文章编号: 1004-0609(2012)011-3151-06

接触线用 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的电滑动磨损性能

贾淑果^{1,2},苏娟华¹,宋克兴¹,任凤章¹,刘平¹

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院,洛阳 471003;2. 河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室,洛阳 471039)

摘 要:采用真空感应熔炼炉制备 Cu-Ag、Cu-Ag-Zr 以及 Cu-Ag-Zr-Ce 合金,利用自制且能模拟接触线实际运行 工况的载流磨损试验机对各不同合金线材的电滑动磨损性能进行研究,并借助扫描电镜对磨损前后 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的组织形貌进行分析。结果表明: Cu-Ag-Zr-Ce 线材的磨损率随着加载电流和滑行距离的增大而增大;粘着 磨损、磨粒磨损和电侵蚀磨损是 Cu-Ag-Zr-Ce 线材电滑动磨损的主要机制。在同种实验条件下, Cu-Ag-Zr-Ce 线 材的耐磨性能优于 Cu-Ag-Zr 和 Cu-Ag 合金的耐磨性能,相同实验条件下 Cu-Ag 合金的磨损率为 Cu-Ag-Zr-Ce 和 Cu-Ag-Zr 合金磨损率的 2~4 倍。

关键词: Cu-Ag-Zr-Ce 合金; 电滑动磨损; 接触线; 接触滑板 中图分类号: TG135.6; TG146.1 文献标志码: A

Electrical sliding wear property of Cu-Ag-Zr-Ce alloy for contact wire

JIA Shu-guo^{1, 2}, SU Juan-hua¹, SONG Ke-xing¹, REN Feng-zhang¹, LIU Ping¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Henan Key Laboratory of Advanced Nonferrous Metals, Luoyang 471039, China)

Abstract: Cu-Ag, Cu-Ag-Zr and Cu-Ag-Zr-Ce alloys were produced by using a vacuum induction furnace. The electrical sliding wear properties of different alloys wires were studied by a self-made sliding wear tester that can simulate the tribological conditions of sliding current collectors on contact wires. The morphologies of Cu-Ag-Zr-Ce alloy before and after wear were analyzed by scanning electron microscope. The results show that the wear rate of the Cu-Ag-Zr-Ce alloy increases with increasing electrical current and sliding distance. The adhesive wear, abrasive wear and electrical erosion are the dominant mechanisms of the Cu-Ag-Zr-Ce alloy during the electrical sliding processes. Compared with Cu-Ag and Cu-Ag-Zr alloys under the same test condition, Cu-Ag-Zr-Ce alloy has much better wear resistance. The wear rate of the Cu-Ag alloy is 2–4 times as large as that of Cu-Ag-Zr and Cu-Ag-Zr-Ce alloys.

Key words: Cu-Ag-Zr-Ce alloy; electrical sliding wear; contact wire; contact strip

电滑动磨损是指处于电场中的摩擦副在电流作用 下的摩擦磨损,属于特殊工况下的摩擦磨损行为。其 研究涉及很多领域,如高速电气化铁路系统(包括地铁) 及城市公共交通中电车的电力传输系统^[1-6]、工业中 广泛应用的发电机、电动机的碳刷^[7]与电极以及航空 航天领域运载火箭升空过程中的整流装置^[8]等在运行 过程中所产生的摩擦磨损行为。相对于纯铜材料, Cu-0.1Ag 合金作为一种集结构与功能于一体的铜合 金材料,除了具有优良的导电导热性能外,还具有优 良的高温性能,可广泛用作电接触材料以及滑动导电 材料^[9-10]。该类合金在用作滑动导电材料时其载流摩 擦磨损性能直接影响电力机车运行的安全性和可靠

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075122);河南省高校科技创新团队支持计划项目(2012IRTSTHN008);河南省高等学校青年骨干教师计 划资助项目(09003047);河南科技大学科研创新培育基金(2010CZ0008)

收稿日期: 2011-11-22; 修订日期: 2012-04-05

通信作者: 贾淑果,教授,博士; 电话: 0379-64229405; E-mail: jiashuguo96@sohu.com

性。因此,研究该类合金材料的受电滑动摩擦磨损行 为具有重要意义,国内外的研究工作者对其进行了大 量的研究^[1-8]。常用 Cu-0.1Ag 合金借助于固溶强化和 形变强化来改善纯铜材料的性能,但仍存在强度低、 高温性能不足等缺陷,不能满足当今电滑动材料的综 合性能要求。

为了克服 Cu-0.1Ag 合金在使用性能上的不足,满 足新一代电滑动材料对强度、导电性、耐高温性能及 耐磨损性能的要求,利用微量 Zr 元素对铜合金的时效 强化以及对高温性能的改善^[11-13],同时考虑稀土元素 具有独特的净化和除杂等作用^[14],在银铜合金接触线 的基础上设计了 Cu-Ag-Zr-Ce 合金^[15-16],该合金具有相 对优良的导电、力学及高温性能,有望作为高速电气 化铁路用接触线材料。本文作者采用自制且能模拟接 触线实际运行工况的实验室用电滑动磨损试验机,摩 擦副材料采用电气化铁路使用的铜基粉末冶金滑板材 料,讨论 Cu-Ag-Zr-Ce 合金材料的受电磨损行为及电流 作用下的磨损机理,并比较同种实验条件下 Cu-Ag-Zr-Ce、Cu-Ag 和 Cu-Ag-Zr 合金线材的磨损性能,探 索 Cu-Ag-Zr-Ce 合金作为新一代接触线材料的可行性。

1 实验

试验用合金在 ZG-0.01 型 10 kg 真空中频感应熔 炼炉中熔炼而成,原材料采用高纯阴极铜、海绵锆、 高纯银和高纯铈,铁模铸造。合金最终成分为(均为质 量分数,下同) Cu-0.1Ag-0.18Zr-0.06Ce、Cu-0.1Ag-0.18Zr 和 Cu-0.1Ag。铸锭经 850 ℃、2 h 的均匀化退 火,然后进行锻造。锻后的合金棒材经 950 ℃、1 h 固溶处理和水淬后进行 40 %的冷变形和 450 ℃、2 h 的时效处理,再经冷变形后,得到截面尺寸为 d7 mm 的磨损试验用线材。

电滑动磨损试验中所用接触滑板材料是我国铁路 上实际使用的铜基粉末冶金滑板,滑板成分(质量分数) 为 Fe 16.77%、C 0.7%、Sn 4.62%、Ni 2.01%、Pb 1.58%、Zn 5.96%、Cu 余量。受电磨损试验机如图 1 所示。在一个直径为 300 mm 的圆盘上,沿其外缘安 装合金接触导线,圆盘两端各有一块滑板分别由弹簧 提供的弹力压靠在接触导线上;曲柄连杆机构带动接 触滑板以 1 Hz 的频率在 30 mm 的摆幅内作横向往复 移动,直流电由滑板流向导线再流向另一块滑板。所 有试验都在实验室完成,电流分别为 0、15、30 和 50 A,转盘以 300 r/min 的速度转动,加载压力为 45 N。 线材的磨损量用其磨损一定时间后线材截面尺寸的变 化来衡量,合金接触线的磨损率用滑板滑过接触线时 单位长度的体积磨损量表示。试样磨损后的表面形貌 在配备有能谱分析(EDS)的JEOL JSM-5610LV型扫描 电镜上进行,工作电压为 25 kV。



图1 磨损试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus of wear test

2 结果与讨论

2.1 加载电流和滑行距离对 Cu-Ag-Zr-Ce 合金磨损 性能的影响

图 2 所示为 Cu-Ag-Zr-Ce 合金在接触压力 45 N、





Fig. 2 Variation of wear rate of Cu-Ag-Zr-Ce wire with electrical current at contact pressure of 45 N and sliding velocity of 18 km/h

滑动速度为 18 km/h 时磨损率随加载电流变化的关系。由图 2 可以看出, Cu-Ag-Zr-Ce 合金线材的磨损率随着加载电流的增大而增大。在较低的加载电流下 (<15 A), 磨损率增加相对较慢; 而在较高的加载电流下(15~30 A), 磨损率增加较快。如在滑行距离为 36 km、加载电流为 50 A 时, 磨损率为 3.46×10⁻³ mm³/m; 而在滑行距离为 36 km 无加载电流时, 磨损率为 1.90×10⁻³ mm³/m。

图3所示为Cu-Ag-Zr-Ce合金在接触压力为45 N、 滑动速度为18 km/h下的磨损率随滑行距离的关系。 由图3可以看出,Cu-Ag-Zr-Ce合金线材的磨损率随 着滑行距离的增大而增大。在磨损开始的最初阶段, 磨损率随滑行距离的增大而急剧增大;随后随滑行距 离的增加,磨损率变化渐缓。这主要是由于在磨损的 开始阶段,圆形合金线材与滑板之间接触面积的急剧 变化而导致较大的正压力,磨损率发生急剧变化;而 后随着滑行距离的增加,滑板与圆形合金线材之间接 触面积的变化逐渐减小,因而使磨损率的变化相对比 较平缓。



图 3 接触压为 45 N、滑动速度为 18 km/h 时 Cu-Ag-Zr-Ce 线材的磨损率随滑行距离的变化

Fig. 3 Variation of wear rate of Cu-Ag-Zr-Ce wire with sliding distance at contact pressure of 45 N and sliding velocity of 18 km/h

由图 3 可以看出,没有加载电流时 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的磨损率相对于加载电流(30、50 A)合金线材的 磨损率增加相对缓慢,且在同种条件下没有加载电流 时磨损率最小。相对于较低电流,在较高电流下磨损 率的变化较大。当电流升高时,由实验参数而引起的 误差相对减小。也即在较低的加载电流下,正压力和 滑行速度对合金线材磨损率的影响相对较大;而在较 高的加载电流下,电流对磨损率的影响大于正压力和 滑行速度的影响。在加载电流作用下产生的热量以及 由于接触线材与滑板脱离接触而产生的电弧,对合金 线材的磨损都有较大影响。放电电弧的温度一般能够 达到3300~4000℃,因此,在离线而产生的放电电 弧线材的附近区域,线材的表层和亚表层温度会急剧 升高,导致 Cu-Ag-Zr-Ce 合金接触线发生软化甚至熔 化,使材料的硬度(强度)急剧下降^[16],从而导致放电 区域发生严重的电弧侵蚀。电弧热能的增加几乎与电 流的平方成正比,所以磨损率随着加载电流的增加而 急剧增大。

2.2 合金受电磨损机理

为了探讨 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的电滑动磨损机理, 采用扫描电镜对该合金在不同加载电流下滑动磨损 4 h 后的表面形貌进行观察。图 4 所示为 Cu-Ag-Zr-Ce 合金在正压力 45 N、滑行速度 18 km/h 及不同加载电 流条件下磨损 4 h 后接触线材磨损表面的 SEM 像。

由图 4(a)~(c)可以看出,磨损表面存在大量剥落 坑,这主要是由于较高的滑动磨损使线材受到较大的 剪切应力和较小的正应力,因此,磨损碎片从线材的 表面剥落,发生材料的转移和剥落,说明粘着磨损是 线材受电磨损的主要机制之一。为了进一步说明粘着 磨损的作用,对 Cu-Ag-Zr-Ce 合金在不同加载电流下 的磨损表面进行能谱分析,结果如表 1 所列。由表 1 可以看出,线材表面有其他元素存在,说明由电滑动 磨损引起的机械和电的作用使材料在滑板和合金线材 之间发生了转移,从而更进一步证明了粘着磨损是其 磨损的主要机制之一。

从图 4(a)~(c)还可以看出,在磨损线材表面存在 明显与滑动方向相平行和连续的犁沟,线材表面的这 种形貌特征表明发生了磨粒磨损。由于 Cu-Ag-Zr-Ce 合金接触线材的硬度(147HB)远高于铜基粉末冶金滑 板的硬度(90HB),由粘着磨损所产生的磨损碎屑会粘 着在 Cu-Ag-Zr-Ce 合金和滑板之间, 作为磨粒使材料 发生磨粒磨损。此外,加载电流的存在导致铜合金线 材表面温度升高,线材表面易于形成氧化膜(由表1中 磨损表面的能谱分析数据可以证实氧化膜存在),而温 度的变化导致线材表层和氧化膜的力学性能的改变 (当出现电弧时其力学性能变化更加明显);氧化膜的 力学性能(包括塑性)对温度十分敏感,在温度高于 500 ℃时性能急剧降低,塑性急剧降低。BOUCHOUCHA 等[17-18]对电流作用下的铜/钢铁的磨损研究认为,电流 的作用不仅加剧氧化物的形成,同时使铜合金线材表 层的温度升至600 ℃以上。由表1中不同加载电流作 用下合金磨损表面的能谱分析数据可以看出,随着加 载电流的增大, 磨损表面的含氧量增加, 从而也证实



图 4 不同电流下 Cu-Ag-Zr-Ce 合金受电磨损后的表面 SEM 像



表1 磨损表面的 EDS 能谱分析结果

Table 1	EDS analysis	results of	worn surface
---------	--------------	------------	--------------

$Current/\Lambda$	Mass fraction/%						
Current/A	0	Sn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
0	1.62	2.90	8.69	2.09	77.74	4.98	1.98
30	2.27	4.15	2.31	1.41	84.29	1.92	3.65
50	2.98	1.70	6.86	1.82	78.92	4.74	2.98

了电流的作用加剧氧化物形成的结论。而在电流作用 下氧化物塑性的急剧降低使在反复的滑动摩擦下表层 形成的氧化物极易破裂形成碎屑,坚硬的氧化物粒子 作为磨粒也可导致磨粒磨损。

由图 4(b)和(c)可以看出,电滑动磨损条件下,在 Cu-Ag-Zr-Ce 合金线材的磨损表面可观察到电侵蚀坑 和气孔(如图 4(b)中箭头所指),且随着加载电流的增 大,电侵蚀坑和气孔增多(见图 4(c))。另外,对经过磨 损的线材进行宏观观察可以看出,随着加载电流的增 大,线材的磨损表面变得更加粗糙,且线材磨损表面 颜色发暗的部分变多。在电滑动条件下,当电流通过 时,滑板和 Cu-Ag-Zr-Ce 合金线材之间由于离线而产 生电弧,从而引起电弧熔化和电弧侵蚀等不同的材料 转移方式。图 4(c)所示为磨损表面的电侵蚀坑以及有 类似于蜂窝状的气孔形貌。图 4(d)所示为图 4(c)的局 部放大形貌,显示出明显的蜂窝状特征。当电滑动时的接触断开时,产生电弧,而在电弧产生处线材的周围材料表层和亚表层的温度瞬时急剧升高,导致 Cu-Ag-Zr-Ce 合金线材和滑板接触处的材料发生熔化 和蒸发,这些熔化的材料在接触表面的凝固过程中由 于液态金属的凝固收缩或金属的热胀冷缩而形成如图 4 所示的气孔。

综上所述,在 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的电滑动磨损过 程中,粘着磨损、磨粒磨损和电侵蚀磨损是其主要的 磨损机制,且随着加载电流的增加,电侵蚀磨损加剧。

2.3 合金元素对 Cu-Ag 合金磨损行为的影响

目前,质量分数为0.1%的银铜接触线材因其优良的导电性、较高的强度及较优的高温性能广泛用于国内外电气化铁路系统中。为了考察 Cu-Ag-Zr-Ce 合金线材的磨损性能,采用 Cu-0.1Ag 以及 Cu-Ag-Zr 合金线材与其进行对比。

图 5 所示为 Cu-Ag-Zr-Ce 合金线材与 Cu-Ag、 Cu-Ag-Zr 合金线材在正压力为 45 N、滑行速度为 18 km/h 时滑行 4 h 的磨损率与加载电流的关系曲线。由 图 5 可以看出, Cu-Ag 接触线材的磨损率明显高于 Cu-Ag-Zr-Ce 以及 Cu-Ag-Zr 合金线材的磨损率; Cu-Ag 合金及 Cu-Ag-Zr 和 Cu-Ag-Zr-Ce 合金线材磨损率 的差别随着受电电流的增大而增大;在不同的受电电流下 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的磨损率明显低于 Cu-Ag-Zr 和 Cu-Ag 合金的磨损率。如 Cu-Ag 合金线材的磨损率 在无加载电流时为 6.64×10⁻³ mm³/m,加载电流为 50 A 时达到 12.63×10⁻³ mm³/m;而无加载电流时 Cu-Ag-Zr 合金的磨损率为 2.99×10⁻³ mm³/m,加载电流为 50 A 时为 4.13×10⁻³ mm³/m;Cu-Ag-Zr-Ce 合金在无加载 电流时的磨损率为 2.13×10⁻³ mm³/m,加载电流为 50 A 时仅为 3.61×10⁻³ mm³/m。Cu-Ag 合金的磨损率约 为相同试验条件下 Cu-Ag-Zr 和 Cu-Ag-Zr-Ce 合金磨损 率的 2~4 倍,说明合金元素 Zr 和 Ce 的加入显著改善了 Cu-Ag 合金的磨损性能。



图 5 合金元素对 Cu-Ag 合金磨损性能的影响

Fig. 5 Effect of elements alloy on wear property of Cu-Ag alloy

合金元素的加入所引起材料磨损性能的显著差别 主要是由于材料微观结构的变化。Cu-Ag-Zr-Ce 合金 是一种新研制的时效硬化合金,图6所示为该合金经 时效处理后析出相的微观形貌。由图6可以看出,经 时效处理后,合金中形成细小弥散分布的 Cu₅Zr 析出 相颗粒,这些细小弥散的析出相分布在铜基体上,尺 寸为 6~7 nm, 且与基体保持共格关系, 能够有效地改 善合金的磨损性能。时效硬化合金的磨损是材料亚表 面层形变、裂纹形核和扩展而导致与表面分离的过 程^[19]。在铜合金的磨损过程中,微观结构和强度起着 重要作用。Cu-Ag-Zr-Ce 合金(570 MPa, 147HB)比 Cu-Ag-Zr(530 MPa, 143HB)和 Cu-Ag 合金(410 MPa, 106HB)具有较高的强度和硬度,能更有效地抵抗磨损 过程中材料表面的塑性变形; 而在塑性变形过程中, 基体上分布的细小弥散且与基体保持共格关系的析出 相会有效阻碍裂纹的形核和扩展。同时, 电滑动磨损

时电弧侵蚀也是一个重要因素,LIU 等^[20]通过对 Cu-Nb 原位复合材料的电滑动摩擦磨损行为进行了研 究,认为具有高强度、高电导率的材料有更强的抗电 弧侵蚀能力。Cu-Ag-Zr-Ce 合金(570 MPa,86.20% (IACS))比 Cu-Ag 合金(410 MPa,97.63%(IACS))具有 更好的导电性和强度匹配,其在不同加载电流条件下 磨损率的变化说明兼具高强度、高导性能的材料具有 更优的抗电弧侵蚀性能。另外,电流作用会导致线材 的温升,Cu-Ag-Zr-Ce、Cu-Ag-Zr 和 Cu-Ag 合金的软 化温度分别为 550、500 和 350 ℃,Cu-Ag-Zr-Ce 和 Cu-Ag-Zr 合金具有的较高软化温度也对其耐磨性有 很大的改善作用。综上所述,合金元素的加入大大改 善了 Cu-Ag 合金的耐磨性能。



图 6 经时效处理 Cu-Ag-Zr-Ce 合金中析出相的微观形貌 Fig. 6 Micrograph of precipitate in Cu-Ag-Zr-Ce alloy after aging treatment

3 结论

 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的磨损率随着加载电流的增 大而增大。在 50 A 的加载电流作用下, Cu-Ag-Zr-Ce 合金的磨损率为 3.61×10⁻³ mm³/m;而无加载电流时 其磨损率为 2.13×10⁻³ mm³/m。

2) 在不同的磨损条件下, Cu-Ag-Zr-Ce 合金的磨 损率随着滑行距离的增大而增加, 在起始阶段磨损率 增加很快, 随后逐渐变缓。

3) 粘着磨损、磨粒磨损和电侵蚀磨损是 Cu-Ag-Zr-Ce 合金电滑动磨损的主要磨损机理; 且随着加载 电流的增大, 电侵蚀磨损加剧。

4) 合金中细小弥散分布的共格析出相能改善 Cu-Ag 合金的磨损性能; 相同实验条件下 Cu-Ag 合金 的磨损率为 Cu-Ag-Zr-Ce 合金的 2~4 倍。

REFERENCES

- 上官宝,张永振,邢建东,孙乐民,丘 明,牛永平,侯 明. 电流密度对铬青铜/黄铜载流配副表面温度和摩擦学特性的 影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(7): 1237-1241.
 SHANGGUAN Bao, ZHANG Yong-zhen, XING Jian-dong, SUN Le-min, QIU Ming, NIU Yong-ping, HOU Ming. Effect of current density on surface temperature and tribology behavior of chromium bronze/brass couple[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(7): 1237-1241.
- [2] JIA S G, LIU P, ZHENG M S, TIAN B H, REN F Z. Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways[J]. Wear, 2007, 262: 772–777.
- [3] HE D H, MANORY R R, GRADY N. Wear of railway contact wires against current collector materials[J]. Wear, 1998, 215: 146–455.
- [4] NAGASAWA H, KATO K. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current [J]. Wear, 1998, 216: 179–183.
- [5] ZHAO H, BARBER G C, LIU J. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current[J]. Wear, 2001, 249: 409–414.
- JIA S G, LIU P, REN F Z, TIAN B H, ZHENG M S, ZHOU G S.
 Wear behavior of Cu-Ag-Cr alloy wire under electrical sliding
 [J]. Mater Sci Eng A, 2005, 398: 262–267.
- [7] 虞 澜. 金-稀土合金电刷丝的磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(4): 282-285.
 YU Lan. Study on the wear mechanism of Au-rare earth alloy wires[J]. Tribology, 2002, 22(4): 282-285.
- [8] TU J P, QI W X, YANG Y Z, LIU F, ZHANG J T, GAN G Y. Effect of aging treatment on the electrical sliding wear behavior of Cu-Cr-Zr alloy[J]. Wear, 2002, 249: 1021–1027.
- [9] 黄崇祺. 我国电力牵引用接触线的发展与展望[J]. 电线电缆, 2003(2): 3-6.
 HUANG Chong-qi. Development and forecast of the contact wires for electrical traction in China[J]. Electric Wire & Cable, 2003(2): 3-6.
- [10] 张 强. 高速铁路用铜镁接触线的引进与自主创新[J]. 铁道 机车车辆, 2009, 29(3): 77-79.
 ZHANG Qiang. Introduction and innovation of the technology for producing CuMg contact wire for high-speed railway[J].

Railway Locomotive & Car, 2009, 29(3): 77-79.

- [11] JIA S G, NING X M, LIU P, ZHENG M S, ZHOU G S. Age hardening characteristics of Cu-Ag-Zr alloy[J]. Met Mater Int, 2009, 15(4): 555–558.
- [12] 贾淑果,刘 平,任风章,田保红,郑茂盛,周根树. 微量 Zr 对 Cu-Ag 合金再结晶的影响[J]. 功能材料, 2005, 36(2): 206-208.
 JIA Shu-guo, LIU Ping, REN Feng-zhang, TIAN Bao-hong, ZHENG Mao-sheng, ZHOU Gen-shu. Effects of trace Zr on the recrystallization of Cu-Ag alloy[J]. Journal of Functional
- [13] 刘 平, 贾淑果,郑茂盛,任凤章. 微量 Zr 对 Cu-Ag 合金磨 损行为的影响[J]. 材料研究学报, 2006, 20(1): 109-112.
 LIU Ping, JIA Shu-guo, ZHENG Mao-sheng, REN Feng-zhang.
 Effects of trace Zr on the wear behavior of Cu-Ag alloy [J].
 Chinese Journal of Materials Research, 2006, 20(1): 109-112.

Materials, 2005, 36(2): 206-208.

- [14] 杜 挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用 [J]. 金属学报, 1997, 33(1): 69-77.
 DU Ting. Physical-chemistry effect of rare earth elements on metallic materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(1): 69-77.
- [15] JIA Shu-guo, ZHENG Mao-sheng, LIU Ping, REN Feng-zhang, ZHOU Gen-shu. Aging behavior studies in a Cu-Ag-Zr-Ce alloy[J]. J Rare Earth, 2005, 23(S): s423-s426.
- [16] 贾淑果,刘 平,田保红,任凤章,郑茂盛. 微量 Ce 对 Cu-Ag-Zr 合金性能的影响[J]. 功能材料, 2008, 39(S): s251-s253. JIA Shu-guo, LIU Ping, TIAN Bao-hong, REN Feng-zhang, ZHENG Mao-sheng. Effect of traces Ce on the property of Cu-Ag-Zr alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(S): s251-s253.
- [17] BOUCHOUCHA A, ZAIDI H, KADIRI E K, PAULMIER D. Influence of electric fields on the tribological behaviour of electrodynamic copper/steel contacts[J]. Wear, 1997, 203/204: 434-441.
- [18] PAULMIER D, BOUCHOUCHA A, ZAIDI H. Influence of the electrical current on wear in a sliding contact with copper/ chrome steel [J]. Vacuum, 1990, 41: 2213–2216.
- [19] SAKA N, PAMIES-TEIXEIRA J J, SUH N P. Wear of two-phase metals[J]. Wear, 1977, 44: 77–86.
- [20] LIU P, BAHADUR S, VERHOEVEN J D. Electrical sliding friction and wear behavior of Cu-Nb in situ composites[J]. IEEE Trans CPMTA, 1994, 17(4): 616–624.

(编辑 陈卫萍)