电弧能量对浸金属碳滑板材料载流 摩擦磨损性能的影响

胡道春,孙乐民,上官宝,张永振 (河南科技大学 材料科学与工程学院,河南 洛阳 471003)

摘 要:在销盘式高速载流摩擦磨损试验机上,通过正交试验考查了电弧能量对浸金属碳滑板材料载流摩擦磨损 性能的影响 ;利用统计学相关系数理论和非线性回归分析 ,对电弧能量与摩擦系数 、比磨损率进行定量比较分析 ,发 现电弧能量与摩擦系数间存在一定的相关性,并与比磨损率间存在幂函数的关系;借助扫描电子显微镜、能谱分析 仪和 X射线衍射仪结合摩擦表面宏观温度的测量,分别对销试样电弧侵蚀后的表面膜微观结构、相组成及磨屑进 行分析. 结果表明:电弧能量严重影响摩擦副的载流摩擦磨损性能;电弧热效应使得局部接触表面温度超过熔点, 浸渗金属熔融渗出摩擦表面,并使基体碳气化沉积于摩擦盘上,使得电弧侵蚀机理表现为材料转移和熔融喷溅. 关键词: 电弧能量;浸金属碳滑板;摩擦磨损性能;电弧侵蚀 中图分类号: TH117.3 文献标识码:A

载流摩擦磨损研究的主要背景为高速铁路系统

(包括轻轨)、城市公共交通中电车^[1~3](有轨和无轨 电车)的电力传输系统,工业中使用比较广泛的发电 机、励磁电机的碳刷与电极以及运载火箭升空过程中 的整流装置^[2]等. 尤其在电气化铁路的电力传输系 统中,受电弓滑板与导线间构成了一对典型的载流摩 擦副、而受电弓滑板与导线相对滑动时的接触区域。 由一些分散的微小接触点所构成,这些接触点不仅支 撑载荷,而且承受摩擦功和电流流过接触电阻所引起 的热流.因而电流收缩及机械载荷的高度集中会产 生高密度的焦耳热,随着热量的积累,接触点温度升 高,材料性能改变,当其不能继续支撑接触载荷时,接 触点遭受破坏,直到另一个合适的"冷"接触点重新支 撑载荷为止,如此构成了滑动载流接触条件下的磨损 行为^[4]. 摩擦副间的接触状态不佳导致了离线电弧 的产生并使其表面出现电弧侵蚀,加剧了接触点的软 化甚至黏着熔焊现象,因而大大降低了表面质量,使 磨损性能恶化. 所以对电弧侵蚀的研究是载流摩擦 磨损性能研究中的一个重要方面.

由于应用领域中无法避免电弧的出现,并随着

文章编号:1004-0595(2009)01-0036-07

列车速度的不断提升,弓网间产生离线电弧的频率 将显著增多.对滑板材料电弧侵蚀性能的研究成为 必然. 目前对于电弧产生的机理及定量分析方面的 研究还很少^[5].本文以现役电力机车上使用的浸金 属碳滑板为研究对象,研究电弧能量对其摩擦磨损 性能的影响并探讨电弧侵蚀的机理,以期为滑板材 料电弧侵蚀特性由定性分析走向定量研究提供试验 依据,并为高速滑板材料的选取提供参考,

- 1 实验部分
- 11 试样制备

销试样为郑州铁路局洛阳机务段现役电力机车 上使用的浸金属碳滑板材料,其化学成分见表 1(质

表 1 浸金属碳滑板材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions

of metal - impregnated carbon strip

Elements	Content /wt%	Elements	Content /wt%	
0	5. 75	Pb	72.20	
Sb	6.85	Si	0. 91	
Cu	5. 58	С	Bal	

收稿日期: 2007 - 11 - 10; 修回日期: 2008 - 03 - 07; 联系人: 孙乐民, e - mail: Sunha @mail haust edu cn

基金项目:国家 973计划资助项目 (2007CB607603);国家自然科学基金资助项目 (50775066);河南省高校科技创新人才项目 资助 (2009HASTIT008):河南省创新团队项目资助.

作者简介:孙乐民(1965-),男,博士,教授,目前主要从事材料摩擦学方面的研究.

量分数计).将其沿长度方向锯成薄片并去掉铝托 及导电胶,在砂轮机上打磨制成尺寸为 9 mm × 12 mm ×20 mm的销试样,并以滑板与导线接触的 实际工作面为摩擦面.盘试样用铸态铬青铜 QCr0.5经热锻后机械加工而成,其直径 \$\phi450 mm.

1.2 摩擦磨损性能评价

采用"HST-100型高速摩擦磨损试验机 评价 材料的摩擦磨损性能. 试验前销试样均需用装于摩 擦盘上的 800[#]砂纸在低速低载荷情况下预磨 40~ 60 s,卸下砂纸后再在原转速下与盘试样预磨 60 s, 以销试样与盘试样良好接触且受力比较均匀为准. 经过预磨后的销试样按照正交试验表在每个试验规 范下进行 60 s的载流摩擦磨损试验,并重复进行 3 次,结果取其平均值,试验载荷分别为 50,60,70和 80 N, 滑动速度分别为 30、40、50 和 60 m / s, 试验电 流分别为 70、100、130和 160 A. 摩擦表面温度采用 镍铬 - 镍硅热电偶直接测量,在销试样上距离摩擦 表面 2 m 处打孔安装热电偶,采用英华达 EN880型 数字测温仪同步记录摩擦过程中的动态温度.用数 码相机观察电弧侵蚀后销、盘试样的宏观形貌.利 用 JSM - 6360LV 型附带能谱分析仪的扫描电子显 微镜 (SEM)观察试样在不同能量电弧侵蚀后的磨 损表面形貌,并用 X射线衍射仪 (XRD)分析其组织 的变化情况.

通过 LP3200D型的电子分析天平 (精确至 1 g) 测量试样磨损前后的质量损失,并按下列公式计算 比磨损率 W_s:

$$W_s = \frac{W}{NL} = \frac{W}{NVt} \tag{1}$$

其物理意义为单位载荷及单位摩擦行程的磨损 体积. 式中: 为磨损体积 (mm³); N 为试验过程 中施加的载荷 (N); L 为销试样在盘试样上的摩擦 行程 (m); W 为磨损质量损失 (g); 为销试样的密 度 (g/cm³); V 为试验速度 (m/s); t 为摩擦磨损 时间 (s).

1.3 电弧能量检测

离线电弧能量大小与其产生时销盘间的电压、 电流及电弧持续的时间密切相关,可由下式来计算 电弧能量 *E*^[6]:

 $E = e = (U \cdot I \cdot t) = T \cdot p(2)$ 式中: e为单次离线时的电弧能量 (J), U为 单次离线时销盘试样间的实测电压与最小动态起弧 电压的差值 (V); I为单次离线时流经销盘试样间的 电流 (A); t为单次离线时长 (s); T为离线总时长 (s); *p*为平均电弧功率 (W).

通过试验机的数据采集系统可同时采集产生离 线电弧时的电流、电压等参数,根据最小动态起弧电 压判定离线(试验标定各工况下的最小动态起弧电 压,若采集电压大于该值则视为离线),再结合采样 周期可以得到总的离线时长,进而得出离线电弧的 电弧能量.

2 结果与讨论

21 电弧能量与摩擦系数的相关性

图 1所示为 70 A 电流、70 N 载荷和 30 m/s速 度条件下的电弧能量与摩擦系数测试结果.可见, 二者出现波峰和波谷所处的时间段相似.这是由于



Fig 1 Variation of arc discharge and friction coefficient with sliding time

图 1 电弧能量与摩擦系数随滑动时间变化的关系曲线

在摩擦过程中摩擦表面会有一些粗糙度的变化和动 态的冲击,这些现象导致了摩擦副的摩擦系数增大 和离线电弧的产生,摩擦热和电弧热的增加致使摩 擦表面温度升高;而后随着温度的逐步升高,材料的 塑变抗力降低,摩擦系数又会降低,摩擦副接触状态 变好,离线电弧减少,因而出现了图中电弧能量和摩 擦副表面摩擦系数具有相关性的波动现象.

表 2列出了该试验条件下的电弧能量和摩擦系数试验数据.应用统计学中相关系数来定量描述电弧能量和摩擦系数之间的相关程度(相关系数可以确定 2种属性之间关系).相关系数的定义为:

$$r = \frac{\frac{2}{xy}}{x-y} = \frac{\frac{1}{n} (x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\frac{1}{\sqrt{n}} (x-\bar{x})^2 \sqrt{\frac{1}{\sqrt{n}} (y-\bar{y})^2}}$$
(3)

式中:x和 y分别表示电弧能量和摩擦系数.

^{© 1994-2010} China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第 29卷

Table 2Results of arc discharge and friction coefficient								
<i>t</i> /s	A rc discharge E/s	Friction coefficient	<i>t</i> / s	Arc discharge E/s	Friction coefficient	<i>t</i> / s	Arc discharge E/s	Friction coefficient
1	24. 936 0	0. 169 1	16	44. 786 4	0. 163 3	31	21. 832 4	0. 175 6
2	15. 577 6	0. 164 6	17	23. 925 4	0. 173 5	32	37. 255 6	0. 182 9
3	57. 456 0	0. 190 0	18	29.8184	0. 174 9	33	67. 154 6	0. 174 6
4	17. 224 8	0. 165 9	19	35. 519 1	0. 177 7	34	38. 512 8	0. 174 1
5	47. 709 2	0. 188 8	20	52.072.8	0. 171 7	35	32 715 3	0. 182 9
6	100.009 1	0. 216 4	21	42. 364 4	0. 158 6	36	60. 794 4	0. 167 4
7	18. 186 9	0. 177 9	22	35. 288 6	0. 189 4	37	28. 626 2	0. 199 1
8	16. 611 9	0. 168 1	23	136. 364 4	0. 196 9	38	95. 927 4	0. 207 8
9	33. 148 2	0. 179 8	24	85. 672 4	0. 213 3	39	91. 378 3	0. 202 6
10	28. 719 9	0. 178 3	25	36. 183 4	0. 189 0	40	89. 586 4	0. 196 1
11	93. 194 7	0. 192 6	26	85. 519 8	0. 205 0	41	20. 369 4	0. 196 8
12	27. 333 3	0. 170 5	27	17. 226 4	0. 1804 5	42	27. 284 0	0. 187 7
13	15. 782 7	0. 161 0	28	45. 782 7	0. 194 6	43	11. 619 9	0. 189 6
14	26. 223 0	0. 165 3	29	37. 271 4	0. 186 0	44	63. 768 2	0. 195 9
15	30. 306 4	0. 167 6	30	71. 283 2	0. 207 0			

表 2 电弧能量和摩擦系数试验数据

计算结果表明:在该试验条件下,电弧能量和摩 擦系数的相关系数为 0.643 8;采用 F检验法对相关 系数,的显著性进行检验,结果为显著,即在载流摩 擦磨损过程中电弧能量和摩擦系数表现出一定的相 关性.

2 2 电弧能量与比磨损率间的回归分析

Shunichi Kubo, Koji Kato等人^[6-7]指出滑板材 料载流摩擦磨损过程中的比磨损率与因离线电弧而 产生的电弧能量大小密切相关.在表 3所示的三因 素四水平试验条件下,按照正交试验表 对浸金属碳 滑板材料进行 16组不同参数的交叉试验得出结果

表 3 因素水平表

 Table 3
 Parameters of the test

· · ·	Factor				
Level	Load /N	Velocity / $(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	Current/A		
1	50	30	70		
2	60	40	100		
3	70	50	130		
4	80	60	160		

如表 4所示.可以得出,电弧能量与比磨损率间存在 幂函数关系,即可由下式来表示:

$$W_s = aE^b \tag{4}$$

式中: W_{s} 为滑板材料比磨损率 [mm³/(N·m)];

表 4 数据计算表 Table 4 Results of the experiment

No.	E_i	W _{Si}	$\frac{x_i}{\ln E_i}$	y_i ln W_{s_i}	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	
1	73. 515 7	0. 000 3	4. 297 5	- 8. 098 3	18.4685	65. 582 3	- 34. 802 4	
2	114. 369 6	0. 000 8	4. 739 4	- 7. 117 4	22. 462 2	50. 657 3	- 33. 732 4	
3	291. 265 4	0. 001 8	5. 674 2	- 6. 334 4	32, 196 9	40. 124 3	- 35. 942 7	
4	112. 478 4	0. 000 9	4.7228	- 7.0196	22, 304 5	49. 274 3	- 33. 151 7	
5	173. 006 0	0. 000 8	5. 153 3	- 7. 113 6	26. 556 8	50. 602 6	- 36. 658 5	
6	56. 876 9	0. 000 2	4. 040 9	- 8. 333 4	16. 328 8	69. 445 6	- 33. 674 4	
7	297. 376 6	0. 001 7	5. 695 0	- 6. 354 4	32. 433 0	40. 378 8	- 36. 188 5	
8	272. 976 1	0. 001 3	5. 609 4	- 6. 641 3	31. 465 2	44. 106 3	- 37. 253 3	
9	130. 747 2	0. 000 2	4.8733	- 8. 312 2	23. 748 7	69. 092 3	- 40. 507 4	
10	168. 379 2	0. 000 5	5. 126 2	- 7. 629 0	26. 278 1	58. 200 9	- 39. 107 7	
11	14. 232 4	0. 000 1	2 655 5	- 8. 944 5	7.0518	80.004 0	- 23. 752 3	
12	145. 610 5	0. 000 4	4. 980 9	- 7. 726 3	24. 809 7	59. 695 4	- 38. 484 1	
13	212. 426 4	0.0010	5. 358 6	- 6.8782	28.7145	47. 309 3	- 36. 857 4	
14	172. 515 9	0. 000 3	5. 150 5	- 8. 172 9	26. 527 5	66. 797 0	- 42. 094 7	
15	100. 668 6	0. 000 3	4. 611 8	- 8. 286 1	21. 269 0	68. 659 4	- 38. 214 1	
16	58. 637 5	0. 000 3	4.0714	- 8. 076 9	16. 576 1	65. 236 5	- 32. 884 1	

E为试验过程中的电弧能量 (J); a, b为常数;

利用非线性回归和方差分析的方法对试验结果进行分析,可得到二者之间的回归方程:

 $W_s = 9.8180 \times 10^{-6} E^{0.8268}$ (5)

经显著性检验, *F* > *F*_{0.01} (1, 14),即所得线性回 归方程非常显著. 从式 (5)可以得出,随着电弧能量



(a) SEM morphologies of the worn surface

增加,浸金属碳滑板材料的磨损加剧.

2.3 电弧侵蚀机理分析

图 2所示为浸金属碳滑板材料在 100 A 电流、 80 N载荷和 50 m/s速度条件下,电弧侵蚀后销、盘 表面及其横剖面形貌的照片.从图 2(a)可以看出, 浸金属碳材料在电弧作用下,摩擦表面粗糙并有裂



(b) SEM morphologies of the Cross section





(c) Macro photograph of disk
 (d) Macro photograph of pin
 Fig 2 Effect of arc discharge on metal - impregnated carbon strip
 图 2 电弧能量对浸金属碳滑板材料的影响

纹产生. 这主要是由于电弧对碳材料的能量作用瞬 时而集中,伴随着温度的上升,电接触表面的巨大温 度梯度所产生的热应力,使接触材料基体形成了裂 纹. 而裂纹的形成与扩展与电弧热流输入造成的巨 大温度梯度又密切相关,在温度梯度相同时,由于电 接触材料各相的热膨胀系数不同,形成各相应变大 小不等,相对滑动产生裂纹;在热膨胀系数相同时, 弧根斑点处由于其温度梯度极高,斑点周围受热应 力膨胀,熄弧后又收缩,材料反复受拉、压应力而产 生疲劳裂纹,同时使原有裂纹进一步扩展^[8].由 图 2(b)可见,与基体组织相比摩擦次表层的浸渗金 属(白色部分为浸渗金属铅和锑)损失严重.这是因 为在电弧热、接触电阻热及摩擦热作用下,次表面的 浸渗金属转移到摩擦表面.随着电弧能量的增加, 摩擦面温度逐步升高使得浸渗金属熔融并在销盘相 对转动作用下形成喷溅,同时摩擦盘也带走了部分 的熔融金属,导致磨损率增大^[9].当销、盘间产生电 弧时,电弧瞬时能量密度高达 10²~10⁴ W/cm²,弧 柱区温度可达 3 000 ~ 50 000 K^[10],在电弧高温作用 下,浸金属碳滑板材料摩擦表面的碳发生了气化,并 沉积在摩擦盘表面,形成碳黑 [图 2(c)]. 由图 2 (d)可以看出,在电弧热及摩擦热作用下,浸金属碳 滑板材料销试样的摩擦表面渗出少量呈圆球状的浸 渗金属颗粒形成磨屑,磨屑的 EDS分析结果如图 3 所示.可见,磨屑中主要含有基体 C,浸渗金属和从

40

摩擦盘上黏着的 Cu

图 4所示为销试样在不同能量电弧侵蚀后的 XRD图谱.可见,在较低能量电弧(*E* = 14.232 J)侵 蚀作用下,表面膜主要由基体 C、浸渗金属(Pb、Sb) 及从配副材料黏着的 Cu等组成 [图 4(a)所示];而 在较高能量电弧(*E* = 112.478 J)侵蚀下,摩擦表面 除了基体 C、浸渗金属和黏着的 Cu外还有浸渗金



Fig 3 EDX analysis of debris 图 3 磨屑的能谱分析



图 4 销试样电弧侵蚀下的摩擦表面 XRD图谱

属的氧化物 PbO, Sb₂O₄ 等形成 [图 4(b)所示]. 电 弧侵蚀后销试样磨损表面白色金属部分较多,主要 由低熔点的浸渗金属 Pb、Sb等组成 (Pb和 Sb的熔 点分别为 327 ,630.7);随着电弧能量的增加, 在电弧热和接触电阻热及摩擦热的作用下,摩擦表 面的温度进步升高 (电弧能量为 112 478 J时热电 偶实测可达 689),使浸渗金属熔融、氧化,形成 了浸渗金属的氧化物. 综上所述,浸金属碳滑板材料在电弧能量的作 用下,由于摩擦表面温度较高使得低熔点的浸渗金 属融化,并在销、盘相对转动的条件下,逐渐满足了 材料熔融喷溅的基本条件^[11],而以小液滴的形式向 四周喷溅,其磨损机理转为熔融喷溅.而在电弧侵 蚀过程中,材料在电弧能量作用下,摩擦副表面的金 属熔化、蒸发而形成金属离子,金属离子在电弧热 -力作用下获得能量并轰击配副材料表面,使配副材 料损失,同时金属离子把自身的能量传递给配副材料,并沉积在其表面,此时磨损机理表现为材料 转移^[12].

3 结论

a 电弧能量的大小显著影响着浸金属碳滑板 载流摩擦磨损性能,摩擦系数与电弧能量大小表现 出一定的相关性,并且磨损率随着电弧能量的增加 而加剧.

b 在载流摩擦磨损试验中,浸金属碳滑板材料的电弧能量与比磨损率之间存在幂函数关系,并获得了二者之间的回归方程.

c 浸金属碳滑板材料在电弧侵蚀下,其磨损 机理主要为材料转移和熔融喷溅机理.

参考文献:

- Paul G Hegda, Gordon J Thackray. Computer evaluation of electric railway catenary equipment by the method of normal modes[J]. IEEE Transaction on Industry, 1981, 17 (9).
- [2] 于涤.高速接触网受流的理论分析 [J] 铁道学报,1998,20 (5):58-64.

Yu D. Analyses on catenary current - carrying theory of high speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20 (5): 58 - 64.

- [3] He Da Hai, Rafael R Manory, Nom Grady. Wear of railway contact wires against current collector materials [J]. Wear, 1998, 215: 146 - 155.
- [4] 戴利民,林吉忠,丁新华.滑板材料受流摩擦时接触点瞬态温
 升对磨损性能的影响 [J].中国铁道科学,2002,23:111 117.

Dai L M, L in J Z, D ing X H. Effects of transient temperature rise

in contact area on wear properties [J]. China Railway Science, 2002, 23: 111 - 117.

[5] 戴利民. 滑板材料受流摩擦磨损性能的研究 [D]. 北京:铁道 科学研究院, 2001: 103 - 107.

Dai Linin Study on tribological property of the strip materials with electric current [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2001: 103 - 107.

- [6] Shunichi Kubo, Koji Kata Effect of arc discharge on wear rate of cu - impregnated carbon strip in unlubricated sliding against cu trolley under electric current [J]. Wear, 1998, 216: 172 - 178.
- [7] Shunichi Kubo, Koji Kata Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper - impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk [J]. Tribology International, 1999, 32: 367 - 378.
- [8] Guo Fengyi, Wang Guoqiang, Dong Na, et al The arc erosive characteristics and crack formation mechanisms analysis of silver
 based contact materials [J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24 (9): 209 - 217.
- [9] 赵彦文.碳材料高速载流摩擦磨损性能研究 [D]. 洛阳:河南 科技大学,2007,41 - 45. Zhao Yanwen Study on tribological property of metal impregnated carbon strip and c/c composite with electric current and high speed[D]. Luoyang: Henan University of Science and
- [10] 荣命哲.电接触理论 [M].北京:机械工业出版社,1982,32-33.

Technology, 2007, 41 - 45.

- [11] Wu Xi Xiu, Li Zhen biao Model on sputter erosion of electrical contact material [A]. Proceeding of 48th IEEE Holm Conference on Electric Contact[C], 2002: 29 - 34.
- [12] 李海军,孙秀霞.继电器触头的电蚀机理研究 [J].电子产品可靠性与环境试验,2005,(3):29-32
 LiHJ, Sun X X Research on the mechanism of electric erosion for relays[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005,(3):29-32

42

Effects of Arc D ischarge on Friction and Wear Properties of Metal - in pregnated Carbon Strip Sliding against Cu Trolley under Electric Current

HU Dao - chun, SUN Le - min, SHANG GUAN bao, ZHANG Yong - zhen

(Institute of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Influence of arc discharge on the contact strip on the pantograph of electric railway vehicles was studied The experiments were carried out on an HST - 100 tribo - tester with metal - impregnated carbon strip under electric current, which simulated working conditions of the pantograph - wire system used in electric railway. Statistical correlation coefficient was applied to describe quantitatively the correlation between friction coefficient and arc discharge, and experiment data were processed through non - linear regression and orthogonal design Regression equation between specific wear rate and arc discharge was obtained Microstructure and phase composition were analyzed by SEM, EDS and XRD. Arc discharge dissipation seriously affected the tribological characteristics of the metal - impregnated carbon strip. Generation of electric arc heat was likely resulted in temperature of some local contact points beyond their melting point, and the main wear form was material transfer, melt and sputter erosion

Key words: arc discharge, metal - impregnated carbon strip, friction and wear performance, arc erosion Author: SUN Le - min, male, born in 1965, Ph D., Professor, e - mail: Sun m@mail haust edu cn