

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.09.013

滚塑工艺对 IV 型储氢瓶 PE-HD 内胆性能的影响

向贵锋, 刘超, 赵瑞, 张习龙, 聂新羽, 柴枫, 马晨辉

(湖北三江航天江河化工科技有限公司, 湖北宜昌 444200)

摘要: 针对高压车载大容量 IV 型储氢气瓶塑料内胆工程化制备需求, 研制出 140L IV 型储氢气瓶高密度聚乙烯 (PE-HD) 内胆, 研究了滚塑成型加热温度及时间、滚塑设备主副轴转速比、冷却方式及时间等工艺参数对 PE-HD 内胆制品外观、力学性能的影响, 结果表明先预热后升温的两段式加热能保证 PE-HD 粉料充分熔融且不发生高温氧化, 制品外观无气泡等缺陷, 力学及缺口冲击强度优良; 随着主副轴转速比的增加, 内胆制品壁厚均匀性及表面气泡问题逐渐改善, 但过高的转速比易造成制品局部位置缺料; PE-HD 内胆制品的韧性和冲击强度与冷却速率呈正相关, 差示扫描量热曲线表明越温和的冷却方式, 降温过程时间越长, PE-HD 内胆试样的结晶度越大, 缓慢的降温过程可以使分子链更充分地排入晶格, 促进结晶; 先风冷后自然冷的两段式冷却方式能有效防止制品变形, 制备的内胆综合性能最佳, 其拉伸强度达 18.255 MPa, 断裂延伸率为 486.1%, 简支梁缺口冲击强度为 13.08 kJ/m², 为同类储氢气瓶塑料内胆研制及材料开发提供一定参考。

关键词: 储氢气瓶; 高密度聚乙烯; 塑料内胆; 滚塑工艺; 缺口冲击强度

中图分类号: TQ322.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)09-0077-06

Effect of Rotational Molding Process on Performance of PE-HD Liner of Type IV Hydrogen Storage Tank

Xiang Guifeng, Liu Chao, Zhao Rui, Zhang Xilong, Nie Xinyu, Chai Feng, Ma Chenhui

(Hubei Sanjiang Aerospace Jianghe Chemical Technology Co., Ltd., Yichang 444200, China)

Abstract : In view of the engineering preparation requirements of high-pressure vehicle large-capacity type IV hydrogen storage tank plastic liner, 140 L high-density polyethylene (PE-HD) inner liners were prepared, and the effects of heating temperature or time, rotational speed ratio of the equipment, cooling mode and cooling time on the appearance, mechanical properties of them were analyzed. The results show that the two-stage heating with preheating and then warming up could ensure the full melting of PE-HD powder without high temperature oxidation, and the appearance of the products without bubbles and other defects, mechanics and notched impact strength is excellent. With the increase of the main and secondary rotational speed ratio, the wall thickness uniformity and the surface bubble problems are gradually improved, but too high a ratio of speed is prone to cause the products of the lack of local position. The toughness and impact strength of PE-HD liners are positively correlated with the cooling rate, the differential scanning calorimetry curve show that the more mild cooling mode, the longer the cooling process, the greater the crystallinity of the PE-HD liner samples, the slow cooling process could make the molecular chain more fully discharged into the crystal lattice to promote crystallization. The first air-cooled and then naturally cooled in a two-stage cooling mode could prevent the products from being deformed, the liner prepared with the best overall performance, the tensile strength of prepared liner is 18.255 MPa, the elongation at break is 486.1%, and the notched impact strength of the simple beam is 13.08 kJ/m², which provide a certain reference for the development of plastic inner liner and material development for similar hydrogen storage cylinders.

Keywords : hydrogen storage tank ; high-density polyethylene ; plastic liner ; rotational molding process ; notched izod impact strength

通信作者: 刘超, 高级工程师, 主要研究方向为功能复合材料及高压储氢内胆材料及成型

收稿日期: 2023-06-29

引用格式: 向贵锋, 刘超, 赵瑞, 等. 滚塑工艺对 IV 型储氢瓶 PE-HD 内胆性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9): 77-82.

Xiang Guifeng, Liu Chao, Zhao Rui, et al. Effect of rotational molding process on the performance of PE-HD liner of type IV hydrogen storage tank[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9): 77-82.

氢能作为零碳的清洁能源,日益成为各国开发的新能源,广泛应用于加氢站及车载储氢领域。目前,高压储氢容器已由全金属气瓶(I型瓶)发展为塑料内胆纤维全缠绕气瓶(IV型瓶)。其中I~III型瓶均为金属内胆,质量较大、成本较高、储氢密度低,质量储氢密度约为1%~1.5%^[1-2]。而IV型高压储氢气瓶因其储氢密度高、充氢速度快、成本低等优势,迅速成为目前国内外高压储氢的重要容器之一^[3-6]。塑料内胆作为IV型储氢瓶核心组成部分,承担着存储及阻隔氢气的作用^[7]。高密度聚乙烯(PE-HD)凭借较高的空气阻隔性,较高的熔体流动速率等性能成为内胆主要原材料之一。滚塑成型相比注塑及吹塑成型具有成型工艺简单、制品壁厚均匀、成型成本低等优势^[8]。滚塑成型工艺中,塑料随着模具转动进行剪切及自由跌落运动,在成型过程中经历快速熔融与冷却过程,可控工艺参数较少,使得内胆制品性能对滚塑工艺较敏感^[9-13]。塑料的结晶度及性能与其经历的热历史相关,故加热与冷却过程等工艺的控制能引起内胆制品性能较大的变化,因此,深入研究加热与冷却、转速比等工艺对IV型储氢气瓶塑料内胆制品性能的影响规律,寻找精确控制制品性能的方法有着重要的意义。

任月庆等^[14-15]研究了模压成型法和滚塑成型法对交联聚乙烯不同温度时的冲击性能与结构的影响,发现最内层制品的结构是影响低温落锤冲击性能的关键因素。温原等^[16-18]研究了不同冷却方式(水冷、风冷、自然冷和保温冷)及加热时间对滚塑级线型低密度聚乙烯的结晶性能和力学性能的影响,表明冷却系数和材料的结晶度及拉伸强度、弯曲和冲击性能有着良好的线性关系,滚塑成型存在最佳加工温度区间,且该区间位于凝结段。他还进行了滚塑制品表面气孔的影响因素研究,发现延长加工时间与提高加工温度利于减少表面气孔。Ramkumar等^[19]研究了冷却工艺对滚塑产品的冲击韧性的影响,结果表明较快的冷却速率利于提高产品的冲击韧性,但是文献并没有研究其对力学性能的影响。目前暂无文献报道滚塑成型工艺对IV型储氢气瓶塑料内胆制品力学性能的影响研究。

笔者采用模具分区控温技术的滚塑成型设备,完成模具各区域局部加热与冷却精确控制,成功制备140 L IV型储氢气瓶PE-HD内胆制品,并研究了加热工艺、滚塑设备主副轴转速比以及冷却工艺对

内胆制品力学及缺口冲击强度的影响,为70 MPa IV型储氢瓶塑料内胆的研制提供参考。

1 实验部分

1.1 原材料

滚塑级PE-HD粉料:熔点144 °C,密度0.963 g/cm³,熔体流动速率6.95 cm³/10 min,粉体流动性25 s/150 g,自制。

1.2 设备及仪器

电动缺口制样机:CRS-GPS24Z型,苏州亚诺天下仪器有限公司;

万能拉伸试验机:INSTRON 5967型,英斯特朗(上海)试验贸易有限公司;

简支梁缺口冲击试验机:XJJD-5型,承德市万塑检测仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:NETZSCH STA 449 F5型,德国耐驰有限公司;

滚塑成型机:电加热式,浙江本凡机械有限公司。

1.3 PE-HD 内胆制备

(1) 内胆制备方法。

采用PE-HD粉末制备塑料内胆,制备流程如图1所示。

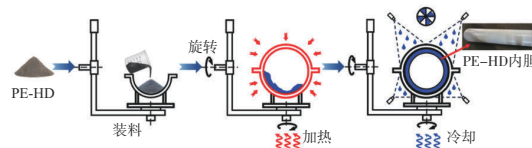


图1 PE-HD内胆制备示意图

(2) 滚塑工艺参数。

分别研究了加热、滚塑设备转速比及冷却等工艺对PE-HD内胆制品性能的影响,加热工艺参数见表1,其中加热温度为设置模具内空气温度。

表1 内胆加热工艺参数

内胆制品	工艺	封头处		直筒段		
PEND-01	A1	加热温度/°C	280		280	
		时间段/s	0~2 200		0~2 200	
	加热温度/°C	140	280	140	280	280
PEND-02	A2	时间段/s	0~600	600~2 200	0~600	600~2 200
		加热温度/°C	140	280	140	280
PEND-03	A3	时间段/s	0~1 200	1 200~2 200	0~1 200	1 200~2 200
		加热温度/°C	140	280	140	280

滚塑设备主副轴转速比参数设置见表2。其中转速比(S)定义为:

$$S = v_1:(v_2 - v_1) \quad (1)$$

式中: v_1 为主轴转速, v_2 为副轴转速。

表2 滚塑设备转速比

内胆制品	工艺	主轴转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	副轴转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	转速比
PEND-04	B1	6	10	3:2
PEND-05	B2	8	16	1:1
PEND-06	B3	10	40	1:3

加热阶段完成后即进入冷却阶段,冷却工艺参数见表3。

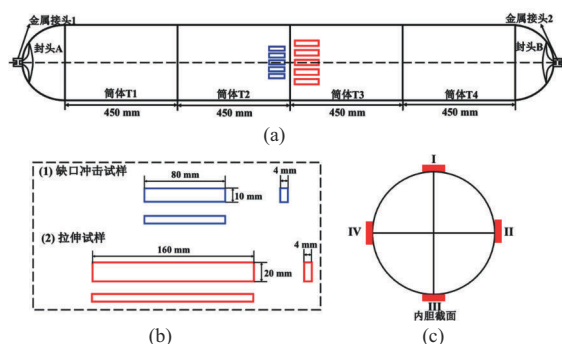
表3 冷却工艺参数

内胆制品	工艺	冷却方式	冷却时间/s
PEND-07	C1	风冷	1 800
PEND-08	C2	水雾冷	1 800
PEND-09	C3	风冷+自然冷	先风冷1 000 s,再自然冷800 s

1.4 样条制备及性能测试

(1) 测试样条制备。

各项性能测试样品取自自制140 L塑料内胆制品,样条采用手持切割机及铣床加工完成,取样方式如图2所示。



a—140 L内胆示意图;b—缺口冲击及拉伸试样图;c—内胆截面图

图2 PE-HD内胆性能测试取样位置示意图

缺口冲击试样经初加工后采用电动缺口制样机制备,选用A型刀具,进刀速率为30 mm/min,缺口深度2.0 mm。

(2) 性能测试。

拉伸强度和断裂伸长率参照GB/T 1040.2-2022,标距为80 mm,拉伸速率为10 mm/min,测试温度为23℃。

筒支梁缺口冲击强度参照GB/T 1043.1-2008,跨距为62 mm,摆锤能量2 J,A型缺口,测试温度为23℃。

DSC测试参照GB/T 19466.3-2004,氮气气氛,温度范围为28~250℃,升温速率10.0 K/min。

2 结果与讨论

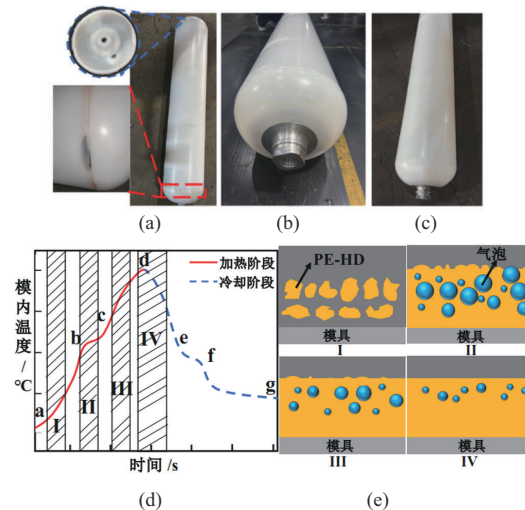
2.1 加热工艺对PE-HD内胆性能影响

研究了滚塑成型温度对PE-HD内胆力学及缺

口冲击强度影响,分别按照表1所述工艺制备PE-HD内胆,对内胆制品进行力学及缺口冲击强度测试,结果见表4及图3。

表4 不同加热工艺内胆制品性能

内胆制品	工艺	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	缺口冲击强度/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
PEND-01	A1	16.056	409.8	11.09
PEND-02	A2	18.279	492.4	13.73
PEND-03	A3	17.941	461.5	13.26



a—PEND-01内胆;b—PEND-02内胆;

c—PEND-03内胆;d—滚塑模内温度曲线;e—模内气泡图

图3 PE-HD内胆及滚塑模内温度曲线图

由表4及图3可知,工艺A1为快速加热模具直筒段与封头段,制备的PE-HD-01内胆表面存在气孔且合模线处存在焦烧黄变现象,力学及筒支梁缺口冲击强度较低。工艺A2与A3为分段式加热,先预热模具直筒段与封头处,再缓慢升温至指定温度,有利于粉末熔融,其中工艺A3预热时间较长,工艺A2制备的PEND-02内胆制品成型优良,力学及缺口冲击强度最优。

这是因为滚塑成型加热工序可分为三个阶段(图3d):第一阶段(即ab段)为模具与粉料开始受热至粉料开始熔融;第二阶段(bc段)为粉料开始熔融至完全熔融成液态流体,此阶段PE-HD粉料在模具内壁上以跌落及滑移形式滚动,当模内达到一定温度后,部分粉料融化吸收模具内热量,导致模内温度上升缓慢甚至短暂降低,随着时间的增加,粉料全部形成熔融态后,模具内温度稳定升高。该阶段存在大量气泡(图3d-II)。第三阶段(cd段)为PE-HD全部熔融后,模具继续加热至温度达到设定温度,此阶段的液态PE-HD黏性较大,几乎不流动,该阶

段需要严格控制温度以防PE-HD高温氧化,此阶段气泡逐渐减少。当采用工艺A1试验时,加热时间较长,粉料处于熔融态的时间长,粉料易降解,导致制品性能较差。而工艺A2分段式加热能一定程度上减缓了粉料的升温速率,预热工序使得粉料熔融更均匀,制品的外观、力学及冲击性能更优,工艺A3预热时间过长,使得bc段熔融时间明显压缩,粉料熔融不充分,最终导致制品外观及性能下降。

2.2 转速比对PE-HD内胆性能影响

分别按照表2所述转速制备PE-HD内胆,并测试力学及缺口冲击强度,结果见表5及图4所示。

表5 不同转速比内胆制品性能

内胆制品	工艺	转速比	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)
PEND-04	B1	3:2	16.916	280.2	8.08
PEND-05	B2	1:1	18.290	447.1	12.96
PEND-06	B3	1:3	18.395	440.5	13.21



(a) a—PEND-04; b—PEND-05; c—PEND-06

图4 不同转速比制备PE-HD内胆封头剖面图

由表5可知,随着滚塑设备主副轴转速比的增加,PE-HD内胆制品的力学及缺口冲击强度逐渐增加。由图4可知,PEND-04内胆封头处壁厚不均匀且有少量气泡,这是由于PE-HD粉料在模具内部以剪切运动和周期性跌落为主,当设备转速比较低,部分熔融的流动体与未融化的粉料黏附,形成粉料堆积,影响粉料原有运动轨迹及粉料流动性,造成局部位置厚度不均,故制品的力学及冲击性能较低。随着转速比的增加,内胆壁厚均匀性及气泡问题逐渐改善,PEND-05与PEND-06内胆无明显气泡,而PEND-06内胆金属接头处包裹不严,是因为转速太快导致金属接头处粉料流动量较少,故此内胆较薄,较多的粉料聚集在直筒段,直筒段壁厚且密实。

2.3 冷却工艺对PE-HD内胆性能影响

(1) 结晶度。

对不同冷却过程的内胆试样进行DSC法分析,其熔融曲线如图5所示。

结晶度(X_c)计算公式为:

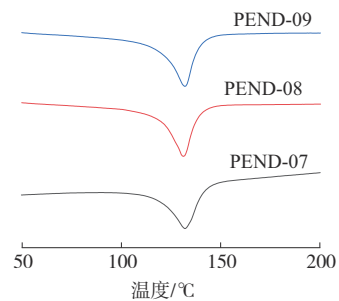


图5 不同冷却过程中内胆试样的DSC曲线

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \quad (2)$$

其中, X_c 为结晶度,%; ΔH_m 为试样熔融焓,J/g; ΔH_m^0 为PE-HD 100%结晶的理论熔融焓,查阅文献[20]可知其值为293 J/g。PE-HD内胆试样结晶度计算结果见表6。

表6 不同冷却工艺制备PE-HD内胆试样的结晶度

内胆制品	ΔH_m /(J·g ⁻¹)	结晶度/%
PEND-07	164.5	56.1
PEND-08	155.8	53.2
PEND-09	169.5	57.8

由表6可知,越温和的冷却方式,降温过程时间越长,PE-HD内胆试样的结晶度越大;水雾冷却速率较快,使得部分分子链来不及结晶即被冻结,内胆制品结晶度则较低;而在结晶温度下缓慢降温可以使分子链更充分地排入晶格,促进结晶过程。

(2) 拉伸及缺口冲击性能。

不同冷却过程的内胆试样拉伸及缺口冲击强度测试结果见表7及图6。

表7 不同冷却工艺内胆制品性能

内胆制品	工艺	冷却方式	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)
PEND-07	C1	风冷	19.109	347.1	9.42
PEND-08	C2	水雾冷	15.572	507.9	13.13
PEND-09	C3	风冷+自然冷	18.255	486.1	13.08



(a) a—PEND-07; b—PEND-08; c—PEND-09

图6 不同冷却工艺制备PE-HD内胆图

由表7可知,采用风冷冷却制备的PEND-07内胆拉伸强度较高,断裂延伸率与缺口冲击强度较

低;采用水雾冷却制备的PEND-08内胆拉伸强度较低,断裂延伸率与缺口冲击强度最高;采用风冷加自然冷却工艺制备的PEND-09内胆力学与缺口冲击性能综合最优。这是由于内胆制品冷却工序主要分为三个阶段(见图3c):第一阶段(de段)从模内最高温度冷却至熔触塑料开始结晶固化为止;第二阶段(ef段)从熔融塑料开始结晶固化至全部完成为止;冷却过程中,紧贴模具内壁的塑料层首先开始固化,此时适宜的冷却速率不仅能促进结晶,而且能减小内胆内外层温度差,提升制品成型效果。第三阶段(fg段)为内胆基本成型后,模具继续冷却至脱模温度;该阶段塑料层为固态,由于金属与聚乙烯导热系数相差较大,此时内胆金属接头与封头处存在较大温差,故该阶段模具需要较慢冷却速率以防出现金属接头与内胆脱黏及拉伸变形问题。

对于工艺C1,df段冷却速率适宜,内胆成型度良好,但fg段接头与内胆封头冷却速率相差较大,故出现脱黏现象。对于工艺C2,水雾冷却速率较快,粉料结晶较快,第三阶段金属接头与PEND-07内胆温差较大,脱模后出现内胆变形问题,且试制过程中发现内胆制品脱模较困难;对于工艺C3,df段采用风冷,冷却速率较慢,可以形成更完美的晶体结构,分子链排列更紧密,聚乙烯分子间作用力更强,内胆材料的结晶度较高,球晶尺寸大,制品的强度高,而韧性和抗冲击强度降低,故拉伸强度较高,断裂延伸率与缺口冲击强度较低。

3 结论

研究了滚塑成型工艺参数对以140 L PE-HD为代表的IV型储氢气瓶塑料内胆的力学及缺口冲击性能影响,形成以下结论:

(1)采用先预热后升温的典型两段式加热既能保证粉料充分熔融又能防止粉料高温氧化,制品力学及冲击强度优良。

(2)随着转速比的增加,内胆制品壁厚均匀性及表面微小气泡问题逐渐改善,但是过高的转速使得金属接头等结构复杂处流料减少,造成内胆封头处较薄。

(3)随着冷却速率的减小,PE-HD内胆制品的韧性和冲击强度降低;采用先风冷后自然冷的冷却方式能在初期促进材料结晶,后期减小接头与内胆材料温差,增加制品强度与防止制品变形。

参考文献

- [1] 赵保颀,薄柯,古纯霖,等.车载IV型储氢气瓶塑料内胆材料氢渗透特性研究[J].中国特种设备安全,2022,38(7):1-5.
Zhao Baodi,Bo Ke,Gu Chunlin,et al. Analysis of hydrogen permeation characteristics of plasticliner of type IV hydrogen storage cylinder on vehicles[J]. China Special Equipment Safety, 2022, 38 (7):1-5.
- [2] 陈泽鸿,黄淞,惠虎.金属内胆纤维环向缠绕储氢气瓶临界疲劳循环次数影响因素探究[J].化工设备与管道,2022,59(4):1-7.
Chen Zehong, Huang Song, Hui Hu. Research of influencing factors to critical fatigue cycle number for hydrogen storage cylinder made of metal and wound with fiber[J]. Process Equipment & Piping, 2022, 59(4):1-7.
- [3] Wang D L, Liao B B, Zheng J Y, et al. Development of regulations, codes and standards on composite tanks for on-board gaseous hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(40):22 643-22 653.
- [4] Abe J O, Popoola E. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(29):15 072-15 086.
- [5] Rivard E, Trudeau M, Zaghbi K. Hydrogen storage for mobility: A review[J]. Materials, 2019, 12(12):1973. DOI:10.3390/ma12121973.
- [6] 郑津洋,马凯,叶盛,等.我国氢能高压储运设备发展现状及挑战[J].压力容器,2022,39(3):1-8.
Zheng Jinyang, Ma Kai, Ye Sheng, et al. Development status and challenges of equipment for storage and transportation of high-pressure gaseous hydrogen in China[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(3):1-8.
- [7] 王修磊,杨卫民,谢鹏程.高压大容量IV型储氢瓶内胆滚塑成型工艺及装备[J].压力容器,2022,39(12):1-9.
Wang Xiulei, Yang Weimin, Xie Pengcheng. Rotational molding process and equipment for high-pressure and large-capacity type IV hydrogen storage tank liner[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(12):1-9.
- [8] 柯华,查志伟,郑斌,等. IV型储氢瓶用复合材料及制备工艺[J]. 纤维复合材料,2022,39(1):15-21.
Ke Hua, Zha Zhiwei, Zheng Xiao, et al. Composite materials for type iv hydrogen storage tanks and production technologies[J]. Fiber Composites, 2022, 39(1):15-21.
- [9] 郭超,吴显,刘方辉,等.滚塑成型工艺的现状及其发展[J].塑料,2010,39(6):105-107.
Guo Chao, Wu Xian, Liu Fanghui, et al. The development status and trends of rotational molding technology[J]. Plastics, 2010, 39 (6):105-107.
- [10] 刘圣军,田丰,杨荆泉,等.聚乙烯旋转模塑成型工艺条件的研究[J].塑料工业,2001,29(5):22-23.
Liu Shengjun, Tian Feng, Yang Jingquan, et al. Study on process conditions of polyethylene rotational molding[J]. China Plastics

- Industry, 2001, 29(5):22-23.
- [11] 苑东兴,刘少成,张超,等.冷却速率对齐鲁滚塑树脂结构和性能的影响[J].齐鲁石油化工,2012,40(4):282-286.
Yuan Dongxing, Liu Shaocheng, Zhang Chao, et al. Effect of cooling rate on structure and properties of OILU rotomolding resin [J]. QILU Petrochemical Technology, 2012, 40(4):282-286.
- [12] 郭德宇,毛现朋,温原.试验参数对滚塑制品低温冲击强度影响[J].工程塑料应用,2020,48(9):110-115.
Guo Deyu, Mao Xianpeng, Wen Yuan. Effects of test parameters on low temperature impact strength of rotomolded products[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9):110-115.
- [13] 王晓乐.交联聚乙烯滚塑成型工艺优化研究[D].北京:北京化工大学,2016.
Wang Xiaole. Optimization of rotational molding crosslinked polyethylene products[D]. Beijing: Beijing University of Chemical technology, 2016.
- [14] 任月庆,董侠,陈学连,等.成型方法对交联聚乙烯冲击性能与结构的影响[J].中国塑料,2017,31(10):83-88.
Ren Yueqing, Dong Xia, Chen Xuelian, et al. Effect of formation methods on impact performance and microstructures of cross-linked polyethylene[J]. China Plastics, 2017, 31(10):83-88.
- [15] 任月庆,董侠,陈学连,等.滚塑成型工艺对交联高密度聚乙烯低温冲击性能的影响[J].塑料工业,2017,45(9):38-42.
Ren Yueqing, Dong Xia, Chen Xuelian, et al. Effects of rotational molding process parameters on low temperature impact performance of crosslinked HDPE[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(9):38-42.
- [16] 温原,毛宪朋,丁学宁.冷却方式对滚塑制品结晶性能和力学性能的影响[J].工程塑料应用,2017,45(6):66-69.
Wen Yuan, Mao Xianpeng, Ding Xuening. Influence to crystalline property and mechanical property of rotomolding product by cooling method[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6): 66-69.
- [17] 温原,毛宪朋,汪永志.加热时间对滚塑制品性能的影响[J].塑料科技,2017,45(2):55-58.
Wen Yuan, Mao Xianpeng, Wang Yongzhi. Influence of heating time on properties of rotational molding product[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(2):55-58.
- [18] 温原,郭强.滚塑制品表面气孔的影响因素研究[J].工程塑料应用,2014(2):52-54.
Wen Yuan, Guoqiang. Influencing factors of rotomolding plastic parts surface pore[J]. Engineering Plastics Application, 2014(2): 52-54.
- [19] Ramkumar P L, Kulkarni D M, Chaudhari V V. Effect of cooling medium on fracture toughness of rotomolded product[C]//International Conference on Mechanical Engineering Design, 2016.
- [20] 张冬娜,丁楠,张兆,等. IV型瓶聚乙烯内胆材料氢渗透行为研究[J].新能源进展,2022,10(1):15-19.
Zhang Dongna, Ding Nan, Zhang Zhao, et al. Hydrogen permeation behavior of polyethylene liner for type IV vessel[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2022, 10(1):15-19.