

文章编号:1000-582X(2008)12-1346-05

制动盘材料构成设计过程热应力分析

王开¹, 刘昌明¹, 杨勇²

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030;

2. 长安汽车(集团)有限责任公司汽车工程研究院, 重庆 401120)

摘要:应用复合材料的物理性能混合法则及离散化处理方式,运用有限元法研究了梯度SiC_p/Zl104复合材料制动盘在紧急制动工况下的温度和热应力分布,并与铸铁件和均质20Vol. %SiC_p/Zl104复合材料制动盘的计算结果进行比较分析。结果表明,同种工况下梯度SiC_p/Zl104复合材料制动盘温度更低,热应力更小,温度和热应力在盘状件上的分布更有利于减少热疲劳和避免产生热裂纹,且梯度SiC_p/Zl104复合材料制动盘具有减重和提高耐磨性能的优点,这为制备梯度SiC_p/Al复合材料制动盘提供了理论上的支持。

关键词:温度分布;热应力;制动盘;金属基复合材料;功能梯度材料;有限元法

中图分类号:TK 402

文献标志码:A

Brake disc thermal stress in material composite design

WANG Kai¹, LIU Chang-ming¹, YANG Yong²

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Automotive Engineering Institute, Changan Automobile Group Liability Co., Ltd., Chongqing 401120, P. R. China)

Abstract: The temperature distribution and thermal stress distribution of brake discs under emergency braking conditions were studied using the finite element method (FEM). The discs were of three types: those made of functionally graded SiC_p/Zl104 composite materials, of uniform (20% volume) SiC_p/Zl104 composite materials, and of compacted graphite iron, respectively. The rule of mixtures of dual-phase material and the discretization of the material composition distribution were applied to estimate the material properties of functionally graded composite materials. The results show that the temperature and thermal stress of brake discs made of graded SiC_p/Zl104 composite are the lowest among the three types studied, and the distribution of temperature and thermal stress of this brake disc type is more uniform than the others. Furthermore, brake discs made of functionally graded SiC_p/Zl104 composite can reduce vehicle weight and increase wear resistance capacity. The results provide a theoretical foundation for fabricating brake discs made of graded SiC_p/Al composite material.

Key words: temperature distribution; thermal stress; brake disc; metallic matrix composites; functionally graded materials; finite element method

目前,车辆所用制动盘主要采用铸铁、铸钢和锻钢等制备而成,铁质金属材料的密度大、导热性差,

收稿日期:2008-08-17

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2008BB4177)

作者简介:王开(1976-),男,重庆大学博士,主要从事金属基复合材料研究,(Tel)023-65111670;

(E-mail) wangkai.china@gmail.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

容易出现热龟裂等缺陷。金属基复合材料具有较高的比强度、比模量,良好的耐高温和导电导热性能,优良的耐磨性及二次加工性等优点,其中最为突出的一点在于具有可设计性^[1-2]。因此,国内外在均质铝基复合材料制动盘零件的制备^[3]、数学分析方法的建立^[4-5]以及与铸铁件制动盘的比较试验^[6]等方面做了大量研究工作。

制动盘是由与制动块衬片摩擦的法兰部分(内侧和外侧法兰)和用于支撑、定位的桥部构成^[7]。制动过程中,制动盘的这两个部分处于不同的应力状况,使得材料容易出现微裂纹和局部的塑性变形^[8]。由于功能梯度复合材料^[9]具有连续的物理、机械性能^[10-12]变化,吸引了很多研究者^[13]的兴趣。笔者提出研制梯度 SiC_p/Al 复合材料制动盘,为了验证使用梯度 SiC_p/Al 复合材料制备制动盘可能性和实用性,运用有限元分析软件 MSC. Patran /MSC. Nastran 研究了梯度 SiC_p/Zl104 复合材料制动盘在紧急制动工况下的温度与热应力分布,并与铸铁、均质 20Vol. %SiC_p/Zl104 制动盘进行比较分析,为梯度 SiC_p/Al 复合材料制动盘的研制奠定了理论依据。

1 梯度复合材料制动盘构成与性能确定

复合材料的增强体是碳化硅(SiC)颗粒,基体合金材料是 Zl104 铝合金,其中碳化硅增强颗粒在基体铝合金中的分布是随机分散的,颗粒的形状、尺寸和颗粒的取向都是任意的,数值研究过程中采用文献^[14]的复合材料混合法则确定了具有不同体积分数的复合材料的性能。计算过程中 Zl104 和 SiC 材料都选取 100 °C 时的材料特性参数值,计算结果如表 1 所示;蠕墨铸铁的各物理参量如表 2 所示。

表 1 不同体积分数 SiC 增强 ZL104 复合材料的特性参数

增强相材料 SiC 的体积分数	热导率 / $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	质量定压热容 / $(kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	质量密度 / $(kg \cdot m^{-3})$
1.00	24.95	120.00	3 200
0.35	70.75	507.02	2 895
0.30	78.43	540.44	2 868
0.25	86.08	574.46	2 842
0.20	93.52	609.09	2 814
0.15	100.48	644.34	2 786
0.10	106.56	680.23	2 758
0.05	111.11	716.77	2 729
0.00	113.00	754.00	2 700

梯度复合材料制动盘的增强形式为从制动盘内径到制动盘外径, SiC 增强颗粒的体积分数从 5% 逐

渐线性增加到 35%。在仿真计算中,运用文献^[15]的方法将梯度复合材料沿径向平均离散成具有一定体积分数的 7 层,在对模型划分单元时,属于不同梯度层的单元赋予不同材料性能参数。

表 2 蠕墨铸铁的特性参数

热导率 / $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	质量定压热容 / $(kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	质量密度 / $(kg \cdot m^{-3})$
38~50	460~480	7 000~7 200

2 制动盘几何与有限元网格模型确定

制动盘实体和网格模型如图 1 所示,盘中央突出部分是桥部,外面两圆盘面分别为内侧和外侧法兰,法兰中间夹层为 32 个弧形条的散热加强筋板,筋板间距约为 13.4 mm,所有筋板都与内、外侧法兰连接为一个整体。制动盘在建模过程中忽略了对有限元仿真结果影响很小的局部结构,如螺纹孔中的螺纹、很小的倒角和倒圆。模型采用了四节点正四面体单元,单元边长为 3.5 mm,共用了单元 52 725 个,节点 13 123 个。

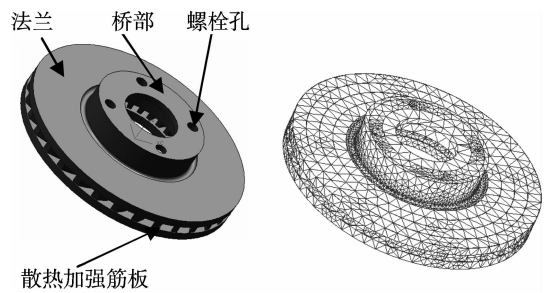


图 1 制动盘的实体及网格模型

3 初始条件与边界条件确定

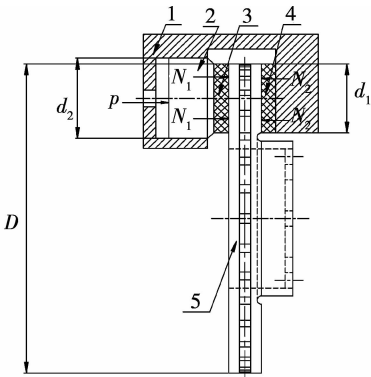
对制动盘的研究是在紧急制动工况下,假设制动为匀减速运动,制动盘旋转一周在其盘面上任一点速度保持不变,且任一点的周向载荷相同以及不考虑车体结构对制动盘换热系数的影响等。车的初始速度 $v_0 = 100.0$ km/h(初始角速度 $\omega_0 = 88.46$ rad/s),经过计算停车所需要的最小制动时间为 3.6 s。

3.1 机械边界条件的确定

浮钳空心盘式制动器结构如图 2 所示,制动时制动盘内侧的活动制动块在油缸液压力 p 的作用下由活塞推靠内侧法兰,同时制动钳上的反作用力将装在制动钳支架中的固定制动块也靠到外侧法兰上,以一定的压力将整个制动盘夹紧制动。制动盘的受力计算公式如下:

$$N_1 = N_2 = p \cdot S_1 = p \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2, \quad (1)$$

式中： N_1 、 N_2 分别为作用在制动盘内侧与外侧法兰上的压力(作用与反作用力)； p 为油缸内液体油压(8.0~12.0 MPa)； S_1 为活塞顶部面积； d_2 为活塞直径(0.045 m)。



1. 制动钳体及其支架；2. 活塞；3. 内侧活动制动块(由摩擦块与金属背板组成)；4. 外侧固定制动块(由摩擦块与金属背板组成)；5. 制动盘

图 2 浮钳空心盘式制动器受力图

3.2 热载荷条件的确定

制动盘的热交换采用了第三类边界条件。制动过程中，制动盘的换热现象复杂，通常采用经验和半经验公式来获取热边界条件，并将计算结果与实测温度值反复比较修正，直到满足精度。制动盘各外表面换热系数计算结果如表 3 所示。

环境温度 / $^\circ C$	散热加强筋板间自然通风孔对流换热系数	热辐射换热系数	内圆环形面的对流换热系数	外圆环形面的对流换热系数
20.0	16.55	0.74	61.42	59.49

3.3 约束条件的确定

为了便于对制动盘进行有限元研究，假设制动盘相对于地面静止。为了避免应力集中，在制动盘 4 个螺栓孔处分别施加 X 和 Y 向约束，在制动盘桥部内表面上施加 Z 向约束。

4 仿真试验结果分析

4.1 温度场分析

图 3 所示为制动最后时刻各种材料的温度分布云图；图 4 所示为制动过程最高温度点随时间的变化趋势。经过比较分析可以看出：3 种材料制备的制动盘的最高温度均分布在法兰边缘，在径向方向上呈梯度分布；在制动时间为 3.6 s 时，铸铁材料的制

动盘最高温度为 238.7 $^\circ C$ ，均质 20Vol. %SiC_p/Zl104 复合材料的制动盘最高温度为 187.4 $^\circ C$ ，而梯度 SiC_p/Zl104 复合材料制动盘最高温度则只有 129.5 $^\circ C$ ；从图 4 可以看出复合材料制动盘最高点温度升温速度小于铸铁件的升温速度；铝基复合材料制备的制动盘温度沿着径向方向逐渐变化，而对于铸铁件而言最高温度主要集中在制动盘的边缘，这主要是因为铝合金的热导率约为铸铁的 4 倍，比热容约为铸铁的 2 倍，在加入了一定体积分数的 SiC 增强颗粒之后，复合材料在提高高温强度和耐磨性的同时仍然保持了较好的导热性能和蓄热能力，因此在制动过程中，复合材料制动盘的表面温度升高比率低于铸铁的温度升高比率。而具有梯度分布的复合材料的导热性能和蓄热能力也随着材料的组成沿径向的变化发生相应的变化，因此，在同种制动工况下其最高温度在 3 种材料制备的制动盘中为最低。

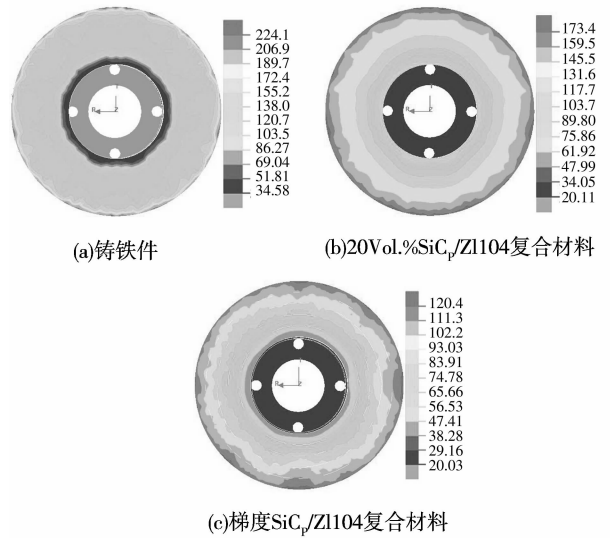


图 3 不同材料制动盘制动过程中温度分布

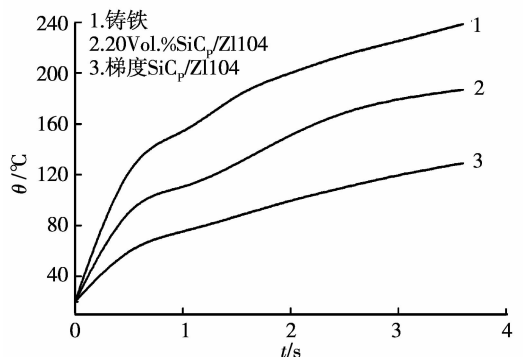


图 4 不同材料制动盘制动过程中最高温度点随时间的变化

4.2 热应力分析

图 5 所示为铸铁件、均质 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 和梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘的热应力分布云图。从图中可以看出铸铁材料制动盘的等效热应力最大值位于制动盘的外边缘,为 224 MPa,均质 20Vol. % $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘和梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘的等效热应力最大值位于法兰的内边缘处,分别为 200 MPa 和 164 MPa,这些热应力值均小于各自材料的许用强度,铸铁件的最大热应力值位于制动盘的法兰外边缘,而均质和梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘位于桥部与法兰交界处,分析可知该处结构变化造成应力集中;另一方面铸铁件的热应力分布在径向方向上有明显的跳跃变化,剧变处还位于摩擦衬片接触部位,这会降低零件的使用寿命,而均质和梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 制动盘的热应力在径向上的剧变主要位于制动盘的桥部与法兰交界处,这可以通过制动盘的结构调整进行改进,而且梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘的这种剧变程度小得多。

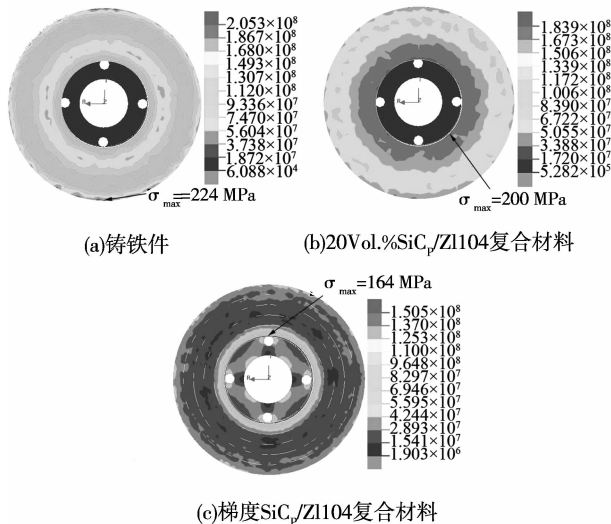


图 5 不同材料组成的等效热应力分布云图

图 6 所示为 3 种材料制动盘沿 x 向的热应力分布云图。对于铸铁制动盘和均质 20Vol. % $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘而言,其中的拉应力和压应力的分布变化剧烈,在这些位置容易出现开裂并扩展,最终降低制动盘的使用寿命。对于梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘而言,其沿 x 向应力变化平缓;对于零件而言,避免了拉、压热应力的急剧变化而引起的裂纹,这对提高产品的使用寿命具有重要意义。由于制动衬片和制动盘的接触产生的作用力在径向距离上有差别,通过梯度分布的复合材料制动盘在径向上的材料分布具备了不同的性能,正好可以大大降

低该过程的拉、压热应力的急剧变化。

从 3 种材料制动盘的热应力值和分布云图的分析,说明了以往采用的铸铁材料制作的制动盘容易出现热疲劳和热裂纹,理论分析表明,将具有梯度分布的复合材料运用到具有特殊工作状况的制动盘上,代替原有的铸铁件制动盘,在使用性能方面完全可以满足需求,同时还可以使零件的使用寿命得到改善并降低自重。

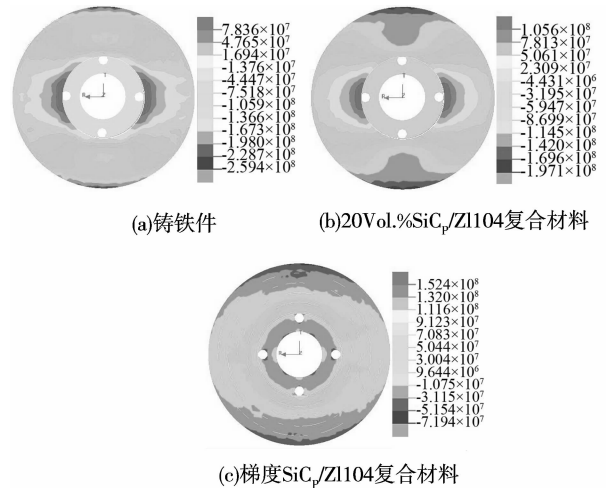


图 6 不同材料组成的沿 x 向热应力分布云图

5 结 论

应用复合材料热性能理论,采用 MSC. Patran/MSC. Nastran 有限元分析软件对普通铸铁、均质 20% $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料和梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料 3 种制动盘的温度、热应力分布状况进行了仿真计算分析。结果表明:

1) 复合材料制动盘的温度分布较铸铁件制动盘温度沿径向变化平缓,而且复合材料制动盘的表面最高温度低于铸铁件表面温度,梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘的表面最高温度在 3 种材料制备的制动盘中为最低。

2) 铝基复合材料制动盘等效热应力分布较铸铁件的等效热应力分布更为合理,从 x 向的应力分布状况可以看出,梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘不易出现应力巨变产生的裂纹。

3) 铝复合材料制动盘的减重对于提高车辆的动力学性能具有明显的优势,而梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘温度场和热应力场分布最为科学合理,另一方面制动盘法兰处的高体积分数 SiC 可以提高产品的耐磨性,这对提高产品的使用寿命具有重要意义。提出的梯度 $\text{SiC}_p/\text{Zl104}$ 复合材料制动盘具

有可行性和实用价值。

4) 运用数值处理方法对具体的产品进行材料构成分析,对于研究复合材料构成的零部件的增强体积分数的分布和进一步的优化设计工作具有一定的指导意义,也为功能梯度复合材料零件设计提供了一种研究思路。

参考文献:

- [1] SADANANFAM J, BIKSHAMIAH G, GOPALAKRISHNA B, et al. Effect of different reinforcements on the therthermal expansion of 2124 aluminium metal-matrix composites [J]. *Journal of Material Science Letter*, 1992, 11: 1518-1520.
- [2] GEIGER A L, HASELMAN D P H, DONALDSON K Y. Effect of reinforcement particle size on the thermal conductivity of a particulate silicon carbide reinforced aluminium-matrix composite [J]. *Journal of Material Science Letter*, 1993, 12: 420-423.
- [3] NAKANISHI H, KAKIHARA K, NAKAYAMA A, et al. Development of aluminum metal matrix composite (Al-MMC) brake rotor and pad [J]. *JSAE Review*, 2002(23): 365-370.
- [4] SHOROWORDI K M, HASEEB A S M A, CELIS J P. Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad [J]. *Wear*, 2004(256): 1176-1181.
- [5] BLAU P J, MEYER H M. Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials [J]. *Wear*, 2003(255): 1261- 1269.
- [6] JANG H, KO K, KIM S J, et al. The effect of metal fibers on the friction performance of automobile brake friction materials [J]. *Wear*, 2004(256): 406-414.
- [7] BONIARDI M, D'ERRICO F, TAGLIABUE C, et al. Failure analysis of a motorcycle brake disc [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2006(13): 933-945.
- [8] CHO J R. Optimum material composition design for thermal stress reduction in FGM lathe bit [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(10): 1568-1577.
- [9] VELHINHO A, SEQUEIRA P D, MARTINS R, et al. X-ray tomographic imaging of Al/SiC_p functionally graded composites fabricated by centrifugal casting [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2003, 200: 295-302.
- [10] 许富民, 齐民, 朱世杰, 等. SiC 颗粒增强铝基梯度复合材料的制备与性能 [J]. *金属学报*, 2002, 38(9): 998-1001.
- XU FU-MIN, QI MIN, ZHU SHI-JIE, et al. Processing and properties of functionally graded aluminum matrix composites reinforced with SiC particulate [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(9): 998-1001.
- [11] 谭银元. 离心铸造过共晶 Al-Si 合金自生梯度复合材料及其阻尼性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(2): 353-358.
- TAN YIN-YUAN. In situ gradient composite of hypereutectic Al-Si alloy by centrifugal casting and its damping property [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(2): 353-358.
- [12] OBATA Y, NOSA N. Optimum material design for functionally gradient material plate [J]. *Arch Appl Mech*, 1996, 66: 581-589.
- [13] 王宝臣, 张伟强. 电磁离心铸造 SiC_p/Al 复合材料励磁电压对不同粒度颗粒分布的影响 [J]. *复合材料学报*, 2006, 23(4): 78-82.
- WANG BAO-CHENG, ZHANG WEI-QIANG. Effect of exciting voltage on the distribution of particles with different size in SiC_p/Al composite prepared by electromagnetic centrifugal casting [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(4): 78-82.
- [14] 曾竟成, 罗青, 唐羽章. 复合材料理化性能 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [15] CHO J R, HA D Y. Volume fraction optimization for minimizing thermal stress in Ni-Al₂O₃ functionally graded materials [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 334(1-2): 147-155.

(编辑 李胜春)

(上接第 1345 页)

- [11] 陈丽娟, 侯柱峰, 朱梓忠, 等. LiAl 中空位形成能的第一原理计算 [J]. *物理学报*, 2003, 52: 2229.
- CHEN LI-JUAN, HOU ZHU-FENG, ZHU ZI-ZHONG, et al. First-principles calculation of the vacancy formation energies in LiAl [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52: 2229.
- [12] GUELLIL A M, ADAMS J B. The application of the analytic embedded atom method to bcc metals and alloys [J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7: 639.
- [13] ADAMS J B, FOILES S M, WOLFER W G. Self-diffusion and impurity diffusion of fee metals using the five-frequency model and the embedded atom method [J]. *Journal of Materials Research*, 1989, 4: 102.
- [14] MOLACHLAN J R, CHAUBERLAIN L L. Atomic vibration and the melting process in metals [J]. *Acta Metallurgica*, 1964, 12: 577.
- [15] MIEDEMA A R. Surface energies of solid metals [J]. *ZMetallkde*, 1978, 69: 287.
- [16] 张邦维, 胡望宇, 舒小林. 嵌入原子方法理论及其在材料科学中的应用: 原子尺度材料设计理论 [M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1999: 300-312.

(编辑 陈移峰)