

基于陶瓷复合材料的盘式制动器热力耦合仿真分析

刘 明

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月8日; 录用日期: 2023年3月7日; 发布日期: 2023年3月14日

摘 要

针对盘式制动器在制动过程中温度分布不均而产生过大热变形, 甚至出现热疲劳裂纹、磨料脱落等问题, 利用ANSYS Workbench平台建立SiC_p/Al陶瓷复合材料盘式制动器热力耦合模型, 探究了不同制动力和制动速度下制动盘温度、位移、应力的变化规律, 并将计算结果与传统金属制动盘进行对比。结果表明: 在额定速度下, 随着制动压力的等量增加, 温度及应力的最大值均随着制动压力的等量增加而非线性增加, 位移沿径向方向呈现出先增大后减小的趋势; 随着制动速度的增加, 温度的差异明显增大, 最大应力与位移均出现在制动盘与摩擦片接触处; 与传统材料制动盘相比SiC_p/Al陶瓷复合材料制动盘制动效果更加明显且制动性能更稳定。相关结果可为盘式制动器的安全运行和优化设计提供技术参考。

关键词

盘式制动器, 陶瓷复合材料, 热力耦合, 制动力, 制动速度

Thermo-Mechanical Coupling Simulation Analysis of Disc Brake Based on Ceramic Composite Material

Ming Liu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 8th, 2023; accepted: Mar. 7th, 2023; published: Mar. 14th, 2023

Abstract

Aiming at the problems of excessive thermal deformation and even thermal fatigue cracks and

abrasive shedding caused by uneven temperature distribution of disc brake during braking, the thermal coupling model of SiC_p/Al ceramic composite disc brake is established by using the ANSYS Workbench platform, and the change laws of brake disc temperature, displacement and stress under different braking forces and braking speeds are investigated, and the calculated results are compared with those of traditional metal brake discs. The results show that at the rated speed, with the equal increase of the brake pressure, the maximum values of temperature and stress increase nonlinearly with the equal increase of the brake pressure, and the displacement first increases and then decreases along the radial direction; With the increase of braking speed, the temperature difference increases significantly, and the maximum stress and displacement appear at the contact of brake disc and friction plate; Compared with traditional brake discs, SiC_p/Al ceramic composite brake discs have more obvious braking effect and more stable braking performance. The relevant results can provide technical reference for the safe operation and optimal design of the disc brake.

Keywords

Disc Brake, Ceramic Composite, Thermal Coupling, Braking Force, Braking Speed

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

制动器作为车辆制动系统的关键零部件之一，其制动性能直接关系到车辆的运行安全[1]。目前市场上主流的有盘式制动器和鼓式制动器，盘式制动器因其稳定性强、结构简单等优点，在乘用车领域已占据主导性地位[2]。汽车制动盘多采用铸铁材料，但是铸铁的性能对温度十分敏感，随着温度的升高制动盘会出现热疲劳、热衰退等现象[3]。SiC_p/Al 陶瓷复合材料具有密度低、热膨胀系数小、耐高温、耐疲劳等特点，在航空航天、交通运输等领域有着广泛的应用[4]。因此对陶瓷复合材料盘式制动器进行热力耦合仿真具有重要的理论意义和应用价值。

目前汽车制动盘应用最广泛的是铸铁材料，但是由于适用温度的限制，铸铁材料在高速情况下容易出现热疲劳等现象，为此近年来，国内外广泛开展了对高性能摩擦材料的研究。Ma 等[5]制备了不同纤维的纸基摩擦材料，并分析了碳纤维增强摩擦材料在不同工况下的摩擦磨损性能。Li 等[6]研究了 Si₃N₄ 陶瓷材料在不同环境温度下的摩擦磨损行为和不同表面质量的材料去除机理，并与普通金属材料进行对比，结果证明 Si₃N₄ 陶瓷材料具有更良好的力学稳定性。Si 等[7]以各种硬质颗粒为摩擦相制备了 SiO₂/SiC/Al₂O₃ 铜基摩擦材料，并探究了温度对摩擦材料摩擦学行为的影响。Wei 等[8]开发了两种使用碳纤维或碳纳米管替代铜纤维的无铜制动材料，并评估了它们的摩擦学性能、颗粒排放和制动尖叫噪声，得出了无铜制动材料比含铜制动材料具有更大的比磨损率。Jubsilp 等[9]制备了 UFNBRPs 摩擦复合材料，所制备的材料拥有较高的摩擦系数和耐磨性，符合汽车刹车片的工业标准。

此外针对盘式制动器，采用热力耦合技术分析应力场与温度场之间的作用关系是当前的主要研究手段。Wen [10]在 ABAQUS 中建立了客车盘式制动器的三维模型，并对盘式制动器的温度场进行了数值模拟，得出了不同制动条件下的制动盘表面温度分布特性。Belhocine 等[11]使用 ANSYS 软件对两种类型制动盘进行了数值建模，并采用热 - 结构耦合方法进行了瞬态热分析和静态结构分析，最后将两种类型制动盘的模拟结果进行对比。Yevtushenko 等[12]提出了一种确定多盘系统中单个制动盘温度的解析模型，

并利用热力耦合方法进行了数值模拟, 得出了制动过程中, 环境传热、纤维束长度和复合材料中纤维浓度对制动盘温度的影响。Yuan 等[13]基于均匀分布热源法, 提出了一种利用余弦函数预测制动温度的更准确有效的方法, 并将其温度曲线与热力耦合法的曲线进行对比, 所得结果完全匹配。Modanloo 等[14]在均匀压力和均匀摩擦两种摩擦热载荷条件下, 建立了高速车辆盘式制动器的热传导模型, 并采用变量分离法在圆柱坐标系下求解控制热传导方程。

综上所述, 目前国内外主要致力于传统金属盘式制动器的热-应力耦合场问题的研究, 而关于陶瓷复合材料盘式制动器在制动工况下的热力耦合分析鲜见开展, 因此本文模拟分析了 SiCp/Al 复合陶瓷材料盘式制动器在制动工况下温度、位移及应力变化特性, 为盘式制动器的优化设计提供新的可行思路, 以期进一步降低制动器损耗。

2. 热力耦合理论

2.1. 热力分析条件假设

为了保证热力耦合计算的正确性与独立性, 做出如下假设:

- 1) 摩擦片与制动盘材料均为各向同性, 在制动过程中没有发生塑性形变;
- 2) 制动过程中的动能全部转化为摩擦热且没有热量散失;
- 3) 在温度变化情况下, 相应的热传导系数和比热容保持固定;
- 4) 摩擦片与制动盘之间的接触面为理想平面, 环境初始温度为 $T = 20^\circ$ 。

2.2. 耦合模型

在制动力较大的情况下, 制动盘和摩擦片之间的摩擦热几乎全部转化成摩擦副接触点处的热能, 此时摩擦副接触点处单位面积内的热载荷为:

$$q(r, \theta, t) = \mu \cdot p(r, \theta, t) \cdot v(r, \theta, t) \quad (1)$$

式中 r , θ 为径向坐标和周向坐标; t 为制动时间; $q(r, \theta, t)$ 为热流密度; μ 为接触面摩擦系数; $p(r, \theta, t)$ 为制动时摩擦片和制动盘的接触压强; $v(r, \theta, t)$ 为摩擦片与制动盘之间的相对滑动速度。

制动盘和摩擦片的热流分配系数可通过理论公式计算获得:

$$\eta = \sqrt{\frac{\rho_a c_a \lambda_a}{\rho_d c_d \lambda_d}} \quad (2)$$

式中 ρ_a 、 c_a 、 λ_a 分别为摩擦片的密度、比热容、热传导系数; ρ_d 、 c_d 、 λ_d 分别为制动盘的密度、比热容、热传导系数。

则作用于制动盘上的热流密度为:

$$q_d = q \times \frac{\eta}{1 + \eta} \quad (3)$$

式中 q 为摩擦副内的热载荷。

根据热传导定律和能量守恒原理建立制动盘和摩擦片的温度场热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 t^2} \right) \quad (4)$$

式中 λ 为瞬态温度; T 为制动盘温度。

制动盘和摩擦片之间的换热主要为对流换热, 制动盘表面的对流换热系数可表示为:

$$h = \begin{cases} 0.7(\lambda_e/d_a)R_e^{0.05} & R_e \leq 2.4 \times 10^5 \\ 0.7(\lambda_e/d_a)R_e^{0.8} & R_e > 2.4 \times 10^5 \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_e 为雷诺数； d_a 为制动盘的直径； λ_e 为空气传热系数。

3. 有限元建模

3.1. 几何参数及材料属性

SiC_p/Al 陶瓷材料制动盘和复合材料摩擦片的几何参数如表 1 所示，材料属性如表 2 所示。

Table 1. Geometric parameters of brake disc and friction plate

表 1. 制动盘与摩擦片几何参数

	内径(mm)	外径(mm)	厚度(mm)
制动盘	101	142	10
摩擦片	104	138	10

Table 2. Brake disc and friction plate material properties

表 2. 制动盘与摩擦片材料属性

	制动盘	摩擦片
材料	SiC _p /Al	复合材料
杨氏模量(N/mm ²)	2.09e11	2.2e11
泊松比	0.3	0.25
密度(Kg/m ³)	7220	2343
热膨胀系数(K ⁻¹)	12e-6	3e-5
热传导率(W·m ⁻¹ K ⁻¹)	47.7	1.4
比热容(J·Kg ⁻¹ K)	500	1400

3.2. 实体建模

采用三维软件 Solidworks 建立 SiC_p/Al 陶瓷材料制动盘的几何模型，为了方便网格剖分及模型计算，在建模过程中采用实心制动盘且对模型的局部结构进行简化，简化后的模型如图 1 所示。

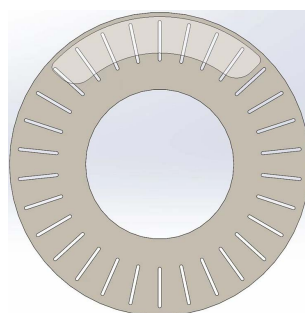


Figure 1. 3D simplified model of SiC_p/Al ceramic composite brake disc

图 1. SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘三维简化模型

3.3. 网格划分

有限元网格划分是热力耦合分析的关键，三维模型离散后的网格质量及数量直接影响到求解时长和结果精度。为了准确反映盘式制动器内各部件的受力和变形，本文将模型导入 ANSYS 的 mesh 模块，采用六面体和四面体混合的方式对制动器模型进行网格划分，其中制动盘包含的单元数为 26,584，节点数为 95,624，生成的制动器网格模型如图 2 所示。

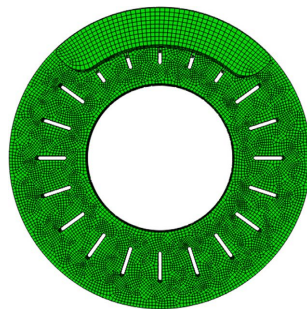


Figure 2. Element model of SiC_p/Al ceramic composite brake disc

图 2. SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘有限元模型

3.4. 边界条件及约束

本文将 APDL 语言加入到 ANSYS Workbench 中来完成热力耦合边界条件及约束设置，具体方法为：在 Workbench 的 Engineering Data 和 Geometry 模块中添加材料等工程数据，通过插入命令“et,1,solid226,11”修改单元类型，在 contacts 中插入命令“keyopt,cid,1,1”来建立制动器摩擦时候的需要添加的结构与温度的自由度；“Terf,20”将初始温度设置为 20℃；“Trnpt,Full”定义瞬态分析方法为完全法。

4. 盘式制动器模拟仿真及结果分析

4.1. 制动力对热力耦合特性的影响

为了探究制动力大小对 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘热力耦合特性的影响，本文以 0.5 MPa 为增量，开展了在额定制动速度 $v = 80 \text{ km/s}$ 作用时三种制动力下的制动盘热力耦合特性分析，在制动力为 4.5 MPa、5 MPa、5.5 MPa 时，制动盘温度、应力的瞬态响应曲线如图 3 所示。

图 3 为摩擦片中心区域某点在不同制动力下温度变化曲线。可以看出，在不同制动力下，温度响应曲线变化基本相同，均呈非线性锯齿状先上升后下降的趋势；温度的最大值均随着制动力的等量增加而非线性增加，增幅随制动压力的增加呈现先变大后减小的变化规律；0~1 s 时各温度曲线增长速率较快，从 1~2 s 时增长速率逐渐放缓，2 s 开始呈下降趋势，这是由于在 0~1 s 时处于压力施加的初期，摩擦生热远大于对流换热，摩擦副的摩擦区域温度急剧上升，2 s 时制动压力施加完毕，摩擦区温度缓慢上升至最高点。制动压力为 4.5 MPa、5 MPa、5.5 MPa 对应的最大温度分别为 191.46℃、203.32℃、216.78℃，表明制动压力对摩擦温度的影响表现出先增大后减小的趋势。

图 4 为不同制动力下应力响应曲线，不难得知：应力响应曲线表现出与温度曲线相似的变化规律，均呈现出先增大后减小的趋势；当 $t = 0.5 \text{ s}$ 时由于受到制动力的作用，应力上升速度较快，当 t 处于 1.5 s 时随着摩擦热的增大热应力继续增加，在 t 在 2.2 s 附近时出现最大热应力点，当 $t = 2.2 \text{ s}$ 之后制动盘表面温度下降，热应力也逐渐减小；制动压力越大，制动盘表面应力增长速率越快且应力值越高，制动压力为 4.5 MPa、5 MPa、5.5 MPa 对应的最大应力分别为 194.23 MPa、201.62 MPa、227.78 MPa。

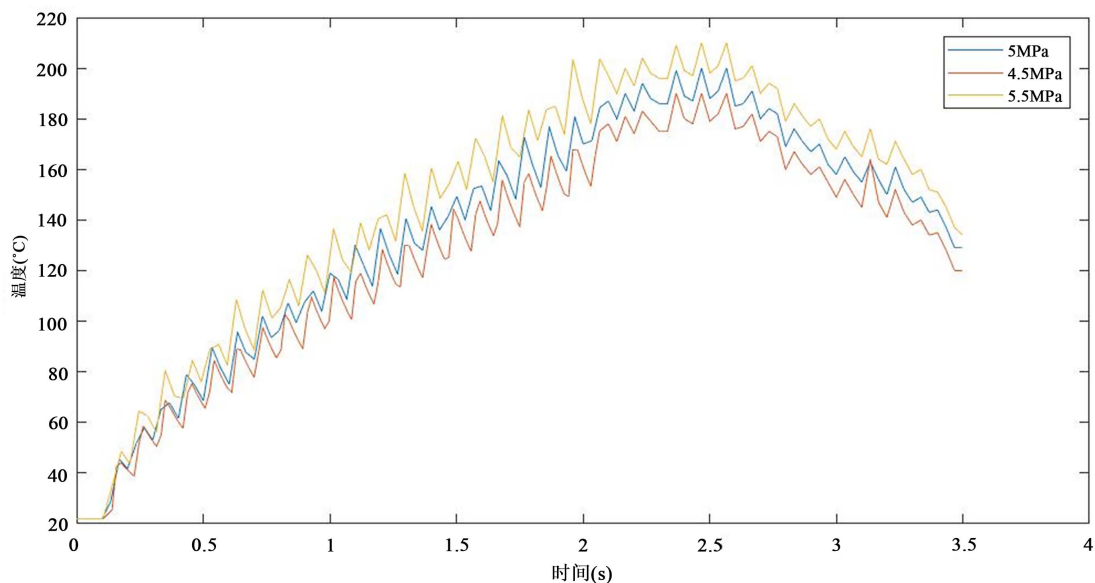


Figure 3. Temperature response curve of SiC_p/Al ceramic composite brake disc under different braking forces

图 3. 不同制动力下 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘温度响应曲线

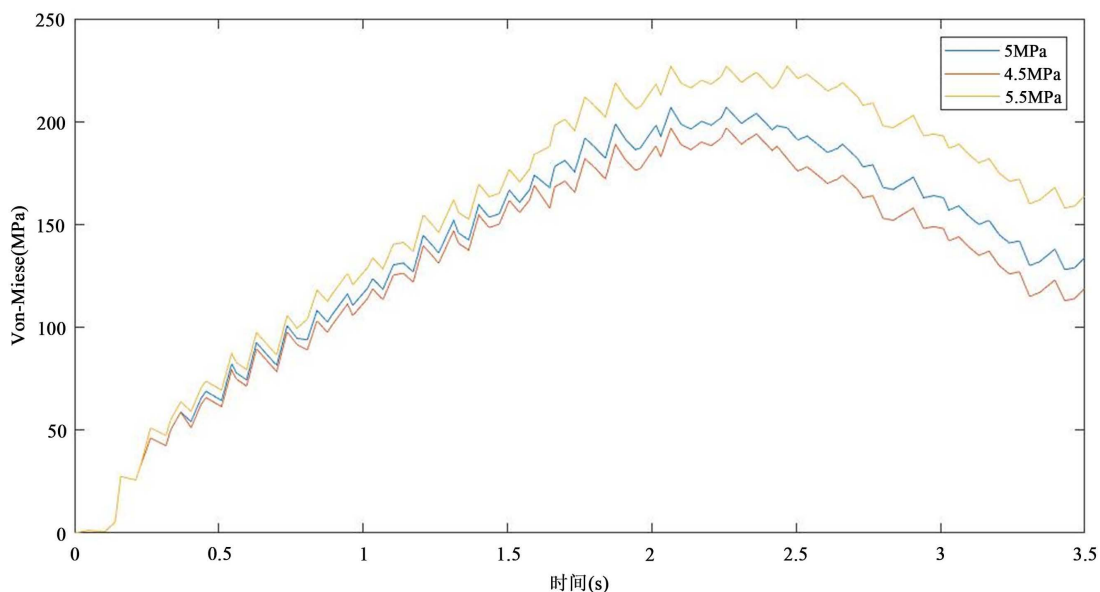


Figure 4. Stress response curve of SiC_p/Al ceramic composite brake disc under different braking forces

图 4. 不同制动力下 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘应力响应曲线

左图 5(a)为制动压力 4.5 MPa 时 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘径向位移最大时刻的分布云图,可以看出,制动盘位移从中心孔位置外缘处呈现先增大后减小的趋势,最大位移发生在摩擦片中心区域,这是由于此处施加了制动力且刚度较小,从而形成摩擦接触挤压区域并在制动盘径向产生较大变形。图 5(b)为位移最大时刻 2.0 s 时分别对应的径向方向的位移变化,由图可知:不同制动压力下位移的增幅总体上呈现由摩擦片中心区域向两侧衰减的变化趋势,这表明制动压力对位移的影响沿径向方向先增大后减小;同一相对径向长度处的最大位移增幅随制动压力的增加呈现先变大后减小的趋势,表明随着制动压力的增大,压力对制动盘位移的贡献先上升后下降。

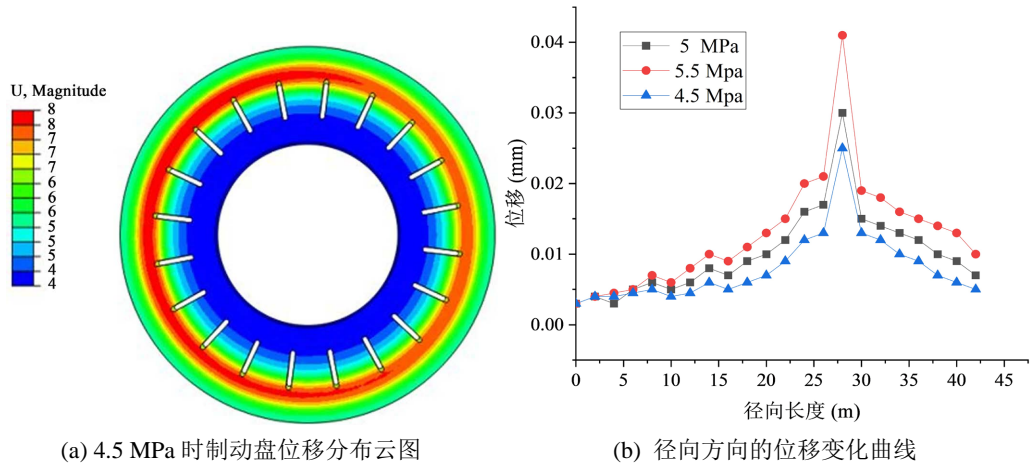


Figure 5. Displacement distribution of SiC_p/Al ceramic composite brake disc at 2.0 s
图 5. 2.0 s 时 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘位移分布

4.2. 制动速度对热力耦合特性的影响

制动速度也是影响 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘热力耦合特性的主要因素之一。在额定制动力 4.5 MPa 情况下设置制动初速度分别为 80 km/h、100 km/h、120 km/h，探究制动盘温度、应力响应，其曲线如图所示。

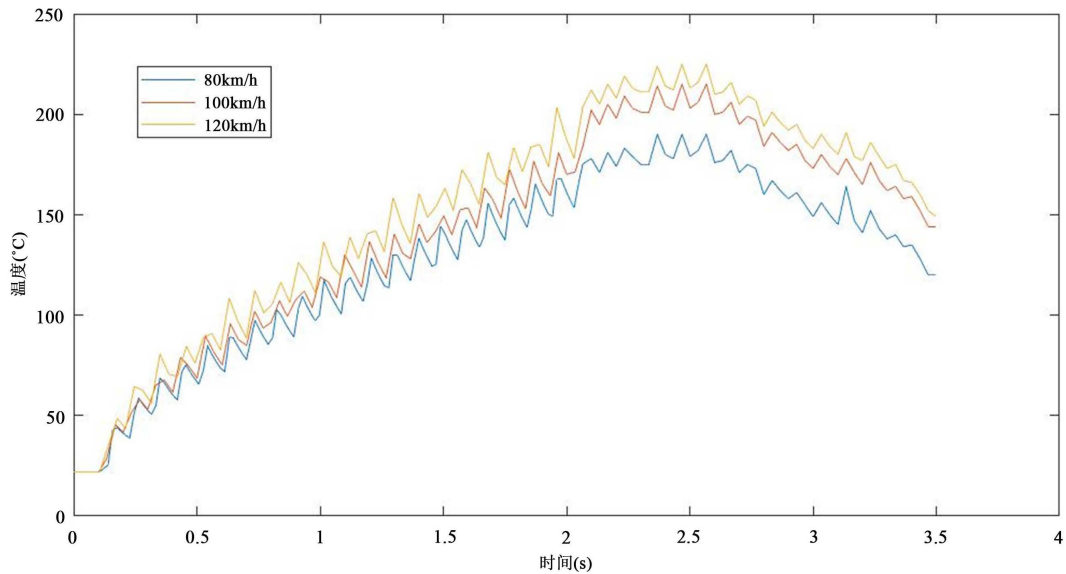


Figure 6. Temperature response curve of SiC_p/Al ceramic composite brake disc under different braking speeds
图 6. 不同制动速度下 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘温度响应曲线

图 6 为不同制动速度下温度变化曲线，从图中可以得出在制动的初始阶段，三条曲线接近重合，这说明在此阶段制动速度对温度的影响不大，随着时间的延长，三条曲线之间的温度差异明显增大，说明制动初速度此时对制动温度影响较大，当 $t = 2\text{ s}$ 时热交换速度与热流输入速度相近，温度上升的趋势变缓；不同制动速度下的温度响应均呈现了先增大后减小的趋势，并且其变化速率随制动速度的增加而增加。制动初速度为 80 km/h、100 km/h、120 km/h 时对应的最高温度分别为 193.52℃、207.26℃、228.45℃。

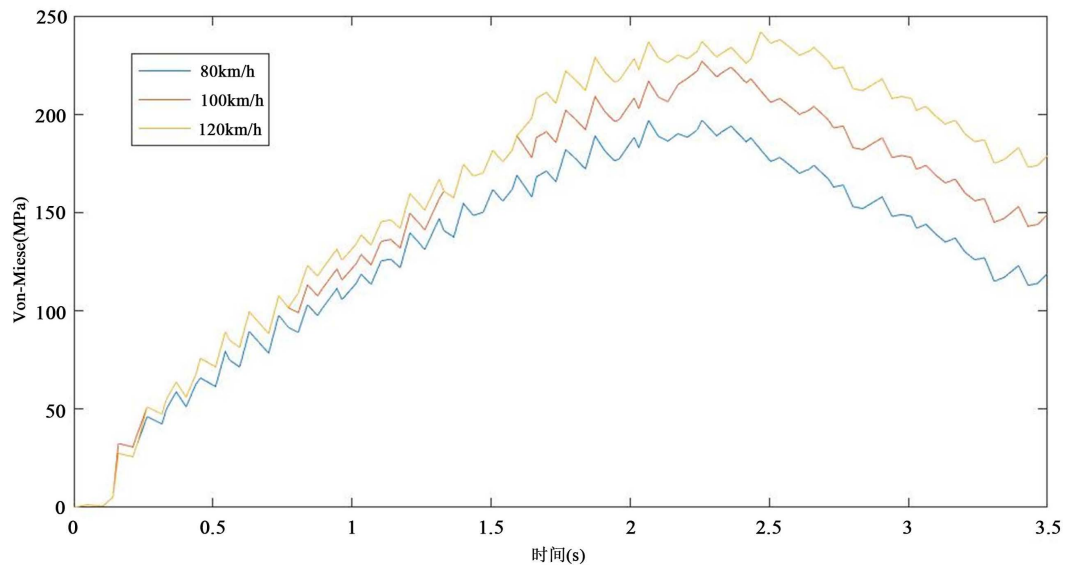


Figure 7. Stress response curve of SiC_p/Al ceramic composite brake disc under different braking speeds
图 7. 不同制动速度下 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘应力响应曲线

图 7 为不同制动速度下应力响应曲线, 由曲线可知, 当 $t < 0.5$ s 时各速度下制动盘产生的热变形都较小, 因此热应力也较小。当 $t > 0.5$ s 时三条曲线都快速上升, 但低制动速度的曲线增长较为缓慢, 当 t 在 2 s 附近时三条曲线均缓慢增长至最高点且热应力差异变小。最大应力区域出现在制动盘与摩擦片接触处, 并基本呈向两侧衰减的趋势, 制动初速度为 80 km/h、100 km/h、120 km/h 时对应的最大应力分别为 197.63 MPa; 225.34 MPa; 251.34 MPa。随着制动速度增加热应力先增大后减小, 而相邻制动速度下应力最大值的增幅不断减小, 这表明制动速度对应力贡献随之增加而降低。

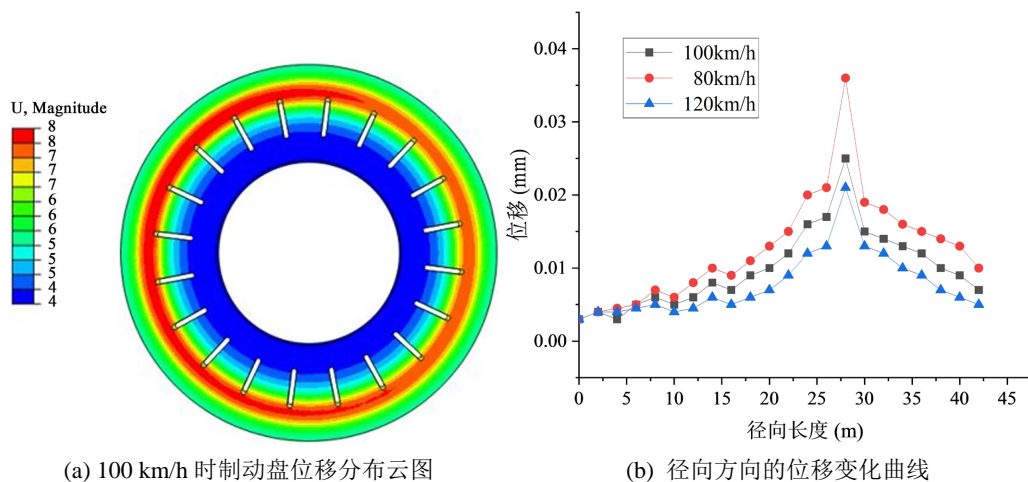


Figure 8. Displacement distribution of SiC_p/Al ceramic composite brake disc at 2.1 s
图 8. 2.1 s 时 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘位移分布

在位移最大时刻 2.1 s, 制动速度 100 km/h 时的 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘径向位移分布云图如图 8(a)所示, 三种制动速度下制动盘位移分布见图 8(b), 可以看出: 最大位移区域亦出现在摩擦片与制动盘接触处, 并向两侧衰减, 随着制动速度的增加, 该趋势更为明显; 不同制动速度下沿径向方向最大位移

差值在摩擦片与制动盘接触处达到最大，这表明了制动速度对位移的影响在最大位移处达到峰值。

4.3. 陶瓷复合材料制动盘热力耦合分析对比

为了验证 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘的良好性能，将 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘与传统材料制动盘在紧急制动工况下温度、位移及应力的变化规律和分布特点进行对比，结果如下图所示。

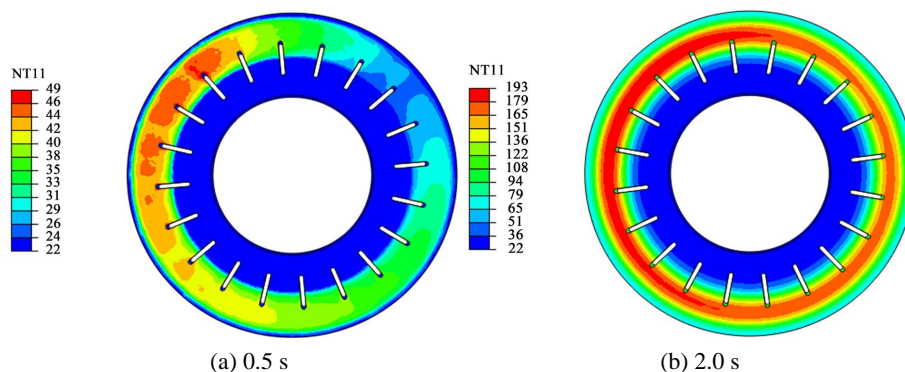


Figure 9. Temperature nephogram of traditional material brake disc at different times
图 9. 不同时刻传统材料制动盘温度云图

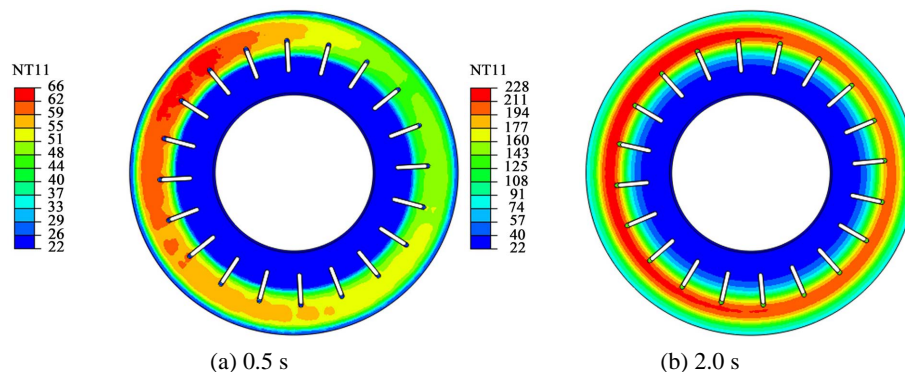


Figure 10. Temperature nephogram of SiC_p/Al ceramic composite brake disc at different times
图 10. 不同时刻 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘温度云图

图 9 和图 10 为传统材料制动盘及 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘在 0.5 s 和 2.0 s 时刻的温度变化云图，从图中可以看出，制动盘与摩擦片在作相对摩擦的过程中，制动盘表面温度沿径向由外到内逐渐降低，传统材料制动盘在 0.5 s 时刻摩擦区最大温度为 36℃，在 2.0 时刻摩擦区最大温度为 185℃，而 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘在 0.5 s 时刻摩擦区最大温度为 54℃，在 2.0 时刻摩擦区最大温度为 204℃。通过对比可以发现由于 SiC_p/Al 陶瓷复合材料的摩擦因数较高，在相同时刻内摩擦区的最大温度值更高，这表明在相同的刹车行程时间内采用 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘能够将更多的汽车动能转化为热能，刹车制动效果更明显。但是因为 SiC_p/Al 陶瓷复合材料刹车片的温度场在径向上存在较大温度梯度，所以会加剧摩擦片的变形以及制动盘的磨损。

图 11 为传统材料制动盘及 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘在 0.5 s 时刻的位移变化云图，从中可以发现，传统材料制动盘与 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘在制动过程中沿制动盘接触面垂直方向的位移近似相等且二者最大位移均出现在制动盘端面外圆处。这说明在汽车制动过程中，制动盘位移与所使用材料类型无关。

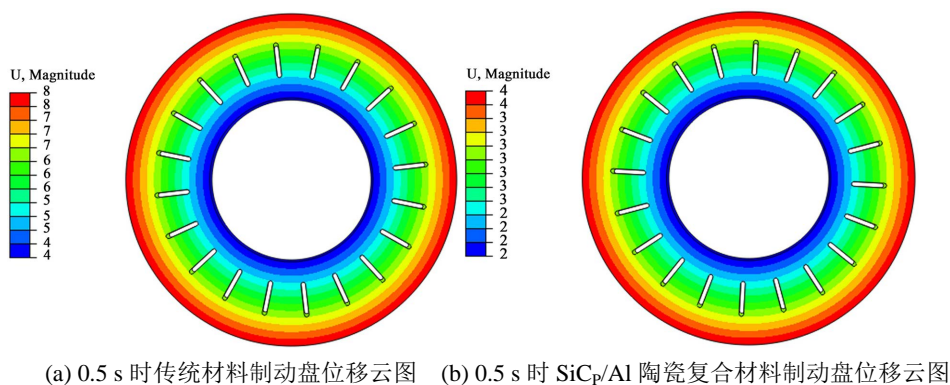


Figure 11. Temperature nephogram of SiC_p/Al ceramic composite brake disc at different times
图 11. 0.5 s 时传统材料制动盘与 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘位移云图

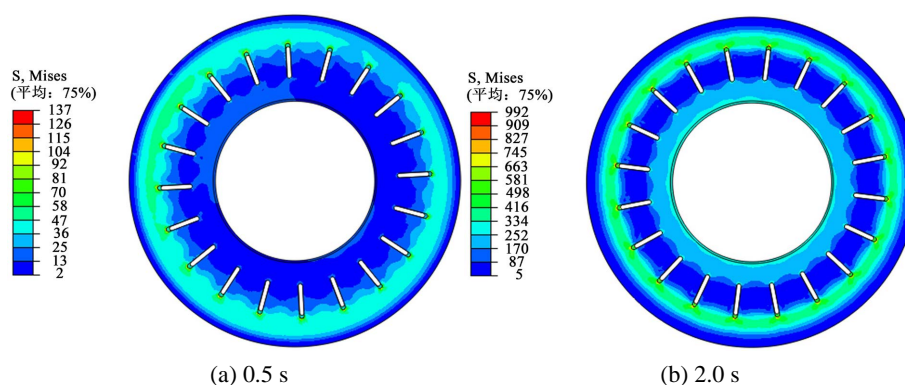


Figure 12. Stress nephogram of traditional material brake disc at different times
图 12. 不同时刻传统材料制动盘应力云图

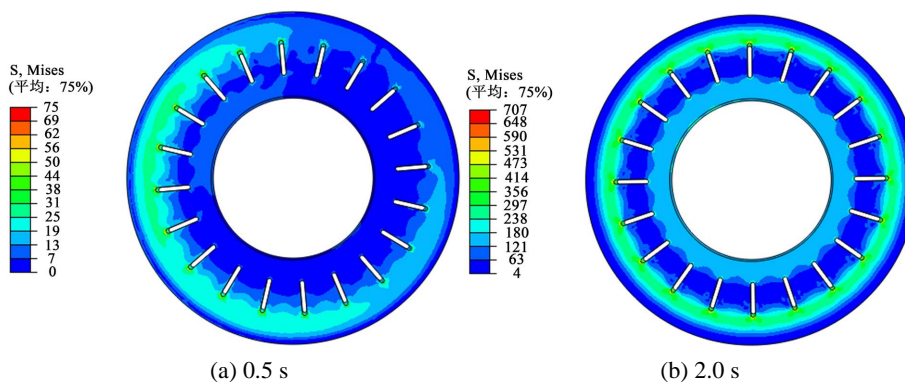


Figure 13. Stress nephogram of SiC_p/Al ceramic composite brake disc at different times
图 13. 不同时刻 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘应力云图

图 12 和图 13 为在紧急制动过程中传统材料制动盘及 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘处于 0.5 s 和 2.0 s 时刻的应力变化云图。从图中可以看出在制动过程中,传统材料制动盘在 0.5 s 时应力最大值达到 49 MPa,在 2.0 s 时应力最大值达到 203 MPa 且沿周向分布在摩擦接触区域中。而 SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动盘在 0.5s 时应力最大值为 26 MPa,在 2.0 s 时应力最大值为 156 MPa,相较而言配置 SiC_p/Al 陶瓷复合材料的制动盘热应力明显降低,应力分布也更加均匀,因此其在制动过程中更不易发生断裂,轴向变形量更小,

制动性能更加稳定。

利用文献对比验证的方法对本文研究结果进行验证。文献[15]所用的试验模型与本文中建立的模型皆为通风制动盘，且制动盘都采用 TH250 传统材料。该文献利用 Link3900 NVH 平台的台架试验方法，得到温度传感器节点与有限元模型对应节点的温度，当制动初速度为 90 km/h、制动速度为 2 s 时，节点温度为 185.2℃。本文以 80 km/h、100 km/h 为制动初速度，制动 2 s 时制动温度为 186.35℃、193.23℃，取其两者平均值作为 90 km/h 制动最高温度进行分析，则温度为 189.79℃，与文献[15]的平均偏差为 2.5%。由于对流换热及热传导的施加参数存在差异，因此本文与文献[15]存在较小的偏差。从仿真和试验结果的数据误差看，本文的模拟方法具有较高的准确性和可靠性。

5. 结论

本文针对 SiC_p/Al 陶瓷复合材料盘式制动器，建立了其有限元模型，在考虑热力耦合作用情形下，开展了不同制动力和制动速度下陶瓷复合材料盘式制动器热力耦合分析，得到结论如下：

1) 不同制动力下，制动盘温度和应力响应曲线变化规律类似，两者均呈现先增大后减小的趋势；温度及应力的最大值均随着制动压力的等量增加而非线性增加；制动盘位移沿径向方向呈现出先增大后减小的趋势。

2) 不同制动速度下的温度响应均呈现了先增大后减小的趋势，并且其变化速率随制动速度的增加而增加；最大热应力出现在制动盘与摩擦片接触处，并基本呈向两侧衰减的趋势；不同制动速度下沿径向方向最大位移差值在摩擦片与制动盘接触处达到最大。

3) 相较于传统材料制动盘，SiC_p/Al 陶瓷复合材料的摩擦因数较高，在相同时刻内摩擦区的最大温度值更高，因此采用 SiC_p/Al 陶瓷复合材料刹车片能够将更多的汽车动能转化为热能，刹车制动效果更明显；SiC_p/Al 陶瓷复合材料的制动盘热应力较低，应力分布也更加均匀，因此其在制动过程中更不易发生断裂，制动性能更加稳定。

参考文献

- [1] 石康, 苏旭武, 吴炎炎, 等. 周盘式制动器热-应力耦合特性的分析探究[J]. 机械传动, 2022, 46(11): 104-109.
- [2] Luo, J., Liu, J.Z., You, Z.Y., et al. (2022) Fatigue Life Prediction of Brake Discs for High-Speed Trains via Thermal Stress. *Science Progress*, **105**, Article ID: 00368504221102742. <https://doi.org/10.1177/00368504221102742>
- [3] 黎小辉, 万霞, 甘春雷. 汽车制动材料研究现状与发展趋势[J]. 材料研究与应用, 2020, 14(3): 240-245.
- [4] 牡丹丰, 王麒麟. SiC_p/Al 陶瓷复合材料制动块磨损数值模拟[J]. 中国新技术新产品, 2022, 459(5): 1-6.
- [5] Ma, Z.W., Zheng, C.S., Xiong, C.B., et al. (2022) Friction-Wear Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Paper-Based Friction Materials under Different Working Conditions. *Materials*, **15**, 3682. <https://doi.org/10.3390/ma15103682>
- [6] Li, S.H., Wei, C., Wang, Y.H., et al. (2022) Effects of High Ambient Temperature and Surface Quality on Tribological Properties of Si₃N₄. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **13**, 3412. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06891-5>
- [7] Si, L., Liu, C., Yan, H.J., et al. (2021) The Influences of High Temperature on Tribological Properties of Cu-Based Friction Materials with a Friction Phase of SiO₂/SiC/Al₂O₃. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **11**, Article ID: 025335. <https://doi.org/10.1063/5.0040220>
- [8] Wei, L., Choy, Y.S., Cheung, C.S., et al. (2021) Comparison of Tribology Performance, Particle Emissions and Brake Squeal Noise between Cu-Containing and Cu-Free Brake Materials. *Wear*, **466**, Article ID: 203577. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203577>
- [9] Jubsilp, C., Jantaramaha, J., Mora, P., et al. (2021) Tribological Performance and Thermal Stability of Nanorubber-Modified Polybenzoxazine Composites for Non-Asbestos Friction Materials. *Polymers*, **13**, 2435. <https://doi.org/10.3390/polym13152435>
- [10] Wen, M. (2022) An Analysis of the Coupling between Temperature and Thermal Stress of Disc Brakes Based on Finite

-
- Element. *International Journal of Heat and Technology*, **39**, 1819-1827. <https://doi.org/10.18280/ijht.390616>
- [11] Belhocine, A. and Afzal, A. (2020) A Predictive Tool to Evaluate Braking System Performance Using a Fully Coupled Thermo-Mechanical Finite Element Model. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, **14**, 225-253. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00650-3>
- [12] Yevtushenko, A., Kuciej, M., Topczewska, K., *et al.* (2020) Frictional Heating during Braking of the c/c Composite Disc. *Materials*, **13**, 2691. <https://doi.org/10.3390/ma13122691>
- [13] Yuan, Z.W., Tian, C., Wu, M.L., *et al.* (2021) A Modified Uniformly Distributed Heat Source Method for Predicting Braking Temperature of Railway Brake Disc. *International Journal of Rail Transportation*, **10**, 216-229. <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.1882890>
- [14] Modanloo, A. and Talaei, M.R. (2020) Analytical Thermal Analysis of Advanced Disk Brake in High Speed Vehicles. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **27**, 209-217. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1472340>
- [15] 张森. 汽车通风盘式制动器的流固热多物理场耦合分析及结构优化[D]: [博士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2017.