

第二相氧化物对银基触头材料熔池影响的模拟分析

徐 坚¹, 熊惟皓¹, 傅江华¹, 李震彪²

- (1. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;
2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘 要:采用有限体积法计算电弧作用下 AgMeO 触头材料温度场, 深入分析第二相 MeO 颗粒的密度、比热容、热导率、分解温度和分解焓等物性参数对熔池接触面积的影响, 详细说明 MeO 含量(体积分数)对熔池接触面积和熔焊力的影响, 着重讨论电弧输入触头的能量、燃弧时间和燃弧半径对熔池接触面积的影响。结果表明: 与第二相 MeO 的密度、热导率及体积分数等物性参数对熔池接触面积的影响相比, 电弧输入能量的影响才是最主要的。

关键词:银-氧化物触头; 温度场; 电弧参数; 氧化物性质; 熔池接触面积

中图分类号: TM 201

文献标识码: A

Simulation analysis of effect of second metal-oxide phase on molten pool in Ag-based electrical contact

XU Jian¹, XIONG Wei-hao¹, FU Jiang-hua¹, LI Zhen-biao²

- (1. State Key Laboratory of Materials Forming and Die and Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. College of Electrical and Electronic Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the calculation results of the temperature field in AgMeO contact materials after arc by finite volume method(FVM), the effects of density, heat capacity, thermal conductivity, decomposition temperature and decomposition enthalpy of MeO phase on the contact area of the molten pool (CAMP) were analyzed. The effect of the density of MeO (volume fraction, %) on the contact area of the molten pool and fusion force was discussed in details. Finally, the input energy of the arc, the arc duration and the arc radius were considered to affect the contact area of molten pool as well. Comparing with the effects of MeO phase density, thermal conductivity and volume fraction etc on the contact area of the molten pool, the input energy of the arc in contact materials is the most important factor. Therefore, reducing the input energy in materials as much as possible is crucial to the research of AgMeO contact materials.

Key words: AgMeO contact material; temperature field; arc properties; properties of MeO; contact area of molten pool

银-金属氧化物(AgMeO)复合材料是目前国内生产和使用最广泛的一类触头材料, 约占整个产量的80%以上。由于AgMeO 触头材料具有优良的开关运行特性, 因而成为低压电器应用最广泛的一类触

头^[1-2]。

大量实际应用表明, 触头材料的性质总体上来说是一个矛盾的统一体, 因此在触头材料中添加第二相质点, 与基体形成复合材料从而满足对触点材料复合

性能的要求^[3]。一般认为其中存在两大类性质互补的物相: 1) 载流相: 主要起导电和导热作用, 常见的如金、银和铜等; 2) 难熔相: 在材料中起骨架作用。难熔相一般作为稳定剂和分解剂, 稳定剂能增加熔融相粘度, 减少液体流动转移与喷溅, 如 SnO_2 等。分解剂在高温下易发生化学分解, 从而消耗电弧能量, 降低触头材料表面温度, 减少触头材料表面侵蚀, 如 CdO 等。目前, 对添加第二相氧化物颗粒的研究大都还是反复进行研究, 得出经验性结论, 而后提出对第二相质点成分设计的宽泛原则^[4-7]。对于 MeO 质点性质对触头材料性能的定量理论研究十分罕见, 本研究旨在初步定量分析触头材料中第二相 MeO 的性质对触头熔池的影响, 进而给出第二相成分设计的基本要素, 探索对熔池接触面积影响最大的因素。

1 AgMeO 触头材料温度场的计算

1.1 模型的建立

根据常见汽车继电器用触头材料的使用条件, 假设触头为圆柱形(上下端面半径为 2 mm, 厚为 2 mm), 电弧为轴对称, 且与触头同轴。在不考虑电弧在触头表面移动的情况下, 可将三维轴对称问题简化为二维问题, 其数学物理模型如图 1 所示^[8]。

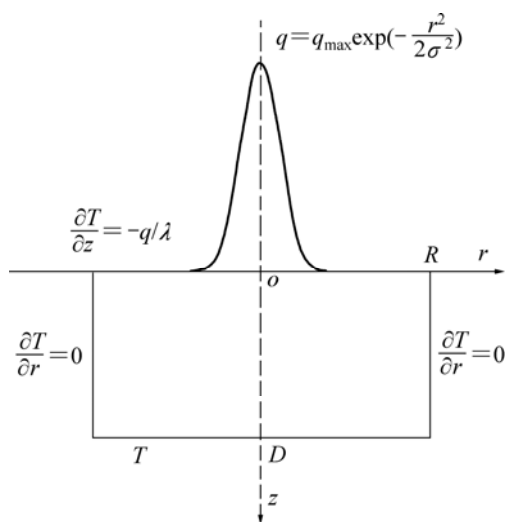


图 1 触头受电弧作用的物理模型

Fig.1 Physical model of electrical contacts under arc

模型中 r 为触头半径方向, z 为厚度方向, R 为触头半径, D 为触头厚度, $T(r, z, t)$ 为触头内部温度场, $q(r)$ 为电弧热流密度, λ 为触头材料的热导率。

在该模型中作如下若干假设:

- 1) 触头材料均匀致密且各向同性, 不考虑材料的气孔和夹杂等缺陷;
- 2) 在触头每一个局部区域内, 银与第二相 MeO 间完全导热, 两相保持温度相等;
- 3) 由于触头底面与 Cu 基片相连, 导热良好, 因此假设触头侧面绝热, 热量全部经触头底面传导, 触头底面保持室温;
- 4) 仅考虑银的相变过程、 MeO 分解过程对比热容的影响, 其它各物性参数均为常数;
- 5) 不考虑触头熔化后的流动及其对温度场的影响;
- 6) 不考虑触头材料对电弧特性的改变;
- 7) 银在电弧作用下不发生化学反应。

假设电弧热源呈高斯分布, 且完全为触头材料所吸收, 则入口热流密度可表达为

$$q(r) = \frac{9P}{2\pi r_a^2} \exp\left(-\frac{9r^2}{2r_a^2}\right) \quad (1)$$

对触头材料电弧作用传热过程建立如下控制方程组:

$$\begin{aligned} \rho(\text{Ag}) \frac{\partial T(\text{Ag})}{\partial t} &= \frac{\lambda(\text{Ag})}{c(\text{Ag})} \left[\frac{\partial^2 T(\text{Ag})}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T(\text{Ag})}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(\text{Ag})}{\partial r} \right] \\ \rho(\text{MeO}) \frac{\partial T(\text{MeO})}{\partial t} &= \frac{\lambda(\text{MeO})}{c(\text{MeO})} \left[\frac{\partial^2 T(\text{MeO})}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T(\text{MeO})}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(\text{MeO})}{\partial r} \right] \\ T(\text{Ag}) &= T(\text{MeO}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 P 为电弧输入功率; r_a 为电弧半径; ρ 为材料密度; c 为比热容。

边界条件为

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{z=0} = -\frac{q(r)}{\lambda} \quad (4)$$

$$T|_{z=D} = \text{const} \quad (5)$$

定义触头材料两极中熔池接触面积(Contact area of the molten pool, CAMP):

$$S = \pi r_{\max}^2 \quad (6)$$

式中 $r_{\max}$ 为熔池接触表面最大半径。

1.2 求解方法

采用显热容法处理银的相变过程完成对上述方程的求解。在温度场计算结果中, 选取银的熔点以上区域为熔池区域, 银熔点等温线即为固液分界面。

对控制方程(2)的求解采用有限体积方法。其原理是将计算区域划分为一系列不重复的控制体积, 并使每个网格点周围有一个控制体积。将待解的微分方程对每一个控制体积积分, 便得出一组离散方程。其中的未知数是网格点上的温度值。这样在任何一个控制体积内都满足能量守恒, 这是有限体积法胜于有限差分方法的地方^[9-10]。

采用显热容法处理材料的相变, 化移动热边界问题为“单相”非线性导热^[11]。对于AgMeO复合材料触头, 假设MeO均匀分布在Ag基体中, 在每一个控制体积内材料的组成都是一致的。在同一个控制体积内, 达到局部热平衡, 各组元温度相等。但求解过程中把复合材料当成均匀连续相, 用各物相物性参数的线性迭加方法计算复合材料物性参数。具体计算参数如表 1 所列^[12]。

表 1 计算中采用的材料物性参数

Table 1 Properties of materials used in the simulation					
Material	Density/ (kg·m ⁻³)	Heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Melting point/ K	Boiling point/ K
Ag	10 500	234.0	418.0	1 234	2 436
CdO	8 150	379.9	0.7		

Material	Heat of melting/ (J·kg ⁻¹)	Heat of boiling/ (J·kg ⁻¹)	Decomposition temperature/ K	Decomposition heat/ (J·kg ⁻¹)
Ag	1.05 × 10 ⁵	2.387 × 10 ⁶		
CdO			1 633	1.994 × 10 ⁶

2 结果与分析

2.1 MeO 物性参数对熔池面积的影响

为了分析比较第二相氧化物质点的性质对触头材料熔池面积的影响, 设定电弧作用参数均为 $P=500\text{ W}$, 电弧半径 $r_a=0.4\text{ mm}$, 电弧作用时间为 3 ms 。以 AgCdO(10%, 质量分数)材料为参照, 计算了MeO的物性参数分别变化时的温度场, 并以触头材料熔池接触面积作为触头材料抗熔焊性能的依据。

图 2~6 所示分别为接触面上熔池面积随第二相 MeO 颗粒密度、比热容、分解温度、分解热和热导率

变化的计算结果。由图 2~6 可以发现, 增大 MeO 的密度、比热容、分解焓和热导率均有助于减小熔池接

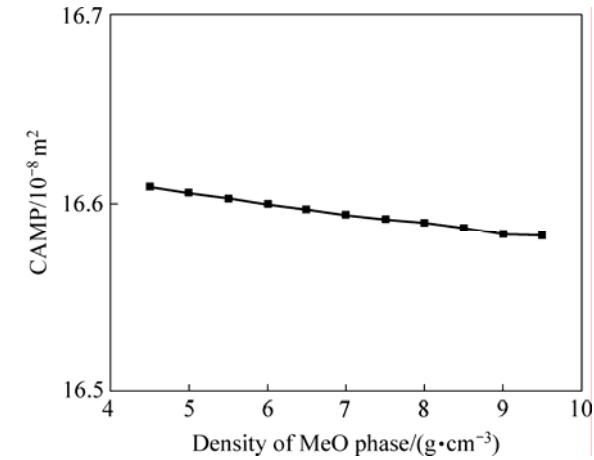


图 2 MeO 密度与熔池接触面积关系
Fig.2 Relationship between density of MeO phase and CAMP

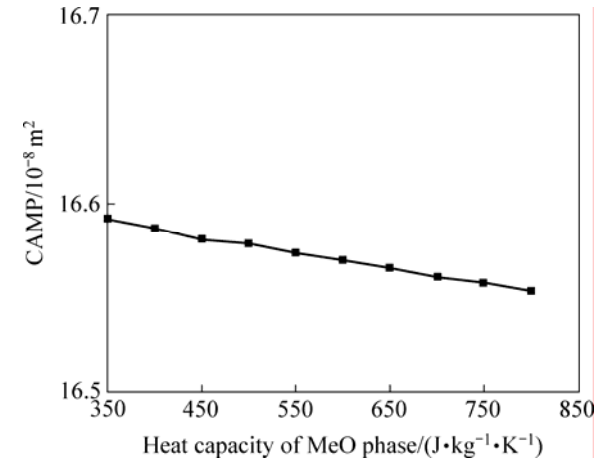


图 3 MeO 比热容与熔池接触面积关系
Fig.3 Relationship between heat capacity of MeO phase and CAMP

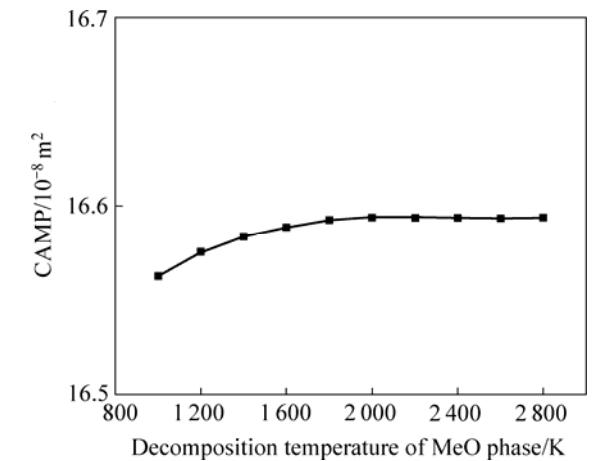


图 4 MeO 分解温度与熔池接触面积的关系
Fig.4 Relationship between decomposition temperature of MeO phase and CAMP

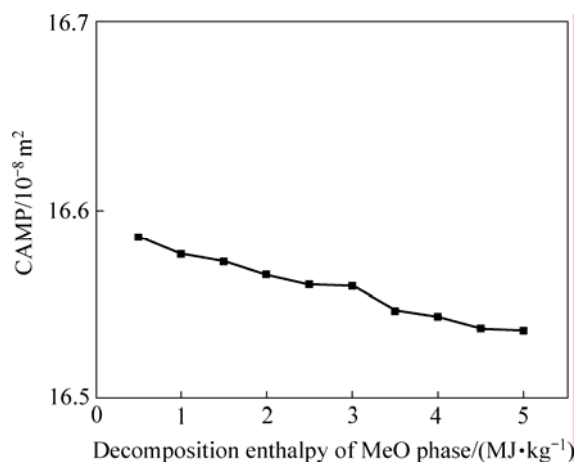


图 5 MeO 分解焓与熔池接触面积的关系

Fig.5 Relationship between decomposition enthalpy of MeO phase and CAMP

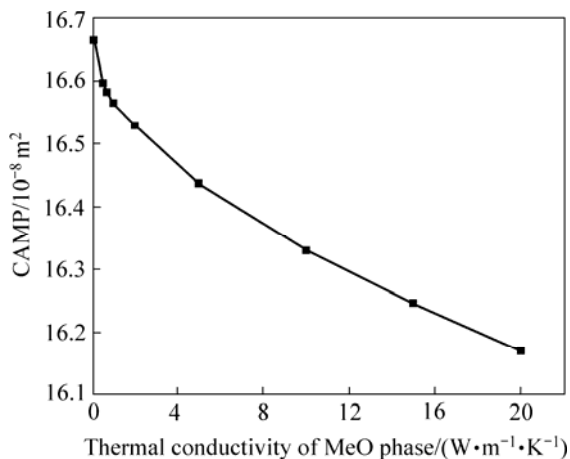


图 6 MeO 热导率与熔池接触面积的关系

Fig.6 Relationship between thermal conductivity of MeO phase and CAMP

触面积,从而有利于提高触头的抗熔焊能力;熔池接触面积随 MeO 相颗粒分解温度的升高而增大,故添加具有较高分解温度或相变温度的 MeO 相不利于触头材料抗熔焊。

图 7 所示为各种因素对触头材料形成的熔池面积影响程度的比较。本文作者分别计算在每个物性参数增大 100%的条件下熔池接触面积变化量。由此可看出,各种因素对于触头熔池接触面积的影响有显著差异,MeO 的密度、比热、分解温度和分解焓对触头材料接触面积的影响并不大,而热导率的改变则对接触熔池面积的影响最显著,约为其它参数影响的 3~4 倍,因此,优先选择具有较高热导率的 MeO 最有利于提高触头材料的抗熔焊性能。

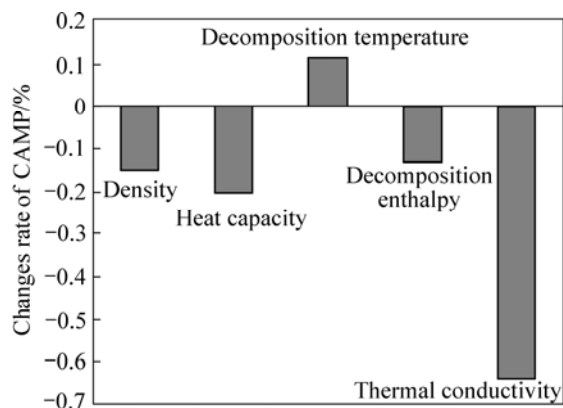


图 7 MeO 的物性参数对熔池接触面积影响的比较

Fig.7 Comparison of effect of MeO phase properties on change rate of CAMP

2.2 MeO 含量对触头材料熔焊性能影响

图 8 所示为电弧能量为 500 W、密度为 6 g/cm³ MeO(其它物性参数以 CdO 计算)的体积分数对熔池面积的影响。由图 8 可看出,接触熔池面积随 MeO 体积分数的增加而增大,而不同密度的 MeO 对熔池接触面积影响不大。

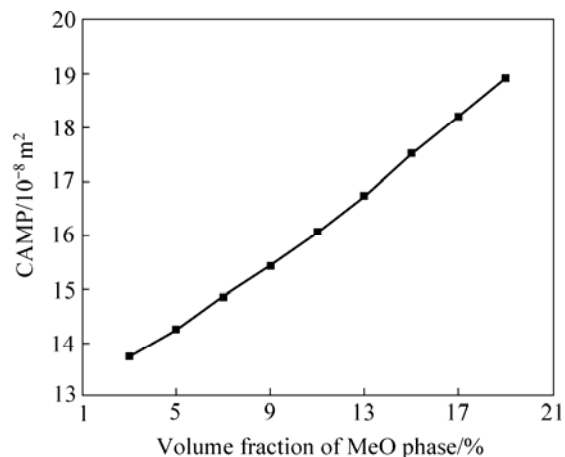


图 8 MeO 的体积分数与熔池接触面积的关系

Fig.8 Relationship between volume fraction of MeO phase and CAMP

对于颗粒型金属复合材料,当基体与颗粒无偶联时,其拉伸强度往往不是增强,而是降低。对于 AgMeO 触头材料而言,一般说来,Ag 与氧化物陶瓷 MeO 之间的物理化学作用极弱,那么只需要考虑 MeO 颗粒最终与基体完全脱开,颗粒占有的体积可看作孔洞,此时基体承受全部载荷。据此,可求出颗粒型复合材料的拉伸强度^[13]:

$$\sigma_b = \sigma_m (1 - 1.21 \phi_p^{2/3}) \quad (7)$$

式中 σ_m 为基体银的拉伸强度; φ_p 为颗粒的体积分数。本研究定义触头熔焊力 F 为

$$F = \sigma_b S$$

式中 S 为熔池接触面积, 可得到触头熔焊力随 MeO 体积分数的变化。

图 9 所示为 MeO 体积分数与熔焊力的关系。由图 9 可看出, 熔焊力随着 MeO 体积分数的增加而减小。这是由于 MeO 体积分数的增加一方面使熔池的接触面积增加, 从而易于熔焊; 另一方面, 触头的拉伸强度却因为 MeO 体积分数的增加而急剧降低。熔池面积的增加不足以抵消拉伸强度降低的影响, 因此, 使得熔焊力随 MeO 体积分数的增加反而下降。

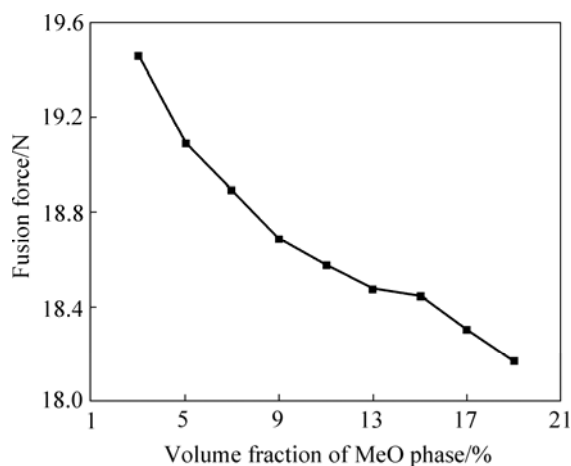


图 9 MeO 体积分数与熔焊力的关系

Fig.9 Relationship between volume fraction of MeO phase and fusion force

2.3 电弧参数对接触熔池面积的影响

图 10 所示为电弧输入功率为 500 W 时, 燃弧时间对熔池接触面积的影响。由图 10 可看出, 随着电弧

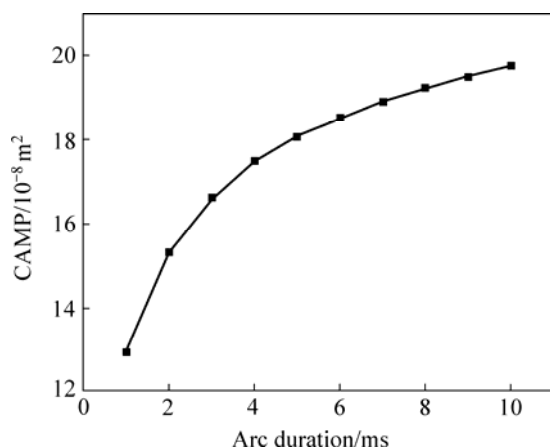


图 10 燃弧时间与熔池面积的关系

Fig.10 Relationship between arc duration and CAMP

燃弧时间的增加, 触头材料熔池接触面积也随之增加, 但在绝热边界条件下, 熔池接触面积随燃弧时间的变化逐渐趋缓, 接近于当触头处于稳态导热时的极限熔池面积。

图 11 所示为电弧输入功率为 500 W 时, 电弧半径对接触熔池面积的影响。由图 11 可看出, 随着电弧半径增加, 接触熔池面积随之增加, 当电弧半径为 0.4 mm 时, 接触熔池面积达到极大值; 随着电弧半径的进一步增加, 接触熔池面积逐渐减小。这是由于一方面, 电弧半径的增大会增加触头表面的受热面积, 从而增加接触熔池面积; 另一方面, 电弧半径的增大又会分散电弧能量, 使热流密度下降, 从而减小接触熔池面积。这两方面的综合效应使得电弧半径作用下接触熔池面积出现极大值后会减小, 当电弧半径增大到 0.8 mm 时, 熔池接触面积减小为零, 几乎不会在两极触头材料表面形成熔池, 从而有利于触头材料的抗熔焊。

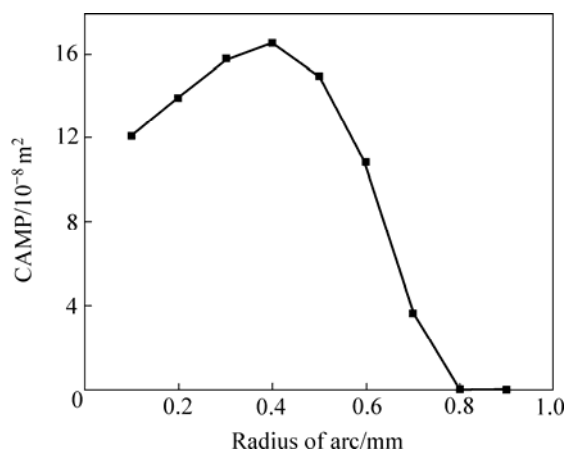


图 11 电弧半径与熔池面积的关系

Fig.11 Relationship between radius of arc and CAMP

电弧能量的输入是对触头材料熔池面积影响另一个重要方面。图 12 和 13 所示分别为不同电弧输入功率条件下 MeO 相的分解温度和分解焓对熔池接触面积的影响。与 3.1 中讨论的类似, 在相同能量输入条件下, 分解温度与分解焓对熔池接触面积影响非常小。而输入功率对熔池的影响是最为显著的, 当电弧输入能量增加 100% 时, 触头熔池接触面积几乎也增加了 100%。与 3.1 中的密度及热导率等性质对熔池的影响相比, 电弧输入能量的影响约为它们的 1 000 倍, 因此电弧输入能量对于触头材料熔焊具有决定性意义。提高触头材料的抗熔焊性能的根本措施是抑制电弧产生、减小电弧能量或分散电弧能量, 从而减少电弧能量的输入。

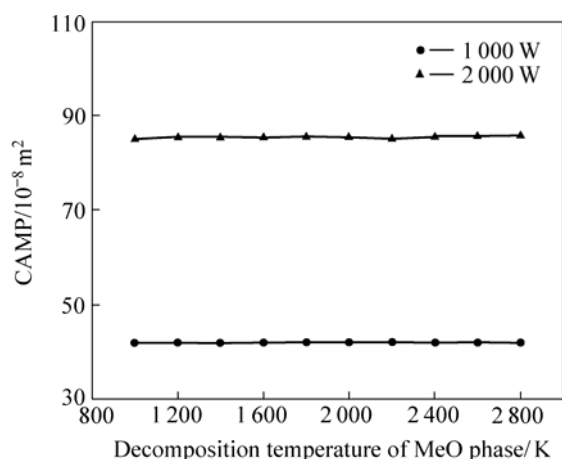


图 12 不同输入能量时 MeO 分解温度对熔池面积的影响

Fig.12 Effects of decomposition temperature of MeO phase on CAMP at different input energies

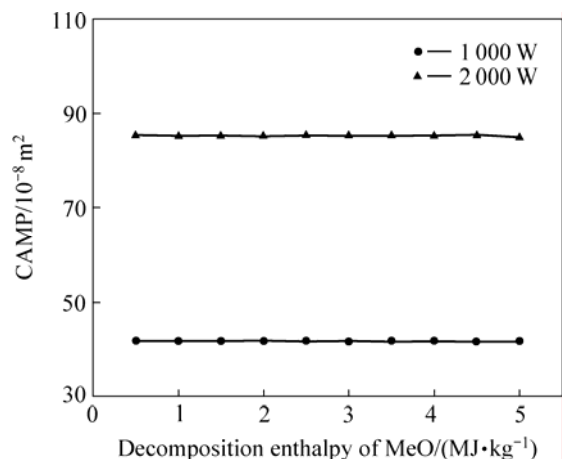


图 13 不同输入能量 MeO 的分解热对熔池面积的影响

Fig.13 Effects of decomposition enthalpy of MeO on CAMP

3 结论

1) 相对 AgMeO 触头材料而言, 当 MeO 质量分数一定时, 选择具有较高密度、比热容、分解焓和热导率以及较低分解温度的 MeO 材料均有助于减小熔池接触面积, 其中 MeO 的热导率是最主要的影响因素。

2) 对 AgMeO 触头材料而言, 随着 MeO 体积分数的增大, 熔池接触面积随之增大, 但也会导致接触处强度下降, 且强度下降的幅度远大于接触面积的增加, 两者之积(熔焊力)亦随 MeO 体积分数增加而下降。

3) 不同电弧能量对熔池接触面积的影响巨大, 输入能量加倍, 其相应的熔池接触面积也加倍。

4) 在相同变化的条件下, 输入电弧能量对熔池接触面积的影响约为 MeO 的密度、热导率等物性参数影响的 1 000 倍。

REFERENCES

- [1] 张尧卿, 郑 冀. AgSnO₂电接触材料研究概述[J]. 材料导报, 2006, 20(4): 53-57.
ZHANG Yao-qing, ZHENG Ji. A review on the development of AgSnO₂ contact material[J]. Materials Review, 2006, 20(4): 53-57.
- [2] 王宝珠, 王胜恩, 白惠珍, 姚 芳. 新型银-金属氧化物触头材料成分设计与制粉[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(3): 77-81.
WANG Bao-zhu, WANG Sheng-en, BAI Hui-zhen, YAO Fang. The designing of the novel Ag-metal oxide contact materials composition[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2001, 30(3): 77-81.
- [3] 程礼椿. 电接触理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
CHENG Li-chun. Theory of electrical contact and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [4] SWINGLER J, MCBRIDE J W. A comparison of the erosion and arc characteristics of Ag/CdO and Ag/SnO₂ contact materials under DC break conditions[C]//Proceedings of the Forty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Montreal, Canada: IEEE, 1995: 381-392.
- [5] WEISE W, BRAUMANN P. Thermodynamic analysis of erosion effect of silver-based metal oxide contact materials[C]//Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts. Chicago: IEEE, 1996: 98-104.
- [6] JENNOT D, PINARD J, RAMONI P, JOST M E. Physical and chemical properties of metal oxide additions to Ag-SnO₂ contact material and predictions electrical performance[J]. IEEE Trans on CPMT, Part A, 1994, 17(1): 17-23.
- [7] 堵永国, 杨 广, 张家春, 王光华, 龙 雁. AgMeO 触点材料电弧侵蚀的物理冶金过程分析[J]. 电工合金, 1997, 4: 1-8.
DU Yong-guo, YANG Guang, ZHANG Jia-chun, WANG Guang-hau, LONG Yan. Physical metallurgy analysis of the arc erosion of AgMeO contact materials[J]. Electrical Engineering Materials, 1997, 4: 1-8.
- [8] 熊惟皓, 傅江华, 徐 坚, 李震彪. 银基触头受电弧热作用的有限体积法分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 80-83.
XIONG Wei-hao, FU Jiang-hua, XU Jian, LI Zhen-biao. Finite volume analysis for thermal effect of the Ag-based contacts under arc[J]. Journal of Huazhong University of Science and

- Technology: Nature Science Edition, 2008, 36(4): 80–83.
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- TAO Wen-quan. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [10] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2000: 168–190.
- VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2000: 168–190.
- [11] AHMAD M, BONTEMPS A, SALLEE H, QUENARD D. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(6): 673–681.
- [12] 刘光启, 马连湘, 刘 杰. 化学化工物性数据手册(无机卷)[M]. 第一版. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- LIU Guang-qi, MA Lian-xiang, LIU Jie. Handbook of properties of chemistry and chemical engineering (Inorganic volume)[M]. 1st ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [13] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 第一版. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- WO Ding-zhu. Cyclopedia of composites[M]. 1st ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- (编辑 李艳红)