文章编号: 1004-0609(2012)12-3432-07

模压技术制备 C/C-BN 复合材料的摩擦学特性

袁锡藩¹, 葛毅成², 易茂中²

(1. 中国南方航空股份有限公司,广州 510406;2. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室,长沙 410083)

摘要:以h-BN、石墨、短切 PAN 炭纤维和酚醛树脂为原料,采用单向模压结合呋喃树脂浸渍炭化技术制备 C/C-BN 复合材料。在 M2000 型实验机上测试不同取向的 C/C-BN 试样与表面镀 Cr 的 40Cr 钢配副时的摩擦磨损行为。结果表明:在平行于压制方向的试样(试样 1)中,抗压强度达 82.43 MPa,高于垂直于压制方向试样(试样 2)的(51.47 MPa)。摩擦实验结果表明:随载荷增加,试样 1、试样 2 的摩擦因数均先增加后降低,试样 1 的摩擦因数在 120 N 时达到峰值 0.157,而试样 2 在 100 N 时达到峰值 0.152;随载荷增加,试样 1 的体积磨损除 150 N 外,基本为增加态势,最高达 2.07 cm³;而试样 2 的体积磨损则呈现三段式增加趋势,最高值为 1.66 cm³。SEM 形貌表明,在实验后,试样 1 的摩擦膜更完整、致密。其中,在 60 N 时,试样 1 的摩擦膜表层因粘着发生卷曲撕裂,而试样 2 则形成了网络状裂纹。

关键词: C/C-BN;模压;摩擦特性;复合材料 中图分类号: TH145.1 文献标志码: A

Sliding friction characteristic of C/C-BN prepared by mold-pressing

YUAN Xi-fan¹, GE Yi-cheng², YI Mao-zhong²

(1. China Southern Airlines Company Limited, Guangzhou 510406, China;
 2. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: C/C-BN composite was prepared by mono-directional mold-pressing combined with funan-resin impregnated and carbonization using h-BN, graphite, short-cut PAN-fiber and phenolic-resin as raw materials. The sliding friction behavior of the samples with different orientations of C/C-BN against 40Cr steel ring coated with Cr was investigated in M2000 tester. The results show that the compress strength of samples consistent with pressing-direction (sample 1) is 82.43MPa, which is higher than that of the other samples with different orientation (sample 2) of 51.47 MPa. The friction results show that the coefficient of friction (COF) of two kinds of samples increase at first and then decrease with the increase of load. The highest COF value of sample 1 is 0.157 at 120 N, while that of sample 2 is 0.152 at 100 N. The volume wear loss of sample 1 increases with the increase of load which reaches the highest value of 2.07 cm³ at 200 N except that at 150 N, but that of sample 2 show a three-stage increase which reaches the highest value of 1.66 cm³ at 200 N. SEM images show that sample 1 has more integrated worn surface than sample 2 at the same tested-load. Some friction film of sample 1 is tore and curled at 60 N, while that of sample 2 has some network cracks.

Key words: C/C-BN; mould pressing; friction characteristic; composites

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(09JJ4027)

收稿日期: 2012-02-13; 修订日期: 2012-07-10

通信作者: 葛毅成, 副研究员, 博士; 电话: 0731-88877700; E-mail: hncsgyc@163.com

目前,针对炭纤维增强炭基体复合材料(C/C)易氧 化、摩擦性能受环境影响较大的不足,对其进行基体 改性或表面处理,提高此类材料的强度、抗氧化、抗 烧蚀、导电率,降低其对温度、气氛的敏感性,已经 成为 C/C 及相关材料研究热点^[1-2]。

在基体改性处理中,FAN等^[3]采用 SiC 和 Ti₃SiC₂ 制备了 C/C-SiC-Ti₃SiC₂复合材料,发现此类材料在同 等条件下的质量磨损仅为 C/C-SiC 的三分之一。李江 鸿等^[4]则认为 TaC 的加入有利于提高 C/C 的抗烧蚀性 能。冉丽萍等^[5-6]采用 Cu 合金改性制备了 C/C-Cu,发 现其电学、摩擦和抗烧蚀性能优异,并克服了石墨/ 铜复合材料脆性大的缺陷,有望在滑动导电以及抗烧 蚀部件上得到应用。

但 SiC、TaC 等需在 1 000 ℃以上才能充分发挥其 抗氧化性能^[7-8],因此,STEVEN 等^[9-10]采用与石墨 晶体结构类似的 h-BN 作为改性剂,制备了炭纤维增 强炭和 h-BN 基体的复合材料(C/C-BN),发现其摩擦 学特性比 C/C 的更优异,因而认为 C/C-BN 可能是一 种新型的高性能摩擦材料,值得深入研究。所以,涂 欣达等^[11]采用熔渗结合原位反应技术制备出 C/C-BN, 发现尽管熔渗制备的 BN 晶型复杂,但材料摩擦磨损 性能与 C/C 的接近,也验证了 BN 改性 C/C 的有效性。 但 STEVEN 等^[9-10]所采用的硼吖嗪制备困难、陶瓷产 率低,涂欣达等^[11]采用的技术则难以在 C/C 坯体内制 备出晶型较好的 h-BN,均需进行进一步的改进。此外, ARUTYUNYAN 等^[12]和 WANG 等^[13]采用 CVD 技术制 备出不同形态的 BN,并将其引入到单根或单束炭纤 维表面并沉积,但均无进一步的应用研究报道。

模压是目前制备石墨、陶瓷材料的成熟技术,其 可通过合理的模具设计、原料调整和压制工艺来制备 高性能的材料^[14]。因此,本文作者采用单向模压技术 制备了 C/C-BN,并探讨不同取向试样的力学和摩擦 磨损行为。

1 实验

将 h-BN 粉(2 µm)、鳞片石墨(<50 µm)、T300 聚 丙烯腈短切炭纤维(PANCF)(2~3 cm)和 6530 丁腈改性 酚醛树脂按优化的配方(质量比 30:20:30:20)进行配 比,加入少量化学添加剂,放入行星球磨机中混料 5 h, 随后在平板硫化床上进行单向模压压制,制备出 C/C-BN 复合坯体。压制温度为 150 ℃,压强为 10~20 MPa,保压时间为 20~40 min。之后将上述坯体炭化, 然后经过反复浸渍呋喃树脂结合炭化补充增密(炭化 温度为 850~1 050 ℃),最终得到密度高于 1.74 g/cm³ 的 C/C-BN。

将上述材料分别沿平行、垂直于压制方向加工成 10 mm×10 mm×10 mm的抗压试样和 20 mm×12 mm×6 mm的块状摩擦试样。摩擦试样的摩擦面为 20 mm×12 mm,研磨后备用,其粗糙度为 0.8 µm。摩擦 配副为表面镀 Cr 的 40Cr 钢,其尺寸为外径(*d*_o)40 mm×(内径 *d*_i) 16 mm×(厚度)10 mm。实验设备为 M2000 型环-块滑动摩擦实验机,配副间的线速度为 0.42 m/s,摩擦时间为 300 min,室温干态。每组实验 重复 3 次,取平均值。抗压实验设备为 CSS44100 型 万能电子实验机,加载速度 1.0 mm/min,每组有效样 件 5~7 个,取其平均值。

分别采用 JSM-6360LV 型扫描电镜、EDAX2000 能谱分析仪、POLYVAR-MET 大型金相光学显微镜和 JDX3 光学读数显微镜检测材料内的物相分布,观测 材料的摩擦表面形貌、局部摩擦表面的元素组成和磨 痕宽度以计算其体积磨损。

2 结果与分析

2.1 材料强度

图 1 所示为 C/C-BN 不同取向试样的示意及其金 相形貌。由图 1(b)可见,纤维主要呈现由上向下或与 其轴向纸面呈一定夹角的排列状态,未发现其他方向





的纤维。这表明,采用单向压制技术制备的材料,纤 维主要集中在垂直于压制方向的二维平面上,在平行 于压制方向上的少,形成了类似于二维叠层增强的材料。

表 1 所示为 C/C-BN 内各成分的最终质量分数及 其不同取向试样的抗压强度。由表可知,垂直方向试 样(试样 1)的抗压强度高于其平行方向试样(试样 2)的 抗压强度。这说明,采用单向模压压制技术易诱发纤 维的优先取向,导致材料的各项异性特征^[15]。

图 2 所示为 C/C-BN 两种取向试样典型的载荷— 位移曲线。由图可见,试样 1 的伪塑性特征显著^[4,16], 有利于避免此方向试样的脆性断裂。

表1 C/C-BN 的质量分数及不同取向试样的抗压强度 Table 1 Mass fraction of components and compress strength of C/C-BN with different orientation

| Mass fraction/% | | | | Compress strength/MPa | |
|-----------------|-------|----------|------|--------------------------|----------|
| Resin carbon | PANCF | Graphite | h-BN | Sample 2 | Sample 1 |
| 51.7 | 13.8 | 13.8 | 20.7 | 51.47 | 82.43 |



图 2 不同取向 C/C-BN 试样抗压实验典型的载荷一位移曲线



2.2 摩擦实验结果与分析

图 3 所示为 C/C-BN 不同取向试样在不同载荷、 实验 300 min 后的摩擦因数和体积磨损。由图 3 (a)可 见,在试样 1 中,随载荷增加,其摩擦因数先增加后 降低,在 120 N时达到峰值 0.157;不同载荷下,其摩 擦因数的差值最高达 0.050。除 150 N 异常外,试样 2 的体积磨损随载荷增加而上升,在 200 N时达到 2.07



图 3 不同载荷下实验 300 min 后 C/C-BN 试样 1 和试样 2 的摩擦因数和体积磨损

Fig. 3 Friction coefficient and bulk wear loss of sample 1 (a) and sample 2 (b) of C/C-BN composite after 300 min friction test under different loads

cm³。由图 3 (b)可见,在试样 2 中,随载荷增加,其 摩擦因数也先增加后降低,在 100 N 时达到峰值 0.152, 在 200 N 时达最低值 0.109;但其体积磨损随载荷增加 呈现三段式增加,在 200 N 达到峰值 1.66 cm³。

图 4 所示为在不同载荷下 C/C-BN 试样 1(a)和试 样 2(b)的摩擦因数随时间的变化。由图 4(a)可见,随 时间延长,试样 1 的摩擦因数先大幅度降低,在 60 min 后趋于稳定。其中,在 60 和 80 N 载荷实验的后期,摩 擦因数有所下降,而在其余载荷下摩擦因数有所增加。 在整个实验期间,试样 1 摩擦因数波动幅度最大的发 生在 60 N 载荷下,可达 0.078;在 60 min 后,其在 80 N 载荷下的波幅最大,达 0.025。由图 4(b)可见,试样 2 的摩擦因数随时间延长也先快速下降,在 60 min 后 趋于稳定。其中,除 100 和 150 N 时的实验外,其余 的摩擦因数基本呈小幅度下降趋势。在整个实验期间, 试样 2 摩擦因数在 80 N 载荷下的波动最大,达 0.089; 在 60 min 后,则在 100 N 载荷下的波动幅度最大,为 0.015。整体而言,试样2摩擦曲线的稳定性稍好。

2.3 摩擦表面的微观形貌及分析

图 5 所示为试样 2 分别在 60、150 和 200 N 载荷

下实验 300 min 后的摩擦表面形貌。由图 5(a)可见, 在 60 N 载荷实验后,试样的磨损表面粗糙,部分摩擦 膜之间的结合差、且局部与基体分离,在摩擦力冲击 下易剥离,从而影响摩擦表面、材料本体的受力状态



图 4 不同载荷下 C/C-BN 试样 1 和试样 2 的摩擦因数随时间的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of friction coefficient of sample 1 (a) and sample 2 (b) of C/C-BN composite with time under different loads



图 5 试样 2 分别在 60、150 和 200 N 载荷下实验 300 min 后的摩擦表面 SEM 像 Fig. 5 SEM images of worn surface of samples 2 after 300 min test under 60 N((a), (b)), 150 N((c), (d)) and 200 N((e), (f))

及其摩擦磨损行为。由图 5(b)可见,在相对完整的表 面,由不同尺度磨屑形成的摩擦层与轴向垂直表面的 炭纤维结合较好;同时可发现,此类纤维明显阻碍了 裂纹的快速扩展,迫使其转向,有利于提高摩擦层的 稳定性。由图 5(c), (d)可见,在 150 N 载荷实验后, 材料摩擦层较完整、致密,未见网络状裂纹及摩擦层 剥落,但有少量磨屑散布。而在纤维束摩擦区域,有 少量纤维端头从基体中脱离。由图 5(e)可见,在 200 N 载荷实验后,材料摩擦层也呈现两种形貌:一种是由 基体材料形成的较致密的摩擦层;另一种则是在基体 大量磨损后,由残留的炭纤维形成的摩擦层。在二者 的过渡处,有明显的摩擦膜台阶状磨损。由图 5(f)可 见, 在较致密的摩擦层上, 分布了粒径为 2~5 μm 的 颗粒,点状的磨损坑主要以脆性撕裂的方式发生,部 分摩擦层之间出现相互叠加的形态。这说明在实验中, 摩擦层是通过磨屑、大块的剥落的摩擦层之间的相互 堆叠、移动、碾压后逐渐形成的。此类成膜特点使得 摩擦膜内形成了更细、多层摩擦层共存、以机械力相 啮合的特征。

图 6 所示为试样 1 分别在 60 和 200 N 载荷实验 300 min 后的摩擦表面形貌。由图 6(a)可见,在 60 N 载荷实验后,摩擦表面无网络状裂纹及即将剥落的摩 擦膜存在。但在轴向平行摩擦滑动方向的纤维束表

面, 磨屑与纤维束的结合差, 难以驻留和成膜。而附 近的摩擦膜较粗糙,存在较多的点状磨损和剥落。由 图 6(b)可见,在较完整的摩擦表面,部分摩擦层出现 了撕裂、卷曲,形成了典型的粘着损伤。这说明石墨 微晶、h-BN 微晶层间易解理、滑移性能好,在长时间 摩擦载荷作用下,表层内不同颗粒之间的微晶逐渐滑 移、交联,并因机械碾压形成较高强度的连接。因此, 在受摩擦力作用时,其表面可产生带状、由鳞片状解 理断面构成、充满裂纹但未完全断裂的准连续摩擦层, 并形成卷曲的磨屑^[10]。另外,此现象也说明连接强度 较高的摩擦层虽可提高材料的自润滑和抗磨损性能, 但在一定程度上也会加剧配副间的粘着。由图 6(c)可 见,在200N载荷实验后,材料摩擦表面比其在60N 时的完整。其磨损主要发生在两类区域表面:一类是 轴向平行摩擦方向的纤维束表面,另一类是纤维数量 少的基体表面。由图 6(d)可见,受纤维端头的阻碍, 部分磨屑形成了堆叠错层形貌,产生了凹凸不平的摩 擦表面。因此,此类表面在摩擦中可能导致材料本体 受力不均匀,造成本体损伤的差异,最终诱发摩擦层 上产生点状、片状的磨损。

2.4 摩擦机理分析

在采用单向模压技术制备 C/C-BN 时,在沿着压



图 6 试样 1 分别在 60 和 200 N 载荷下实验 300 min 后的磨损表面 SEM 像 Fig. 6 SEM images of worn surface of sample 1 after 300 min test under 60 N((a), (b)) and 200 N((c), (d))

第 22 卷第 12 期

制方向上形成了纤维的二维密集分布,增强效果较好, 试样的抗压强度较高[15]。在摩擦实验中,配副对摩擦 面上磨屑的三体磨损作用强,因而在相同载荷下试样 1 磨屑的成膜性好,摩擦膜较完整、致密。在低载荷 实验时,受轴向与滑动方向不一致的纤维的影响,磨 屑在摩擦表面的移动受阻、进而就近堆积成膜,形成 较致密的摩擦膜^[11]。而在轴向平行滑动方向的纤维束 表面, 磨屑或摩擦膜与其机械结合较弱, 易大面积磨 损。随载荷增加,摩擦膜内不同材质磨屑间的交接幅 度及其与纤维的结合力增加,成膜性提高,从而克服 了材料本体表层缺陷的影响,形成较致密的摩擦层。 但在高载荷下,材料本体内的炭纤维束受压后产生的 类似粉末冶金压坯时的弹性后效作用更强^[6],由此积 累的应力将影响摩擦膜自身及其与纤维束的结合;此 外,由纤维形成的硬质颗粒的磨粒磨损增强,降低了 摩擦层的完整和稳定^[11]:石墨、h-BN 微晶等也易镶嵌 在钢对偶摩擦表面的粗糙峰内并形成结合好的摩擦 膜,进而对试样摩擦表层形成粘着。因此,摩擦膜内 产生了较多的点状和片状的损伤。

对于试样 2,因纤维的优先取向,在相邻的纤维 层间缺少类似针刺毡坯体中针刺纤维的作用, 故其抗 压强度低。在 C/C-BN 的树脂浸渍炭化补充增密时, 因各种气体的排放、热应力的综合作用,导致在此方 向上的裂纹、孔隙较多[4-7];同时,端头垂直于摩擦面 的纤维也会影响磨屑的自由移动。因此,在低载荷下 试样表面的磨屑量少,需要克服的缺陷多,故摩擦面 难以形成连续性好的摩擦膜,易剥离。但在中高载荷 下, 磨屑产生量大, 可克服材料表层缺陷和纤维的影 响,形成较大范围完整致密的摩擦膜。虽然试样2的 抗压强度较低,但较软的材质有利于缓解硬质颗粒对 摩擦表面的磨损,降低摩擦应力积累的影响;而且试 样2中摩擦表面有较多轴向与其垂直的纤维,其抗摩 擦力的冲击性能比轴向平行于摩擦表面的纤维好,也 可在一定程度上抑制配副间的真实接触面积的波动, 降低材料的摩擦因数和体积磨损。故而除个别载荷外, 试样2的摩擦因数和体积磨损比试样2的低和稳定。

随时间的延长,两种取向试样的摩擦表面均趋于 完整,石墨、h-BN 的自润滑性能得到充分体现,配副 间的真实接触面积趋于稳定,摩擦因数维持稳定。但 在低载荷下,两种试样摩擦表面仍处于继续完善的过 程中,故摩擦因数在实验后期仍逐渐降低。

因此,改进 C/C-BN 的模压技术,提高增强纤维 分布的三维均匀性,降低此类材料的各向异性特征和 内部缺陷,对于提高材料整体摩擦磨损性能具有重要 的意义。

3 结论

1) 采用单向模压技术制备了 C/C-BN 复合材料, 沿压制方向试样 1 的抗压强度达 82.43 MPa,高于垂 直于压制方向试样 2 的(51.47 MPa)。

2) 随载荷增加,试样 1、试样 2 的摩擦因数均先 增加后降低。试样 1 的摩擦因数在 120 N 时达到峰值 0.157,而试样 2 的在 100 N 时达到峰值 0.152。随时 间延长,试样 2 的摩擦因数在 60 min 后的稳定性稍好。 随载荷增加,试样 1 的体积磨损基本为增加态势,最 高达 2.07 cm³;试样 2 的体积磨损为三段式增加,最 大值为 1.66 cm³。

3)在实验后,试样1的摩擦表面均比试样2的完整、致密。在低载荷下,试样1致密的摩擦膜表面因粘着产生局部撕裂损伤,而试样2摩擦膜的连续性较差。

REFERENCES

- LIU Ye-qun, HE Lian-long, LU Xue-feng, XIAO Peng. Transmission electron microscopy study of the microstructure of carbon/carbon composites reinforced with in situ grown carbon nanofibers[J]. Carbon, 2012, 50(7): 2424–2430.
- [2] 苏哲安,杨 鑫,黄启忠,黄伯云,李建立,张明瑜,谢志勇. SiC 涂层对 C/C 复合材料高温氧乙炔焰烧蚀性能影响[J]. 中国有 色金属学报, 2011, 21(11): 2838-2845.
 SU Zhe-an, YANG Xin, HUANG Qi-zhong, HUANG Bai-yun, LI Jian-li, ZHANG Ming-yu, XIE Zhi-yong. Effect of SiC coating on ablation resistance of C/C composites under oxyacetylene torch flame[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2838-2845.
 [3] FAN Xiao-meng, YIN Xiao-wei, HE Shan-shan, ZHANG
- [5] FAN Alao-meng, FIN Alao-wei, HE Shah-shah, ZHANG Li-tong, CHENG Lai-fei. Friction and wear behaviors of C/C-SiC composites containing Ti₃SiC₂[J]. Wear, 2012, 274/275: 188–195.
- [4] 李江鸿,张红波,熊 翔,肖 鹏,赵 磊,黄伯云. 含钽树 脂先驱体转变生成 TaC 的过程研究[J]. 无机材料学报, 2007, 22(5): 973-978.
 LI Jiang-hong, ZHANG Hong-bo, XIONG Xiang, XIAO Peng, ZHAO Lei, HUANG Bai-yun. Formation mechanism of TaC by tantalum-contained resin precursor[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(5): 973-978.
- [5] 冉丽萍,李文军,杨 琳,易茂中. C/C-Cu 复合材料的烧蚀性 能及烧蚀机理[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 510-515.
 RAN Li-ping, LI Wen-jun, YANG Lin, YI Mao-zhong. Ablation properties and ablation mechanism of C/C-Cu composites[J].

The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 510-515.

- [6] 杨 琳, 易茂中, 冉丽萍. C/C/Cu及C/Cu复合材料摩擦磨损 行为比较[J]. 复合材料学报, 2009, 26(6): 97-102.
 YANG Lin, YI Mao-zhong, RAN Li-ping. Comparative study of friction and wear behavior of C/C/Cu and C/Cu composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(6): 97-102.
- [7] SINGH S, SRIVASTAVA V K. Electrical properties of C/C and C/C-SiC ceramic fibre composites[J]. Ceramics International, 2011, 37: 93–98.
- [8] KUMARA S, KUMARI S, KUMAR A, SHUKLA A, ROHINI DEVI G, GUPTA A K. Investigation of effect of siliconization conditions on mechanical properties of 3D-stitched C-SiC composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(3): 1016–1022.
- [9] STEVEN S, BRIANF, JAMES E. Carbon/carbon boron nitride composites with improved wear resistance compared to carbon/carbon[J]. Carbon, 2004, 24(5): 3043–3048.
- [10] STEVEN S, JAMES J, JAMES E. High density carbon fiber/boron nitride matrix composites: Fabrication of composites with exceptional wear resistance[J]. Carbon, 2005, 43(11): 2035–2043.
- [11] 涂欣达,易茂中,葛毅成,彭 可,冉丽萍,雷宝灵,杨 琳.
 B、Si 改性炭/炭复合材料及其摩擦磨损特性[J].中国有色金属学报,2009,19(7):1257-1263.

TU Xin-da, YI Mao-zhong, GE Yi-cheng, PENG Ke, RAN Li-ping, LEI Bao-ling, YANG Ling. C/C composites modified by

B, Si and their friction and wear properties[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(7): 1257–1263.

- [12] ARUTYUNYAN N R, ARENAL R, OBRAZTSOVA E D, STEPHAN O, LOISEAU A, POZHAROV A S, GREBENYUKOV V V. Incorporation of boron and nitrogen in carbon nanomaterials and its influence on their structure and opto-electronical properties[J]. Carbon, 2012, 50(3): 791–799.
- [13] WANG Yu-ting, Shiro Shimada Yasunori Yamamoto, Norio Miyaura. Preparation of h-BN nano-tubes, -bamboos, and -fibers from borazine oligomer with alumina porous template[J]. Materials Research Bulletin, 2008, 43(2): 251–256.
- [14] PALMER J, SAVAGE L, GHITA O R, EVANS K E. Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recyclate[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(9): 1232–1237.
- [15] TAHERIAN R, GOLIKAND A N, HADIANFARD M J. The effect of mold pressing pressure and composition on properties of nanocomposite bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell[J]. Materials & Design, 2011, 32(7): 3883–3892.
- [16] 姜 海,李东生,吴凤秋,邓海金. C/C 刹车盘用短纤维预制体组成及工艺研究[J]. 材料工程,2009(8):76-79.
 JIANG Hai, LI Dong-sheng, WU Feng-qiu, DENG Hai-jin. Study on composition and processing of C/C composite brake disc with random fiber preform[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(8): 76-79.

(编辑 龙怀中)