

硅-金属基复合储锂材料研究概述

乔靖涵, 杨宗洋, 石磊, 成家旭, 董鹏, 张英杰, 周忠仁

(昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650031)

[摘要] 用高容量硅材料替代传统石墨负极以提升锂离子电池能量密度是当下的研究热点。硅负极在实际应用过程中由于自身电导率低、嵌锂时存在严重的体积膨胀效应,使得材料的倍率性能差、循环性能不理想,难以实现商业化应用。将导电性能优异的金属与储锂容量高的硅进行复合被视为有效的改性策略之一。本文介绍了硅-金属基负极在材料的结构设计、合成方法、电化学性能的研究进展,并对储锂性能提升机制进行了探讨。

[关键词] 硅负极; 硅-金属基复合材料; 锂离子电池

[中图分类号] TG146.4⁺14

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2022)01-0010-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.01.003

近年来,随着电子产品以及新能源汽车的普及,对于高能量密度的锂离子电池需求量逐渐增大。目前,商业化的石墨材料实际储锂容量已经接近其理论嵌锂容量(仅有 $372 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$),严重限制了锂离子电池能量密度的进一步提升。作为可替代的硅负极材料,由于其理论容量高($3972 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$)、储量丰富、低的放电平台($< 0.5 \text{ V}$),被认为是下一代锂离子电池的理想负极^[1]。然而,弱导电的硅负极在嵌/脱锂过程中伴随着体积膨胀率大(约 400%),表面 SEI(Solid Electrolyte Interface)不断生成,导致硅颗粒严重粉化,使得电极的嵌/脱锂能力严重下降,循环寿命迅速衰减。因此,循环寿命短、效率低成为制约硅负极商业化应用的瓶颈。为了解决硅基负极材料导电性差以及体积膨胀,同时克服硅嵌/脱锂结构不稳定的缺点,研究人员对硅材料进行了广泛而深入的改性研究^[2]。作为主要的技术手段之一——硅基材料合金化,被视为能够有效解

决硅导电性差、抑制硅的体积膨胀。根据合金组分是否参与锂化反应,分为惰性金属,如 Ti、Cu、Ni、Zn 等;以及活性金属,如 Ca、Mg、Ge 等^[3]。通过合金化制备的硅基负极材料可以显著提高电极导电性以及倍率性能,有效减小了硅的体积膨胀,改善了材料的导电性,提升了电池的循环性能。因此,本文通过综述硅-金属基负极材料,包括硅钛、硅铝、硅锆、硅锡、硅铜、硅镍、硅镁以及硅-双金属基复合材料的合成及应用,并对后续研究进行了展望。

1 硅钛负极材料

硅-钛基复合材料的制备主要方法包括熔盐电解法、化学气相沉积法、硅热还原、镁热还原法等,所得产物为 Si 和 TiSi_2 的混合物,将其组装成锂离子电池负极,体现出较好的储锂比容量。首先, A. Netz^[4] 等研究了 TiSi_2 合金的储锂能力,发现 TiSi_2 的首次嵌锂容量仅有 $27 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$,首次库伦效率仅有 40.7%, TiSi_2 合金相的极低储锂比容量说明 TiSi_2 不能单独作为储锂活性材料。汤兑海等^[5] 通过硅热还原 TiO_2 制备得到了 $\text{Si}/\text{Ti}_x\text{Si}_y$ 复合材料,该材料的首次嵌锂比容量高达 $1371 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$,首次库伦效率提升至 87%, Ti_xSi_y 纳米粒子能够提升 Li^+ 和电子的传输能力是储锂性能提升的原因。Yung-Eun Sung 等^[6] 以钛酸四丁酯经水解后生成的 TiO_2 包覆在 SiO_2 表面、构成 $\text{SiO}_2@ \text{TiO}_2$ 为原料,采用镁热还原法制备得到了 $\text{Si}@ \text{TiSi}_2$ 核壳型结构, TiSi_2 高的电导率以及较好的结构稳定性使得该材料在 $400 \text{ mA} \cdot \text{g}^{-1}$

[收稿日期] 2021-11-09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51804148);云南省应用基础研究计划项目(2018FD038)

[作者简介] 乔靖涵(2002—),男,吉林通化人,大学本科,研究方向为锂离子电池材料制备。

[通信作者] 周忠仁(1989—),男,山东滕州人,副教授,研究方向为有色金属冶金、熔盐电化学。

[引用格式] 乔靖涵,杨宗洋,石磊,等. 硅-金属基复合储锂材料研究概述[J]. 有色设备,2022,36(1):10-14.

放电电流密度下,经过 50 圈循环后可逆比容量高达 $1\ 180\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Sa Zhou 等^[7-8]以 TiCl_4 、 SiH_4 为反应原料,采用化学气相沉积(CVD)方法在 Ti 箔上生长出 TiSi_2 ,之后在 TiSi_2 骨架上以氦气为稀释气体和保护气氛通入 SiH_4 ,经过热分解反应在 TiSi_2 基体上生成 Si,最终构成 Si/ TiSi_2 纳米复合异质结构,将该复合材料组装成电极后,在电流密度为 $8\ 400\ \text{mA}\cdot\text{g}^{-1}$ 下,经 100 次循环后,可逆储锂容量仍高达 $1\ 000\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Zhou^[9]等利用熔融电解法以硅钛摩尔比 1:20 的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 混合物为原料,制备获得了 Si/ TiSi_2 复合材料,形貌为镶嵌在硅线周围的硅钛纳米颗粒。分散在硅线周围的硅钛纳米颗粒间的空隙既能提高活性物质硅的电接触,容量保持率更高,又可以有效稀释体积膨胀产生的应力。该材料在 $200\ \text{mA}\cdot\text{g}^{-1}$ 放电电流密度下的首次嵌锂比容量高达 $2\ 107.02\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,首次脱锂比容量为 $1\ 895.4\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,首次库伦效率为 89.95%。

2 硅铝复合材料

郝世吉等^[10]通过强酸浸蚀 Si-Al 合金制备得到多孔硅复合物,将其组装成电池后,具有 $2\ 072\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的首次储锂比容量,经 200 次循环后,其放电容量高达 $1\ 431\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。文钟晟等^[11]公布了一种通过高温固相法制备 Si-Al/C 复合材料的方法。首先利用高温固相反应制备硅铝合金,之后将有机聚合物高温裂解成碳并添加石墨粉,在密闭气氛中反应制备出 Si-Al/C 复合材料。Al 的加入对材料的首次嵌锂深度有良好的抑制效果,并使电压滞后现象得以减缓,使得复合材料的首次可逆容量为 $600\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,首次库伦效率大于 80%,25 次循环后容量仍在 90% 以上。陈子重^[12]通过去合金化构建纳米硅多孔结构以及引入高导电 Al 和新型碳材料-石墨烯量子点(GODs)来提高 Si 的储锂性能。在该研究中,因为交叉网络结构有利于电子和离子的连续传输,加上 GODs 在纳米孔表面外的原位包覆提高了材料的导电性能以及适应锂合金化/脱合金过程中的体积变化,最终得到了具有优异的锂存储容量和高倍率容量的 NP-SiAl/GQDs 复合材料。

3 硅锆复合材料

硅和锆的储锂机制相同,均与金属锂通过合金化进行锂化/去锂化反应,理论比容量分别为 $4\ 200$

$\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1\ 625\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。硅锆复合材料结合了硅的极高储锂比容量以及锆具有的高离子扩散和电导率,使得硅锆负极材料体现出较好的储锂能力。王帮润^[13]采用固相合成法制备出硅-锆合金负极(Si_xGe_y),利用 Si 和 Ge 两者具有不同的储锂电位来释放材料体积膨胀产生的应力,在大倍率 $2\ \text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 充放电 900 圈后仍具有高达 $418\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的比容量。Xiao 等^[14]以 $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ 混合物为原料,利用熔盐电解法制备出具有纳米管结构的 Si-Ge 复合物。该材料在电解脱氧过程中单质 Si 和 Ge 通过合金化反应形成 Si-Ge 合金,基于 Kirkendall 效应最终构成纳米中空结构的复合物。该材料在 $200\ \text{mA}\cdot\text{g}^{-1}$ 下循环 100 圈后,可逆比容量高达 $590\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

4 硅锡复合材料

Si 和 Sn 分别可以与锂反应形成 $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$ 和 $\text{Li}_{4.4}\text{Sn}$ 合金,硅锡合金利用锡的低电阻率($1.15 \times 10^{-7}\ \Omega\cdot\text{m}$)、价格低廉,储锂电位低等优势,将两者进行合金化,使得硅、锡在储锂时互作缓冲基体,有效提升了硅负极的倍率性能。王鸿等^[15]以 SiCl_4 、 SnCl_2 为原料,用恒电位共沉积法制备得到 Si-Sn 合金,在 $100\ \text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 电流密度下充放 100 圈后,比容量仍有 $0.151\ \text{mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$,比单一 Si 负极提升 73%。Qin 等^[16]以 SiSnAl 合金为原料,通过去合金化除去 Al 并制备出三维微孔异质结构的 $\text{Sn}_{85}\text{Sn}_{15}$ 合金,该材料倍率性能佳,在 $3\sim 4\ \text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下储锂比容量仍高达 $620\sim 800\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。张卫等^[17]以机械球磨法与高温煅烧法结合,制备出 Si/Sn/N-C 复合负极材料首次充放电比容量达 $1\ 088.4\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 经 100 次充放电循环以后,仍保持 $759.8\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的比容量,容量保持率高达 86.2%。

5 硅铜复合材料

金属铜具有良好的导电性和延展性,无储锂性能,制备的硅铜合金作为惰性基体起到支撑骨架的作用,抑制硅机械结构的破裂及材料的粉化。已报道的硅铜复合材料微观结构包括核壳型纳米颗粒、具有较大长径比的交联纳米线等。Yu 等^[18]用热还原法合成了 Cu/Si 核壳纳米线,在 $3.6\ \text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下,循环 400 圈,容量保持率在 80% 以上。Zhou 等^[19]以 CuCl 和 Si 为原料,经 Rochow 反应制备得到 $\text{Cu}_3\text{Si}@\text{Si}$ 核壳型纳米颗粒,在 $2\ \text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度

下充放循环 400 圈后,可逆比能量仍高达 $903.6 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。李鑫等^[20]通过固态机械球磨法制备了不同质量比的 Si-Cu 合金,当 Si 的质量分别为 Cu 的 15 倍、10 倍、5 倍、1 倍时,对应的初始库伦效率分别为 76.0%、89.4%、82.5% 和 73.2%,初始库伦效率 65.8%。说明 Cu 的引入起到了缓冲保护的作用,提高了材料的机械强度,有效提高了硅电极的初始库伦效率。王茜等^[21]采用化学镀铜方式在硅颗粒表面镀覆均匀致密的铜颗粒,所制备的硅铜复合粉体首次放比容量为 $1185 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,经 60 次循环后可逆比容量为 $350 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

6 硅镍复合材料

将金属镍与硅复合的设计思路主要是利用镍的强导电性和成本低优势,制备 NiSi_2/Si 复合物,其中 NiSi_2 作为惰性基体以稳定活性物质 Si 在嵌脱锂时引发体积膨胀/收缩材料的整体结构。Ohta 等^[22]利用等离子物理气相沉积技术在 Si 颗粒表面形成了稳定的 Si/ NiSi_2 界面层。当 Ni 的添加量为 1 at% 时,硅镍负极经 50 圈循环后,可逆比容量为 $1707 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。王忠等^[23]以氢电弧等离子法制备出硅镍纳米颗粒,具有高达 $1304 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的嵌锂比容量。将合金颗粒球与石墨进行球磨混合,制备的复合物经 20 次循环后,仍有 86% 的容量保持率。方升等^[24]以 SiO_2/Ni 为原料,通过熔盐电解制备得到 NiSi_2 纳米线,发现金属镍能够诱导硅电化合成核及定向生长。Min-Sik 等^[25]采用电弧熔炼和高能球磨相结合方法制备了硅镍复合物,复合物中包括电化学活性硅以及非活性的 NiSi_2 与 NiSi 相,该种材料首次放电比容量高达 $823 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,经过 50 次循环后,仍有 $650 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的比容量。

7 硅镁复合材料

Mg 和 Si 作为轻量元素,能够与锂进行合金化反应,是目前研究较多的硅基合金化复合材料。另外,由于镁的反应活性高,通常作为还原剂,通过镁热还原 SiO_2 等合成多孔状的硅镁复合物^[26]。Jiang 等^[27]利用烟气飞灰为原料,通过酸洗除杂、静电纺丝、镁热还原后制备得到棒状纳米硅,该材料在 0.5C 下循环 100 圈后可逆比容量有 $1132 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Cai 等^[28]在熔盐电解 SiO_2 制备出单质 Si 的基础上,以 $\text{MgSiO}_3@C$ 为反应原料,通过熔盐电解 MgSiO_3 实

现 Mg 的优先原位还原,并通过镁热还原方式完成 Si 的制备,所得产物为 Si@void@C 。该材料在 $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下循环 300 圈后,容量保持率高达 75.5%,体现出了较好的储锂性能。

8 三元系复合材料

除了所述二元系硅基复合材料以外,采用双金属对硅进行复合被视为又一改性方法。舒杰等^[29]研究三元复合材料中存在多种合金成分可有效抑制复合材料的体积效应。谢锐等^[30]利用熔炼-机械球磨二步法制出 Fe-Ni-Si/C 复合材料。该研究中,三元复合材料在充放电过程中,只有 Si 参与到脱嵌锂过程,提供容量,其余合金成分则仅作为惰性基体来抑制 Si 在脱嵌锂时产生的体积效应,因而最终得出的材料不仅比容量得到一定提升,而且循环稳定性也得到了显著改善。Seo 等^[31]通过电弧炉熔炼制备出 Si-Ti-Ni 合金,之后经聚酯纤维表面聚合出现实现三元系硅基合金的包覆改性,在 1 C 电流密度下充放循环 100 圈,可逆比容量仍有 $612 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

9 结束语

硅合金化复合材料作为锂离子电池负极材料,其脱嵌锂容量以及库伦效率均优于现有的石墨电极,同时与其他硅基复合材料相比,合金化复合材料同时也具有一定的强度的机械结构可有效缓解体积膨胀所产生的应力变化效应,提高材料的循环性能。可以预见的是,金属集自身良好的导电性和维持电极结构双重优势,将成为除硅碳复合材料的理想负极。目前硅-金属基复合材料的合成成本较高,而材料的微观结构和物相又同时决定了储锂性能。因此,构筑具有特定微观结构的硅-金属基复合材料,实现低成本合成仍是研究的重点。

[参考文献]

- [1] Liwen Ji, Zhan Lin, Mataz Alcoutlabi, et al. Recent developments in nanostructured anode materials for rechargeable lithium-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(8): 2682-2699.
- [2] 艾新平. 下一代动力电池及材料发展趋势探讨[J]. 新材料产业, 2012(9): 10-14.
- [3] 孙自许. 硅基锂离子电池负极材料的制备及其电化学性能研究[D]. 宁波:中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 2016.
- [4] Andreas Netz, Robert A. Huggins, Werner Weppner. The

- formation and properties of amorphous silicon as negative electrode reactant in lithium systems [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 119 - 121: 95 - 100.
- [5] 张文婷, 汤兑海, 霍启升. Si/Ti_xSi_y 复合物的合成及其锂离子电池负极性能研究 [J]. *分子科学学报: 中英文版*, 2017(6): 460 - 465.
- [6] Kim Y M, Ahn J, Yu S H, et al. Titanium silicide coated porous silicon nanospheres as anode materials for lithium ion batteries [J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 151: 256 - 262.
- [7] Zhou S, Wang D. Unique lithiation and delithiation processes of nanostructured metal silicides [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(11): 7014 - 7020.
- [8] Zhou S, Yang X, Lin Y, et al. A nanonet-enabled Li ion battery cathode material with high power rate, high capacity, and long cycle lifetime [J]. *ACS Nano*, 2011, 6(1): 919 - 924.
- [9] 周忠仁, 董鹏, 李普良, 等. 硅纳米线制备方法研究进展 [J]. *有色设备*, 2020(2): 1 - 3.
- [10] 郝世吉, 李纯莉, 朱凯, 等. 酸侵蚀 Al-Si 合金制备锂离子电池高性能多孔硅负极材料 [J]. *电化学*, 2014, 20(1): 1 - 4.
- [11] 文钟晟, 锂离子电池负极用硅铝合金/碳复合材料及其制备方法. 上海市, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2006 - 01 - 01.
- [12] 陈子重. 纳米多孔硅基负极材料的改性及储锂性能研究 [D]. 济南: 济南大学, 2020.
- [13] 王帮润. 高比能量锂离子电池硅/锗基负极材料的制备及其电化学性能研究 [D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐研究所), 2019.
- [14] Wei Xiao, Jing Zhou, Le Yu, et al. Electrolytic formation of crystalline silicon/germanium alloy nanotubes and hollow particles with enhanced lithium-storage properties [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55: 7427 - 7431.
- [15] 王鸿, 吴蕴雯, 李明, 等. 锂电池硅锡合金负极的电沉积制备 [J]. *电镀与精饰*, 2020, 42(7): 1 - 6.
- [16] Hao Q, Hou J, Ye J, et al. Hierarchical macroporous Si/Sn composite: Easy preparation and optimized performance towards lithium storage [J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 306: 427 - 436.
- [17] 张卫. 锂离子电池合金复合负极材料的制备及电化学性能研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- [18] Hongxiang Wang, Hucheng Song, Zixia Lin, et al. Highly cross-linked Cu/a-Si core-shell nanowires for ultra-long cycle life and high rate lithium batteries [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(5): 2613 - 2619.
- [19] Zhou J, Lin N, Han Y, et al. Cu₃Si@Si core-shell nanoparticles synthesized using a solid-state reaction and their performance as anode materials for lithium ion batteries [J]. 2015, 7: 15075 - 15079.
- [20] 李鑫. 锂离子电池负极硅基复合材料的制备与储能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [21] Ohta R, Gerile N, Kaga M, et al. Composite Si-Ni nanoparticles produced by plasma spraying physical vapor deposition for negative electrode in Li-ion batteries [J]. *Nanotechnology*, 2021, 32: 265703 - 265711.
- [22] 王茜. 锂离子电池硅铜复合负极材料的制备及其性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [23] 王忠, 田文怀, 刘小鹤, 等. 硅镍纳米颗粒的氢电弧等离子体制备及电化学性能研究 [J]. *无机化学学报*, 2006(4): 661 - 665.
- [24] 方升. Ni/SiO₂ 及 NiO/SiO₂ 复合多孔电极熔盐电解制备硅纳米线的研究 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2016.
- [25] Park M S, Rajendran S, Kang Y M, et al. Si-Ni alloy-graphite composite synthesized by arc-melting and high-energy mechanical milling for use as an anode in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(1): 650 - 653.
- [26] Tan Y, Jiang T, Chen G Z. Mechanisms and product options of magnesiothermic reduction of silica to silicon for lithium-ion battery applications [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 651386.
- [27] 于玉泉. 金属热还原法制备锂离子电池纳米硅材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2021, 35(3): 03041 - 03049.
- [28] Cai M, Zhou X, Zhao Z, et al. Engineering electrolytic silicon-carbon composites by tuning the in situ magnesium oxide space holder: molten-salt electrolysis of carbon-encapsulated magnesium silicates for preparing lithium-ion battery anodes [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8: 9866 - 9874.
- [29] 舒杰, 程新群, 史鹏飞, 等. Cu-Sn-Sb 三元复合电极的电化学性能研究 [J]. *电源技术*, 2005(5): 301 - 306.
- [30] 谢锐. 硅基合金负极材料的制备及电化学性能的研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.
- [31] Seo H, Kim K, Yi C W. Physico-chemical and electrochemical properties of Si-Ti-Ni alloy modified with poly(3,4-ethylenedioxythiophene) [J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 165: 247 - 254.

An Overview of the Research on Silicon-Metal Matrix Composite Lithium Storage Materials

QIAO Jing-han, YANG Zong-yang, SHI Lei, CHENG Jia-xu,
DONG Peng, ZHANG Ying-jie, ZHOU Zhong-ren

Abstract: Replacing traditional graphite anodes with high-capacity silicon materials to improve the energy density of lithium-ion batteries is a current research hot spot. Due to the low conductivity of silicon anode and the serious volume expansion effect during lithium intercalation, the silicon anode has poor rate capability and unsatisfactory cycle performance, and it is difficult to achieve commercial application. The composite of metals with excellent electrical conductivity and silicon with high lithium storage capacity is regarded as one of the effective modification strategies. This article introduces the research progress of the structure design, synthesis method and electrochemical performance of silicon-metal-based anode materials, and discusses the improvement mechanism of lithium storage performance.

Key words: silicon anode; Silicon-metal matrix composites; lithium ion battery



(上接第 9 页)

Research Progress of Carbon Fuel Cells Directly Using Coal

HAO Sen-ran, CHEN Xiao, ZENG Xiaoyuan, XIAO Jie

Abstract: Under the background of global energy crisis and serious environmental pollution, the clean and efficient power generation technology-direct carbon fuel cell technology, has attracted more and more attentions. China is a big consumer of coal resources, where traditional thermal power generation technology brings about serious environmental pollution and energy waste problems. Therefore, the application of coal fuel to direct carbon fuel cells has become an urgent and critical solution. This paper gives a detailed introduction to the application of different types of coal fuels in direct carbon fuel cells, which provides an important reference for addressing the issue of clean and efficient utilization of coal.

Key words: direct carbon fuel cell; coal fuel; clean and efficient power generation technology

