

文章编号: 1001-1455(2004)02-0151-07

摩擦材料在无围压和加围压条件下的形变比较*

刘建秀^{1,2}, 韩长生², 张祖根², 王 悟²

(1. 郑州轻工业学院机电系, 河南郑州 450002;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川绵阳 621900)

摘要: 研究铜基粉末冶金摩擦材料在无围压和加围压条件下的动态力学特性及其形变特征。试验在 Hopkinson 压杆上完成, 通过试验发现, 材料在无围压、应变率低于 1000 s^{-1} 时, 有应变率强化效应; 在更高应变率下, 材料有损伤软化效应。微观分析可以看到试件上大量的平行滑移裂纹导致了材料破坏, 形变是滑移伴随少量的孪晶; 裂缝中有大量的碳纤维组织, 这些纤维状组织对裂纹的扩展起抑制作用。而材料在加围压下的性能得到了很大的改善, 同一应变率下最大应力、屈服极限和动态杨氏模量均有提高。在高应变率时, 无论是加围压还是无围压, 破碎的硬质颗粒都是长条状的。由此得出推论, 球状、细化的硬质颗粒, 可提高基体的强度。

关键词: 固体力学; 冲击; 围压; 纤维组织; 硬质颗粒

中图分类号: O341

国标学科代码: 130°1510

文献标志码: A

1 引言

摩擦材料在制动时, 均会受到冲击载荷的作用, 尤其是急刹车情况。列车的速度越高摩擦材料所受的冲击力就越大, 因此研究摩擦材料的抗冲击性能具有重要的意义。而铜基粉末冶金摩擦材料由于其良好的导热性和耐磨性, 已被广泛用于航空领域^[1], 法国的 TGV-S、TGV-A 均使用了铜基粉末冶金摩擦材料^[2], 我国也正处于研制阶段^[3]。一般粉末冶金摩擦材料总是与钢背烧结或抱缘后使用, 也就是说, 材料同时受多向应力状态。本文中, 研究摩擦材料的加围压冲击性能, 近似模拟材料的多向应力工况, 并与不加围压的情况对比。

2 材料的配方、工艺及组织结构

2.1 配方

在铜基粉末冶金摩擦材料中, 金属具有良好的塑性和导热性, 非金属具有高熔点和坚硬耐磨等特点, 如何能充分发挥和兼顾二者的特性则可获得性能优良的摩擦材料。该试验所采用的摩擦材料配方如表 1 所示。

表 1 铜基粉末冶金材料的配方范围表

Table 1 Mass component of Cu-matrix P/M friction material										W _B / (%)
Cu	Fe	Sn	Ni+Zn+Mn+Ti	BaSO ₄	Al ₂ O ₃ +SiO ₂ +SiC+B ₄ C	CaF ₂ +WS ₂	石墨+Pb+MoS ₂	其它		
65~68	5~8	4~7	0~1	1~4	2~5	0~1	8~11	2~7		

该材料以铜粉为基本组元, 保证材料的承载能力, 硬度, 耐磨性, 耐蚀性及热稳定性; 以铁粉、锡粉以及微量合金为辅助组元, 增强基体的强度, 抗冲击性。摩擦组元 SiO₂, SiC 等可提高材料的摩擦系数和耐磨性。润滑组元石墨等有利于提高材料的抗卡性能和抗粘结性能, 防止焊接^[3]。BaSO₄、CaF₂+WS₂ 等作为摩擦调整剂。

* 收稿日期: 2003-04-03; 修回日期: 2003-12-25

基金项目: 中国工程物理研究院基金项目(421010201)

作者简介: 刘建秀(1962—), 女, 博士研究生。

2.2 制备工艺

电解铜粉、还原铁粉、喷雾锡粉、SiO₂ 及石墨等在球磨机中碾磨，制出粒度合适的各种原料粉。电解铜粉的粒度为 0.074 mm，还原铁粉的粒度为 0.074 mm，喷雾锡粉、铅粉的粒度均为 0.104 mm，MoS₂ 的粒度为 0.074 mm，层状石墨的粒度为 0.104 mm。石墨粒度不能太细，否则它在材料中造成的孔隙将会增多，使材料的强度降低，较易磨损，摩擦系数也会降低，其它摩擦组元、摩擦调整剂和微量元素的粒度为 0.075 ~ 0.145 mm。经机械混合 10 ~ 16 h，加入硬质耐高温树脂和橡胶共混作粘结剂，以提高材料的摩擦系数和抗冲击能力，同时降低杨氏模量，增大摩擦副之间的实际接触面积，达到提高制动力，缩短制动时间及降低偶件摩擦温升的目的。在 500 ~ 600 MPa 压力下冷压成具有一定形状的坯块，烧结温度为 950 ~ 1050 °C，3 ~ 3.5 MPa 氢气保护下保温 1.5 ~ 2.0 h，升温速率和冷却速率为 2 ~ 3 °C/min，2 ~ 6 °C/min。最后制成实验用的试件。试验时加载方向与烧结加压方向相同。

制备工艺流程如下：

各原料粉制备 → 配料、混料 → 称料、装模 → 压制成型 → 叠片、装炉 → 加压烧结 → 制样 → 冲击性能检测。

2.3 组织结构

粉末冶金材料性能的好坏，除了与化学成分有关外，还与烧结材料的组织密切相关。通过微观检验，可以测定烧结材料的颗粒大小，组织特征、孔隙状况、各种非金属的数量、形态和分布，以及烧结缺陷。

采用 JSM-5900 电子扫描显微镜观察，该材料的显微组织如图 1 所示。

在图 1 中，测点 1 是 SiO₂。测点 2 是多相组织：C、Cu、O、S、Fe、Ba、Si、Sn。测点 3 的组织是石墨，所以样品的组织是由 Cu 基体、硬质颗粒 SiO₂、多项组织和石墨组成。以形状和颜色来讲，基体是以铜为基的 α 固溶体，其上分布有不均匀 SiO₂ 颗粒，浅色块状相为 SiO₂，SiO₂ 颗粒与金属基体之间形成了一层过渡层。这个过渡层也是基体夹持硬质质点的连接带。还可看到均匀分布有条状或片状的石墨。图 2 是各种组织的 SEM 图，可以看出石墨镶嵌于铜基体中，由于石墨不溶于基体材料，可以清楚地看到孔隙和裂缝，这是含损伤材料的特征之一^[4]，冲击时孔隙处也是产生裂纹的地方，这种现象在 SiO₂ 硬质颗粒周围也有发生。

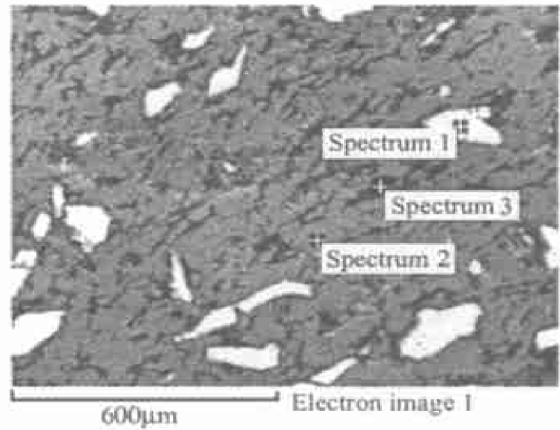


图 1 样品的组织
Fig. 1 Component of specimen

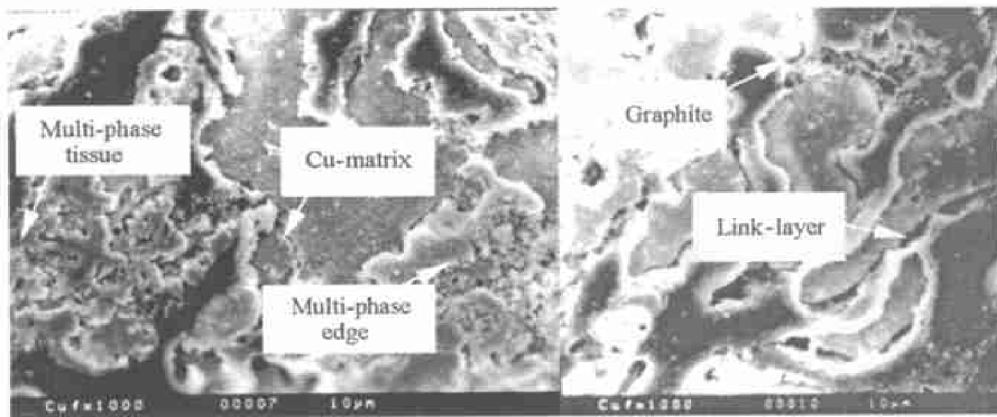


图 2 各种组织的 SEM 图
Fig. 2 SEM morphology of component

3 冲击实验曲线

3.1 无围压动态应力应变曲线

实验在 $\varnothing 14.5$ mm 的钢质 SHPB 上进行, 入射杆长为 800 mm, 透射杆长为 1000 mm, 应变率范围为 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, 无围压试件的尺寸为 $\varnothing 12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。测得的应力应变曲线如图 3 所示。为了便于比较, 图中也给出了在 MTS 上测得的准静态应力应变曲线。

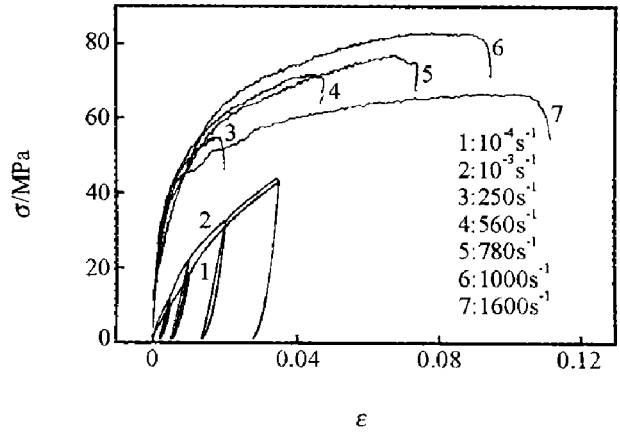


图 3 动静态应力应变曲线

Fig. 3 Dynamics and static's stress-strain curve

从图 3 中可以看出, 屈服极限动态比静态提高了约 2.7 倍(静态为 9 MPa, 动态为 25 MPa), 应变硬化率静态比动态时高。由对数应变率敏感系数 $\lambda = \partial\sigma / \partial \log \dot{\epsilon}$ 可知, 应变率在 1000 s^{-1} 以下, 材料有应变率强化特性, 当大于该应变率时, 应变硬化率反而减低, 当应变率达到 1600 s^{-1} 时, 出现了“应力平台”, 也就是说, 出现了“本构失稳”的临界状态^[5~6], 即在 1000 s^{-1} 以上该材料出现损伤软化效应。这时的试件表面宏观上可以看到滑移裂纹。而微裂纹的损伤在客观上起某种弱化作用, 因为损伤软化是个不可逆过程, 且依赖于应变率。同时还可以看到蜘蛛状裂纹和柔性连接现象如图 4、5 所示。还有硬质颗粒的破碎, 在裂缝中还有大量的纤维状组织如图 6、7 所示。能谱分析知, 纤维状组织为碳纤维。这些纤维和柔性连接一样, 对裂纹的扩展起抑制作用。而在有围压时因为没有宏观开裂的裂纹, 剖面中也没发现这种纤维组织(见下一节 4 分析)。

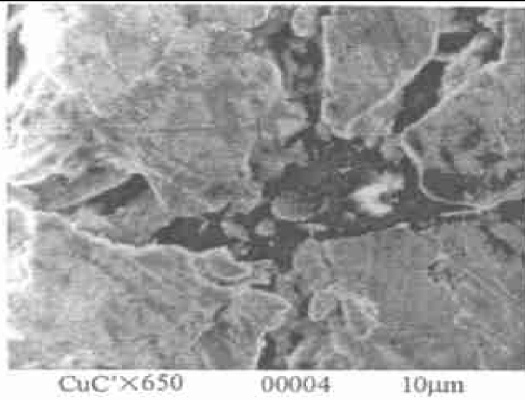


图 4 应变率为 1600 s^{-1} 的蜘蛛状裂纹

Fig. 4 Spider crack at strain rate 1600 s^{-1}

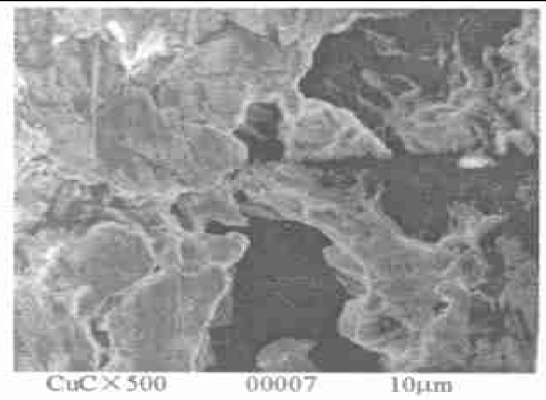


图 5 应变率为 1600 s^{-1} 柔性连接

Fig. 5 Conjoined crack at strain rate 1600 s^{-1}

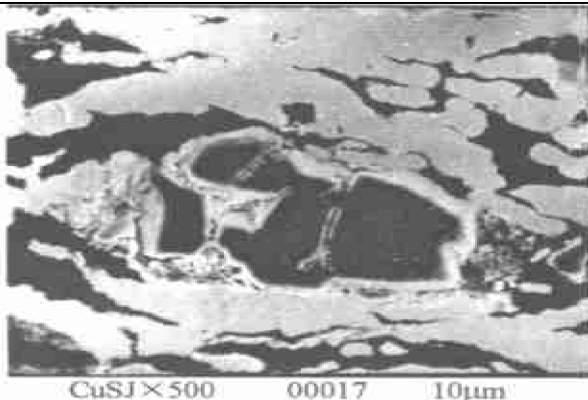


图 6 冲击后条状硬质颗粒 SiO_2 破碎

Fig. 6 Stripe SiO_2 grain broken



图 7 裂缝中有大量纤维状组织

Fig. 7 Fibre component inside crack

3.2 加围压应力应变曲线

试件的尺寸为 $\varnothing 14.5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 外径尺寸公差为 -0.05 ; 用 20[#] 钢做的被动围压套筒的尺寸为内径 $\varnothing 14.5 \text{ mm}$, 外径 $\varnothing 24 \text{ mm}$, 长度 10 mm , 内径尺寸公差为 $+0.05$ 。在放置试样时, 为了减少摩擦, 试样周边涂一层油膜作为传递压力的耦合介质^[7], 被动围压套筒装置示意图如图 8 所示。

由实验测得的试件加围压应力应变曲线如图 9 所示。图中为了与静态和不加围压的情况比较, 同时给出了静态和不加围压的应力应变曲线。

从图 9 中可看出, 在被动围压下, 材料有应变率强化效应, 加载段几乎是直线上升, 试验时在应变率达到 1650 s^{-1} 时, 试样的表层出现粉状碎末, 就没有再往高应变率做。但此时得到的数据已可以与不加围压时对比, 包括材料的微观分析比较。加围压时的应变硬化率明显高于无围压 (0.35 GPa) 工况, 同时也高于静态 (1.2 GPa) 的应变硬化率。屈服应力也有同样的趋势。说明该材料在三向压力 (静水压力分量) 下的强度性能得到了极大的改善, 即围压抑制了损伤软化^[7]。同时为了与不加围压时的参数比较又求出了加围压时的杨氏模量和应变硬化率 $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ 分别为 11.84 GPa 和 1.23 GPa 。

材料在加围压后由于约束了试样的变形, 巨大的冲击动能除转化为声能和热能外, 大部分用于压缩变形使试样的孔隙率降低, 从而使密度提高。在测量显微硬度时, 由于 SiO_2 和 Cu 基体的硬度不同, 所以分别用 100 g 和 50 g 的压力测量, 材料在加围压时, 基体的形变以孪晶为主, 从而使显微硬度略有提高。

综合以上分析计算, 在加围压的情况下, 几乎各种参数都优于不加围压和静态的工况。

4 两种动态工况下微观分析比较

下面的微观比较是应变率为 1000 s^{-1} 时的情况。图 10 是两种动态工况实验后的形状图。从图中看出, 被动围压试验后的试样, 由于试样径向和环向被约束, 宏观上看不到任何裂纹, 形状也看不出什么变化。不加围压时由于试样可以自由变形, 所以变形随着应变率的升高变形增长较快, 肉眼可见大量裂纹, 且这些裂纹沿着最大剪应力方向扩展如图 10 所示。

图 11 是加围压试样的金相组织, 从图中可看到, SiO_2 组织周围变形较严重。图 11 中小颗粒组织是 Cu, Sn, Fe 固溶体。

图 12 是无围压试样的金相组织, 由图可见加围压试样和无围压试样组织一样, 经高速冲击后基体铜均有少量滑移和少量孔洞。同样 SiO_2 组织周围变形较严重。因为在摩擦材料中硬质颗粒 SiO_2 起摩擦和支撑强度的作用, 冲击时首先接触的质点就是突出的硬质颗粒, 由于硬质颗粒的冲击嵌压使其周围

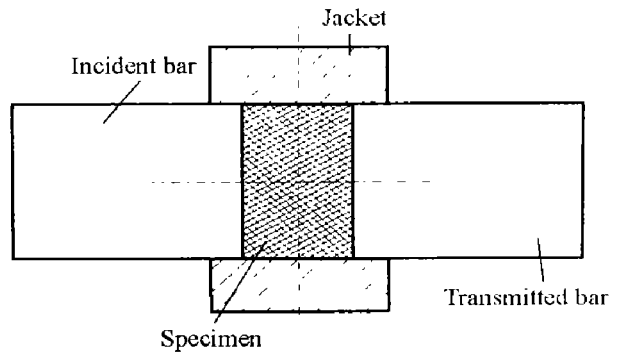


图 8 被动围压套筒装置示意图
Fig. 8 Sketch of confined jacket

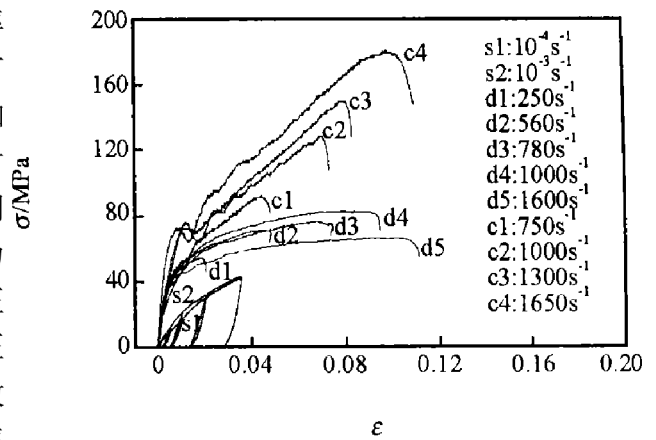


图 9 静态、无围压、加围压应力应变曲线
Fig. 9 Static, dynamic, confined pressure stress-strain curve

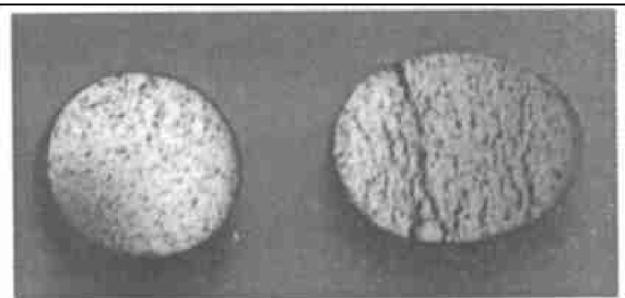


图 10 加围压试样 (左) 和不加围压试样 (右)
Fig. 10 Confined pressure sample (left) and not confined pressure sample (right)

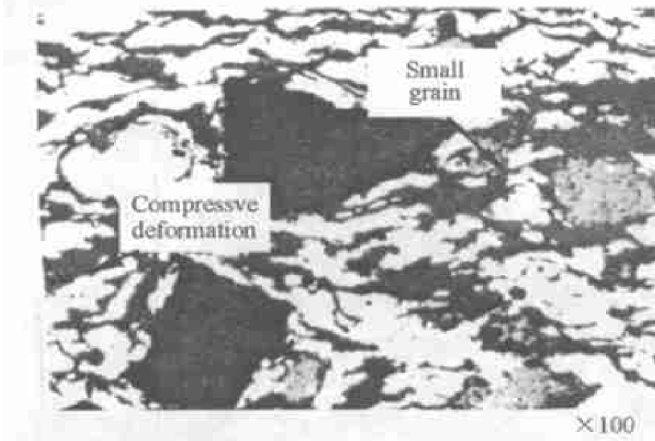


图 11 加围压试样(未腐蚀)

Fig. 11 Confined pressure sample (without corrosive)

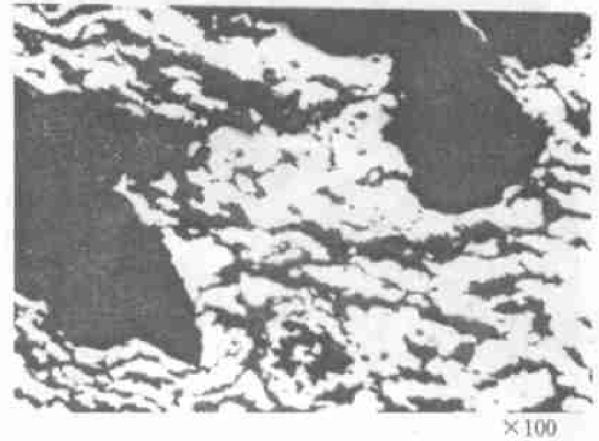


图 12 不加围压试样(未腐蚀)

Fig. 12 No Confined pressure sample (without corrosive)

的组织发生压缩变形(因为基体组织的硬度小于硬质颗粒的硬度)。图 13 是冲击后破碎的条状 SiO₂ 颗粒和没有破碎的球形 SiO₂ 颗粒。微观分析发现凡是破碎的 SiO₂ 颗粒都是条状 SiO₂ 颗粒,球形 SiO₂ 颗粒却没有发现破碎,因为本身 SiO₂ 作为硬质颗粒起增强基体强度和摩擦力的作用,它的破碎就会使强度大为降低,如果在控制 SiO₂ 的粒度方面做一些工作,尽量选用球形颗粒,将会使材料的强度和摩擦性能提高。图 14 是围压试样的金相分析和 SEM 分析,铜基体上可看到一些滑移线。

图 15 是围压后铜基体上大量的孪晶。图 16 是无围压试样裂缝中的纤维状组织,可见这些纤维组织是一些碳纤维组织,这些纤维对裂纹的扩展起抑制作用。

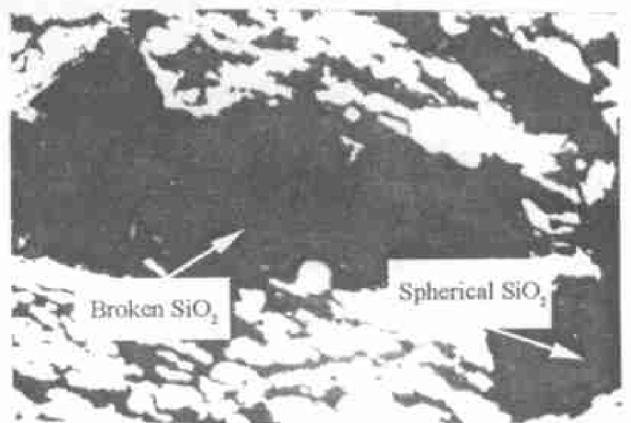


图 13 冲击后不同形状的 SiO₂颗粒(未腐蚀)

Fig. 13 SiO₂ particle with different shape after impact (without corrosive)

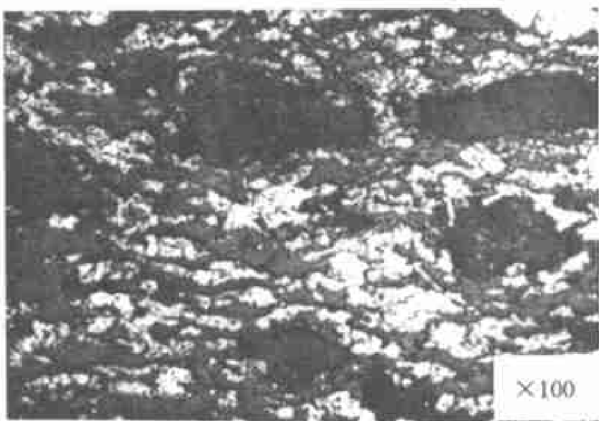
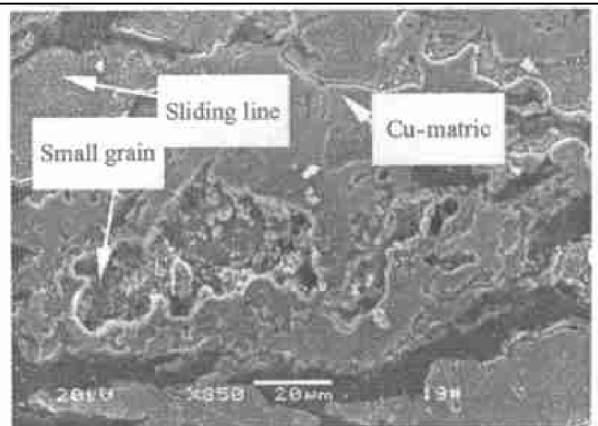


图 14 加围压试样:SiO₂+灰色条状+少量孔洞+小颗粒多相+铜基体上有滑移(腐蚀)

Fig. 14 Confined pressure sample: SiO₂+gray stripe +pore+ small grain+ Cu-matrix with sliding line (corrosive)



为了比较被动围压前后试样表面化合物的变化,做了材料的 X 衍射分析,发现无围压时,表面成分以 FeO 和 Cu 合金为主,如图 17。而围压冲击后表面则以 FeN、Fe₃C 以及 FeAl 合金为主,表面的石墨正好起减少冲击摩擦的作用,如图 18。发生这些变化的原因主要是冲击后表面展现的多相组织不同,冲击中的绝热形成了碳化物和不稳定的氮化物,氮的一部分来源是来自于冲击试验的氮气。从试验后石

墨的峰宽变窄,说明在冲击过程中,石墨的颗粒被细化,而这种细化有利于迅速传导开摩擦表面产生的热量。



图 15 加围压:石墨+少量孔洞+铜基体上孪晶(腐蚀)
Fig. 15 Confined pressure sample:
twin crystal of Cu-matrix (corrosive)

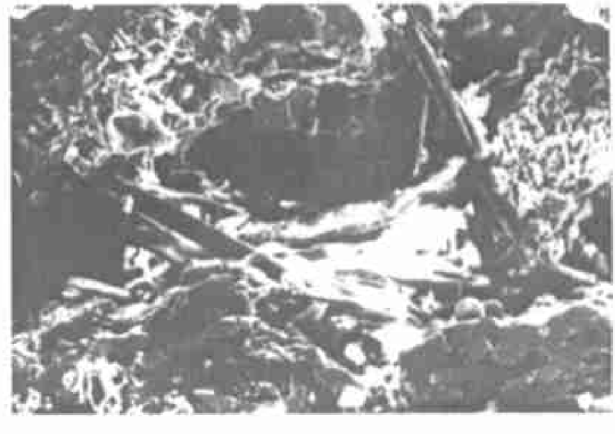


图 16 无围压裂缝中的纤维状组织
Fig. 16 fiber tissue inside crack of
non-confined pressure

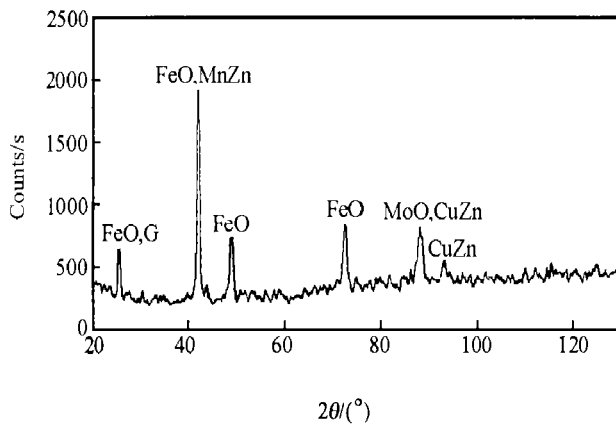


图 17 原始试样表面 X 衍射图
Fig. 17X diffract on surface of origin sample

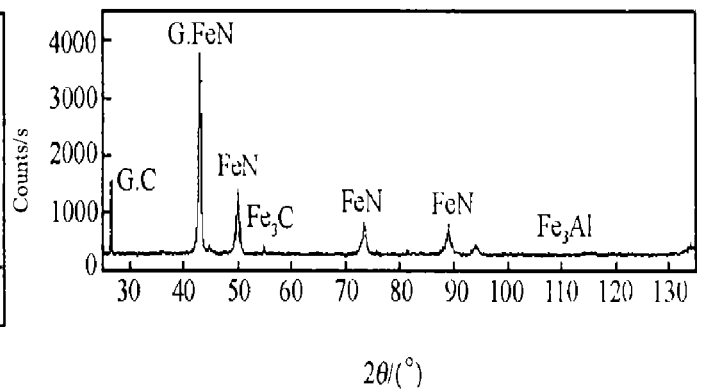


图 18 围压冲击后试样表面 X 衍射图
Fig. 18X diffract on surface of impacted sample

5 结 语

综上所述,对铜基粉末冶金摩擦材料在冲击载荷下的性能,可以得出如下结论:

(1) 无围压时该材料在动态下流动应力随应变率的提高而提高,但当应变率大于 1000^{-1} s 时,表现为损伤软化效应。而加围压后未发现应变弱化现象。

(2) 从试件的破坏形式看,无围压时,材料的破坏是伴随着动态裂纹的迅速扩展而形成动态失效模式,材料的多系滑移,多源裂纹和孔洞分布群使裂纹沿着颗粒界面扩展,裂纹中大量的纤维状组织抑制裂纹的扩展。

(3) 用被动围压的方法,可以极大的改善材料的性能,围压(静水压力分量)抑制了材料损伤软化。这也是为什么粉末冶金摩擦材料总是与钢背烧结或抱缘后使用。无围压试样经高速冲击后基体铜有较大的滑移变形。铜基体上有大量滑移线和少量孪晶,加围压试样显微组织中裂纹很少,只有少量孔洞。由于围压抑制了滑移变形使显微组织中有大量的孪晶;所以可以推论,无围压试样显微组织的变形以滑移变形为主,而加围压试样则以孪晶变形为主。

(4) 细化 SiO_2 颗粒,控制粒度,以球形颗粒为好,尽量减少长条形颗粒,避免材料强度的降低。冲击前后由于绝热温升使表面的化合物发生了改变。

参考文献:

- [1] 饶忠. 列车制动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998: 1—28; 128—190.
- [2] 刘芬来, 乌云兴. 国外高速列车摩擦制动元件的材料及制造工艺[J]. 车辆工程, 1999(19): 36—39.
- [3] 戴雅康. 高速列车摩擦制动材料的现状与发展[J]. 机车车辆工艺, 1994, (2): 1—8.
- [4] Amstrong R W, Zerilli F J. Dislocation aspects of shock-wave and high-strain-rate phenomena[A]. Proceeding of International Conference on Fundamental Issues and Applications of Shock-wave and High Strain-rate Phenomena (EXPLOMET2000)[C]. Albuquerque: [s. n.], 2000.
- [5] Bao G, Ramesh K T. Plastic flow of a tungsten-based composite under quasi-static compression[J]. Acta Metal Mater, 1993, 41(9): 2711—2719.
- [6] WANG Li-li, DONG Xin-long. Positive and negative strain-rate effect for materials with damage and/or phase transformation at high strain rates[A]. Staudhammer K P, Murr L E, Meyers M A, ed. Fundamental Issues and Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena[C]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2001: 193—200.
- [7] Hanmon T G, Ramakrishnan S, Wang E H. Confined concrete subjected to uniaxial monotonic Loading [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, (2): 1303—1309.
- [8] Gong J C, Malvern L E. Passively confined tests of axial dynamical compressive strength of concrete [J]. Experimental Mechanics, 1990(3): 55—59.

Deformation comparison between confined pressure and non-confined pressure for friction material

LIU Jian-xiu^{1, 2*}, HAN Chang-sheng², ZHANG Zu-gen², WANG Wu²
 (1. *Department of Mechanics and Electron Science, Zhengzhou Institute of Light Industry, Zhengzhou 450002, Henan, China;*
 2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The dynamic behavior and deformation properties of Cu-matrix powder metallurgy friction material under impact loading with confined pressure and non-confined pressure is investigated. Quasi-static tests were performed before the dynamic tests in order to make a comparison. The elastic modulus and elastic and plastic Poisson's ratios were measured. Impact tests were conducted on Hopkinson pressure bar, strain rate hardening effect was observed at strain rates under 1000 s^{-1} , whereas weakening effect was seen at higher strain rates, It was shown from microscopic analysis that there were a large number of paralleling sliding cracks on the surface that induced material failure. A large amount of carbon fiber tissue was found in cracks, which could resist the development of cracks. The plastic deformation was dominated by sliding accompanying a small amount of twinning. The confined pressure improved the material properties, value of the maximum stress, yield stress and dynamic young's modulus all were increased at the same strain rate, Whatever confined pressure or non-confined pressure, only stripe like hard particles were broken. The experimental result indicates that the fine spheroid shape hard particles embedded in the matrix are responsible for the improved strength of the material.

Key words: solid mechanics; shock; confined pressure; fiber tissue; harden grain

* Corresponding author: LIU Jian-xiu
 E-mail address: m20011418@sina.com;
 Telephone: 0371-3556922