

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.02.005

电镀镀层对帘线黏合剥离性能影响

李 呐^{1*}, 周志嵩^{1,2}, 寇首鹏¹, 余育军¹, 刘湘慧¹, 魏于博¹(1. 江苏兴达钢帘线股份有限公司, 江苏 泰州 225721; 2. 江苏省结构与功能金属复合材料
重点实验室; 江苏 泰州 225721)

摘要: 为研究电镀钢丝镀层对帘线黏合和剥离性能的影响, 分别生产不同镀层重量、镀层铜含量和镀层表层铜含量的 $\Phi 1.72$ mm 电镀黄铜钢丝, 以相同工艺拉拔捻制为 2×0.30 HT 钢帘线, 用以帘线和橡胶黏合和剥离性能测试。结果发现: 当帘线镀层重量在 $2.47 \sim 4.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、镀层铜含量在 $61.30\% \sim 66.36\%$ 时, 帘线和橡胶建立了良好的黏合强度和黏附效果, 即帘线和橡胶在此范围具有较好的黏合和剥离性能, 钢丝表层铜含量在 $57.82\% \sim 62.22\%$ 时, 帘线与橡胶的黏合和剥离性能均良好, 说明此范围内表层铜含量的变化未对帘线黏合和剥离性能造成明显的或不利的影

响。同时, 当钢丝铜含量或表层铜含量偏低, 均使得拉拔损失增加, 不利于钢丝拉拔。

关键词: 电镀; 黄铜钢丝; 钢帘线; 黏合性能; 剥离性能

中图分类号: TQ153.2 文献标识码: A

Effect of electroplating coating on adhesion and peeling property of steel cord

Li Na^{1*}, Zhou Zhisong^{1,2}, Kou Shoupeng¹, Yu Yujun¹, Liu Xianghui¹, Wei Yubo¹(1. Jiangsu Xingda Steel Tyre Cord Co., Ltd., Taizhou 225721, China; 2. Jiangsu Key Laboratory
for Structural and Functional Metal Materials Composites, Taizhou 225721, China)

Abstract: In order to study the effect of electroplating steel wire coating on the adhesion and peeling property of steel cord, the electroplating brass steel wire of 1.72 mm diameter was produced with different coating weight, copper content of coating and copper content of coating surface. The 2×0.30 HT steel cord was drawn and twisted with the same technology to test the adhesion and peeling property of steel cord and rubber. The study found that when the coating weight of steel cord was in $2.47 \sim 4.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the copper content of the coating was in $61.30\% \sim 66.36\%$, and the adhesion strength and adhesion effect of steel cord and rubber were well established. It also meant that the steel cord and rubber had better bonding and peeling property under these conditions. The adhesion and peeling property of steel cord and rubber was good when the copper content of steel wire coating surface was in $57.82\% \sim 62.22\%$, indicating that the change of copper content of steel wire coating surface had no obvious or adverse effect on the adhesion and peeling property of steel cord. At the same time, when the copper percentage content or surface copper content was lower, the steel wire drawing loss increased, which was not conducive to steel wire drawing.

Keywords: plating; brass steel wire; steel cord; adhesive property; peeling property

收稿日期: 2023-05-25

修回日期: 2023-07-05

*通信作者: 李呐(1991—), 硕士, 工程师, 主要研究方向: 表面处理, email: 13852645371@163.com

钢帘线作为橡胶骨架增强制品,在轮胎的胎体层和带束层应用广泛,轮胎生产中钢丝帘线成本约占 10%^[1-4],且其对轮胎自身强度和刚度以及轮胎行驶中承载性、操控性、安全性、耐久性、稳定性和使用寿命等均有重要影响^[5-8]。钢帘线与轮胎橡胶的结合是通过钢丝表面黄铜镀层与橡胶硫化后发生胶联反应而建立,其与橡胶的黏合好坏对钢帘线用于轮胎后的性能非常重要^[9-15]。黄铜镀层是由铜和锌构成的合金镀层,镀层铜锌比例的变化必然导致帘线与橡胶黏合层附着力的差异,故黄铜镀层是影响帘线与橡胶黏合性能的重要因素^[2, 12]。

钢帘线生产中黄铜镀层的沉积是在电镀工序,其在钢丝表面沉积的黄铜是帘线与橡胶产生强胶联的黏合剂^[16-20],故电镀工序也是帘线生产的核心。因此本文通过对电镀工艺的调整进而控制黄铜镀层的变化,分别得到不同系列的电镀钢丝,继而拉拔捻制为相应规格帘线,考察镀层的变化,即镀层重量、镀层百分铜含量和镀层表层铜含量对帘线黏合性能、剥离性能的影响,为镀层改变对帘线和橡胶黏合

带来的影响机制奠定基础。

1 实验

1.1 原料

经热处理后的 $\Phi 1.72$ mm C82DA 钢丝若干轮。

1.2 实验样品的生产

分别生产不同镀层重量、镀层百分铜含量和镀层表层铜含量的 3 个系列 1.72 mm 电镀黄铜钢丝,生产工艺流程见图 1。3 个系列电镀钢丝的工艺区别在于:不同镀层重量和镀层百分铜含量的钢丝通过调整电镀铜和电镀锌的电流进而控制钢丝镀层中铜锌含量,不同镀层表层铜含量的电镀钢丝是通过控制中频热扩散炉的加热和保温功率从而获得所需钢丝。将得到的 1.72 mm 电镀钢丝分别经过同台湿拉机床及相同拉拔工艺获得 0.30 HT 湿拉单丝,后将 0.30 HT 单丝以同台捻股机床和相同捻制工艺分别合绳为 2×0.30 HT 钢帘线。湿拉和合绳选用同台机床和相同工艺避免了帘线生产中其他因素的干扰,更有利于后续性能测试的准确。

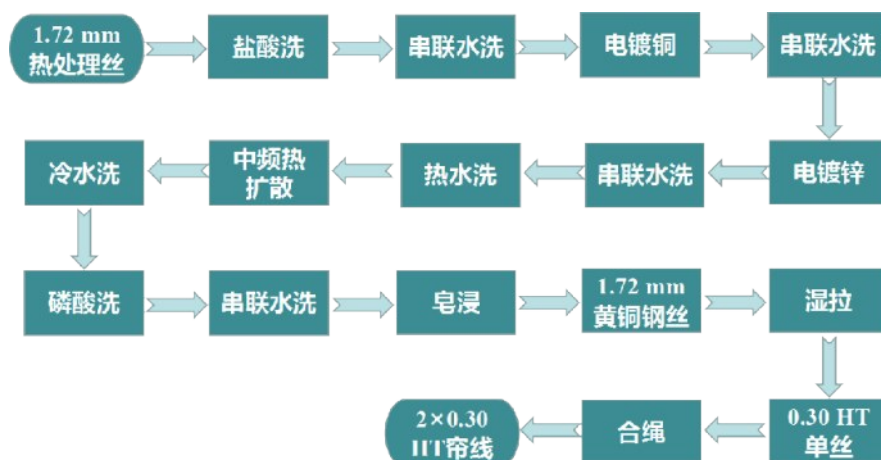


图 1 钢帘线样品生产流程图

Fig.1 Flow chart of steel cord samples production

1.3 样品性能测试

美国瓦里安 ICP720ES 电感耦合等离子原子发射光谱仪用于钢丝镀层重量、镀层铜含量及镀层表层铜含量的检测;江阴市华丰橡机有限公司 XLB-500 平板硫化机用于钢丝帘线黏合和剥离性能的硫化实验;德国 ZWICK-Z010 拉力试验机用于帘线黏合实验中钢丝抽出力的检测及剥离实验中帘线和胶片的分离;德国蔡司 2000-C 体视显微镜用于剥离后帘线和橡胶界面处二者结合情况检测。

2 结果与讨论

2.1 钢丝镀层重量对帘线黏合剥离性能影响

分别生产 6 轮不同镀层重量的 1.72 mm 电镀黄铜钢丝,钢丝的镀层成分含量分布见图 2。6 轮钢丝依镀层重量由小至大分别命名为 D1~D6,样品生产工艺为保持样品 D1~D6 的电镀铜、电镀锌电流密度不变,即镀铜、镀锌电流分别为 48 A 和 28 A,通过控制收线速度来控制钢丝镀层上镀量,样品 D1~D6 的

收线速度分别为 40 m/min、30 m/min、24 m/min、20 m/min、17 m/min 和 15 m/min。镀层重量以 W 表示,是指每公斤被镀钢丝所上镀金属的克数,单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,镀层中铜的质量占整个镀层质量的百分含量以 $\text{Cu}\%$ 表示。由图 2 可知,控制 D1~D6 电镀钢丝的镀层重量呈阶梯上升,范围为 $1.93\sim 5.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同时控制镀层 $\text{Cu}\%$ 含量在 $62.92\%\sim 63.90\%$,6 轮钢丝百分铜差异在 1% 以内,也说明镀层中铜含量基本一致,以防止镀层中因铜量差别较大对镀层重量系列钢丝黏合剥离性能产生影响。

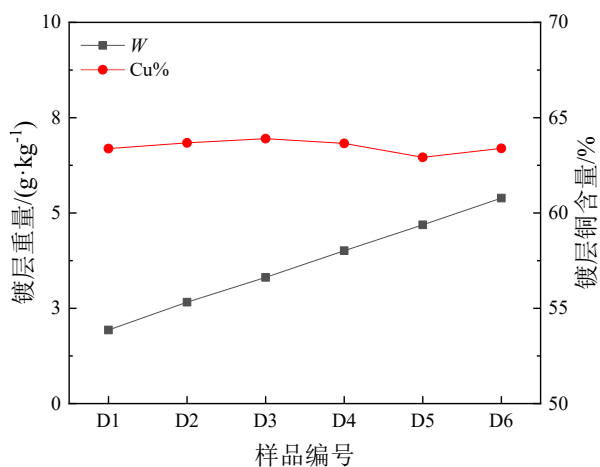


图 2 不同镀层重量电镀钢丝的镀层成分

Fig.2 Coating composition of electroplated steel wire with different coating weight

将 6 轮 1.72 mm 不同镀层重量的电镀黄铜钢丝分别经湿拉拉拔为 0.30 HT 单丝,所谓单丝是指在帘线中作为单独元件使用的金属细丝,后将镀层重量系列 0.30 HT 单丝分别合股为 6 轮 2×0.30 HT 帘线。6 轮帘线的化学性能见表 1,可见帘线经拉拔捻制后镀层重量变化如电镀黄铜钢丝亦是由小及大, D1~D6 镀层重量变化范围 $1.84\sim 5.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与电镀黄铜钢丝镀层重量 $1.93\sim 5.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相比略微降低,这是因为电镀钢丝经拉拔捻制后会损失部分镀层,即会产生一定拉拔捻制镀层损失,镀层损失主要是由于湿拉拉拔过程中由于钢丝表层与模具之间的挤压摩擦以及表面镀层与润滑剂发生的腐蚀磨损导致钢丝表层部分镀层脱落在湿拉机床里。从表 1 可以看出,当电镀钢丝镀层重量由 $1.93\sim 5.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 经拉拔捻制为 2×0.30 HT 帘线,其镀层损失呈现先增大后减小的趋势。6 轮帘线的百分铜变化范围在 $63.38\%\sim 64.12\%$ 之间,差异小于 1%。

表 1 镀层重量系列 2×0.30 HT 帘线化学性能

Tab.1 Chemical property of 2×0.30 HT steel cord for coating weight series

检测项目	样品编号					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
$W/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.84	2.47	3.00	3.62	4.34	5.05
$\omega(\text{Cu})/\%$	63.53	63.69	64.04	64.12	63.38	63.71
镀层损失/%	4.7	7.1	9.4	9.7	7.5	6.3

6 轮 D1~D6 不同镀层重量 2×0.30 HT 帘线采用同种同批次胶料对其进行黏合性能检测,硫化条件均为 $161\text{ }^{\circ}\text{C}\times 20\text{ min}$,帘线埋胶深度为 12.5 mm, D1~D6 帘线的黏合抽出力见图 3。图 3 中 POF 代表帘线黏合抽出力,单位为 N,其值大小代表帘线和橡胶的结合强度。可以清晰看到, D1~D6 帘线镀层重量在 $1.84\sim 5.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,帘线黏合性能随着镀层的增大基本呈现先增加后减小的趋势,当帘线镀层重量在 $2.47\sim 4.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,其黏合抽出力处于较高水平,这也说明在此镀层区间帘线和橡胶黏合强度更高。

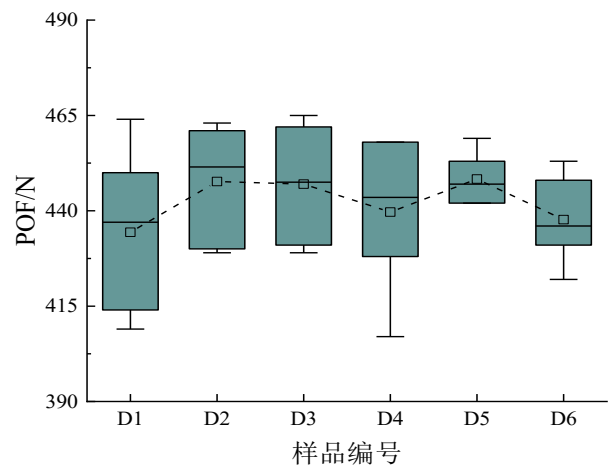


图 3 不同镀层重量帘线的黏合性能

Fig.3 Adhesion property of steel cord with different coating weight

将 D1~D6 不同镀层重量帘线进行剥离性能测试,测试结果使用德国蔡司 2000-C 体视显微镜观察,用于监测帘线和橡胶界面二者结合情况,具体见图 4 所示。可清晰看出, D1~D6 帘线随着镀层重量的增加,帘线与橡胶界面处暴露的钢丝点数由多至少再至多的规律,二者界面处钢丝露点越少,说明帘线更易于橡胶黏附,反之亦然,由此可见 D1~D6 帘线的剥离情况与黏合现象表现一致,即当帘线镀层

重量处在 $2.47 \sim 4.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间时,更有利于帘线与橡胶的黏附和黏合。

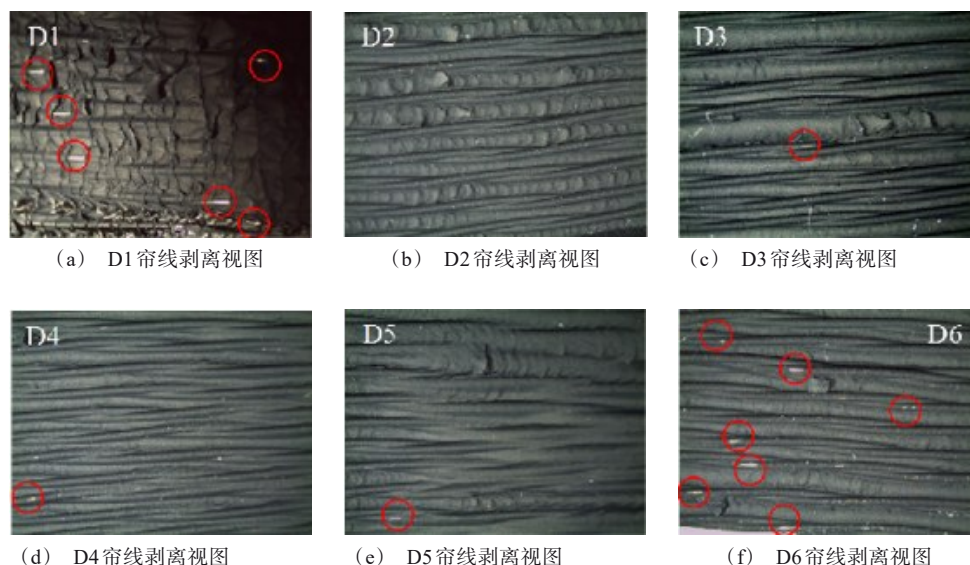


图4 不同镀层重量帘线的剥离性能视图

Fig.4 Views of peeling property of steel cord with different coating weight

2.2 钢丝镀层铜含量对帘线黏合剥离性能影响

生产系列不同镀层百分铜含量 1.72 mm 钢丝,按照百分铜由小至大分别命名为 C1~C5,5 轮电镀钢丝的镀层成分含量见图 5,图中 W 为钢丝镀层重量,即每公斤钢丝上镀金属的克重,单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} \%$ 为钢丝镀层中铜含量所占镀层总质量的百分比,C1~C5 的镀层 $\text{Cu} \%$ 范围分布在 57.03 %~68.67 %,镀层重量分布范围在 $3.79 \sim 3.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,镀层重量 C1~C5 的差距在 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以内,以避免因钢丝镀层重量差异较大对百分铜系列钢丝帘线黏合剥离性能产生影响。

将 C1~C5 系列不同镀层百分铜 1.72 mm 电镀黄铜钢丝经同台湿拉机床、相同拉拔工艺下经 1.72 HT→0.30 HT 模链,得到 0.30 HT 单丝,即组成帘线的单根细金属丝,后经同台捻股机床和相同捻制工艺合绳为 $2 \times 0.30 \text{ HT}$ 帘线,C1~C5 帘线的理化性能见表 2。其中 C1 电镀钢丝(W : $3.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cu} \%$: 57.03 %)经湿拉拉拔后断丝,故无 C1 帘线样品。拉拔断丝原因可能是由于镀层中整体铜含量偏低导致,使得黄铜延展性较差,故而出现拉拔断丝现象。从表 2 钢丝拉拔后镀层损失数据也可以看出,随着 $\text{Cu} \%$ 含量的增加,钢丝镀层损失逐渐下降,从 7.1 %下降为 5.5 %,这也说明百分铜含量的增加使

得钢丝更有利于拉拔。帘线 C2~C5 的镀层重量范围在 $3.52 \sim 3.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,各样品差异在 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以内, $\text{Cu} \%$ 范围在 61.30 %~69.18 %。

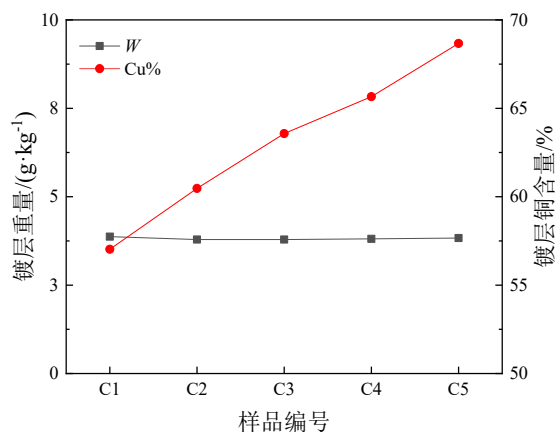


图5 不同镀层百分铜电镀钢丝的镀层成分

Fig.5 Composition of the coating of electroplated steel wire with different copper percentage of the coating

不同镀层百分铜 C2~C5 帘线的黏合性能见图 6,硫化条件为 $161^\circ\text{C} \times 20 \text{ min}$,帘线埋胶深度为 12.5 mm,图 6 中纵坐标为黏合抽出力,即 POF,单位为 N。由图 6 可知,随着帘线镀层百分铜的增加,在 61.30 %~66.36 % 范围之间,帘线黏合抽出力相差较小,当镀层百分铜升至 69.18 % 时,出现明显降低,因

此,结合上述分析,帘线镀层百分铜处在61.30%~66.36%范围之间具有较好的黏合性能,百分铜偏低不利于钢丝拉拔,镀层损失偏高,容易出现断丝,百分铜偏高不利于帘线与橡胶的黏合。

表2 镀层百分铜系列2×0.30 HT帘线化学性能

Tab.2 Chemical property of 2×0.30 HT steel cord for copper percentage series of the coating

检测项目	样品编号				
	C1	C2	C3	C4	C5
$W/(g \cdot kg^{-1})$	—	3.52	3.55	3.59	3.62
$\omega(Cu)/\%$	—	61.30	64.07	66.36	69.18
镀层损失/%	—	7.1	6.3	5.8	5.5

对不同镀层百分铜C2~C5帘线进行剥离性能测试,帘线和橡胶黏附情况如图7。可以看出,当帘线镀层百分铜含量在61.30%~66.36%时,帘线与橡胶具有较佳的黏附效果,当镀层百分铜含量升至69.18%时,二者黏附界面不良,钢丝露点数明显增加,这与黏合性能分析结果一致,即当帘线镀层百分

铜含量在61.30%~66.36%时具有较好的黏合和剥离性能,当镀层百分铜偏高时其黏合和剥离不良,当镀层百分铜明显偏低时,主要是引起钢丝拉拔不畅甚至无法拉拔。

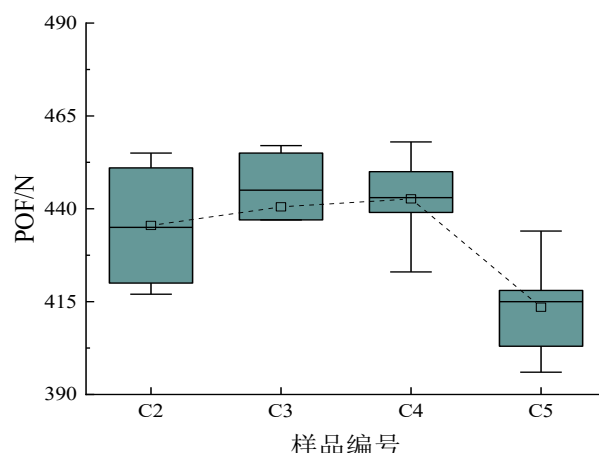


图6 不同镀层百分铜帘线的黏合性能

Fig.6 Adhesion property of steel cord with different copper percentage of the coating

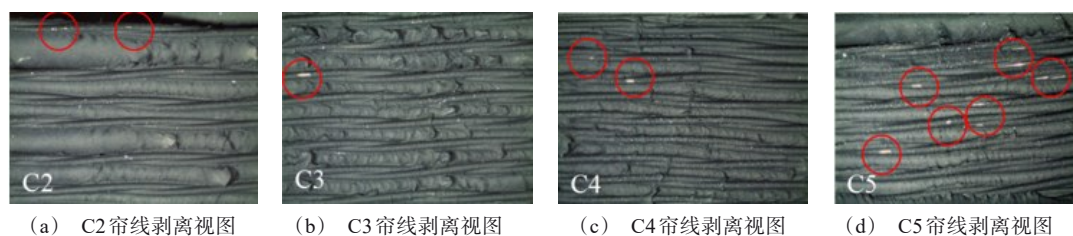


图7 不同镀层百分铜帘线的剥离性能视图

Fig.7 Views of peeling property of steel cord with different copper percentage of the coating

2.3 钢丝镀层表层铜含量对帘线黏合剥离性能影响

通过控制电镀线中频热扩散炉的加热和保温功率生产系列不同镀层表层铜含量1.72 mm电镀钢丝,电镀钢丝依表层铜含量由小至大,分别命名为B1、B2和B3,钢丝具体镀层参数见图8。图中 W 是指镀层重量,即每公斤钢丝上金属镀层的克重,单位 $g \cdot kg^{-1}$, $Cu\%$ 是指钢丝镀层中铜含量所占整体镀层质量的百分比,以%表示,钢丝镀层表层铜含量即是1 g Cu%,具体指钢丝镀层表层1g/kg镀层重量中铜所占的质量百分比,以%表示。1.72 mm钢丝的表层铜含量,即1 g Cu%是指镀层自表面向内部0.4 μm 及以内镀层。由图8可知,不同表层铜含量钢丝的镀层重量范围为3.85~3.88 $g \cdot kg^{-1}$,镀层百

分铜含量在62.97%~63.33%,钢丝镀层重量差异在0.1 $g \cdot kg^{-1}$ 以内,同时镀层百分铜差异在1%以内,3轮钢丝镀层表层铜含量由小至大分别为57.82%、59.38%和62.22%。

将不同表层铜含量1.72 mm电镀钢丝经同机床和相同工艺拉拔捻制为2×0.30 HT帘线,帘线对应样品编号为B1、B2和B3。B1~B3帘线相关化学性能见表3,从表3可知帘线镀层重量范围在3.51~3.57 $g \cdot kg^{-1}$,镀层百分铜含量在63.77%~63.98%,差异分别在0.1 $g \cdot kg^{-1}$ 和1%以内,与电镀钢丝镀层相对应。钢丝镀层损失随着表层铜含量的增加而降低,这与镀层铜含量的规律一致,也说明钢丝镀层中无论是百分铜含量或表层铜含量的偏低,均不利于拉拔。表3中未列出钢丝经拉拔捻制后帘线的表层

铜含量,原因是 1.72 mm 电镀钢丝经拉拔为 0.30 HT 单丝,钢丝丝径总压缩率几近 97 %,导致单丝镀层厚度相较于电镀钢丝极大幅度减薄,无法准确控制表层 $1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镀层重量,因而此处未列出。

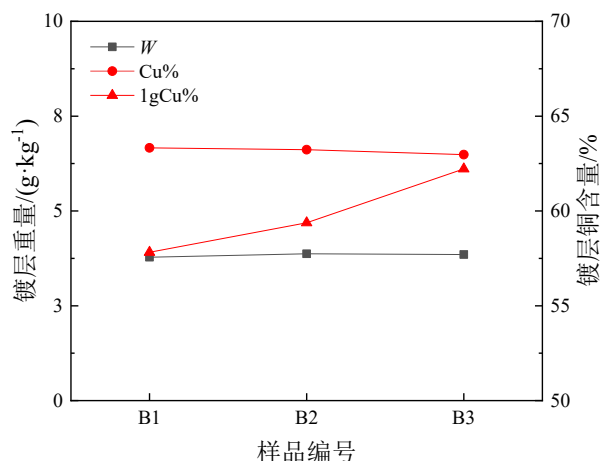


图 8 不同镀层表层铜含量电镀钢丝的镀层成分

Fig.8 Composition of coating of electroplated steel wire with different copper content of coating surface

表 3 镀层表层铜含量系列 2×0.30 HT 帘线化学性

Tab.3 Chemical property of 2×0.30 HT steel cord for coating surface series with different copper content

检测项目	样品编号		
	B1	B2	B3
W/(g·kg ⁻¹)	3.51	3.54	3.57
ω(Cu)/%	63.98	63.83	63.77
镀层损失/%	9.5	8.5	7.3

将系列 B1~B3 不同表层铜含量帘线在相同测试条件下进行黏合性能检测,硫化条件为 161 °C×20 min,帘线埋胶深度为 12.5 mm,具体数据见图 9,图中纵坐标为帘线与橡胶的黏合抽出力,以 POF 表

示,单位为 N,可见 B1、B2 和 B3 帘线的黏合数据基本一致,说明钢丝镀层表层铜含量在 57.82 %~62.22 %之间对帘线和橡胶的黏合未见明显影响,也说明在此范围内钢丝表层铜的变化对帘线和橡胶的结合强度无不利影响。

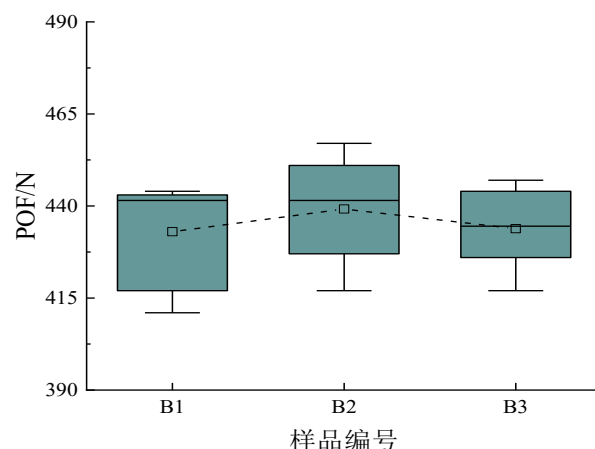
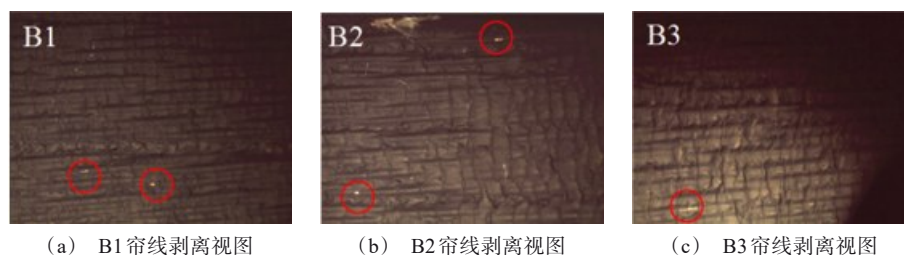


图 9 不同镀层表层铜含量帘线的黏合性能

Fig.9 Adhesion property of steel cord with different copper content of coating surface

B1~B3 帘线进行剥离性能测试,剥离情况见下图 10。可以清晰看出,当钢丝表层铜含量在 57.82 %~62.22 %时,对应帘线与橡胶的剥离性能均良好,这也说明此范围内钢丝表层铜含量的变化未对帘线和橡胶的黏附造成不良影响,此规律与黏合性能相似。结合上述分析可知,钢丝表层铜含量在 57.82 %~62.22 %之间变化,未对帘线黏合和剥离性能产生不利影响,其主要是影响钢丝的拉拔,其规律与镀层百分铜的规律呈现一致性,即随着镀层铜含量或表层铜含量的升高,有利于钢丝的拉拔,钢丝拉拔的镀层损失下降。



(a) B1 帘线剥离视图

(b) B2 帘线剥离视图

(c) B3 帘线剥离视图

图 10 不同镀层表层铜含量帘线的剥离性能视图

Fig.10 Views of peeling property of steel cord with different copper content of coating surface

3 结论

以不同电镀工艺分别生产批量 1.72 mm 电镀黄铜钢丝,按照相同工艺拉拔捻制为 2×0.30 HT 帘线,用以考察钢丝镀层对帘线黏合和剥离性能的影响。实验结果表明:当帘线镀层重量在 2.47~4.34 g·kg⁻¹ 之间,帘线与橡胶有良好的黏合强度和黏附效果;帘线镀层百分铜在 61.30 %~66.36 % 之间具有较好的黏合性能和剥离性能;钢丝镀层表层铜含量在 57.82 %~62.22 % 之间,对帘线与橡胶的黏合和剥离无明显及不利影响;当钢丝百分铜含量或表层铜含量偏低时,不利于钢丝的拉拔,增加了钢丝镀层损失。

参考文献

- [1] 来永彪,赵阳,左锦中,等.钢帘线生产断丝原因分析[J].金属制品,2023,49(1): 52-55.
- [2] 马海俊,王宝星,刘磊.不同镀层钢丝帘线黏合力在相应黏合体系中的测试、表征和分析[J].轮胎工业,2018,38(2): 117-120.
- [3] 郜宪杰,陈龙,车树新,等.不同产地 2×0.30ST 钢丝帘线在轮胎中的应用对比[J].轮胎工业,2023,43(1): 43-45.
- [4] Tashiro H, Tarui T. State of the art for high tensile strength steel cord[J]. Nippon Steel Technical Report, 2003(88): 87-91.
- [5] 寇首鹏,周志嵩,张喜泽,等.1+6+12 与 1+18 钢帘线微动磨损研究[J].金属制品,2022,48(2): 6-9.
- [6] Hananto A L, Sulaiman S, Widiyanto S, et al. Evaluation comparison of wave amount measurement results in brass-plated tire steel cord using RMSE and cosine similarity[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2021, 22(1): 207-214.
- [7] 俞志高,罗奕文,王宝星,等.贝泰威镀层钢丝帘线在轮胎中的应用[J].轮胎工业,2018,38(11): 684-688.
- [8] Jeon G S. Adhesion between rubber compounds and ternary-alloy-coated steel cords, Part I: Effect of cobalt plating amount in ternary-alloy-coated steel cords[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2005, 19(6): 445-465.
- [9] 王佳莉,张越,王宝星,等.改性硫黄对无钴天然橡胶的性能及与镀钴钢丝帘线黏合的影响[J].合成橡胶工业,2017,40(6): 473-476.
- [10] 张宁,龙飞飞,郑涛,等.镀钴钢丝帘线在子午线轮胎束层中的应用[J].橡胶科技,2017(12): 32-35.
- [11] 黄元昌.铜-锌-钴三元合金涂层钢丝帘线与橡胶的最佳黏合[J].橡塑技术与装备,2018,44(3): 37-41.
- [12] 姚利丽,李呐,倪自飞,等.一步法替代热扩散电镀工艺对钢帘线性能影响[J].电镀与精饰,2023,45(4): 100-105.
- [13] Buytaert G, Wang B X, Luo Y W. Superior adhesion of rubber and steel cord coated with Cu-Zn-Co ternary alloy[J]. Rubber World, 2015, 252(6): 20-24, 32.
- [14] 张兰波,刘春芳.铜-锌-钴三相合金镀层钢丝帘线与无钴橡胶胶料的黏合[J].世界橡胶工业,2016,43(11): 29-34.
- [15] 宋为.国产电镀黄铜生产线技术研发[J].金属制品,2011,37(1): 41-44, 60.
- [16] Nah C, Sohn B Y, Park S-J. Adhesion of brass/cobalt/copper-plated steel cord to a typical rubber compound[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2002, 16(6): 653-667.
- [17] Buytaert G, Luo Y W. Study of Cu-Zn-Co ternary alloy-coated steel cord in cobalt-free skim compound[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014, 28(16): 1545-1555.
- [18] Abou-Kandil A I, Awad A, Darwish N, et al. Adhesion of brass plated steel cords to natural rubber: Dynamic and statistical study of adhesion failure[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013(44): 26-35.
- [19] Vanooij W J, Harakuni P B, Buytaert G. Adhesion of steel tire cord to rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2009, 82(3): 315-339.
- [20] Jeon G S, Kang U I, Jeong S W, et al. Adhesion between rubber compounds and ternary-alloy-coated steel cords. Part II: Effects of sulfur and cobalt salt in rubber compounds[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2005, 19(15): 1325-1348.