

利用液化天然气卫星站冷能的 废旧橡胶低温粉碎装置

熊永强^{1,2}, 华 贲², 贾德民¹

(1. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:为充分利用液化天然气(LNG)卫星站的冷能和降低废旧橡胶低温粉碎生产精细胶粉的能耗,提出了一种利用 LNG 卫星站冷能的废旧橡胶低温粉碎装置。在该流程中,先利用冷媒在卫星站内与 LNG 换热回收冷能,然后再将低温冷媒输送到胶粉厂内与空气换热,生产的冷空气用于废旧橡胶的冷冻与粉碎。研究表明,相对空气涡轮膨胀机制冷法,利用 LNG 卫星站的冷能为橡胶低温粉碎装置节省用电 242.8 kWh/t,精细胶粉的生产能耗可降低 198.5 kWh/t。

关键词:LNG 卫星站;冷能利用;废旧橡胶;低温粉碎

中图分类号:F416.22;TH145.4

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)07-0059-04

Process of cold energy utilization of LNG satellite station in waste rubber cryogenic comminution

XIONG Yong-qiang^{1,2}, HUA Ben², JIA De-min¹

(1. College of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of the Ministry of Education,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to utilize sufficiently the cold energy of LNG satellite station and reduce the energy consumption of rubber powder through cryogenic comminution of waste rubber, a process of cold energy utilization of waste rubber cryogenic comminution in LNG satellite station is proposed. The process employs an intermediate cooling medium to recover cold energy by heat exchange with LNG in satellite station, then the low-temperature cooling medium is transported to rubber powder plant to produce chilling air which is used to waste rubber comminution. Compared with the traditional grinding method under refrigeration of air turbine, it could saved 242.8 kWh of power using cold energy of one ton of waste rubber cryogenic comminution in LNG of satellite station, and the power consumption of rubber powder reduces by 198.5 kWh/t.

Key words: LNG satellite station; cold energy utilization; waste rubber; cryogenic comminution

随着我国 LNG 产业的迅猛发展,近年来全国各地已经建成了 200 多座 LNG 卫星站。目前大型接收站的 LNG 冷能利用已经受到全社会的关注^[1],积极开展 LNG 冷能用于空气分离^[2]、轻烃分离^[3]、冷能发电^[4]等方面的研究。但是 LNG 卫星站由于冷能较小、而且冷量随时间频繁波动、利用经济性较差而未能得到迅速发展。目前,国内已有将 LNG 卫星站的冷能用于发电^[5]和低温冷库^[6]方面的研究报告,由于 LNG 冷能温位很低,直接用于冷库和发电的冷能利用效率较低,并且大部分 LNG 卫星站的供气规模在 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下,故冷库和冷能发电的规

模也会较小,规模效益较差。本文提出了一种将 LNG 卫星站的冷能用于废旧橡胶低温粉碎的工艺流程,为 LNG 卫星站的冷能利用提供了一种新的思路。

1 废旧橡胶低温粉碎

从 2002 年开始,我国橡胶消费量超过美国成为世界最大的橡胶消费国,与此同时也成为最大的废旧橡胶产生国之一,每年报废的轮胎接近 1 亿条,总的废旧橡胶达到 400 万 t^[7]。废橡胶在自然条件下很难降解,弃于地表或埋于土中几十年都不会变质

腐烂,露天堆放不仅占用大量土地,还极易滋生蚊虫、传播疾病,而且容易引发火灾,污染环境。与此同时,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^[8]。因此废旧橡胶的回收利用,对于充分利用再生资源,摆脱自然资源匮乏,减少环境污染等都非常重要^[9]。

废旧橡胶的回收利用主要有热能利用、再生胶生产和胶粉制备 3 种方法,为避免产生二次污染问题,发达国家普遍采取将废旧橡胶粉碎制成精细胶粉加以回收利用。胶粉直接或经改性后可广泛应用于橡胶塑料制品、化工建材、公路交通等领域^[10],不仅可以替代部分生胶,而且还可以提高产品的性能^[11]。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。常温粉碎法的优点是设备简单,处理量大,缺点在于制造的胶粉粒径较粗,获得精细胶粉的难度大。低温粉碎法是先利用冷却介质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将其制成精细胶粉^[10]。常用的冷却介质有液氮和涡轮膨胀制冷的低温空气,由于需要耗费大量的冷能用于橡胶的冷冻和粉碎,因此,能耗成本较高。液氮冷冻法和空气涡轮膨胀冷冻法的经济性比较如表 1 所示。

表 1 低温粉碎法技术经济指标对比

	液氮冷冻法	空气涡轮冷冻法
万吨设备投资/万元	4000	2000
生产成本/元·t ⁻¹	6000	4000
能耗/kWh·t ⁻¹	1100	900
人工/人·班 ⁻¹	22	22
经济效益/元·t ⁻¹	负数	负数

从表 1 中可见,由于能耗成本较高,采用液氮和空气涡轮制冷的低温粉碎法基本无经济效益。因此,将 LNG 卫星站的冷能用于废旧橡胶的冷冻与粉碎可以大幅降低精细胶粉的生产成本,节省大量的能耗,增强废旧橡胶低温粉碎生产精细胶粉项目的经济可行性,促进废旧橡胶资源的循环利用。

2 LNG 冷 ■ 分析

LNG 成分是以甲烷为主,包括氮、乙烷、丙烷等组分的低温液体混合物。LNG 与外界环境存在着温度差和压力差,其物理 ■ 分为压力 p 下由热不平衡

引起的冷 ■ $e_{x,th}$ 和环境温度下由压力不平衡引起的压力 ■ $e_{x,p}$ 两部分^[12],即:

$$e_x(T, p) = e_{x,th} + e_{x,p} \quad (1)$$

其中:

$$e_{x,th} = e_x(T, p) - e_x(T_0, p) \quad (2)$$

$$e_{x,p} = e_x(T_0, p) - e_x(T_0, p_0) \quad (3)$$

假定 LNG 全部由甲烷组成,热力学方法采用 Peng-Robinson 方程,利用 Aspen Plus 软件计算出不同气化压力下 LNG 的压力 ■ 和冷 ■ 的变化曲线如图 1 所示。从图 1 可知,常压的 LNG 经泵增压至不同压力下气化,其物理 ■ 变化很小,压力 ■ 随着气化压力增大而增加,而冷 ■ 则随着压力增大而减小。在大型 LNG 接收站内,LNG 的气化压力均在 6.0 MPa 以上,广东大鹏 LNG 的气化压力达到了 10.5 MPa。而在 LNG 卫星站,LNG 通常经空气气化器加热气化,气化压力一般在 0.7 ~ 0.8 MPa。由于其压力较低,所以卫星站中单位质量 LNG 的冷 ■ 比大型接收站的 LNG 更大。

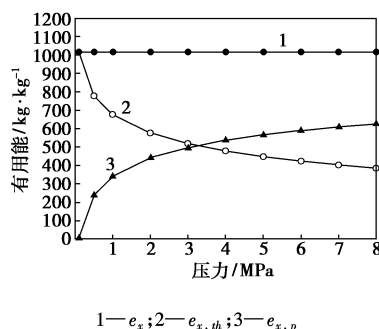


图 1 LNG 冷 ■ 随系统压力的变化
($T_0 = 288.15 \text{ K}$)

3 利用 LNG 卫星站冷能的废旧橡胶低温粉碎工艺

现有的废旧橡胶低温粉碎工艺一般采用液氮或涡轮膨胀制冷的低温空气作为橡胶的冷却介质。虽然空分装置可以利用 LNG 生产液氮,但是卫星站的 LNG 气化量较小,而且昼夜波动幅度很大,所以不适合利用 LNG 卫星站的冷能来建立空分装置。而且普通橡胶的玻璃化温度在 -105°C 以上,一般将其冷却至 -80°C 左右就脆化变硬了,利用 -196°C 的液氮来冷冻橡胶,冷 ■ 损失大,能耗高。同时,考虑到 LNG 属于易燃易爆的物质,利用过程的安全性要求很高,需要避免 LNG 与空气直接换热,而且从消防安全和掌控 LNG 的气化供气等方面考虑,最好不要将 LNG 输送到卫星站外进行冷能利

用。参考空气涡轮膨胀制冷法,本文提出了如图2所示利用LNG卫星站冷能的废旧橡胶低温粉碎装置。

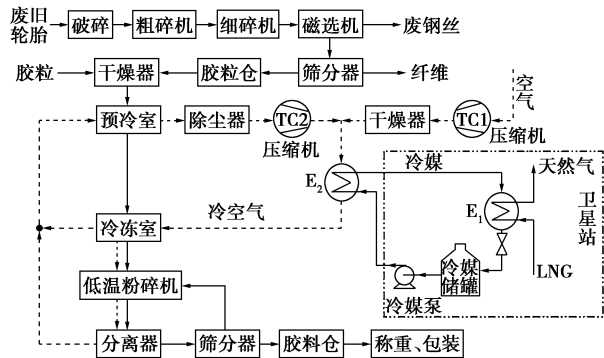


图2 LNG卫星站冷能用于废旧橡胶低温粉碎的工艺流程图

由图2可知,在该工艺中,废旧轮胎经初步破碎成一定粒度的胶粒后,经磁选将废钢丝分离出来,再经筛分和干燥后送到预冷室进行初步降温,然后送到冷冻室冷冻,冷冻脆化后的胶粒在低温粉碎机中粉碎。由于LNG的可燃性,该流程采用冷媒作为介质在卫星站内经换热器 E_1 回收LNG的冷能,然后由冷媒泵将低温冷媒输送到胶粉厂进行冷能利用;空气经压缩机TC1增压和分子筛干燥后在换热器 E_2 回收冷媒的冷能,空气温度降低至 -100°C 以下,然后输送到冷冻室和低温粉碎机中用于胶粒的冷冻和粉碎。从冷冻室和低温粉碎机中出来的空气温度仍然较低,可用于胶粒的预冷;空气温度升高至 0°C 以上后,再经除尘器脱除粉尘,然后经压缩机TC2增压又返回换热器 E_2 中与冷媒换热,形成冷能利用循环。该工艺操作灵活,当LNG的气化量随时间波动时,则通过调节冷媒泵来调节与LNG换热的冷媒量,多余的冷媒则储存在冷媒储罐中。空气可以循环利用,但在传输利用环节会损失一部分,故需要补充部分新鲜空气。

在该工艺中,冷媒的作用是将LNG的冷能传递给空气,现有的冷媒主要有碳氢化合物和氯氟烃2类,几种常用的冷媒及其物理性质见文献[13]。碳氢化合物属天然工质,具有臭氧层消耗潜能(ODP)为零,全球变暖潜能(GWP)值也很小,凝固点低,与水不起化学反应,不腐蚀金属,不需要化工合成,可直接从石油天然气等化工流程中提取,容易获得,价格便宜等优点;缺点就是该化合物具有可燃性,不能直接与空气换热。氯氟烃的优点是毒性较低,不燃,无爆炸危险,但需要通过人工合成,其价格较碳氢化

合物高,而且此类物质还会造成臭氧层破坏和温室效应等环境问题,目前多数国家限制并规定了氯氟烃的使用年限。因此,为了冷能利用安全,只能选用中氯氟烃作为冷媒。同时为了防止冷媒在换热过程中凝固,冷媒需要具有较低的凝固温度,卫星站中LNG进入气化器的温度一般在 $-130.0\sim-150.0^\circ\text{C}$,故一般要求冷媒的凝固点低于 -150.0°C 。适合作为冷媒的氯氟烃有二氟一氯甲烷(R22)和二氟二氯甲烷(R12),目前R12已经明令禁止使用,可以选择R22作为冷媒。

4 应用实例分析

某LNG卫星站,每天的供气量约为 $80\,000\text{ m}^3$,假定LNG组成全为甲烷,则平均每小时的气化量约 $3\,333.3\text{ m}^3$ (约 2.24 t/h)。采用图2所示的工艺流程,将卫星站的LNG冷能用于废旧橡胶的低温粉碎,生产精细胶粉。LNG的冷能利用率按照60%计算,即平均每小时利用 1.34 t LNG携带的冷能。LNG的气化压力为 0.8 MPa ,温度为 -135°C ,冷空气用于橡胶低温粉碎过程的压降取 4 kPa ,冷媒选用R22。利用Aspen Plus模拟软件计算,结果如表2所示。

表2 换热器 E_1 和 E_2 中各物流的模拟计算结果

换热器	参数	冷物流		热物流	
		LNG	R22	R22	空气
E_1	流量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	1.34	6.15		
	入口压力/MPa	0.80	1.60		
	入口温度/ $^\circ\text{C}$	-135.0	34.2		
	出口压力/MPa	0.75	1.55		
	出口温度/ $^\circ\text{C}$	8.5	-125.0		
	参数	R22	空气		
E_2	流量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	6.15	5.73		
	入口压力/MPa	1.55	0.14		
	入口温度/ $^\circ\text{C}$	-125.0	62.7		
	出口压力/MPa	1.50	0.13		
	出口温度/ $^\circ\text{C}$	34.2	-115.0		

从表2结果可知,利用LNG卫星站冷能共可获得 -115°C 的冷空气 5.73 t/h (约 $4\,980\text{ m}^3/\text{h}$),冷空气携带的冷能约 184.1 kW ,相当于 1.64 t/h 液氮的冷能。按照生产 1.0 t 精细胶粉需要消耗 1.0 t 液氮的冷能计算,则 5.73 t/h 、 -115°C 的冷空气可以满足生产 1.64 t/h 精细胶粉的需要。每年运行时间按照 $8\,000\text{ h}$ 计算,可年产 1.31 万 t 精细胶粉,每年约可处理 90 万条 废旧轮胎。如果采用空气涡轮膨胀法

来生产 5.73 t/h、-115℃的冷空气,则制冷的能耗约为 386.7 kW,而采用图 2 所示的工艺流程,压缩机 TC1、TC2 和冷媒泵的功耗约为 61.4 kW。故采用 LNG 卫星站的冷能相比空气涡轮膨胀制冷法可节省用电约 325.3 kW,平均利用 1.0 t LNG 可省电 242.8 kWh,一年共计可节省用电 2.60×10^6 kWh,折算每吨精细胶粉的生产能耗可降低 198.5 kWh,节能效果显著。直接利用 LNG 卫星站冷能的废旧橡胶低温粉碎装置,相比采用空气涡轮膨胀制冷法,需要增加低温换热器 E_1 和 E_2 、冷媒泵,以及冷媒储罐和保温输送管道,但是不需使用透平膨胀机制冷,工程投资与空气涡轮膨胀法相差不多。

5 结语

随着中原天然气液化工厂、新疆广汇 LNG 生产装置以及广东、福建等地的大型 LNG 接收站的建成投产,可作为 LNG 卫星站稳定的资源供应基地。LNG 卫星站不仅可以作为天然气主干网周边地区的天然气下游市场的开拓者,而且可以作为天然气管网高峰供气 and 事故调峰的备用气源站,保障管网的供气安全,所以 LNG 卫星站在我国具有很好的发展前景。LNG 卫星站广泛分布于全国各地,利用 LNG 卫星站的冷能建设废旧橡胶低温粉碎装置,可以就近处理当地的旧轮胎等废橡胶,而不必将其运输到沿海地区的大型 LNG 接收站来集中处理,可节省大量运输环节的费用。从实例分析可知,利用一个 LNG 卫星站的冷能约可处理 90 万条废旧轮胎,则利用 100 座 LNG 卫星站的冷能就可处理 9 000 万条,基本相当于全国一年产生的废轮胎量,环保意义重大。因此,将 LNG 卫星站的冷能用于废旧橡胶的低温粉碎,不仅可以节约能源,增加卫星站的经济效

益,而且可以降低精细胶粉的生产成本,促进橡胶资源的循环利用,符合建设节约型社会的需要。

参考文献

- [1] 华贲. 大型 LNG 接收站冷能利用[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 10-15.
- [2] 陈则韶, 程文龙, 胡芃. 一种利用 LNG 冷量的空分装置新流程[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 913-916.
- [3] 熊永强, 李亚军, 华贲. 液化天然气冷量利用与轻烃分离集成优化[J]. 现代化工, 2006, 26(3): 50-53.
- [4] Sun Wei, Hu Peng, Chen Zeshao, et al. Performance of cryogenic thermoelectric generators in LNG cold energy utilization[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 789-796.
- [5] 徐文东, 尹华, 华贲, 等. 利用 LNG 低温用的开式工质循环发电技术[J]. 现代化工, 2007, 27(增刊 2): 428-433.
- [6] 唐贤文, 杨泽亮. LNG 卫星站中的冷能用于冷库设计的探讨[J]. 中山大学学报论丛, 2007, 27(2): 88-91.
- [7] 方芳, 周勇敏, 张继. 废轮胎回收制胶粉及其应用进展[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(1): 164-168.
- [8] 于清溪. 中国橡胶工业崛起之思考[J]. 现代化工, 2006, 26(6): 1-6.
- [9] 吕百龄, 刘登祥. 实用橡胶手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [10] 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.
- [11] Scaffaro R, Dintcheva N, Tzankova, Nocilla M A, et al. Formulation, characterization and optimization of the processing condition of blends of recycled polyethylene and ground tire rubber: Mechanical and rheological analysis[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 90: 281-287.
- [12] Liu Hongtan, You Lixin. Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40: 1515-1525.
- [13] 王松岭, 论立勇, 谢英柏, 等. 碳氢化合物在制冷工质替代过程中的应用[J]. 天然气工业, 2005, 25(12): 121-124. ■

《现代化工》被评为“RCCSE 中国权威学术期刊”

在武汉大学中国科学评价研究中心(RCCSE)与武汉大学图书馆和信息管理学院联合研发完成的《中国学术期刊评价研究报告》(2009—2010)中,《现代化工》被评为“RCCSE 中国权威学术期刊”。

该课题组经过对我国万种期刊的大致浏览、反复比较和研究,从中挑选出了 6 170 种纯学术性期刊和半学术性期刊参与评价。专家们首先为“权威期刊”和“核心期刊”界定概念,所谓“权威期刊”是指刊载基金论文数量多,被读者利用次数高、广受网络用户点击、二次文献转载篇数多或被国外重要数据库收录多的期刊,它们基本上代表了该学科领域内的学术前沿;而“核心期刊”则指那些发表基金论文数量相对较多、被读者利用次数较高、网络用户点击较多、二次文献转载篇数较多或被国外重要数据库收录较多的那

些期刊,它们刊载的学术论文学术影响力较高,是该学科领域内主要成果的传播载体。研究人员将把在各学科期刊排行榜中排在最前面的 5% 的期刊定为“权威期刊”,排在前面 6%~20% 的为“核心期刊”,权威期刊是核心期刊中的“核心”,是最重要的核心期刊,在学术界与科研人员心目中享有权威地位和最高学术水平。

该评价中心系统,采用定量评价与定性分析相结合的方法,构建了科学、合理的多指标评价体系,得出了 65 个学术期刊排行榜,包括分学科的 61 个排行榜和分类型的 4 个高校学报排行榜。这次共有 6 170 种中国学术期刊参与评价,计 1 324 种学术期刊进入核心区,其中权威期刊 311 种,核心期刊 1 013 种,约占总数的 21.46%。

——《现代化工》编辑部