温度升高至接近常温;由于氮气同胶粒换热一般采用流化床式换热器和沸腾式的冷冻室^[11],氮气的压力能有一定的损失,所以将氮气送入压缩机中压缩升压,以提供循环动力,压缩机可由透平膨胀机膨胀做功来驱动;压缩后的氮气温度升高,经过水冷却器冷却后进入板翅式换热器中,形成下一个循环。

3 应用研究

某城市使用“西气东输”的天然气,气体组成如表1所示。通过高压输气管网输送到城市门站的天然气压力为 4.0 MPa ,温度为 20.0°C ,在调压站中,高压天然气的压力降至 0.5 MPa 后进入城市的中压燃气管网。其中一个调压站的处理量为 10.0 t/h (约 $14\ 000\text{ m}^3/\text{h}$),调压装置使用制冷装置(其性能如图2所示),利用高压天然气降压释放的压力能制冷,为废旧橡胶的低温粉碎提供冷源。

表1 西气东输天然气组成 摩尔分数/%

N_2	CO_2	C_1	C_2	C_3	$i\text{C}_4$	$n\text{C}_4$	$i\text{C}_5$	$n\text{C}_5$	C_6+
0.70	0.58	98.10	0.51	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05

高压天然气分成2股,a股占45%,a股高压天然气在气波制冷机中膨胀到 0.5 MPa 时产生 -50°C 的低温,利用该低温在换热器中将b股高压天然气预冷到约 -23.0°C 。预冷的b股高压天然气先通过气波制冷机膨胀到 2.4 MPa ,再经膨胀机减压膨胀到压力为 0.5 MPa ,天然气的温度降至 -111.0°C 。此股 -111.0°C 、 5.5 t/h 的天然气将 11.0 t/h 、 15.0°C 的氮气在随后的换热器中冷却到 -101.2°C ,该低温氮气通过管道输送到废旧橡胶粉碎装置,用于胶粒的冷冻和粉碎。根据目前世界橡胶低温粉碎技术,按照生产 1.0 kg 胶粉需要消耗 1.5 kg 液氮的冷量

计算,则此制冷装置提供的 11.0 t/h、-101.0℃的低温氮气可以满足生产 2.0 t/h 胶粉的冷量需求,全年按 5 000 h 计算,则此调压站提供的冷量能够生产 1.0 万 t 胶粉,能处理 80 万~100 万条废旧轮胎。生产的精细胶粉除了可以作再生胶原料外,还可以作填充剂用于轮胎、胶管、胶带、电线电缆、防水卷材等橡胶制品。在各类橡胶制品中掺入胶粉,不仅能节约生胶,降低成本,而且还能改善橡胶制品的工艺性能^[11]。

当上游输送的高压天然气的压力变化时,必然会影响到循环氮气的换冷温度。上游输送的高压天然气的压力在 2.5~5.0 MPa 波动时,循环氮气换冷温度的变化结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,当高压天然气的压力达到 5.0 MPa 时,循环氮气能够被冷却到 -111.4℃,具有更多的冷能;当压力降低到 2.5 MPa 时,循环氮气的温度降为 -80.3℃,仍然比橡胶的脆化温度(-70.0℃)低,橡胶粉碎装置仍然可以正常运行。由此可见,该装置对高压天然气的压力波动具有较好的适应能力。

表 2 高压天然气的压力同循环氮气换冷温度的关系

天然气输气压力/ MPa	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
氮气换冷温度/℃	-80.3	-88.4	-95.2	-101.2	-106.5	-111.4

4 结语

根据我国政府 2004 年制订的新能源战略,在未来的 15 年间,我国的天然气消费量将从 300 亿 m³/a 上升为 2 200 亿 m³/a,大量的天然气将通过高压管网输送到用户。高压天然气一般需要降压才能供给普通用户使用,有大量的天然气压力能可供利用。

通过回收高压天然气降压过程释放的压力能,利用膨胀制冷工艺为废旧橡胶的低温粉碎提供冷源,该方法不仅能够使高压天然气的压力能得到有效的回收利用,提高能源的综合利用效率,而且能够降低废旧橡胶低温粉碎的成本,提高橡胶资源的循环利用率,从而达到节约能源和资源、改善环境、减少污染的综合效益,符合国家提倡发展循环经济的方向。

参考文献

- [1] 严铭卿,康乐明.天然气输配工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [2] 王雪梅.天然气运输研究[J].石油工业技术监督,2005(5):41-44.
- [3] 徐正康,张宝金,乔珩.城市燃气调峰的探讨[J].煤气与热力,2005,25(4):44-47.
- [4] 熊永强,华贵,罗东晓.用于燃气调峰和轻烃回收的管道天然气液化流程[J].天然气工业,2006,26(6):130-132.
- [5] 王松岭,论立勇,谢英柏,等.基于天然气管网压力能回收的联合循环构思[J].热能动力工程,2005,20(6):628-631.
- [6] 于清溪.中国橡胶工业崛起之思考[J].现代化工,2006,26(6):1-6.
- [7] 沈阳市食品酿造机械厂,沈阳化工学院.橡胶脱硫挤出机:中国,2059872[P].1990-08-01.
- [8] Bilgili E, Arastoopour H, Bernstein B. Pulverization of rubber granulates using the solid-state shear extrusion (SSSE) process: Part I. Process concepts and characteristics[J]. Powder Technology, 2000, 115: 265-276.
- [9] 吕百龄.废旧橡胶制品的回收利用[J].橡胶技术与装备,2004,30(7):16-19.
- [10] 王屏,刘思永.采用空气涡轮制冷制取精细胶粉的低温粉碎技术[J].橡胶工业,1999,46(1):45-48.
- [11] Scaffaro R, Dintcheva N T, Nocilla M A, et al. Formulation, characterization and optimization of the processing condition of blends of recycled polyethylene and ground tyre rubber: Mechanical and rheological analysis[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 90: 281-287. ■

朗盛重组董事会

德国朗盛集团的顾问委员会在其总部勒沃库森 2006 年 12 月 11 日的例会上,就董事会成员职责分配做出以下决定:从 2007 年 7 月 1 日开始,贺德满博士将继续担任董事会主席,延续原本 2008 年春天到期的合同,任职 5 年。同时,公司首席财务官常牧天先生也将延长 5 年合约。Rainier van Roessel 博士被任命为董事会新成员,他此前负责朗盛橡胶化学品业务部门和比利时朗盛公司。2007 年 1 月起,他将接任董事职责,管理集团高性能化学品业务板块中的 3 个业务部门。此外,他还将负责朗盛集团的全球公司和集团 IT、物流、供应链、采购以及其他重要

的集团职能。董事会成员温浩辉博士及 Ulrich Koemm 博士将继续履行董事会成员职责到 2008 年春天为止。

顾问委员会主席 Rolf Stomberg 博士指出:“在过去的 2 年中,朗盛已经成长为享誉全球化工行业的新生力量。现在,公司又面临着新的挑战。在历经了意义深远的转型以及快速实现盈亏平衡之后,我们在化工行业完全确立了发展的主动地位。公司董事会的新架构使我们现在能够成功地应对挑战。我们将全心致力于业务的盈利,企业的国际化以及利润的增长”。(刘龙芝)