

铜石墨材料抗弯强度与孔隙的关系^①

丁华东 李雅文 浩宏奇 吕涛 金志浩

(西安交通大学材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘要 定性地分析了孔隙含量、形状及其不同的位向关系在材料断裂过程中的行为, 采用灰色系统方法处理试验数据, 由此建立抗弯强度 σ_{bb} 与孔隙度 θ 间的数学方程: $\sigma_{bb} = \sigma_0 e^{-\beta\theta}$, 式中 σ_0 为材料孔隙度 θ 趋近于零时的归算抗弯强度值, β 为表征孔隙形状及其位向关系的特征指数。所建立的方程式与实验值吻合较好。

关键词 粉末冶金 多孔材料 灰色系统

铜石墨材料中, 铜合金为基体, 它赋予材料以较高的强度、硬度、良好的传导性及耐腐蚀性等; 石墨赋予金属基复合材料良好的自润滑性能, 而且在电接触过程中, 石墨还可提高材料耐电弧烧蚀和抗熔焊的性能。故铜石墨材料应用领域越来越广。

不少学者对 Cu-Sn 合金和铜石墨材料作过研究。文献[1]利用球形铜粉研究铜粉的烧结机制, 文献[2]研究了 Cu-Sn 合金烧结过程, 文献[3, 4, 5]分别研究了烧结黄铜的摩擦磨损性能、Cu-Sn 混合粉末压坯烧结胀大机理和扩散温度对 Cu-Sn 粉末压制与烧结性能的影响, 文献[6]研究了石墨含量对 Cu-石墨材料烧结膨胀的影响。

本文首先定性地分析孔隙在材料弯曲断裂过程中的行为, 然后采用灰色系统方法建立材料抗弯强度与孔隙度之间的函数关系, 为改善材料性能提供依据。

1 实验与结果

铜基合金为 Cu 中添加少量 Fe、Sn、Ni, 石墨为磷片状天然石墨。上述粉未经混合后单向模压成型, 成型压力为 450 MPa, 试样长 \times 宽 \times 高为 250 mm \times 25 mm \times 10 mm, 烧结工艺

为 880 $^{\circ}$ C, 3 h, 通 H₂ 保护。

按 JB2868-81 标准在 Instron-1195 型电子拉伸试验机上测抗弯强度和断裂前挠度, 按 JB2868-81 标准采用浸蜡法测定密度, 称重用 TG328A 电光分析天平。结果示于表 1 和表 2。

表 1 试样的石墨含量与密度

材料	HD0	HD20	HD35	HD40	HD50
石墨体积分数/%	0	7.1	12	13.5	16.6
相对密度/%	92.8	82.8	75.8	72.7	66.4
孔隙率/%	7.2	17.2	24.2	27.3	33.6

表 2 试样的抗弯强度与断裂前挠度

材料	HD0	HD20	HD35	HD40	HD50
抗弯强度/MPa	774.4	356.8	219.1	183.0	123.3
挠度/mm	2	0.9	0.56	0.55	0.45

2 材料断裂过程中孔隙行为分析

铜石墨材料基本是由三部分组成: (1) 铜基合金, (2) 石墨, (3) 孔隙。孔隙的承载能力为零, 随孔隙度的提高, 试样有效承载面积下降, 导致材料抗弯强度下降^[7]。

含有裂纹的弹性体受力时, 在裂纹尖端将产生局部应力集中(见图 1), 这种应力集中现象与裂纹尖端的曲率半径有关。图 2 为“无限大”薄平板, 板中存在贯穿的椭圆形切口, 其

① 收稿日期: 1996-05-08; 修回日期: 1996-07-03 丁华东, 男, 35 岁, 博士生

长轴为 $2a$ ，短轴为 $2b$ 。当承受单向均匀拉应力作用时，最大拉应力发生在椭圆长轴端点 A (或 A') 处，其值为^[8]：

$$(\sigma_y)_{\max} = \sigma(1 + \frac{2a}{b}) \quad (1)$$

该点处的曲率半径为 ρ

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (2)$$

由此得：

$$(\sigma_y)_{\max} = \sigma(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}) \quad (3)$$

可见，随曲率半径 ρ 的减少，材料的承载能力急剧下降。

但需指出，当固体材料中的缺陷是尖裂纹时，应取原子间距 b_0 代替曲率半径 ρ_0 ，此时可得临界应力^[8]：

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\gamma}{4a}} \quad (4)$$

式中 E 、 γ 分别为材料的弹性模量和固体材料表面能密度。

依据上面的分析，给出 Cu-石墨材料中孔的形状与裂纹位向及其扩展方向的示意图，见图 3。图中用带箭头曲线表示裂纹及其扩展方向，裂纹与孔隙相遇后，其作用顺序为自左向右沿箭头方向。图 3 显示，裂纹扩展遇到孔隙时是否继续扩展，依赖于孔隙形状及裂纹与孔隙间的几何位向关系。在外载荷作用下，裂纹启动，开始扩展。若同时启动 n 个裂纹，则裂纹扩展遇到了图 3(c) 所示情况时，裂纹便陷入孔隙中而难以继续扩展；而遇到(d)和(f)所示情况，裂纹将改变扩展方向，偏离外加载荷在

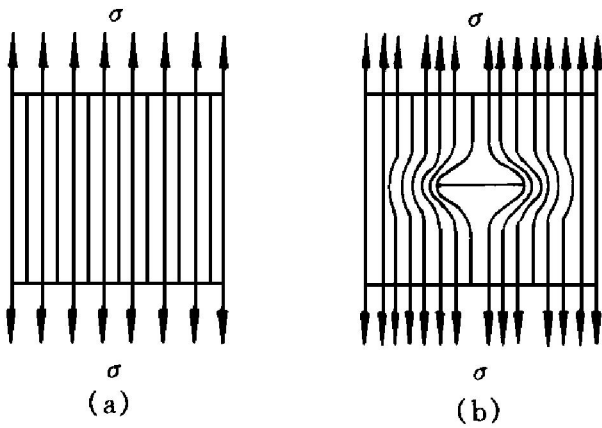


图 1 应力流线图

(a) 一无裂纹板受拉；(b) 一含裂纹板受拉

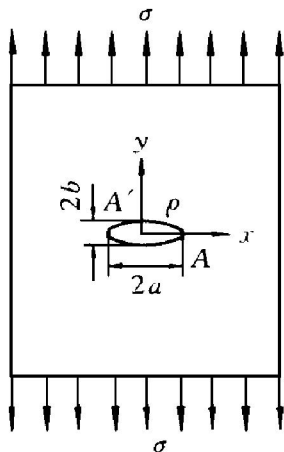


图 2 含椭圆切口受拉伸无限大板

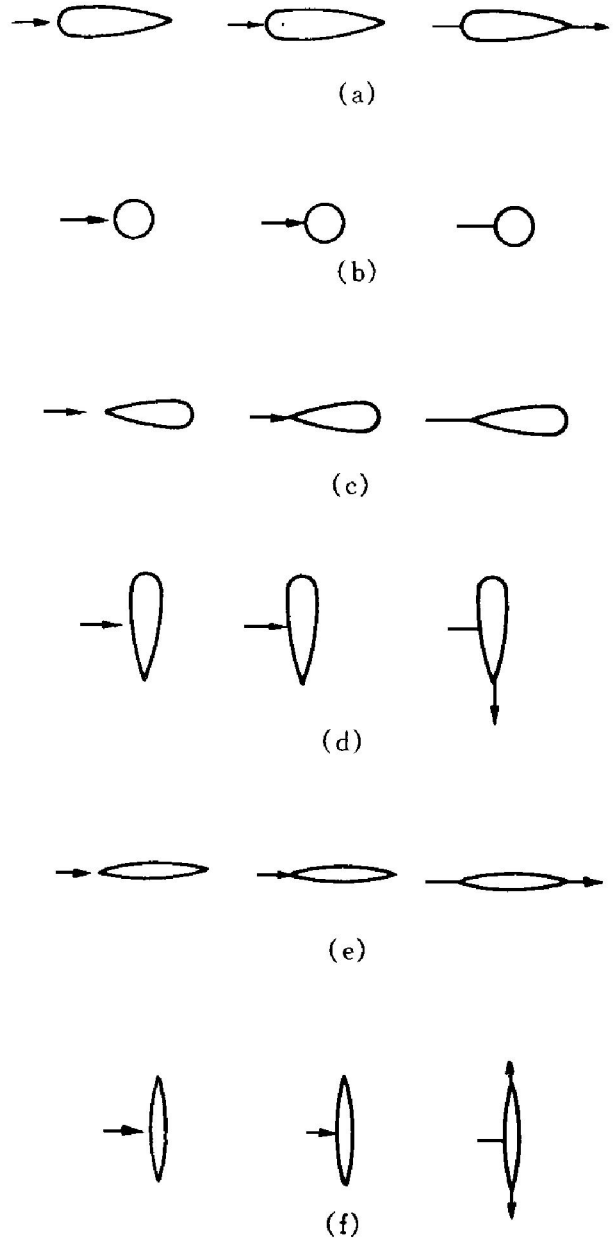


图 3 扩展裂纹与孔隙相遇作用示意图

材料内部所形成的最大应力方向,减缓裂纹扩展速度;而出现(a)和(f)情况时,裂纹将沿着其扩展方向加速扩展。

根据粉末冶金烧结特性可知,(b)所示或与之类似的孔隙出现在铜合金内部的机率较大,而其它各类孔隙出现在铜合金与石墨界面处和两石墨交界处的机率较大。

石墨的线膨胀系数远小于铜合金的,当试样从烧结温度(880℃)缓冷至室温时,由于线膨胀系数的差异,材料内部某些区域中石墨表面受压应力;相应地,包围石墨的铜合金受张应力,裂纹扩展至这种应力交界面处时,使应力释放,对材料宏观抗弯强度产生不良影响。

3 抗弯强度与孔隙度的灰色模型

不仅在材料内部的裂纹与孔隙间有相互作用,而且裂纹与孔隙相遇并发生相互作用时,对邻近孔隙也有弱应力场作用。石墨与Cu合金界面处的应力释放时,也将在其周围产生应力场。裂纹扩展方向与孔隙位向间的夹角也可以在360°内变化,远非图3(a)~(f)所列形式范围内。即使仅从力学角度出发,将上述因素加以考虑,数学计算也极为复杂,而且所获结果的准确性与精度也不理想。实际上,尽管对孔隙形状、位向在断裂中的行为有所认识,但无法在此基础上进行定量计算。鉴于此,采用灰色系统中的GM(1,1)建模方式^[9]来处理这一灰色微系统。其优势是在对一些因素间的相互作用不甚明了时,追求总体作用结果与实际情况相符合,最终便可求得孔隙度 θ 与抗弯强度 σ_{bb} 间的数学方程式。

GM(1,1)建模程序为:(1)对表1和表2中数据进行AGO(Accumulated Generating Operation)处理。这是灰过程的一种白化方法,由此可以看出灰量累积过程的发展态势。使原始数据离散但积分特性蕴含的某种规律性加以显露。(2)在AGO处理基础上,按开集拓扑定义信息浓度,定义灰导数与灰微分方程。(3)考虑残差GM模型的补充和修正后,变成差分微

分方程。(4)关联度检验。(5)得白化形式微分方程的解,即建立孔隙度 θ 与抗弯强度 σ_{bb} 间的白色关系。上述处理方式可同时提高 σ_{bb} 与 θ 间关系的可靠性和精度。所获白色关系如下:

$$\sigma_{bb} = 1230.74e^{-0.0697163\theta} \quad (5A)$$

写成一般形式:

$$\sigma_{bb} = \sigma_0 e^{-\beta\theta} \quad (5)$$

式中 σ_0 为当孔隙度趋于0时材料的归算抗弯强度,作为近似计算时,可用致密材料的抗弯强度代替。 β 为与孔隙形状有关的参数,其值来自于GM(1,1)模型。

图4为实验值和方程(5A)计算值曲线,图中二线相吻合,说明式(5A)与实验相符合。

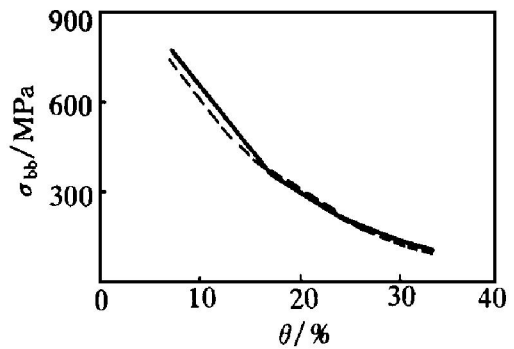


图4 抗弯强度 σ_{bb} 与孔隙度 θ 关系曲线

实线—实验值;

虚线—式(5A)的计算值

实验中,测量误差总是存在的,而实验值经灰色系统方法处理后,其可靠性和精度均获提高,故计算值源于试验值,但又比实验值更逼近真值。

式(5)与Романова И И所建立的方程^[10]表达式相同。在他所建立的方程中,仅指出 β 为一取决于材料制造和实验条件的常数,其物理意义不甚明确。

式(5)则明确指出 β 是一与孔隙形态相关的常数,有明确的物理意义,从对图3(a)~(f)的讨论可知随孔隙曲率的提高, β 值也升高,这为孔隙度一定时提高材料的抗弯强度提供了依据。改变孔隙的形状只能在材料制造过程中执行,这说明式(5)和Романова И И方程中的 β 值是一致的。

4 结论

(1) 多孔材料的抗弯强度不仅与其孔隙度有关, 而且还与孔隙形态有关。

(2) 采用灰色系统 GM(1, 1) 建模方式可获抗弯强度与孔隙度及孔隙形态间的函数关系, 且计算值较实验值更接近真值。

参考文献

- 1 Moon I H *et al.* Powder Metallurgy, 1993, 36(3): 207.
- 2 Narendra N Acharya *et al.* The International Journal of Powder Metallurgy, 1995, 30(1): 63.
- 3 李溪滨, 苏春明, 谭林英. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 112.
- 4 张金生, 樊毅, 高游等. 中南工业大学学报, 1995, 26(4): 488.
- 5 张金生, 高游, 樊毅. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(5): 629.
- 6 丁华东, 浩宏奇, 金志浩. 中国有色金属学报, 1996, 6(3): 106.
- 7 黄培云. 粉末冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 373.
- 8 高庆. 工程断裂力学. 重庆: 重庆大学出版社, 1986: 4.
- 9 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 189.
- 10 Романова Н И. Цвет Металлов, 1975, (8): 75.

GREY EQUATION BETWEEN BENDING STRENGTH AND POROSITY OF COPPER-GRAPHITE COMPOSITE

Ding Huadong, Li Yawen, Hao Hongqi, Lü Tao, Jin Zhihao
School of Materials Science and Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

ABSTRACT The effects of pore in the composite on bending strength were studied. A grey equation was set up using grey system method to analyze the relation between porosity θ and bending strength σ_{bb} of the material, which is $\sigma_{bb} = \sigma_0 e^{-\beta\theta}$, where σ_0 is the limit bending strength as θ tends toward zero, and β is a characteristic constant related to pore shape, pore size and pore orientation. The derived equation fits well with the experimental data.

Key words powder metallurgy porous material grey system

(编辑 李克敌)