

造粒炭黑含量对 Cu-Fe 摩擦材料性能的影响

王晓阳^{1,2}, 张翠萍¹, 王伟¹, 茹红强¹

(1. 东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 沈阳大学 辽宁省先进材料制备技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110044)

摘要: 采用干压擦筛造粒法制备了炭黑造粒颗粒, 研究了炭黑造粒颗粒含量(质量分数)对 Cu-Fe 摩擦材料显微组织、力学性能、摩擦性能的影响。结果表明: 炭黑造粒颗粒易被压制成条状形态, 当炭黑造粒颗粒质量分数较低时, 其与金属基体能形成完整的界面, 而含量较高时界面易出现孔洞和裂纹; 随着炭黑造粒颗粒质量分数的增加, 摩擦材料的力学性能先增加后降低、摩擦系数和磨损量均先降低后增加。当炭黑造粒颗粒质量分数为 5% 时, 摩擦材料的力学性能最大, 摩擦系数最低, 磨损量最小, 材料的综合性能最佳。

关键词: 造粒炭黑; 鳞片石墨; 成分配比; 摩擦性能

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)S1-302-05

制动材料是关系到高速列车运行安全的关键部件。目前, 作为高速列车制动材料主要有粉末冶金摩擦材料^[1], 有机合成摩擦材料^[2-4]、碳纤维或碳陶摩擦材料以及以 C-C/SiC 复合材料为代表的复合陶瓷材料^[5-11]。粉末冶金摩擦材料具有磨损量小、使用寿命长等优点, 是目前摩擦材料中应用最广的材料。

粉末冶金摩擦材料主要由基体组元、摩擦组元、润滑组元构成。粉末冶金摩擦材料中使用的润滑组元多为低熔点金属 (Pb、Sn、Bi 等)、固态润滑剂 (石墨、MoS₂、云母片、SbS 等) 以及金属的磷化物、一些氧化物等, 在所有的润滑组元中, 以片状石墨 (主要以鳞片石墨为主) 和 MoS₂ 的应用最广泛。天然鳞片石墨是一种单晶体, 炭黑^[12,13]作为一种人造无定形碳, 两者性质相近, 但天然鳞片石墨资源有限、价格高, 人造炭黑来源广泛、价格低。能否在粉末冶金摩擦材料里, 利用价格较低的炭黑替代价格较高的鳞片状石墨还鲜有报道。炭黑和鳞片状石墨同样具有润滑性, 但其颗粒细小, 不能直接在摩擦材料中使用, 本研究以经过造粒工艺处理的炭黑和天然鳞片石墨为润滑组元, 探讨其不同成分对比对摩擦材料性能的影响, 实验发现造粒炭黑的加入可显著提高材料性能。本研究工作对于降低摩擦材料的原材料成本、提高摩擦材料的性能具有重要的实际应用价值。

1 实验

实验采用的主要原料有电解铜粉 (粒度 < 75 μm, 纯度 ≥ 99.8%)、水雾化铁粉 (粒度 < 75 μm, 纯度 ≥ 99.8%)、Fe-Cr 合金 (粒度 < 200 μm, 纯度 ≥ 99%)、天然鳞片石墨 (粒度 < 200 μm, 纯度 ≥ 99%) 和炭黑 (粒度 < 100 nm, 纯度 ≥ 99%)。首先采用酚醛树脂为结合剂、利用干压擦筛造粒法将炭黑制备成粒度约为 400 μm 的颗粒。试样的编号和原料配比如表 1 所示。采用热压烧结方法制备摩擦材料, 其烧结工艺为^[14]: 在 18 MPa 下、15 min 升温至 600 °C, 在 600 °C 下加压至 25 MPa, 并保温 15 min, 保温结束后随模具冷却至室温。

利用万能试验机测试抗弯强度及抗压强度, 利用日立 S-4800 扫描电镜、Olympus LEXT OLS3000 显微

表 1 Cu-Fe 摩擦材料的组成

Table 1 Composition of Cu-Fe friction materials (ω/%)					
Sample No.	Cu-Fe	MoS ₂	Fe-Cr	Flake graphite	Carbon black
1 [#]	73	2	10	15	0
2 [#]	73	2	10	12	3
3 [#]	73	2	10	11.25	3.75
4 [#]	73	2	10	10	5
5 [#]	73	2	10	7.5	7.5
6 [#]	73	2	10	5	10

收稿日期: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51272039, 51032007); 中央高校基本科研业务费 (N130810003)

作者简介: 王晓阳, 女, 1981 年生, 博士生, 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110189, 电话: 024-62268751, E-mail: wxy927@163.com

镜观察显微组织和摩擦表面形貌。采用 MM1000-II 型摩擦磨损性能试验机测试摩擦性能, 以 40Cr 为对偶材料, 实验参数为^[14]: 转动惯量 0.82 kg m^2 , 制动压强 0.5 MPa , 制动速度 60、120、180、250、380 km h^{-1} 。材料经充分磨合后, 在每种制动速度下制动 5 次, 测定摩擦系数和磨损量。

2 结果与讨论

2.1 造粒炭黑质量分数对材料显微组织的影响

不同炭黑造粒颗粒质量分数的摩擦材料在垂直于压制压力方向的显微组织如图 1 所示 (图中 A 指鳞片石墨, B 指造粒炭黑)。由图可知, 当炭黑造粒颗粒质量分数为 0 即全部加入鳞片石墨时 (图 1a), 扁条状的鳞片石墨趋于垂直压力方向分布。当炭黑造粒颗粒质量分数为 5% 时 (图 1b), 炭黑造粒颗粒在与压力垂直方向发生形变并形成趋于条状形貌。这是由于在压制压力的作用下鳞片石墨在物料中发生了滑移、炭黑造粒颗粒发生了压制变形, 所以鳞片石墨在垂直于压制压力方向出现了鳞片分布, 炭黑造粒颗粒在垂直于压制压力方向被压制成条状形态。

图 2 为不同造粒炭黑颗粒质量分数试样中造粒炭黑颗粒与基体金属相的界面显微组织。

由图可知, 当造粒炭黑颗粒质量分数为 5% 时 (图 2a), 界面结合良好且造粒炭黑本身较致密无明显缺

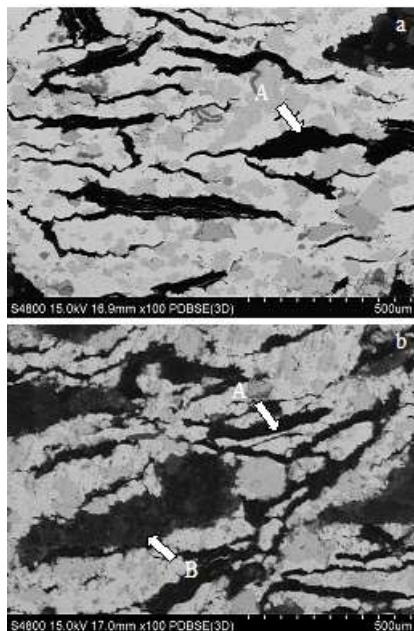


图 1 不含炭黑造粒颗粒与含炭黑造粒颗粒试样的显微组织
Fig.1 Microstructures of samples with non-granulated carbon black (a) and 5% granulated carbon black (b)

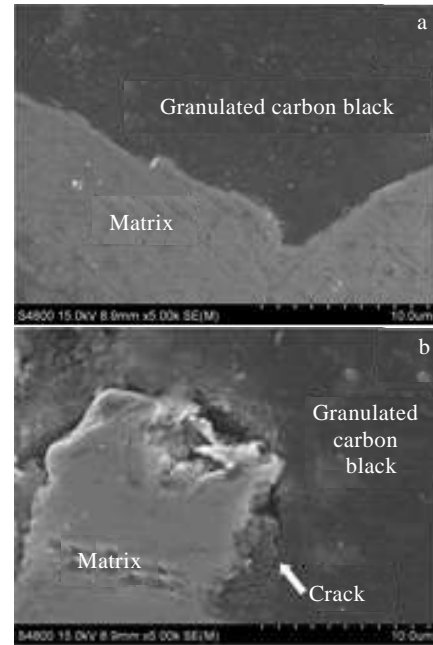


图 2 不同造粒炭黑颗粒质量分数试样的界面显微组织
Fig.2 Interface microstructures of samples with different mass fractions of granulated carbon black: (a) 5% granulated carbon black and (b) 10% granulated carbon black

陷, 当造粒炭黑颗粒质量分数为 10% 时 (图 2b), 金属基体与造粒炭黑界面存在明显间隙, 并在造粒炭黑颗粒内部出现裂纹, 说明界面结合较差。这与造粒炭黑含量过多形成团聚有关。造粒炭黑颗粒是以酚醛树脂作为结合剂而进行造粒的, 属于软颗粒, 在压制压力的作用下容易变形, 易于和金属基体形成完整的界面组织, 但由于酚醛树脂在压制烧结过程中发生裂解、碳化, 排除大量的气体, 当造粒炭黑颗粒质量分数较低时, 排除的气体少, 并没有影响造粒炭黑颗粒与金属基体形成的完整界面, 而当造粒炭黑颗粒质量分数较高时, 排除的气体增加, 释放到造粒炭黑颗粒与金属基体界面时, 容易引起界面出现裂纹、孔洞, 因此出现了图 2b 所示的现象。

2.2 造粒炭黑质量分数对材料力学性能的影响

材料力学性能随造粒炭黑质量分数的变化曲线如图 3 所示。由图可知, 材料力学性能随着造粒炭黑质量分数的增加呈现先增加后降低的变化规律, 当炭黑造粒颗粒质量分数为 5% 时, 材料的抗弯强度与抗压强度均达到最大值。炭黑造粒颗粒属于软性颗粒, 在材料的变形过程中软性颗粒可以缓解和吸收材料的变形应力, 因而可以提高材料的力学性能。但材料的力学性能与材料的显微组织与结构具有密切的关系, 当造

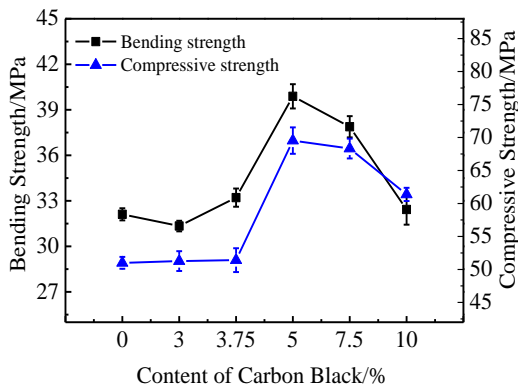


图 3 造粒炭黑质量分数对材料力学性能的影响

Fig.3 Effect of mass fraction of granulated carbon black on mechanical property of materials

粒炭黑质量分数较低时，造粒炭黑与基体界面结合性良好，因此材料的力学性能较好；当造粒炭黑质量分数较高时，其与金属基体的界面恶化使材料力学性能迅速降低。因此，随着造粒炭黑质量分数的增加，材料的力学性能出现了先增加后降低的变化趋势。

2.3 造粒炭黑质量分数对材料摩擦系数的影响

材料摩擦系数随造粒炭黑颗粒质量分数变化曲线如图 4 所示。

由图可知，随造粒炭黑质量分数的增加，摩擦系数呈先下降后上升的变化趋势，当造粒炭黑质量分数为 5% 时，材料的摩擦系数最低。造粒炭黑作为润滑组元，加入到摩擦材料中将降低其摩擦系数^[15]，但如果在摩擦过程中造粒炭黑颗粒破碎、脱落，润滑组元的作用就会失效，导致摩擦材料的摩擦系数增加。因此，当造粒炭黑颗粒质量分数低于 5% 时，造粒炭黑颗粒起到了润滑组元的作用，材料的摩擦系数随着造粒炭黑

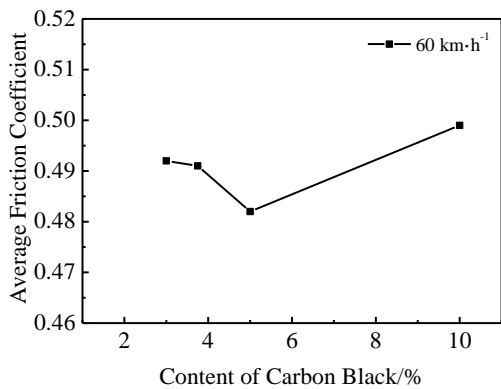


图 4 造粒炭黑质量分数对材料摩擦系数的影响

Fig.4 Effect of mass fraction of granulated carbon black on average friction coefficient of materials

颗粒分数的增加而降低，而当造粒炭黑颗粒质量分数超过 5% 时，其与金属基体的界面恶化使造粒炭黑颗粒在摩擦过程中容易发生破碎和脱落，导致材料的摩擦系数增加。

2.4 造粒炭黑质量分数对材料磨损量的影响

材料磨损量随造粒炭黑质量分数的变化曲线如图 5 所示。由图可知，在摩擦压力为 0.5 MPa 时，材料的磨损量呈先降低后增加的变化趋势，当造粒炭黑质量分数为 5% 时，材料的磨损量最低。材料的磨损量与材料的力学性能、摩擦系数和显微组织有关，材料的力学性能高、摩擦系数低对应材料的磨损量就低。因此材料磨损量的变化规律与图 2、图 3 和图 4 所反映的规律相一致，当造粒炭黑质量分数为 5% 时，材料的界面结合最好、力学性能最高、摩擦系数最低，材料的磨损量最低。

为了进一步分析磨损量变化趋势，利用激光共聚焦扫描显微镜对造粒炭黑质量分数为 3.75%、5% 和 7.5% 的试样摩擦后表面磨损情况进行了观察，其结果如图 6 所示。

由图可知，当造粒炭黑质量分数为 3.75% 时，材料摩擦后摩擦表面出现了裂纹和部分表面膜脱落的现象，呈现清晰犁沟且犁沟深度较大；当造粒炭黑质量分数为 5% 时，材料摩擦后摩擦表面相对平滑并形成完整的摩擦表面膜，犁沟深度较小；当造粒炭黑质量分数为 7.5% 时，材料摩擦后摩擦表面破坏严重且局部发生了严重的粘着磨损和表面层堆积现象，犁沟分布不均匀、且犁沟深度较大。当造粒炭黑质量分数为 7.5% 时，材料中出现的缺陷较多（2.1 中所述），材料摩擦过程中，摩擦表面膜会以缺陷为中心加速破坏，伴随有表面膜的快速破坏与生成；当造粒炭黑质量分数为 3.75% 时，由于材料强度较低（图 3），犁沟深度相对

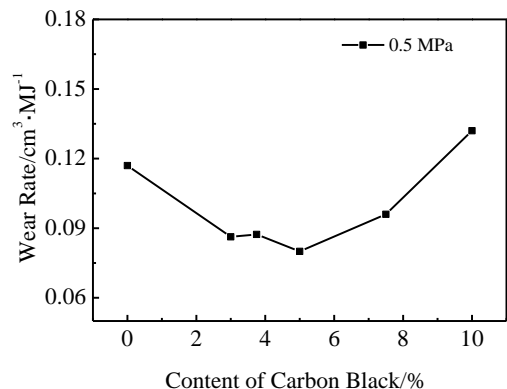


图 5 造粒炭黑质量分数对材料磨损量的影响

Fig.5 Effect of mass fraction of granulated carbon black on wear loss of materials

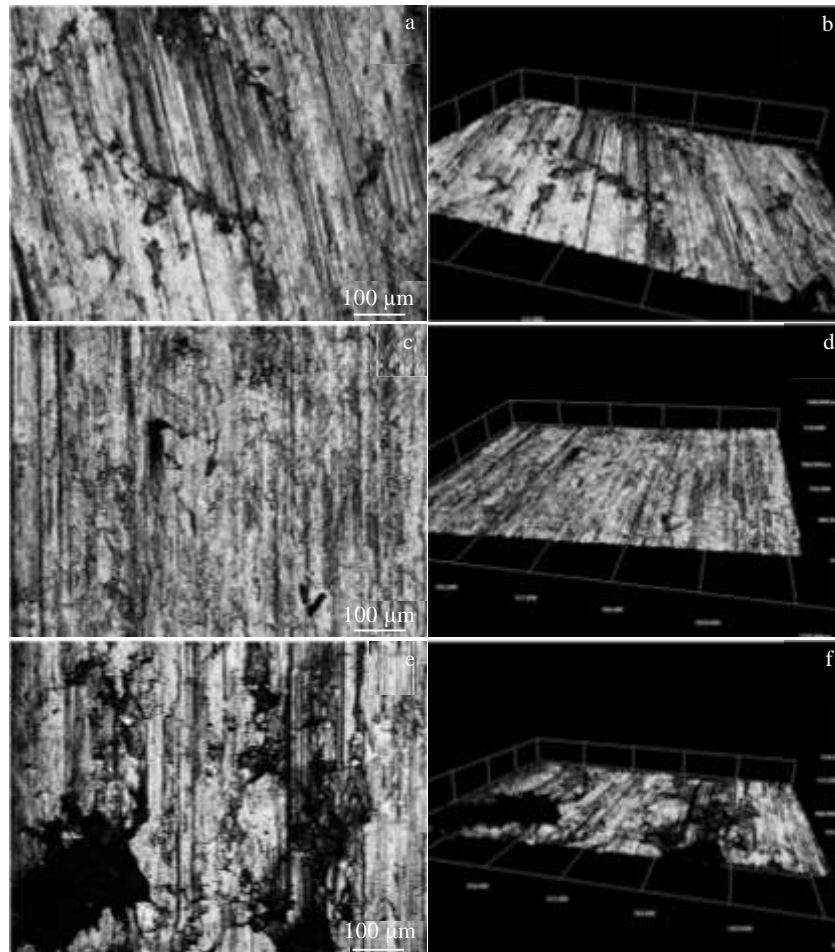


图 6 摩擦后样品表面激光共聚焦扫描分析

Fig.6 LSM analysis of the worn surface: (a, b) 3.75% granulated carbon black, (c, d) 5% granulated carbon black, and (e, f) 7.5% granulated carbon black

较大；当造粒炭黑质量分数为 5% 时，由于此时材料具有适当的强度与较少的缺陷（图 2 和图 3），摩擦表面膜能够保持相对较长的摩擦时间而不被破坏，材料的磨损量较低。对材料摩擦表面的激光共聚焦显微分析也验证了图 5 的实验结果。

3 结 论

1) 炭黑造粒颗粒易被压制成条状形态，当其质量分数较低时，可与金属基体形成完整的界面，但其质量分数较高时界面易出现孔洞和裂纹。

2) 随造粒炭黑颗粒质量分数的增加，材料的抗弯强度和抗压强度呈先增大后减小的变化趋势，材料的摩擦系数和磨损量均呈现先下降后上升的变化趋势。

3) 当造粒炭黑颗粒质量分数为 5% 时，材料的力学性能最高、摩擦系数最低、磨损量最小，此时材料的综合性能最佳。

参考文献 References

- [1] Gultekin D, Uysal M, Aslan S *et al.* *Wear*[J], 2010, 270(1-2): 73
- [2] Österle W, Urban I. *Wear*[J], 2004, 257(1-2): 215
- [3] Filip P, Weiss Z, Rafaja D. *Wear*[J], 2002, 252(3-4): 189
- [4] Österle W, Griepentrog M, Gross Th *et al.* *Wear*[J], 2001, 251(1-12): 1469
- [5] Leng Jinfeng(冷金凤), Jiang Longtao(姜龙涛), Wu Gaohui(武高辉) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(11): 1894
- [6] Blanco C, Bermejo J, Marsh H *et al.* *Wear*[J], 1997, 213(1-2): 1
- [7] Deng H L, Li K Z, Li H J *et al.* *Wear*[J], 2010, 270(1-2): 95
- [8] Fan S W, Zhang L T, Cheng L F *et al.* *Composites Science and Technology*[J], 2010, 70(6): 959
- [9] Fan S W, Zhang L T, Cheng L F *et al.* *Ceramics International* [J], 2011, 37(7): 2829

- [10] Jang G H, Cho K H, Park S B *et al.* *Metals and Materials International*[J], 2010, 16(1): 61
Kunming: Kunming University of Science &Technology, 2006
- [11] Cai Y Z, Fan S W, Yin X W *et al.* *International Journal of Applied Ceramic Technology*[J], 2011, 8(2): 317
[14] Wang Xiaoyang(王晓阳), Ru Hongqiang(茹红强). *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2015, 25(6): 48
- [12] Zou Wei(邹 薇). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Science &Technology, 2005
[15] Österle W, Prietzel C, Kloß H *et al.* *Tribology International* [J], 2010, 43(12): 2317
- [13] Jiang Yan(姜 艳). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D].

Effect of Granulated Carbon Black Content on Properties of Cu-Fe Friction Material

Wang Xiaoyang^{1,2}, Zhang Cuiping¹, Wang Wei¹, Ru Hongqiang¹

(1. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Key Laboratory of Advanced Materials Technology of Liaoning Province, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: The carbon black granulated granules were prepared by dry pressing and sieving granulation. The effects of the mass fraction of carbon black on the microstructure, mechanical properties and tribological properties of Cu-Fe friction materials were studied. The results indicate that the carbon black granulated granules can be easily pressed into strip shape. When the mass fraction of granulated carbon black is low, it can form a complete interface with the metal matrix, and when the content is high, the interface is prone to form holes and cracks. With the increase of the mass fraction of granulated carbon black, the friction coefficient and the wear loss initially decrease and then increase, while the bending strength and compressive strength of the material show an opposite trend. In particular, when the mass fraction of the granulated carbon black is 5%, the friction material exhibits the highest mechanical properties, the lowest friction coefficient, the minimum wear loss and the best comprehensive performance.

Key words: granulated carbon black; flake graphite; composition ratio; tribological property

Corresponding author: Ru Hongqiang, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, Tel: 0086-24-83680248, E-mail: ruhq@smm.neu.edu.cn