

铜 / 钢液固相复合界面的结合强度 *

于九明 方晓英 孝云祯
(东北大学)

摘 要 用液-固相复合法制备铜包钢线,研究了钢线表面的处理方法,预热温度,铜液的温度和复合时间等工艺参数对铜包钢线中界面结合强度的影响.结果表明,表面经酸洗、机械打磨并覆助镀剂的钢线,在400℃预热复合后,钢线与铜层之间的结合效果较好,界面结合强度达到95MPa.

关键词 铜包钢线 结合强度 复合界面

分类号 TB331

文章编号 1005-3093(2000)06-0661-04

LIQUID AND SOLID BONDING STRENGTH OF Cu/Fe INTERFACE IN COPPER CLAD STEEL

YU Jiuming** FANG Xiaoying XIAO Yunzhen
(Northeastern University)

ABSTRACT This paper presents an investigation of copper clad steel wire produced by means of liquid and solid bonding method. The influences of process parameters, such as surface preparation method, preheating temperature, liquid copper temperature and bonding time, on bonding strength of Cu/Fe are systematically studied. The results showed that the bonding strength in the interface hits the record of 95MPa after the steel core is treated through preheating above the temperature of 400℃ and applying surface welding supporting technology.

KEY WORDS copper clad steel wire, bonding strength, bonding interface

铜包钢线是一种双金属复合导电线材,兼有铜的优异的耐蚀性能、导电性能和钢的高强度性能. 荷载高频电流时^[1,2],铜包钢线可直接取代同直径铜线. 在直流或低频条件下,当对材料的导电性要求不高而需要较高的机械性能时,可采用不同包覆比的铜包钢线^[3]. 铜/钢复合界面的结合质量直接影响它的机械性能和导电性能. 本文研究制备工艺对铜包钢线中铜/钢复合界面结合强度的影响.

* 国家自然科学基金资助项目 59674035. 2000年4月5日收到初稿; 2000年7月7日收到修改稿.

本文联系人: 于九明, 教授, 沈阳市 110006, 东北大学材料与冶金学院

** To whom correspondence should be addressed

1 实 验 方 法

实验用材料为电解铜 (纯度 99.9%) 和 20Mn 低碳钢线 (线径为 4mm). 使温度较低的经过表面处理的钢线从熔融的铜液中通过, 液态铜冷凝在钢线表面, 形成具有一定覆层厚度的铜包钢线^[4,5]. 分别研究在不同条件下钢线的预热温度和复合时间对铜包钢线中铜 / 钢复合界面结合强度的影响. 对钢线的表面处理方法, 一种是酸洗 + 机械打磨, 另一种是酸洗 + 机械打磨 + 覆助镀剂. 铜 / 钢界面结合强度试验是在 Instron 拉力试验机上进行的, 所用的测试试样均为非标准型. 切取长度约 500mm 的试样, 在其一端预留一定距离 (用锉打平分界处), 然后沿长度方向将铜层车掉大约 30mm, 通过测量预留段剥离铜层的剪切力可以计算出铜 / 钢界面处结合强度. 剥离夹具如图 1 所示. 在一个长 30mm, 直径 18mm 的铁棒中心钻一个和钢线直径相同的圆孔, 用线切割机将其沿纵向切开, 在 Instron 拉伸机上一边夹住铜包钢线, 一边卡住该夹具, 把铜层从钢芯体上剥离下来. 端部预留部分的长度要选择适当, 过长会导致钢线先断裂, 过短会使实验误差变大. 在保证钢线不被拉断的前提下尽量增大预留部分的长度 (其值一般为 2~3mm).

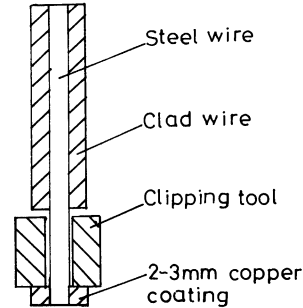


图 1 铜包钢线中铜 / 钢界面结合强度测试示意图

Fig.1 Sketch drawing of testing bonding strength of the interface in copper clad steel wire

2 结 果 与 讨 论

2.1 钢线的预热温度和表面处理方式对界面结合强度的影响

从图 2 可以看出, 随着钢线预热温度的升高, 铜 / 钢界面结合强度逐渐增大; 在预热温度为 400 °C 时, 界面结合强度达到较大值, 超过 400 °C 后, 随着预热温度的增加, 复合强度变化不大, 曲线趋于平缓; 在同一预热温度下, 钢线采用不同的表面处理方式, 铜 / 钢界面结合强度不同, 钢线覆助镀剂可使铜和钢的界面结合强度明显提高.

铜和钢的复合是异种金属反向凝固复合过程^[6,7], 这一过程由液态铜在固态钢线表面的润湿铺展, Fe、Cu 相互溶解、扩散, 液态铜的凝固结晶, 固相组织和化学成分变化等几个连续阶段组成. 钢线表面预处理质量和预热温度直接影响着液态铜对固态钢表面的润湿、异质形核、结晶和界面反应的进行^[7]. 钢线表面的氧化膜在铜液与基体间起隔离作用, 也妨碍铜与钢的真实接触. 在复合前必须对钢线进行表面处理, 以利于界面的结合. 钢线表面的预热处理可以提高钢线表面原子的活动能力, 促进液态铜与固态钢界面间的结合, 所以随着钢线预热温度的升高, 复合线界面初结合强度提高. 在钢线表面涂覆助镀剂, 使钢线与液态铜反向凝固复合形成的凝固层与钢基体的界面结合强度明显提高. 这是因为涂覆助镀剂可防止钢线在预热处理过程中的轻度氧化和二次污染, 同时助镀剂溶化后能降低铜液的表面张力, 改善铜和钢的润湿性, 促进铜、钢界面结合.

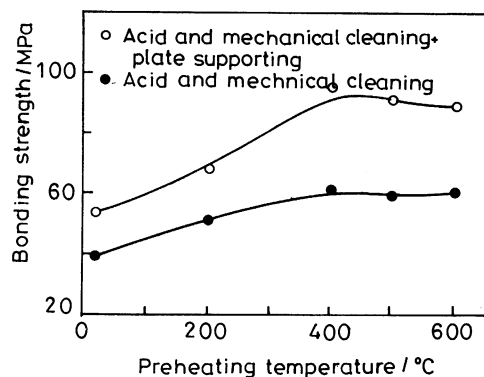


图 2 界面结合强度与预热温度的关系

Fig.2 Relationship between bonding strength and preheating temperature bonding time: 1.4s, temperature of liquid copper: 1100 °C

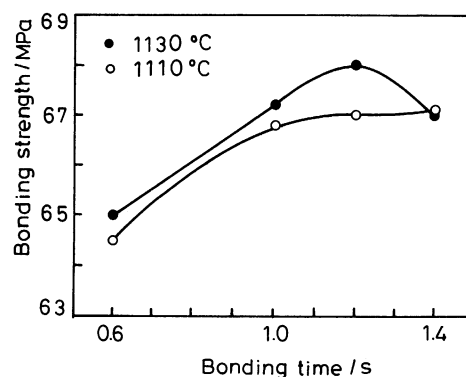


图 3 界面结合强度与复合时间的关系

Fig.3 Relationship between bonding strength and bonding time under the condition of preheating temperature 200 °C and different temperature of liquid copper

2.2 铜液温度和复合时间对界面结合强度的影响

从图 3 可以看出, 随着复合时间的延长, 界面结合强度逐渐升高; 铜液温度高, 界面结合强度略有提高; 当铜液温度为 1130 °C 时, 界面结合强度随着复合时间的延长先是升高, 最后又有下降的趋势。

液 - 固相的复合时间包括润湿时间和凝固时间。两种材料之间的润湿角 θ 越小, 润湿效果越好。润湿角 θ 和时间 t 的经验公式^[8] 为 $\theta = \theta_0 + \theta_0 \exp(B - At)$, 其中 A 、 B 为材料常数, 可见润湿角 θ 随着接触时间增长而急剧下降。另一方面, 由于铜与钢之间的液 - 固相界面的激活

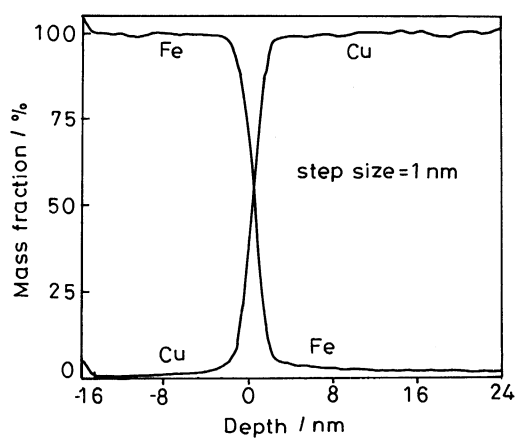


图 4 复合界面元素浓度变化

Fig.4 Line analysis of bonded interface

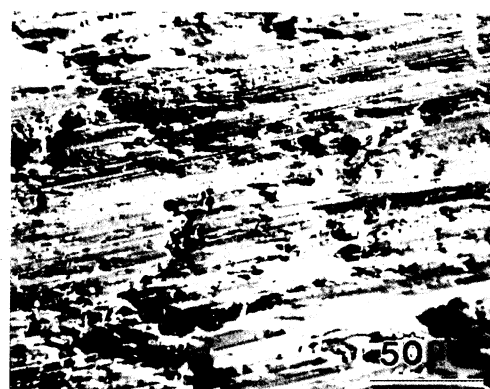


图 5 剥离界面断面形貌

Fig.5 SEM of fracture point

能很小,在凝固过程中,铜原子和铁原子进行互扩散,随着复合时间的增加,扩散充分进行,在界面区形成一互扩散层,使界面结合强度增加,但是随着复合时间的进一步延长,界面晶粒长大,强度降低(图4).

图5表明,在剥离界面钢线基体上有大量均匀分布的铜,说明铜与钢复合得比较好.部分断裂发生在铜的一侧,说明复合界面的结合强度已超过铜的剪切强度.实际测得的界面初结合强度达到95MPa;热处理后界面结合强度提高到102MPa.温度高,原子激活能力增强,原子越易迁移,因此铜液温度高有利于铜/钢界面的扩散结合.但铜液温度过高,液态铜与钢线接触时间过长,发生液态铜在 γ -Fe晶间渗入^[9].晶间渗入是在铜液温度为1130℃,复合时间超过1.2s的条件下界面结合强度下降的原因.

3 结 论

适当提高钢线的预热温度、铜液温度和延长复合时间,都使界面的结合强度提高,在钢丝表面预处理后立即涂覆助焊剂,也可改善复合效果.

参 考 文 献

- 1 费保俊,张绍先,电线电缆, 3, 17(1997)
- 2 龚建华,电线电缆, 3, 8(1995)
- 3 J.Brelm, M.Kornman, Wire Industry, 12, 824(1990)
- 4 于九明,王群骄,孝云楨,陈金英,闫谷丰,吴法宇,中国有色金属学报, 9, 474(1999)
- 5 傅晓,于九明,陈海耿,金属学报, 8, 828(2000)
- 6 于九明,王群骄,孝云楨,方晓英,材料研究学报, 1, 12(2000)
- 7 于九明,王群骄,孝云楨,陈金英,东北大学学报, 3, 286(2000)
- 8 J.C.Ambrose, M.G.Nicholas, A.M.Stoneham, Acta Metallurgica et Materialia., 40(10), 2483(1992)
- 9 W.Rostoker, J.R.Dvorak, 刘以宽,周连,金相组织解说(上海,上海科学技术出版社, 1984) p.112