



中国科学院力学所魏宇杰研究团队发现并提出锂电池的寿命分析准则

作者: 陈春光 2023-06-21 11:52

【放大 缩小】

疲劳是工程结构中部件承受循环载荷时发生灾难性故障的最常见原因之一, $S-N$ 曲线是固体材料中疲劳可靠性分析与评价的经典准则。商用锂电池在循环服役过程中, 同样面临寿命退化的问题。然而, 锂电池寿命退化与固体材料的疲劳不同, 其涉及复杂的力-热-电-化等多方面因素。如何精准刻画锂电池的寿命演化规律, 是领域内长期困扰的科学问题。

锂电池的寿命衰退具有过程依赖性和个体差异性, 具体表现为: 1) 锂电池的充放电倍率和工作温度的不同, 将造成寿命衰退的速率和规律差异; 2) 同种电池、同一批次、相同测试条件下, 锂电池寿命将在一定范围内分散。迄今为止, 锂电池循环寿命对环境温度和充电速率等的依赖性, 以及寿命的分散特性仍未所知, 亟需开展相关实验与理论创新。

中国科学院力学所非线性国家重点实验室魏宇杰研究团队通过大规模电池测试实验与系统性的数据挖掘工作, 发现并提出了锂电池充电倍率 (C) 和 (N) 之间的标度律关系: $C = c_0 N^b$, 即 $C-N$ 准则。式中 c_0 临界充电倍率, 即引起电池首次充电失效的最小倍率; b 是与电池材料相关的常数。在双对数坐标下, $C-N$ 准则呈线性关系, c_0 为截距、 b 为斜率 (如图1A所示)。团队还对高倍率下电极材料内部的应力进行了相关的力学模拟, 证实了高倍率可造成材料内部高应力 (如图1B和1C所示)。

通过研究恒定温度、不同放电倍率下的 $C-N$ 准则变化规律 (如图2所示), 进一步揭示了 b 与放电倍率 (D) 相关, 而 c_0 则不受 D 的影响。通过恒定放电倍率和变化温度下的 $C-N$ 准则演变趋势 (如图2所示), 发现 $C-N$ 准则的幂指数 b 对温度变化不敏感, 而 c_0 则对环境温度具有强烈的依赖性, 进而得到了修正的 $C-N$ 准则方程: $C = c_0(T)N^{b(D)}$ 。基于多种统计学分析, 发现对数正态分布(Lognormal distribution)是锂电池循环寿命分散性分析的最佳分布统计模型, 并由此构建了锂电池的疲劳失效概率模型 (即 $P-CN$ 模型), 首次实现了对锂电池失效概率分析 (如图3示)。

以上工作为锂电池循环寿命预测、健康管理提供理论依据, 基于力学原理的新思路。研究成果发表以 "The scaling of charging rate and cycle number of commercial batteries" 和 "The operation dependence of $C-N$ fatigue for lithium-ion batteries" 为题发表在 ACTA Mechanica Sinica 和 Advanced Energy Materials 上, 第一作者分别为温济慈助理研究员, 陈春光副研究员, 以及北京信息科技大学邹庆荣副教授。工作得到了国家自然科学基金委(No.11988102,12002343)、中国科学院力学所力量计划(No. E1Z1010901)、北京市教委项目(KM202311232008)等项目的资助。

论文链接:

<https://doi.org/10.1007/s10409-022-22108-x>

<https://doi.org/10.1002/aenm.202300942>

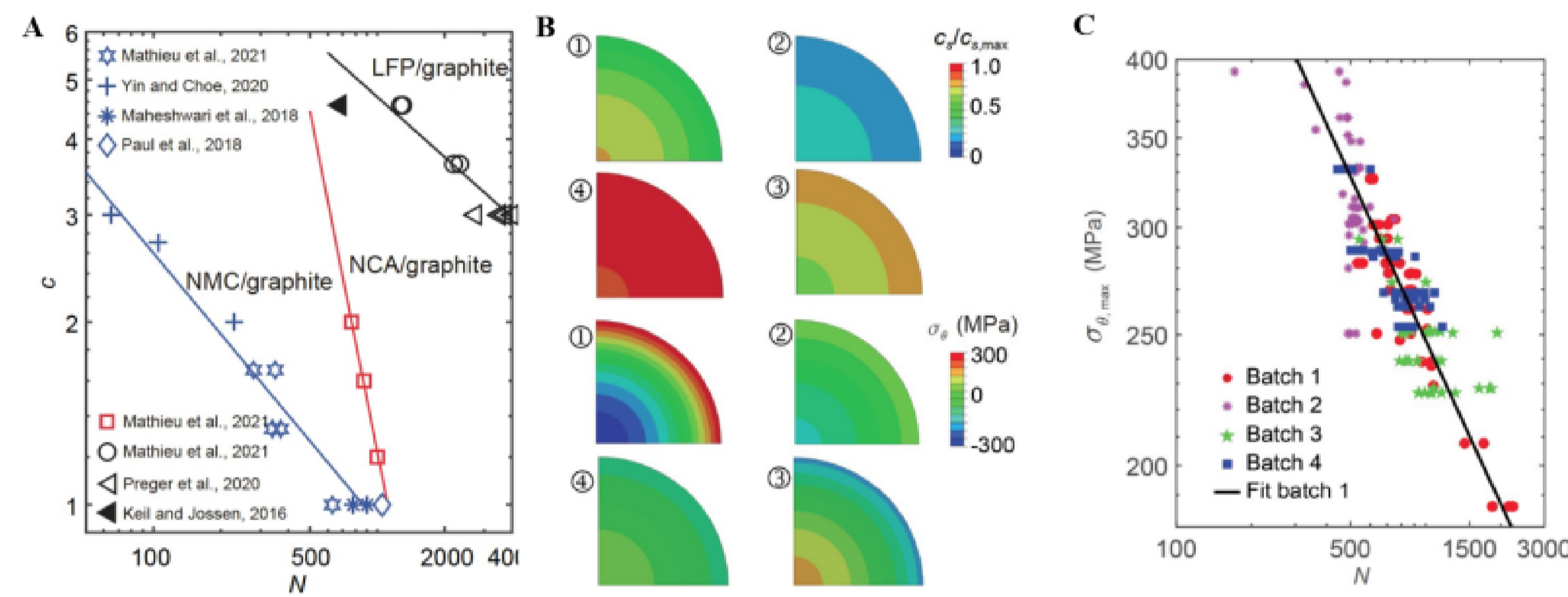


图1. (A)不同材料锂电池的 $C-N$ 曲线, (B) 不同充放电进程的颗粒内锂浓度场和应力场分布, (C) 基于电极颗粒内应力的锂电池寿命关系曲线

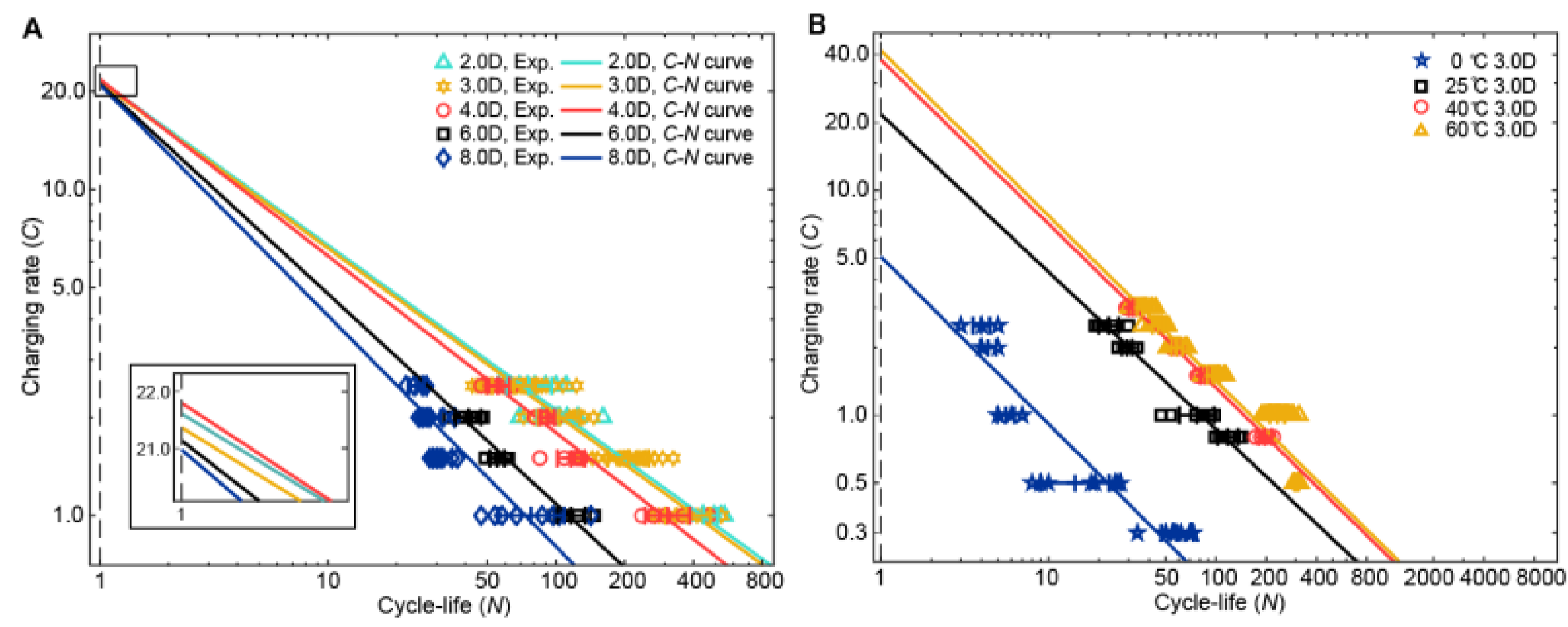


图2. 双对数坐标系下不同放电倍率下 (A) 与恒定倍率、不同温度下的 $C-N$ 曲线 (B)

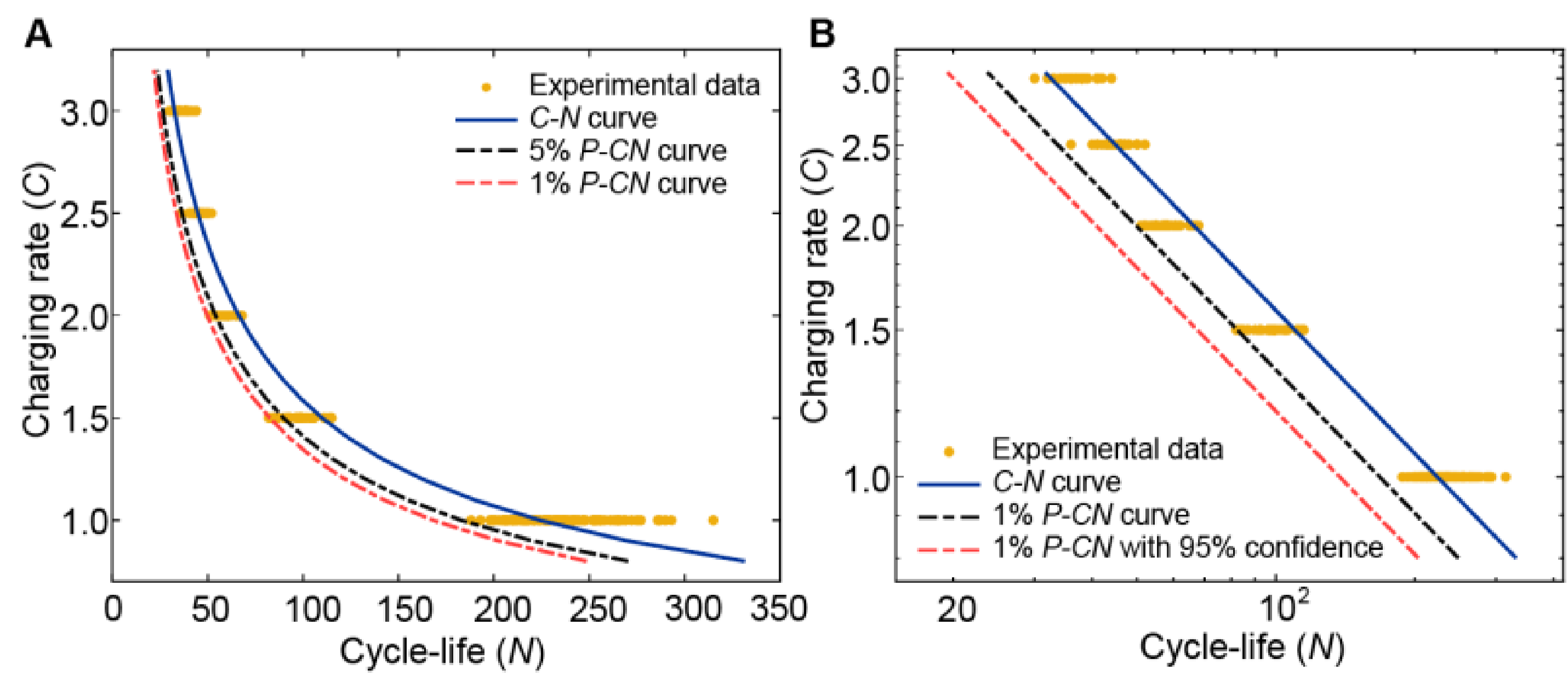


图3. 自然数坐标下的 $P-CN$ 曲线 (A) 与双对数坐标下的失效概率曲线 (B)

