

碳纳米管超细粉碎分级的特性研究

张明星^{1,2*}, 马小辉¹, 樊钦宇¹

(1.西南科技大学环境与资源学院, 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;
2.浮法玻璃新技术国家重点实验室, 安徽 蚌埠 340300)

摘要:为了制备超细碳纳米管粉体, 利用机械磨和气流磨对碳纳米管粉体进行超细粉碎, 通过调控设备运行时分级机和引风机的转速, 对不同运行参数下制备的超细碳纳米管的粒度、能耗、形貌特征进行测试与分析。研究发现, 常温下气流磨分级机转速在 2 100~7 200 r/min 时, 所制备的碳纳米管细粉粒度 d_{50} 在 10.127~2.540 μm ; 高温(200 $^{\circ}\text{C}$)下气流磨转速在 4 800~6 000 r/min 时, 所制备的碳纳米管细粉粒度 d_{50} 在 5.061~2.831 μm 。机械磨风量在 339.757~688.903 m^3/h 时, 所制备的碳纳米管细粉粒度 d_{50} 在 4.892~11.443 μm 。当粉碎到相同粒度 d_{50} 分别为 5、10 μm 时, 机械磨的产能分别为气流磨的 1.6、2.1 倍, 而气流磨的单位吨能耗分别为机械磨的 3、3.9 倍。机械磨粉碎后的碳纳米管颗粒粒度明显减小, 大多呈规则形状; 气流磨粉碎后的碳纳米管颗粒粒径相对于机械磨粉碎后的颗粒粒度明显减小, 大多呈无规则形状。因此, 在工业生产中, 综合考虑粉碎的粒度、能耗和形貌特征, 可以选择机械磨进行粉碎, 通过选择恰当的运行参数, 既能满足粒度要求, 又能实现节能的目的。

关键词:碳纳米管; 超细粉碎; 粒度; 能耗; 形貌

中图分类号: TB44

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)02-0236-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.02.047

Characteristics of carbon nanotube ultrafine grinding and classification

ZHANG Ming-xing^{1,2*}, MA Xiao-hui¹, FAN Qin-yu¹

(1.Key Laboratory for Treatment and Resource Utilization of Solid Waste of the Ministry of Education, School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2.State Key Laboratory of New Technology for Float Glass, Bengbu 340300, China)

Abstract: Carbon nanotubes powder is ultra-finely pulverized by mechanical mill and jet mill respectively to prepare ultrafine carbon nanotubes powder. Through adjusting the rotating speed of the classifier and the induced draft fan when the equipment runs, ultrafine carbon prepared under different operating parameters is controlled. The particle size, energy consumption, and morphological characteristics of the nanotubes are tested and analyzed. It is found that the particle size d_{50} of ultrafine carbon nanotubes powder is in the range of 10.127~2.540 μm when it is prepared at room temperature and the jet mill classifier rotates at a speed of 2 100~7 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. The d_{50} is in the range of 5.061~2.831 μm when the preparation temperature is at 200 $^{\circ}\text{C}$ and the rotating speed of jet mill classifier is between 4 800 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ and 6 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. The d_{50} is in the range of 4.892~11.443 μm when the air volume of mechanical mill is in the range of 339.757~688.903 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$. As the d_{50} of nanotube powder reaches 5 μm and 10 μm , the productivity of mechanical mill needs to be 1.6 times and 2.1 times respectively that of jet mill, while the energy consumption per ton of the jet mill is 3 times and 3.9 times respectively that of the mechanical mill. The particles of the carbon nanotube become smaller after mechanical milling and most of them have regular shapes. The particles of carbon nanotubes after jet milling have an obviously smaller size than that after mechanical milling, and most of them are in irregular shapes. By comparing particle size, energy consumption and morphological characteristics, a mechanical mill is suggested for crushing carbon nanotubes in industrial production. Through selecting appropriate operating parameters, mechanical mill can meet the requirement in particle size and achieve the purpose of energy saving.

Key words: carbon nanotubes; ultrafine grinding; particle size; energy consumption; morphology

碳纳米管是由石墨烯片同轴卷曲而成的新型纳米碳材料, 按照石墨烯片层数不同, 可分成单壁碳纳米管和多壁碳纳米管^[1]。碳纳米管的长度在几微米到数毫米之间, 长径比一般在 1 000 以上^[2]。碳纳米管不仅具有一般纳米粒子的量子效应, 还具有密度非常小、长径比高、比表面积大、机械强度高、电导率高和耐热性好等特点, 表现出特殊的机械、物理和化学性能^[3-5]。近年来, 随着人们对碳纳米管的

深入研究, 由于独特的结构、物理化学特性和机械特性而日益受到关注, 碳纳米管被广泛应用于环境科学、材料工程、电子、通信、化工、航空和航天、复合材料、能源方面、医疗及生物工程、催化储氢、二次电池、传感器及超级电容器等领域^[6-9]。

目前, 制备碳纳米管的工艺多种多样, 并且已经实现了功能化、填充、掺杂和化学改性等。碳纳米管合成有 3 个关键要素: 碳源、热源及金属催化剂颗

收稿日期: 2021-03-20; 修回日期: 2021-12-08

基金项目: 浮法玻璃新技术国家重点实验室开放基金项目(2018KF04); 国家自然科学基金项目(11802255)

作者简介: 张明星(1982-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事气流粉碎、气流分级技术及暖通空调、通风防尘等方面设备的研究开发, 通讯联系人, 13778149628@139.com。

粒^[10]。经过多年的研究和发展,碳纳米管的制备技术越来越完善。当前,制备碳纳米管的主要方法有电弧放电法、激光烧蚀法、化学气相沉积法以及火焰法等。黄瑶等^[11]以一次电弧放电合成的粗制单壁碳纳米管为碳源,通过二次电弧放电的方法制备了平均直径更小、直径分布范围更窄的单壁碳纳米管,约为1.36 nm。李亚娟等^[12]利用改进的浮动催化化学气相沉积法制备了直径可控的多壁碳纳米管。然而,无论通过何种方法制备的碳纳米管中,总会存在着其他的杂质,如金属催化剂颗粒、石墨碳碎片和碳纳米颗粒等^[13]。这些杂质混杂在碳纳米管中,导致了碳纳米管的研究利用受到限制。

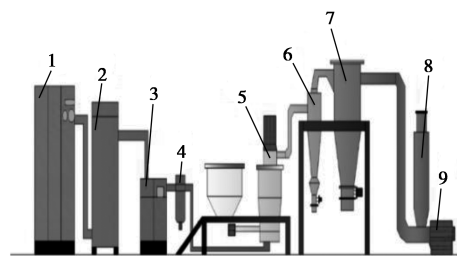
在碳纳米管超细粉体的制备工艺中,很难见到气流磨和机械磨制备碳纳米管超细粉体的文献,而其他的碳纳米管粉碎方法主要以固相剪切碾磨研磨为主^[14],制备的粉体平均粒径在75 μm左右,能耗高,不能满足碳纳米管的应用要求。分级式机械磨和气流磨的发展为制备微米及亚微米级超细粉体提供了一种可行的方法^[15]。超细粉碎技术是通过一系列的加工工艺,利用特殊的设备对物料进行碾磨、冲击、剪切等,将粒径在5~10 mm的物料加工至粒径为1~10 μm的微细粉体,从而使粉碎后的产品能够更好地被利用。

拟采用机械磨和气流磨(常温和高温条件下)对碳纳米管粉体进行超细粉碎,利用激光粒度仪、扫描电子显微镜(SEM)对粉碎后的碳纳米管超细粉体进行分析测试,研究粉碎后的碳纳米管的颗粒特性及整个工艺的能耗,对工业生产中碳纳米管高效、节能的超细粉碎具有指导意义。

1 实验装置与方法

1.1 实验设备与原理

图1为气流磨(LNJ-36A型,绵阳流能粉体设



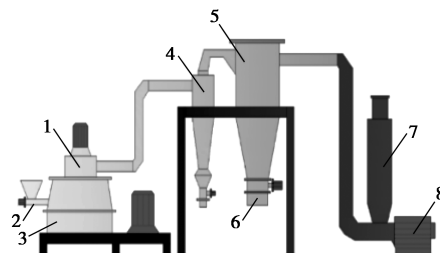
1—空气压缩机;2—空气储气罐;3—冷冻干燥机;
4—精密过滤器;5—涡轮气流分级机;6—旋风收集器;
7—高效布袋收集器;8—消音器;9—高压引风机

图1 气流磨系统

备有限公司)粉碎分级系统,主要由气源系统(空气压缩机、空气储气罐、冷冻干燥机)、粉碎分级系统(粉碎主机、涡轮气流分级机)、收集系统(旋风除尘器、袋式除尘器、引风机)3大部分组成。该系统分级机、引风机的转速均可通过上位机、可编程逻辑控制器(PLC)等一系列自动化硬件设施及软件程序进行自动化控制与实时监控。

工作原理:气流磨是利用喷嘴形成的高速气流带动物料,使物料达到音速并在气流的交汇点相互碰撞,实现超细粉碎。利用分级机将粉碎后达到粒度要求的细颗粒分离出来,不满足粒度要求的粗颗粒返回继续粉碎。

图2为机械磨(LNI-90A,绵阳流能粉体设备有限公司)粉碎分级系统,主要由粉碎分级系统(粉碎主机、涡轮气流分级机)和收集系统(旋风除尘器、滤筒除尘器、引风机)2大部分组成。该系统对主机、分级机、引风机的转速以及粉碎粒度均可通过可编程逻辑控制器(PLC)进行调节和实时监控。



1—涡轮气流分级机;2—螺杆加料机;3—粉碎主机;
4—高效旋风收集器;5—高效滤筒收集器;6—高气密性下料阀;
7—消音器;8—高压引风机

图2 机械磨系统

工作原理:机械磨是利用内置的高速旋转的锤头对物料进行撞击,使物料与锤头和衬板之间发生碰撞,实现超细粉碎。利用分级机将粉碎后达到粒度要求的细颗粒分离出来,不满足粒度要求的粗颗粒返回继续粉碎。

1.2 实验方法

本研究选用粒度 $d_{90} = 38.247 \mu\text{m}$, $d_{50} = 21.198 \mu\text{m}$ 的碳纳米管(中国科学院成都有机化学有限公司)作为实验材料,利用机械磨和气流磨分别对碳纳米管粉体进行超细粉碎。通过调节气流磨分级机转速和机械磨的风量来控制粉碎后碳纳米管的粒度、产能、能耗等。利用风速仪(Swema Air50,瑞典斯威玛公司)、激光粒度仪(Mastersizer 3000,英国马尔文仪器有限公司)、扫描电子显微镜(EVO18,德国蔡司仪器公司)等测试仪器对粉碎后的碳纳米管

粒度、形貌特征进行分析测试,对比研究气流磨和机械磨的粉碎效果。为了研究不同参数的影响规律,实验采用单一变量原则。

(1) 气流磨粉碎碳纳米管实验

本实验使用图 1 所示的气流磨粉碎分级系统,实验中保持主机和引风机转速不变,通过改变分级机的转速进行分级机转速对粒度、产能、能耗的影响实验。常温条件下,选取主机转速为 3 000 r/min,引风机转速 1 920、2 040 r/min,分级机的转速分别为 2 100、2 400、3 600、4 800、6 000、7 200 r/min 进行对比实验。在高温(200℃)条件下,选取主机转速 3 000 r/min,引风机转速 1 920、2 040 r/min,分级机的转速分别为 4 800、6 000 r/min 进行对比实验。

(2) 机械磨粉碎碳纳米管实验

本实验采用图 2 所示的机械磨粉碎分级系统,实验在常温条件下进行,在保持主机和分级机转速不变的条件下,通过改变引风机的转速控制系统风量,研究系统风量对粉碎的粒度、能耗和产能的影响规律。常温条件下,选取主机和分级机转速为 3 000 r/min,引风机的转速分别为 1 800、4 800 r/min,研究系统风量对粉碎的粒度、能耗和产能的影响规律。

2 实验结果与讨论

2.1 粉碎与分级

采用 $d_{90} = 38.247 \mu\text{m}$, $d_{50} = 21.198 \mu\text{m}$ 的碳纳米管作为原料,在保持气流磨粉碎主机和引风机转速不变的条件下,分别在常温和高温(200℃)条件下,通过调节分级机转速控制粉碎后的碳纳米管的粒度和产能;在保持机械磨粉碎主机和分级机转速不变的条件下,通过调节引风机转速来控制粉碎后的碳纳米管的粒度和产能。具体参数见表 1 和表 2。

表 1 气流磨的运行参数

引风机/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	风量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	成品粒度/ μm		产能/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	备注
		d_{50}	d_{90}		
2100	417.577	10.127	26.379	6.0	气流磨,常温
2400	413.705	8.594	23.168	6.0	
3600	412.164	4.990	13.897	4.6	
4800	411.394	4.448	11.156	3.8	
6000	395.986	3.324	9.304	2.8	
7200	345.910	2.540	7.014	2.6	
4800	413.705	3.986	10.567	4.3	气流磨,高温
6000	366.741	2.831	8.302	3.6	

表 2 机械磨的运行参数

分级机/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	风量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	成品粒度/ μm		产能/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	备注
		d_{50}	d_{90}		
3000	339.757	4.892	9.887	7.5	机械磨
3000	688.903	11.443	20.746	12.6	

由表 1 可知,常温条件下,保持粉碎主机和引风机转速不变,引风机转速为 1 920 r/min,分级机的转速从 2 100 r/min 增加到 4 800 r/min,碳纳米管细粉成品粒度 d_{50} 从 10.127 μm 降低到 4.448 μm ,产量降低 36.67%;当引风机转速增大到 2 040 r/min,分级机的转速从 6 000 r/min 增大到 7 200 r/min 时,碳纳米管细粉成品粒度 d_{50} 从 3.324 μm 降低到 2.540 μm ,产能降低 7.14%。在保持分级机和引风机转速不变的条件下,温度升高会导致成品粒度降低,而产能会增加。

离心分级机的切割粒径公式^[16]为:

$$d_c = (k/n) \sqrt{Q/\rho_s} \quad (1)$$

式中, d_c 为分级机的切割粒径, μm ; n 为分级轮的旋转速度, r/min; Q 为通过分级轮的气体流量, m^3/min ; ρ_s 为颗粒密度, g/cm^3 ; k 为与分级轮结构尺寸、形状、空气黏度等相关的系数。

粉体切割粒径与分级机转速呈反比,当引风机的转速一定,即风量一定时,随着分级机转速增大,粉体的切割粒径变小,实验所得结果与理论完全符合,这是因为碳纳米管粉体颗粒受到叶片的强制作用力增强,使得颗粒获得的离心速度变大,较粗的颗粒就会碰撞到壁面,减小了粗颗粒通过分级机的机率,因此碳纳米管的粒度随着分级机转速的增加而减小,产能也随之降低。

由表 2 可知,在主机和分级机转速一定的条件下,引风机的转速从 4 800 r/min 降低到 1 800 r/min,碳纳米管细粉成品粒度 d_{50} 从 11.443 μm 降低到 4.892 μm ,产能降低 40.48%。

根据离心分级机的切割粒径公式(1),粉体切割粒径与气体流量呈正比,当分级轮转速一定,随着引风机转速的降低,导致通过分级轮的气体流量减小,粉体的切割粒径减小,实验所得结果与理论分析完全符合。这是因为随着气体进入分级轮的粉体越少,碳纳米管粉体颗粒受到叶片的强制力作用越强,使得颗粒获得的离心速度变大,较粗的颗粒就会碰撞到壁面,减小了粗颗粒通过分级机的机率,因此碳纳米管的粒度随着引风机转速的减小而减小,产能也随之降低。

2.2 能耗分析

根据粉碎主机、引风机和分级机运行时的电流可折算生产每吨碳纳米管细粉的能耗,其中气流磨总装机功率 59 kW,实际功率 47.2 kW;机械磨总装机功率 31.5 kW,实际功率 25.2 kW。实验结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 气流磨的能耗

成品粒度 $d_{50}/\mu\text{m}$	分级机 电流/A	引风机 电流/A	能耗/ ($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$)	备注
2.540	1.5	7.0	18154	气流磨,常温
3.324	1.6	7.6	16857	
4.448	2.1	7.5	12421	
4.990	3.1	7.5	10261	
8.594	3.5	7.2	7867	
10.127	4.6	7.7	7867	
2.831	1.8	7.5	13111	气流磨,高温
5.016	2.0~2.1	7.3	16857	

表 4 机械磨的能耗

成品粒度 $d_{50}/\mu\text{m}$	分级机 电流/A	引风机 电流/A	能耗/ ($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$)	备注
4.892	4.6~5.0	7.0~7.6	3360	机械磨
11.443	3.2~3.5	8.4~8.7	2000	

由表 3 可知,在常温条件下,气流磨生产每吨 d_{50} 为 2.540 μm 的碳纳米管超细粉的单位吨能耗为 16 857 kWh,当成品粒度 d_{50} 增大到 10.127 μm 时,单位吨能耗为 7 867 kWh;高温条件下,生产每吨 d_{50} 为 2.831 μm 的碳纳米管超细粉的单位吨能耗为 13 111 kWh,当成品粒度 d_{50} 增大到 5.016 μm 时,单位吨能耗为 16 857 kWh。可以看出,随着粉碎粒度的减小,能耗会增大。机械磨生产每吨 d_{50} 为 4.892 μm 的碳纳米管细粉的单位吨能耗为 3 360 kWh,当成品粒度 d_{50} 增大到 11.443 μm 时,单位吨能耗为 2 000 kWh。

根据 Rittinger 于 1867 年提出了粉碎能耗与新生表面积呈正比的“新表面说”^[17],则粉碎能耗为:

$$E = C_R(1/d_2 - 1/d_1) \quad (2)$$

式中, E 为能量,J; d_1 为粉碎前颗粒的尺寸,mm; d_2 为粉碎后颗粒的尺寸,mm; C_R 为粉碎效率系数。

随着粉碎的尺寸减小,能耗增大,与实验所得结果完全相符。这是因为粉碎的粒度越小,所需的分级轮转速越大,单位时间内所需的能量就越多,因此能耗就会增加。

对比气流磨和机械磨的能耗,结果表明,在粉碎到

相同粒度 $d_{50}=5 \mu\text{m}$ 时,气流磨的能耗为 10 261 kWh,而机械磨的能耗为 3 360 kWh,气流磨单位吨能耗为机械磨的 3.1 倍;在粉碎到相同粒度 $d_{50}=10 \mu\text{m}$ 时,气流磨的能耗为 7 867 kWh,而机械磨的能耗为 2 000 kWh,气流磨单位吨能耗为机械磨的 3.9 倍。升高温度对气流磨的粉碎效果影响不大,但是会导致能耗增加。

2.3 形貌分析

利用扫描电镜对粉碎前后的碳纳米管颗粒形貌进行观察和分析,图 3 是 $d_{50}=5 \mu\text{m}$ 的碳纳米管细粉颗粒形貌的 SEM 图像。

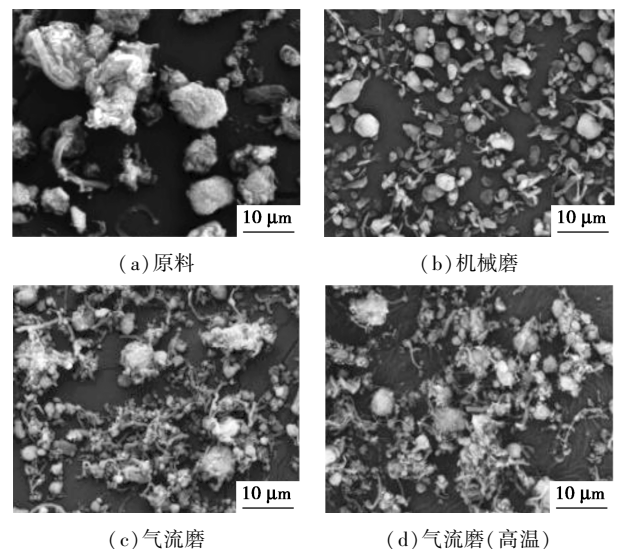


图 3 碳纳米管细粉颗粒形貌的 SEM 图像

由图 3(a) 可以看出,碳纳米管原料大多呈团状,颗粒表面凹凸不平整,且大部分颗粒之间团聚在一起。从图 3(b) 可以看出,机械磨粉碎后的碳纳米管颗粒粒径明显减小,大多呈规则形状,粉碎后的碳纳米管颗粒部分呈团状结构,表面比较光滑。根据 Hutting 等提出的粉碎模型^[18],可以得出机械磨粉碎以表面粉碎为主,具体粉碎过程如图 4 所示,大部分颗粒在机械磨内部与叶片发生碰撞,仅在颗粒的表面产生破坏,从颗粒表面不断削下微粉成分,这一破坏不涉及颗粒内部;同时,小部分颗粒之间也会相

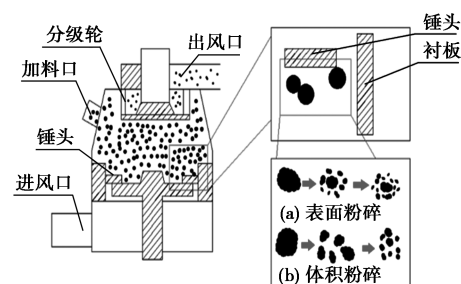


图 4 机械磨粉碎过程

互碰撞,整个颗粒都会被破坏。因此粉碎后的碳纳米管颗粒大部分表面较光滑,粉碎后细粉较多,但粒度分布范围较宽,粗颗粒也较多。

从图 3(c)、(d)可以看出,常温和高温对气流磨的粉碎效果影响不大。气流磨粉碎后的碳纳米管颗粒粒径相对于机械磨粉碎后的颗粒粒径明显减小,大多呈无规则形状,粉碎后的碳纳米管颗粒部分呈团状结构,表面凹凸不平。这是因为气流磨粉碎以体积粉碎为主,同时伴随着表面粉碎。具体粉碎过程如图 5 所示,在粉碎室内,在高速气流的带动下,颗粒与颗粒之间发生碰撞,导致颗粒整体受到破坏,先是生成粒度较大的中间颗粒,随着粉碎的持续进行,这些中间颗粒再依次被粉碎成粒度更小的颗粒,最后逐渐蓄成微粉成分(即稳定成分);同时,少部分颗粒会与粉碎室内壁发生碰撞,产生表面破碎,粉碎后的少部分颗粒表面光滑。因此粉碎后的碳纳米管粒度分布较窄,粗颗粒较少。

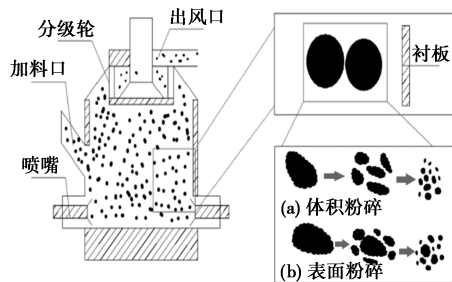


图 5 气流磨粉碎过程

3 结论

(1) 采用气流磨可以生产出粒径 d_{50} 在 2.540~10.127 μm 的碳纳米管超细粉体,产量可达 2.6~6.0 kg/h,单位吨能耗小于 18 154 kWh。连续运行实验表明,气流磨具有粉碎粒度小、产量大、运行稳定的特点。采用机械磨可以生产出粒径 d_{50} 在 4.892~11.443 μm 的碳纳米管超细粉体,产量可达 7.5~12.6 kg/h,单位吨能耗小于 3 360 kWh。连续运行实验表明,机械磨具有产量大、能耗低、运行稳定的特点。

(2) 机械磨粉碎以表面粉碎为主,气流磨粉碎以体积粉碎为主,实际过程中的粉碎是表面粉碎和体积粉碎的叠加。粉碎所得的粉碎产物的粒度分布不同,机械磨粉碎后细粉较多,但粒度分布范围较宽,粗颗粒也较多。气流磨粉碎后的碳纳米管粒度分布较窄,粗颗粒较少。

(3) 经过机械磨制备碳纳米管超细粉体具有良

好的颗粒结构,综合考虑粒度、能耗和形貌特征,在工业生产中,可以选择机械磨制备碳纳米管超细粉体,通过选择合适的运行参数,既能满足粒度要求,又能达到节能的目的。

参考文献

- [1] 杨春燕,马云龙,冯小琼,等.碳基材料在锂离子电池中的研究进展[J].储能科学与技术,2021,10(2):432-439.
- [2] 王倩倩,颜红侠,李朋博,等.碳纳米管的纯化、性能及应用[J].化学工业与工程,2010,27(3):259-265.
- [3] 秦煜,阮鹏臻,唐元鑫,等.碳纳米管水泥基复合材料导电特性影响因素研究进展[J].硅酸盐学报,2021,49(2):411-419.
- [4] 黎恒杆,王玉林,罗昊,等.多壁碳纳米管分散性对水泥基材料导电性能和电热特性的影响[J].硅酸盐报,2020,39(11):3438-3443.
- [5] Benjamin P Frank, David G Goodwin, Pavlo Bohutskyi, et al. Influence of polymer type and carbon nanotube properties on carbon nanotube/polymer nanocomposite biodegradation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140512. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140512.
- [6] 李振宇,冯雪松,刘月,等.碳纳米管杂化材料的制备及在环氧树脂复合材料中的应用[J].化工新型材料,2021,49(1):1-4.
- [7] 赵悠曼,严小波,段红坤,等.碳纳米管导电剂对硅碳负极锂电池性能提升的探索[J].储能科学与技术,2021,10(1):118-127.
- [8] Mpouras Thanasis, Polydera Angeliki, Dermatas Dimitris, et al. Multi wall carbon nanotubes application for treatment of Cr(VI)-contaminated groundwater; Modeling of batch & column experiments[J]. Chemosphere, 2021, 269: 128749. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128749.
- [9] Dariush Khalili, Ali Reza Banazadeh, Elham Etemadi-Davan. Palladium stabilized by amino-vinyl silica functionalized magnetic carbon nanotube; Application in suzuki-miyaura and heck-mizoroki coupling reactions[J]. Catalysis Letters, 2017, 147(10):2674-2687.
- [10] Hamzah N, Yasin M F M, Yusop M Z M, et al. Rapid production of carbon nanotubes: A review on advancement in growth control and morphology manipulations of flame synthesis [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5: 25144-25170.
- [11] 黄瑶,李里,修姝,等.二次电弧放电法调控单壁碳纳米管的直径分布[J].黑龙江大学自然科学学报,2015,32(5):641-644,701.
- [12] 李亚娟,马昌,康建立,等.改进浮动催化化学气相沉积法制备直径可控的多壁碳纳米管(英文)[J].新型炭材料,2017,32(3):234-241.
- [13] 王倩倩,颜红侠,李朋博,等.碳纳米管的纯化、性能及应用[J].化学工业与工程,2010,27(3):259-265.
- [14] 张正义,陈英红,戚方伟,等.固相剪切研磨制备尼龙 12/多壁碳纳米管复合粉体及选择性激光烧结 3D 打印[J].高分子材料科学与工程,2017,33(3):122-127.
- [15] 张明星,吕娟,付瑜,等.机械磨制备碳酸氢钠超细粉体[J].精细化工,2017,34(2):134-137,171.
- [16] 付海峰,李天翻,秦文茜,等.蒸汽动能磨超细电炉镍铁渣试验[J].钢铁钒钛,2019,40(6):77-83.
- [17] 卢寿慈主编.粉体加工技术[M].北京:中国轻工业出版社,1999.
- [18] 盖国胜.超细粉碎分级技术 理论研究 工艺设计 生产应用[M].北京:中国轻工业出版社,2000.■