

# 石墨化度对炭/炭复合材料在不同制动速度下的摩擦磨损性能的影响解析

陈学谦

中国机械总院集团海西（福建）分院有限公司，福建三明，365500；

**摘要：**本文将深入分析不同制动速度下石墨化程度对炭/炭复合材料摩擦磨损行为的影响规律。通过实验研究和数据对比，揭示石墨化程度与材料摩擦磨损性能之间的内在联系，为炭/炭复合材料在制动领域的实际应用奠定理论基础。

**关键词：**炭/炭复合材料；石墨化度；制动速度；摩擦磨损

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.11.009

## 引言

在现代交通和工业生产过程中，刹车系统的性能直接关系到车辆的安全性和经济性。随着高速铁路、空间飞行器和高性能汽车的快速发展，对刹车材料提出了更高的要求。炭/碳复合材料因具有优异的耐高温、高比强度、轻质等特点，在摩擦刹车制动材料中占有重要地位。石墨化度是炭/炭复合材料最重要的结构参数，决定了炭/炭复合材料的摩擦学性能。揭示不同制动速率下石墨化度与炭/炭复合材料摩擦磨损行为之间的内在联系，对高性能刹车材料的研发具有重要意义。同时，高性能炭-石墨材料的不断出现，也给刹车材料的革新带来了新的机遇和挑战。

## 1 炭/炭复合材料及石墨化度概述

### 1.1 炭/炭复合材料特性

炭/炭复合材料是一种先进的复合材料系统，它是以碳纤维增强炭为基体构建的。其中，碳纤维赋予材料高强度和高模量，能承受更大的外力；炭基体承担着传递和分散载荷的重要作用，保证了材料的综合性能。该复合材料具有优异的高温力学性能，可有效抵抗高温对材料结构的损伤，为极端工况下的安全可靠运行提供保障。它的低密度特性，不但可以降低刹车系统的重量，减少能量的消耗，而且可以降低惯性的影响，提高刹车的响应速度。此外，炭/炭复合材料具有良好的摩擦特性，能提供稳定、可靠的制动性能，满足各种制动场合的需要。

### 1.2 石墨化度的定义与意义

石墨化度是指碳材料中碳原子排布接近于理想石墨晶格结构的程度。石墨化后，碳材料的晶体结构变得更加规整，层间距变小，这种变化对材料的物理化学性能产生了深刻的影响。对炭/炭复合材料来说，石墨化程度的提高对其摩擦学性能有很大的影响。随着石墨化程度的提高，材料表面形成了更加平滑的石墨层，在摩擦过程中，石墨层就像是一层高效的润滑剂，可以有效地降低摩擦系数，降低材料的磨损，延长刹车材料的使用寿命。

## 2 新型高性能碳石墨材料在制动领域的应用

### 2.1 材料特点

新型高性能炭/炭复合材料是对传统炭/炭复合材料的深度优化和创新改进。该材料石墨化程度明显提高，晶体结构更加完美，具有更低的摩擦系数波动性，更好地保持制动时的摩擦特性。在此基础上，通过添加特定的增强相或者采用先进的表面处理技术，进一步提高材料的强度和抗热震性能，以应对高温、高压和高冲击等苛刻工况。例如，一些新型高性能炭-石墨材料中加入纳米级陶瓷粒子，可显著提高材料的硬度和耐磨性，同时提高抗热冲击性能，有效降低温度突变引起的材料裂纹。

### 2.2 应用优势

**航空航天领域：**飞机降落时，刹车系统需要在很短的时间内消耗大量的能量。新型高性能碳-石墨基材料具有优异的高温性能和稳定的摩擦特性，可为飞机高速着陆提供安全可靠的刹车保障。其优良的散热性能可以

快速散热，防止因过热而导致刹车性能降低。相关数据表明，与传统材料相比，新型高性能碳石墨刹车系统使飞机刹车距离缩短10%-15%，大大提高了飞机的安全性能。

**高速列车领域：**高速列车高速行驶对制动系统性能提出了更高的要求。新型高性能碳-石墨基材料具有轻质、轻量化等特点，可有效降低列车整体重量，减少运行能耗。同时，其优良的摩擦磨损特性，可确保车辆在频繁启动和停止运行时仍能保持高可靠性和长寿命。研究表明，采用该材料可以使高速列车制动系统的维修周期延长2-3倍，有效降低运营成本，提高运营效率。

**汽车领域：**高性能车辆对刹车系统的要求是快速反应和强劲的刹车性能。新型高性能碳-石墨基复合材料具有较高的摩擦系数，可实现高速制动、缩短制动距离等特点。另外，它具有优良的耐磨性能，可以减少制动片的更换次数，降低使用费用。例如，某些高档运动车在使用了这种新型高性能碳石墨刹车材料之后，可以将时速从100公里缩短到35米以内，大大提高了驾驶的安全性和操控性。

### 3 实验研究：石墨化度对炭 / 炭复合材料摩擦磨损性能的影响

#### 3.1 实验材料与方法

通过对不同石墨化程度的炭/炭复合材料的研究，确定了炭/炭复合材料的最佳制备条件。通过对热处理温度和时间的精确调控，实现石墨化度的精确调控。利

用先进的摩擦磨损试验机模拟不同制动速度条件，对试样进行全面的摩擦磨损试验。采用高精度传感器实时监测摩擦系数和磨损量，采用扫描电镜（SEM）细致观察磨损表面微观形貌，揭示磨损机理。

#### 3.2 实验结果与分析

**摩擦因数变化：**不同石墨化程度的炭/炭复合材料，其摩擦系数随制动速率的增加而有显著差异。由于石墨化程度低，碳原子排列无序，导致低速制动时摩擦系数较大，且缺乏有效的润滑机理。然而，当转速升高时，由于摩擦热的影响，材料表面会发生一定的结构变化，从而使摩擦系数出现剧烈的波动并逐渐减小。而石墨化程度越高的材料，其摩擦系数就越稳定，其数值也越小。这主要是由于石墨层在高速摩擦时具有连续、平滑的石墨层，使其在高速摩擦时具有持久的润滑效果，有效地减小了摩擦阻力的波动，保持了稳定的摩擦特性。

**磨损量的变化：**由于石墨化程度低，材料在较低的刹车速度下磨损量相对较小，这是因为它具有较高的表面硬度，对磨粒有一定的抵抗作用。然而，随着制动转速的大幅提高，材料内部结构耐高温、高应力，极易发生基体开裂、剥落等现象，导致磨损量急剧增加。而石墨化程度越高的材料，其磨损量增长越平缓，表现出更好的耐磨性。这是因为，石墨化层不仅可以有效地降低摩擦系数，降低摩擦热，而且可以在摩擦过程中不断地保护基体，降低外部因素对基体的直接腐蚀，减少材料的磨损率。

表1 制动速度变化对不同石墨化度炭/炭复合材料性能影响率

石墨化度	摩擦系数变化率（从5m/s到30m/s）	磨损量变化率（从5m/s到30m/s）
低	$(0.30 - 0.45) / 0.45 \times 100\% \approx -33.3\%$	$(50 - 10) / 10 \times 100\% = 400\%$
中	$(0.32 - 0.35) / 0.35 \times 100\% \approx -8.6\%$	$(30 - 8) / 8 \times 100\% = 275\%$
高	$(0.31 - 0.30) / 0.30 \times 100\% \approx 3.3\%$	$(20 - 6) / 6 \times 100\% \approx 233.3\%$

从该表格数据可知，石墨化度低的材料摩擦系数下降幅度最大，磨损量增加幅度也最大；而石墨化度高的材料摩擦系数变化幅度最小，磨损量增加幅度相对较小，进一步证实了石墨化度对材料在不同制动速度下摩擦磨损性能的显著影响。

#### 4 微观机理分析

#### 4.1 磨损表面形貌

扫描电镜观察表明，石墨化程度较低的材料，其磨损表面较为粗糙，且存在大量的刮痕、剥落坑。刮痕起源于磨粒与材料表面的摩擦作用，剥落坑由材料内部结构在摩擦热-应力共同作用下发生断裂脱落，表现为磨粒磨损与粘着磨损。而石墨化程度较高的材料，其磨损面较为平整，且存在连续、均匀的石墨化转移膜。该转

移膜可有效隔离摩擦副间的直接接触，减小摩擦系数，降低磨损，并对材料表面微小损伤进行一定程度的修复，保持材料表面完整性。

#### 4.2 磨损机制

当制动速度较低时，材料主要以磨粒磨损为主，以氧化为主。此时，摩擦热减少，材料表面氧化反应较慢，磨粒磨损占主导地位。随着刹车速度的急剧增大，摩擦热量迅速积累，材料表面温度迅速上升。低石墨化材料的散热及抗热冲击性能较差，在高温与热应力共同作用下，材料内部微裂纹快速扩展，导致基体开裂、剥落，磨损机理逐渐向疲劳、剥落转变，磨损量急剧增加。高石墨化材料具有良好的导热性能和稳定的晶体结构，能有效地导热、散热，有效缓解热应力集中，其磨损机理以轻微磨粒磨损及石墨层逐级消耗为主，因此在高速制动时仍然具有良好的耐磨性能。

### 5 结束语

综上所述，石墨化度是影响炭/炭复合材料摩擦磨损性能的重要因素。由于石墨化程度高、结构优化等特点，新型高性能碳-石墨化材料在刹车制动材料领域表

现出优异的性能优势，极具应用前景。在此基础上，通过对炭/炭复合材料石墨化程度的精确调控，有针对性地优化其摩擦磨损性能，满足不同制动工况下的多样化需求。通过本项目的研究，有望实现高性能碳石墨复合材料的制备工艺优化与性能提升，并对复杂工况下材料的失效机理进行深入探究，为我国汽车制动材料持续创新发展提供理论基础和技术支持。

### 参考文献

- [1] 艾艳玲, 杨延清, 王小宪. 炭/炭复合材料石墨化度的XRD表征方法[J]. 煤炭转化, 2009, 32(01): 72-74.
- [2] 汤中华, 周桂芝, 熊杰, 等. 炭/炭复合材料石墨化度的XRD均峰位法测定[J]. 中国有色金属学报, 2003, (06): 1435-1440.
- [3] 徐惠娟, 熊翔, 黄伯云, 等. 石墨化度对炭/炭复合材料在不同制动速度下的摩擦磨损性能的影响[J]. 矿冶工程, 2003, (04): 71-74.

作者简介：陈学谦（1981.07-）男，汉族，山西省大同市人，大学本科，研究方向：材料科学与工程。