

铜基电磁开关触头材料的抗熔焊性能

李 权¹, 丁 敏², 吴爱萍¹, 邹贵生¹, 宋 伟², 李 剑²

(1. 清华大学 机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 博世汽车部件(长沙)有限公司, 长沙 410100)

摘 要: 自行设计了结构简单、操作方便的电磁开关触头材料抗熔焊性能模拟试验机。通过该试验机, 研究纯铜、典型铜合金、铜基复合材料的抗熔焊性能。结果表明: 相对于纯铜触头材料, 碲铜合金、钨铜复合材料均有较优异的抗熔焊性能; 从降低熔焊触头融焊力的角度考虑, 触头材料的抗熔焊性能与触头闭合时熔焊区域是否容易形成焊接缺陷有关。研究结果对改善电磁开关触头抗熔焊性能具有重要参考意义。

关键词: 铜基材料; 电磁开关; 触头; 抗熔焊性能

中图分类号: TG146.1⁺1

文献标志码: A

Anti-welding performance of copper-based electrical contacts in solenoid switch

LI Quan¹, DING Min², WU Ai-ping¹, ZOU Gui-sheng¹, SONG Wei², LI Jian²

(1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education,

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Bosch Automotive Products (Changsha) Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: A simulation device of solenoid switch with simple structure and easy operation, was developed to test the anti-welding performance of pure copper, typical copper alloys and copper-based materials. The results show that CuTe alloy and CuW30 composites have better anti-welding performance than pure copper. From the view of decreasing welding force, the anti-welding performances of different copper-based materials are related to the formation of welding defects in the welding zone when the contacts are connected. The results are beneficial to improving the anti-welding performance of electrical contacts in solenoid switch.

Key words: copper-based materials; solenoid switch; electrical contacts; anti-welding performance

商用车起动机电磁开关触头供电电源电压虽然只有 24 V, 但接通时的瞬时涌流却可达 1.8 kA。在这样的使用环境下, 其电磁开关触头容易在未达到使用寿命前出现偶然的熔焊失效, 即电磁开关粘连现象。当电磁开关触头发生熔焊时, 可能会导致电磁开关烧毁、起动机损坏等故障。该问题是电磁开关工作过程中的

一大隐患, 一直困扰着众多电磁开关生产厂家。

相关的文献报道。有些电磁开关方面的专利虽然对熔焊的原因有所提及, 但观点存在分歧^[1-2]。

吴建刚^[1]认为电磁开关触头的熔焊为静熔焊, 因此, 他采用复合触点分流的形式减少焦耳热作用来提高电磁开关抗粘连性能。袁刚强等^[2]认为电磁开关闭合过程中的电弧是导致触头熔焊的原因, 因此他采用降低动触点组件的质量, 缩短电磁开关吸合时间, 减少动静触点之间产生电弧次数的方法来提高电磁开关

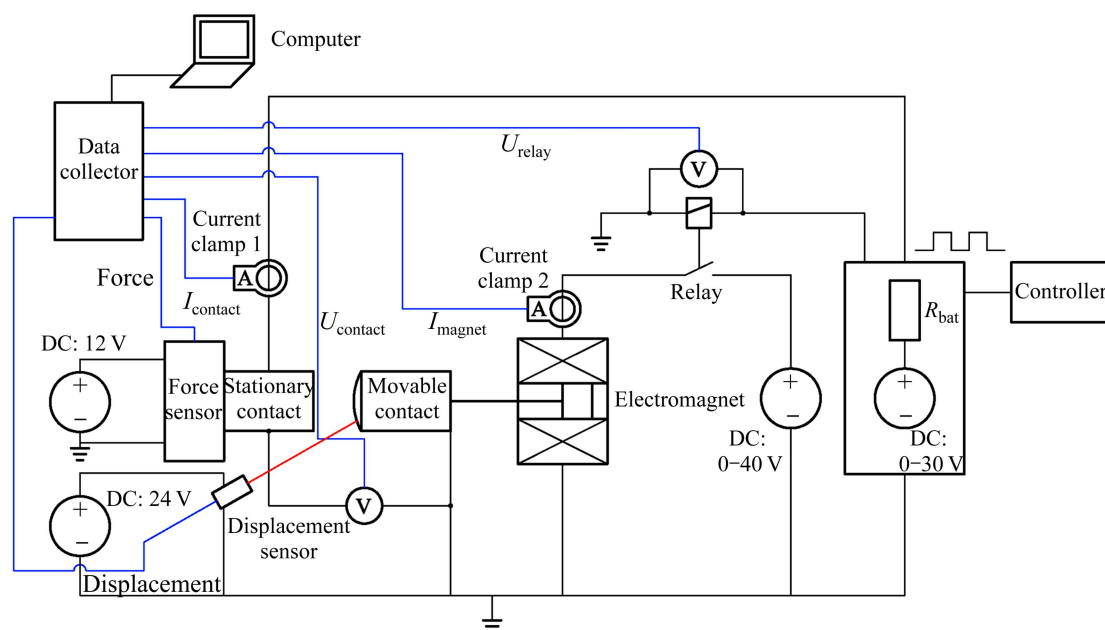


图2 电磁开关触头抗熔焊性能试验机电路图

Fig. 2 Principle schematic diagram of test circuit of anti-welding performance of electrical contacts in solenoid switch

磁开关触头熔焊时的闭合阶段电流(见图2中 I_{contact})、电压(见图2中 U_{contact})及功率信号,其熔焊时的闭合电弧信号特征如下:触头闭合后电流突然下降,并且同时出现电压峰和功率峰。图3(b)所示为利用试验机进行模拟试验,触头熔焊时所采集到的闭合电弧信号。由于在机械结构上与实际电磁开关有一定差异,试验机中的闭合电弧燃弧时间较长,因而电弧能量较大。但这并不影响对不同材料抗熔焊性能的比较研究,且更有利于产生有效熔焊(即给定分断力下触头无法分断),缩短试验时间。出现有效熔焊后,分断力小于触头熔焊力,需通过手动加载使触头分离。

为评价不同材料的抗熔焊性能,采用如下抗熔焊性能评价指标^[6]:

$$f_w = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: f_w 为熔焊概率; n 为有效熔焊次数; N 为闭合、分断总次数。由式(1)可知,熔焊概率越低,抗熔焊性能越强。

1.2 试验材料

试验材料及成分如表1所示。各材料性能特点如下。

1) Cu。具有优异的导电、导热性能,作为试验中的对比材料。

2) CuNi1Si。时效硬化铜合金,具有较高的强度、硬度,耐机械磨损。但导电、导热性能相对较差,作为试验中的对比材料。

3) CuTe。在电弧作用下低熔点碲元素从合金中分解,吸收大量热量对电弧有冷却作用,因此具有一定的抗电弧侵蚀能力^[7];焊接熔池冷却时,碲元素在触头焊点处偏析形成 Cu_2Te 脆性化合物,对抗熔焊有利^[8]。

4) CuAl_2O_3 。氧化铝弥散强化铜合金,具有较高的强度和硬度,耐机械磨损。氧化铝弥散分布可避免电弧的集中烧蚀^[9]。

5) CuCr1Zr。时效硬化铜合金,具有较高的强度和硬度,耐机械磨损。作为电阻焊电极材料,有一定的抗氧化性能,对降低接触电阻有利。

6) CuW30。钨熔点较高,不易熔化,对抗电弧烧蚀十分有利;大量硬质点钨可有效削弱焊点强度。

表2所列为试验材料的主要性能参数,除CuNi1Si外,各材料均具有较优异的导电和导热性能。图4所示为触头试样主要尺寸。

1.3 试验条件

经过一定次数的调试试验,确定如表3所列的试验参数。在该试验参数下,纯铜触头出现了较为稳定的熔焊现象。因此,采用该参数进行试验,测试不同材料及配对的熔焊概率。

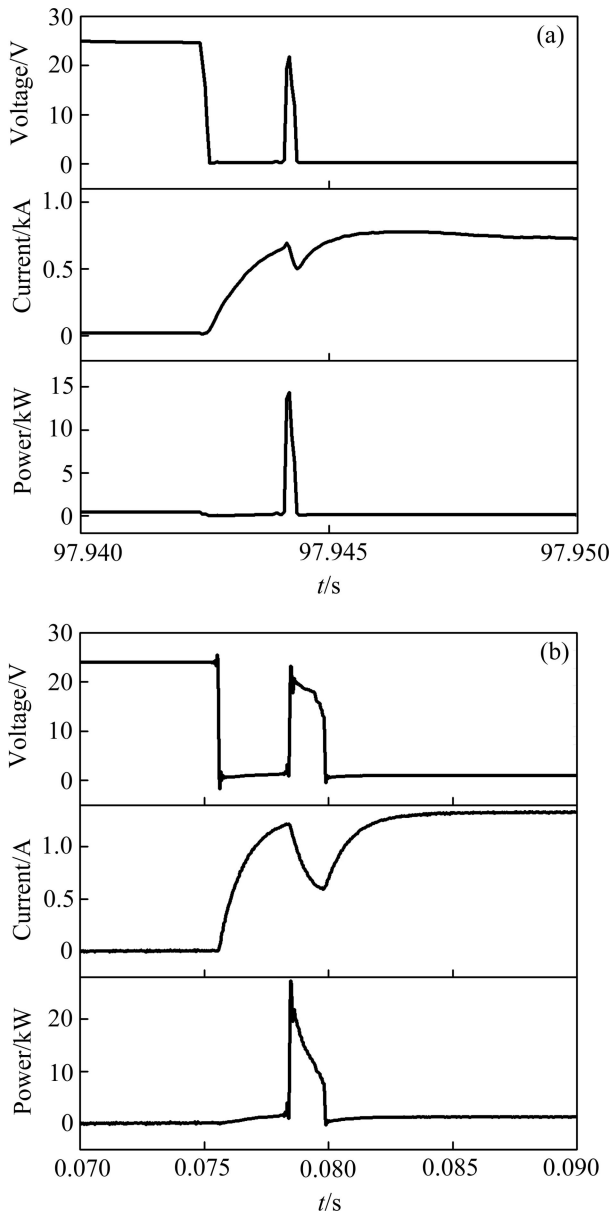


图3 熔焊发生时闭合阶段的信号特征

Fig. 3 Characteristics of contact welding in making process: (a) Solenoid switch; (b) Simulation test

表 1 试验材料及成分^[10-11]

Material	Mass fraction/%
CW004A(Cu)	Cu≥99.90, O≤0.04
CW109C(CuNi1Si)	Cu-(1.0-1.6)Ni-(0.4-0.7)Si
C14500(CuTe)	99.50Cu-(0.4-0.6)Te
C15760(CuAl ₂ O ₃)	98.77Cu-(1.1-1.2)Al ₂ O ₃
C18150(CuCr1Zr)	99Cu-(0.5-1.5)Cr-(0.05-0.25)Zr
CuW30	70Cu-30W

表 2 试验材料性能参数^[12-14]

Material	Thermal conductivity, $\lambda/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Density, $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Electrical resistivity, $\rho_d/(\mu\Omega\cdot\text{cm})$	Tensile strength, σ_b/MPa
Cu	3.88	8.89	1.72	210(R200) ¹⁾
CuNi1Si	1.60	8.80	4.35-5.88	590(R590)
CuTe	3.55	8.94	1.86	260(H02) ¹⁾
CuAl ₂ O ₃	3.22 ¹⁾	8.81 ¹⁾	2.21 ¹⁾	551 ¹⁾
CuCr1Zr	3.24 ¹⁾	8.89 ¹⁾	≤2.29 ¹⁾	469(TL02) ¹⁾
CuW30	—	10.80	2.36	—

1) Data from industry.

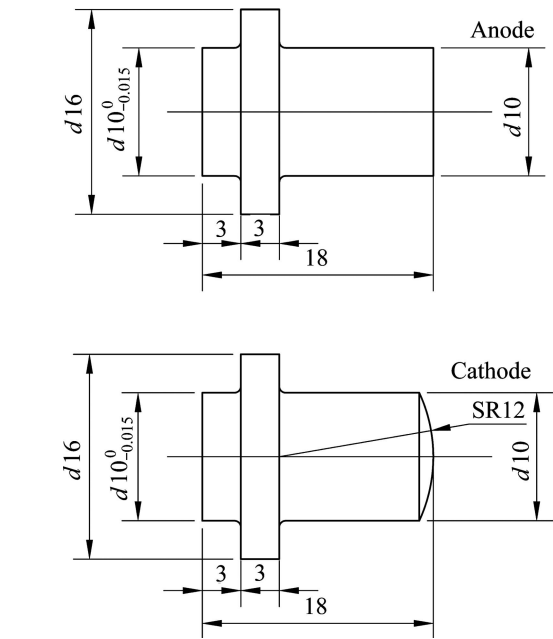


图4 触头试样尺寸

Fig. 4 Dimensions of contact samples (unit: mm)

2 实验结果

2.1 抗熔焊性能试验结果

同种材料配对，在通电电流 1.0 kA 的试验条件下，各材料的熔焊概率如图 5(a)所示。CuNi1Si 熔焊概率最高，其次为 CuCr1Zr、CuAl₂O₃、Cu。CuTe 和 CuW30 的熔焊概率相当，均低于 Cu 的。增加通电电流至 1.4 kA，由图 5(b)可知，CuTe 熔焊概率略低于 CuW30 的，但两者熔焊概率仍低于 Cu 的。因此，各材料抗熔焊性能从高到低的顺序如下：CuTe、CuW30、

表 3 模拟试验中触头闭合、分断过程的试验参数

Test condition	Direct adjustable					Indirect adjustable		Others			Test cycles
	Battery resistance, $R_B/\text{m}\Omega$	Battery voltage, U_B/V	Break force, F_b/N	Make force, F_m/N	Electromagnet voltage, U_E/V	Contact current, I_c/kA	Make velocity, $V_m/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Contact gap/mm	Switch off duration of relay/s	Switch on duration of relay/s	
1	15	24	25	10	35	1.0	1.4	3	20.7	0.8	100
2	8	24	25	10	35	0.3	0.3	3	25.7	0.8	100

Air blower was used to cool down temperature of contacts.

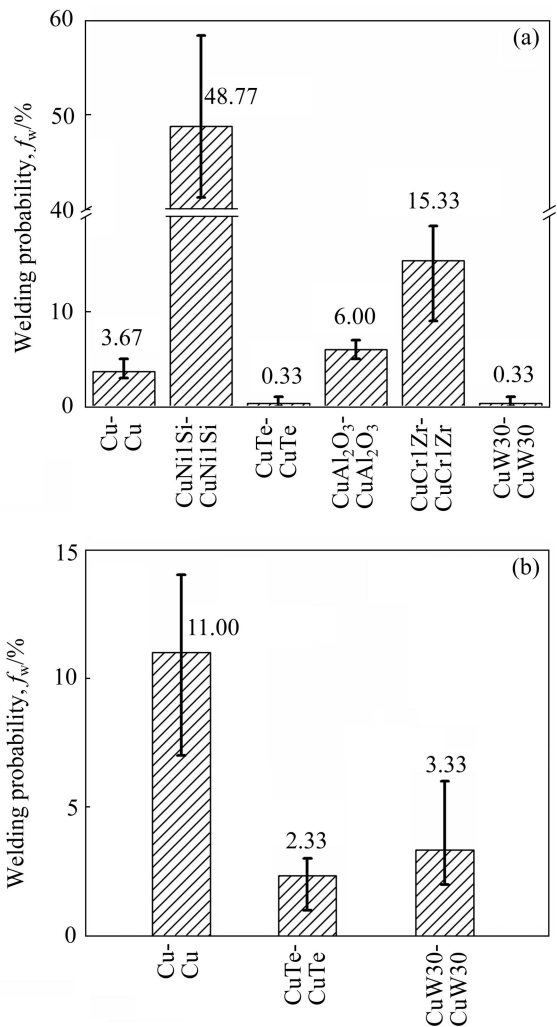


图 5 同种材料配对熔焊概率
Fig. 5 Welding probability of contact pairs with same electrode materials: (a) $I_c=1.0 \text{ kA}$; (b) $I_c=1.4 \text{ kA}$

Cu、CuAl₂O₃、CuCr1Zr、CuNi1Si。

在通电电流为 1.4 kA 条件下进行异种材料配对, 试验结果如图 6 所示。CuTe、CuW30 等材料与抗熔焊性能较好的 Cu 配对时, 仍能保持其优异的抗熔焊性能; CuTe、CuW30、Cu 与抗熔焊性能较差的 CuNi1Si、

CuCr1Zr 配对时, 其抗熔焊性能下降非常明显。

2.2 熔焊断口形貌

为研究不同材料的抗熔焊机理, 在 1.4 kA 通电电流条件下对同种材料配对的触头进行熔焊试验, 当触头出现首次熔焊后, 停止试验, 手动加载分断触头, 然后用扫描电镜观察正极断口形貌。

图 7 所示为同种材料配对熔焊触头正极断口形貌, 其特征如下。

- 1) Cu。断口有一定数量的气孔, 气孔周围有较多的细小切窝。
- 2) CuNi1Si。断口有较大、较深的切窝, 呈韧性断裂特征。
- 3) CuTe。断口气孔较密集, 部分气孔中还含有小气孔。大量的气孔减小了受力面积, 图中仅部分区域可见撕裂痕迹, 在撕裂处有少量细小切窝。另外还可观察到二次裂纹。

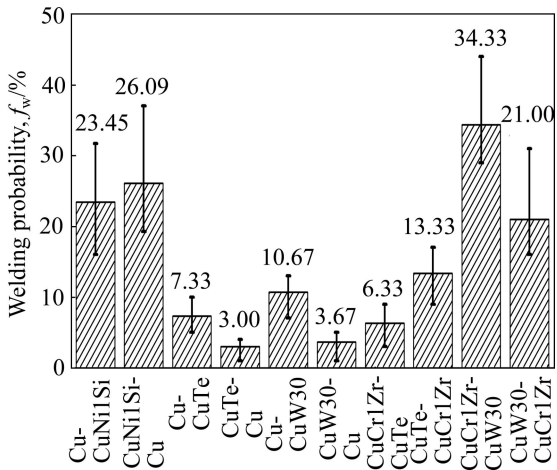


图 6 异种材料配对熔焊概率
Fig. 6 Welding probability of contact pairs with dissimilar electrode materials ($I_c=1.4 \text{ kA}$; Before “-” is anode material, after “-” is cathode material)

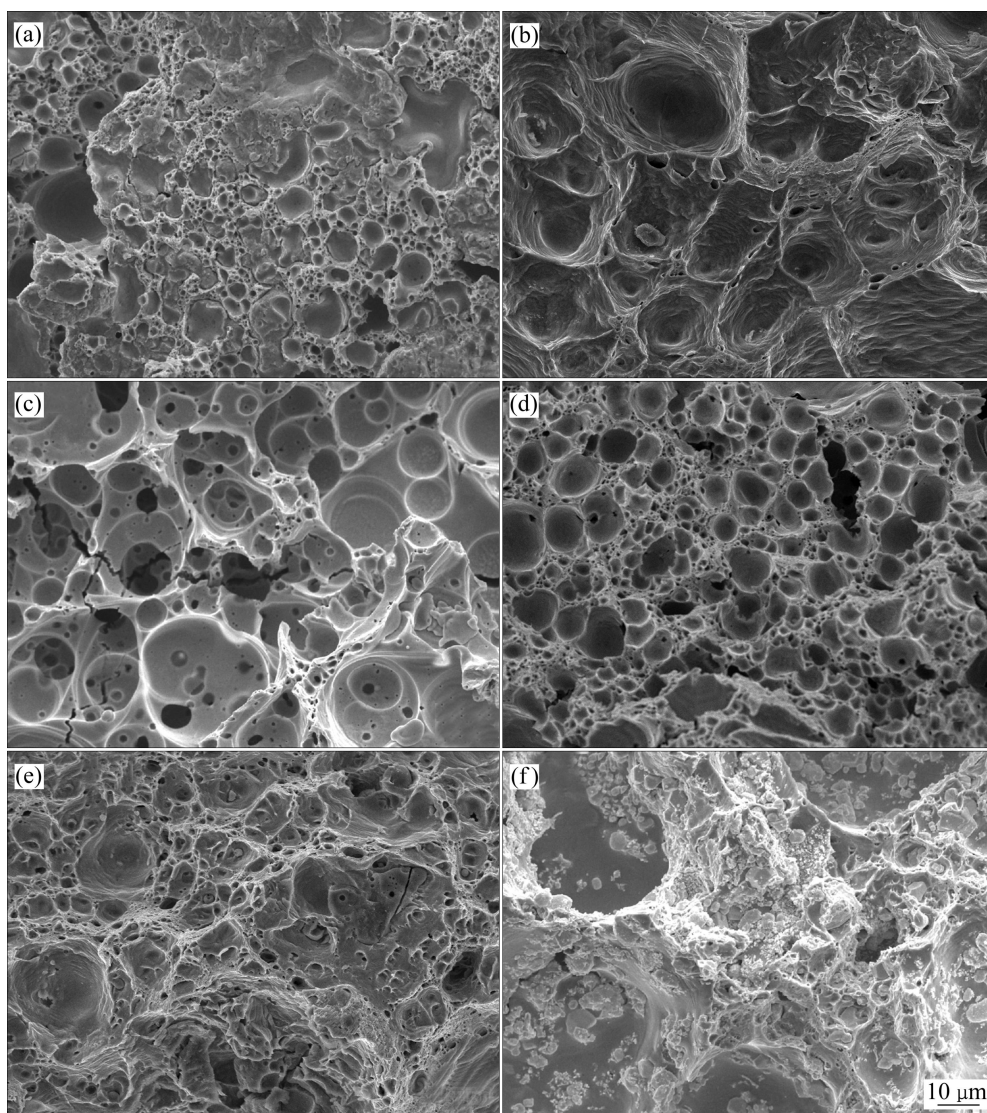


图 7 同种材料配对熔焊触头正极断口形貌

Fig. 7 Anode fracture morphologies of welding contacts with same electrode materials ($I_c=1.4$ kA): (a) Cu; (b) CuNi1Si; (c) CuTe; (d) CuAl₂O₃; (e) CuCr1Zr; (f) CuW30

4) CuAl₂O₃。断口有较多气孔，气孔周围有很多细小韧窝。另外还可观察到一定数量的孔洞缺陷。

5) CuCr1Zr。与 CuNi1Si 相比，断口韧窝较浅，且细小韧窝较多，呈韧性断裂特征。

6) CuW30。断口有较大的气孔，气孔内外均分布了 W 颗粒。

3 讨论

根据抗熔焊性能试验结果，CuTe 和 CuW30 等材料抗熔焊性能较为优异，而 CuNi1Si 和 CuCr1Zr 等材料抗熔焊性能较差。众所周知，决定各材料抗熔焊性

能优劣的一个重要因素为熔焊力。在试验中发现，同一材料在相同试验条件下出现熔焊时的熔焊力大小并不恒定，且变化的随机性较大。但是，由表 4 可知，最大熔焊力却能一定程度上反映不同材料的抗熔性能。抗熔焊性能好的材料(如 CuTe)其最大熔焊力较小，抗熔焊性能差的材料(如 CuNi1Si)其最大熔焊力较大。分断力一定，最大熔焊力越大，意味着该材料在闭合电弧作用下发生熔焊时，熔焊力处于分断力与最大熔焊力之间的概率越大，也即越容易发生有效熔焊。相对熔焊概率(R_w)的定义如下：

$$R_w = \frac{n_2}{N_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中： n_2 为有效熔焊次数； N_2 为闭合电弧次数。

可以发现 CuNi1Si 与 CuCr1Zr 的相对熔焊概率较高(见图 8), 在闭合电弧作用下, 更容易发生有效熔焊, 这从一定程度上印证了上述观点。

表 4 同种材料配对平均闭合电弧能量与最大熔焊力
Table 4 Average make arc energy and maximum welding force of contact pairs with same electrode materials ($I_c=1.0$ kA)

Contact material	Average make arc energy/J	Maximum welding force/N	Anti-welding performance rank
Cu	14.09	169.70	3
CuNi1Si	20.83	500.00	6
CuTe	10.66	57.68	1
CuAl ₂ O ₃	14.97	267.00	4
CuCr1Zr	11.25	443.30	5
CuW30	12.87	128.80	2

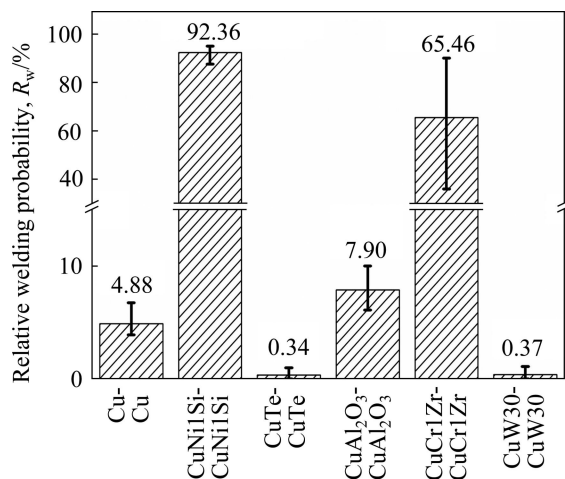


图 8 同种材料配对相对熔焊概率
Fig. 8 Relative welding probability of contact pairs with same electrode materials ($I_c=1.0$ kA)

虽然闭合电弧能量对触头材料的熔焊力有一定影响, 但并不是决定熔焊力的主要因素。如表 4 所列, CuNi1Si 和 CuTe 平均闭合电弧能量与最大熔焊力有一定关系, 而其他材料却没有这样的对应关系。造成这一现象的主要原因是熔焊时的缺陷和触头材料的强度。

由图 7 熔焊断口形貌可知, 熔焊时出现的缺陷越多, 抗熔焊性能越好。CuTe 材料熔焊断口上气孔、裂纹缺陷最多, 因此熔焊力较低, 其抗熔焊性能也最为突出。相比之下, CuCr1Zr、CuNi1Si 等材料熔焊断口上的缺陷要少得多, 而且材料的强度相对较高, 因此熔焊力较大, 不容易分断。以下将简要分析各材料形

成图 7 所示焊接缺陷的可能原因。

1) Cu。电弧热高温作用下产生的[H]进入熔融态的 Cu 中, 凝固过程中形成氢气泡; [H]与 Cu₂O 发生反应生成水蒸气, 在熔焊区处形成气孔^[15-16]。

2) CuTe。在电弧热作用下, 合金中的 Cu₂Te 分解, 低熔点、高蒸汽压的 Te 元素汽化, 加剧了气孔的形成; 另一方面, 根据 BARKAN 等^[8]的观点, Cu₂Te 脆性化合物在熔焊界面有一定的偏析效应, 在急冷作用下易形成裂纹。

3) CuAl₂O₃。弥散分布的 Al₂O₃ 为气孔形成提供了核心, 也会促进气孔的产生^[17], 但弥散分布的 Al₂O₃ 可能会增加焊点强度。

4) CuCr1Zr。Cr、Zr 元素与氧的亲合力较大, 有脱氧作用, 能够降低熔焊区的气孔^[16]。

5) CuNi1Si。Si 元素与氧的亲合力较大, 有脱氧作用, 能够降低熔焊区的气孔^[16]。

6) CuW30。其气孔的形成与 Cu 类似, 但由于 W 与基体 Cu 不互溶, 大量分散的硬质点 W 在熔焊区形成夹杂物, 对熔焊强度有较大的削弱作用。

由上述分析可知, CuTe 和 CuW30 等材料的添加元素有利于形成熔焊缺陷, 因此具有较强的抗熔焊性能。而对于 CuNi1Si 和 CuCr1Zr, 由于脱氧元素的作用, 有效降低了熔焊区的气孔, 具有较低的抗熔焊性能。当然, CuNi1Si 的较差的导电、导热性能, 也是其抗熔焊性能差的原因之一。

4 结论

1) 典型铜基材料的抗熔焊性能从高到低的顺序如下: CuTe、CuW、Cu、CuAl₂O₃、CuCr1Zr、CuNi1Si。

2) 材料的抗熔焊性能与其添加元素是否有利于形成熔焊缺陷进而降低熔焊区强度有关。Te 有助于在熔焊区形成气孔, W 在熔焊区相当于夹杂物, 对改善铜基材料抗熔焊性能有利; 而 Cr、Zr 和 Si 等由于有脱氧作用, 会减少熔焊区的气孔, 不利于改善铜基材料抗熔焊性能。

REFERENCES

[1] 吴建刚. 复合触点电磁开关: 中国, 200810212991.4[P]. 2010-03-17.
WU Jian-gang. Composite contact electromagnetic switch: China, 200810212991.4[P]. 2010-03-17.
[2] 袁刚强, 孙长坤, 唐兴伟, 易礼杰. 汽车起动机用电磁开关: 中国, 200920315603.5[P]. 2010-10-13.

- YUAN Gang-qiang, SUN Chang-kun, TANG Xing-wei, YI Li-jie. Solenoid switch for starter in automobile: China, 200920315603.5[P]. 2010-10-13.
- [3] 荣命哲. 电接触理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 24-26.
- RONG Ming-zhe. Theory of electrical contact[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 24-26.
- [4] 梅一峰, 宋刚. 防触点粘连型电磁开关: 中国, 201020118382.5[P]. 2010-11-17.
- MEI Yi-feng, SONG Gang. Contact adhesion prevention type electromagnetic switch: China, 201020118382.5[P]. 2010-11-17.
- [5] NEUHASUSEN K B, SCHWIEBERDINGEN K B. Solenoid switch for starter: USA, 6360707B1[P]. 2002-03-26.
- [6] DOUBLET L, JEMAA N B, HAUNER F, JEANNOT, D. Electrical arc phenomena and its interaction on contact material at 42 volts DC for automotive applications[C]// Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts. Seattle, 2004: 8-14.
- [7] 王岩, 崔玉胜, 邵文柱, 甄良. 国内铜基电接触材料专利综述[J]. 低压电器, 2003(4): 3-7.
- WANG Yan, CUI Yu-sheng, SHAO Wen-zhu, ZHEN Liang. A review of patents about copper based electrical contact materials in China[J]. Low Voltage Apparatus, 2003(4): 3-7.
- [8] BARKAN P, LAFFERTY J M, LEE T H, TALENTO J L. Development of contact materials for vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, PAS-90(1): 350-359.
- [9] 杨平. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料耐电击穿性能的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009: 51.
- YANG Ping. Investigation on electrical breakdown properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composite[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009: 51.
- [10] 宋小龙, 安继儒. 新编中外金属材料手册[M]. 化学工业出版社, 2008: 1097, 1102, 1147.
- SONG Xiao-long, AN Ji-ru. A new handbook of Chinese and foreign metal materials[M]. Chemical Industry Press, 2008: 1097, 1102, 1147.
- [11] Copper Development Association Inc. ASTM standard designation for wrought and cast copper and copper alloys [EB/OL]. [2012-11-18]. <http://www.copper.org/alloypdf/alloyall.pdf>. 2012.
- [12] 赵祖德, 姚良均, 郭鸿运. 铜及铜合金材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 104-108, 126.
- ZHAO Zu-de, YAO Liang-jun, GUO Hong-yun. Copper and copper alloys handbook[M]. Beijing: Science Press, 1993: 104-108, 126.
- [13] CARO-PROMETA Metallvertriebs GmbH. Manufacturing application and processing of copper alloy [EB/OL]. [2012-11-19]. <http://www.caro-prometa.de/internet/media/en/lagerlisten/technik.pdf>. 2012.
- [14] 张万胜. 电触头材料国外基本情况[J]. 电工合金, 1995(1): 1-20.
- ZHANG Wan-sheng. Foreign general situation of electric contact[J]. Electrical Alloy, 1995(1): 1-20.
- [15] 季杰, 马学智. 铜及铜合金的焊接[J]. 焊接技术, 1999(2): 15-17.
- JI Jie, MA Xue-zhi. Welding of copper and copper alloys[J]. Welding Technology, 1999(2): 15-17.
- [16] 顾曾迪. 有色金属焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 125-126.
- GU Zeng-di. Welding of nonferrous metals[M]. Beijing: China Machine Press, 1995: 125-126.
- [17] 张华伟, 李言祥. 金属熔体中气泡形核的理论分析[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4864-4871.
- ZHANG Hua-wei, LI Yan-xiang. Study on bubble nucleation in liquid metal[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4864-4871.

(编辑 龙怀中)