

电火花沉积 WC-4Co 复合层界面行为

王建升, 张占哲, 闫镇威, 李 刚, 唐明奇, 冯在强

(华北水利水电大学 机械学院, 郑州 450011)

摘 要: 采用新型电火花沉积设备, 将亚微米 WC-4Co 陶瓷硬质合金材料沉积在铸钢材料上, 制备电火花沉积合金涂层, 利用 SEM 和 XRD 等技术研究沉积层与基体间的界面行为, 分析沉积层的表面润湿性、物相形成机理、微观组织结构、界面元素分布、界面结合机理和显微硬度变化等。结果表明: 电火花沉积技术可以在金属基体表面制造出微纳米非晶高熔点强化层。铸钢表面沉积层主要由 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Si_2W 和 Fe_2C 等相组成; 沉积层与基体呈冶金结合, 过渡层中出现一些柱状晶和等轴晶的组织结构, 沉积层中细小的 Fe_2C 和 Si_2W 等硬质相颗粒弥散分布于 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 沉积层上。沉积层的厚度大于 $20\text{ }\mu\text{m}$, 沉积层的平均显微硬度为 1803.2 HV , 细小弥散分布的硬质相是沉积层硬度提高的主要因素。

关键词: WC-Co 硬质合金; 电火花沉积; 组织结构; 界面行为

中图分类号: TG174.445

文献标志码: A

Interface behavior of WC-4Co coating by electro-spark deposition

WANG Jian-sheng, ZHANG Zhan-zhe, YAN Zhen-wei, LI Gang, TANG Ming-qi, FENG Zai-qiang

(School of Mechanical Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Submicron WC-4Co cemented carbide material was deposited on the surface of cast steel by electro-spark deposition (ESD), the electro-spark deposition coating was prepared. The behavior of interface between the coating and the substrate was studied by SEM and XRD. The surface wettability, the forming mechanism of phase, microstructure, element distribution of deposition, bonding mechanism of interface and microhardness of the coating were investigated. The results show that micro/nano and amorphous coating with high melting-point is produced on the surface of cast steel by ESD. The coating consists of $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, Si_2W and Fe_2C phases. The coating is well metallurgical bonded with the cast steel roll substrate. The microstructure of the transition layer is a structure of fine columnar crystals and equiaxed crystals. The extra-fine structure hard Si_2W and Fe_2C phases distribute dispersedly in $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ and $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ deposition. The coating is usually more than $20\text{ }\mu\text{m}$ thick. The average microhardness of the coating is 1803.2 HV . These fine and dispersed hard phases can greatly improve the hardness of coating.

Key words: WC-Co cemented carbides; electro-spark deposition; microstructure; interface behavior

金属表面电火花沉积(Electro-spark deposition)技术是一种微焊接技术, 它的基本原理就是把电极材料(硬质合金如 WC、TiC 等)作为工作电极(阳极), 氩气中使之与被沉积的金属工件(阴极)之间产生火花放电, 在 $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-6}\text{ s}$ 内电极与工件接触的部位达

到 $8000\sim 25000\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温, 直接利用旋转电极与基体材料间形成的微弧及瞬间高能量脉冲放电产生等离子态的高温、高压区, 使电极熔化过渡到微熔的基体表面熔池中, 形成合金化表面强化层的一种表面处理技术。其主要特点有热输入量集中、热影响区小, 由于

瞬间形成高温达万度以上,可制造高熔点的且具有高硬度、高耐磨和抗腐蚀的复合强化层^[1-2]。虽然电火花沉积后工件表面涂层的性能非常高,但其心部的组织和力学性能不发生变化,工件不会退火或热变形。采用电火花沉积技术对工件表面进行强化处理,可延长设备的使用寿命,减少资源消耗,具有较高的节能环保意义^[3-4]。由于电火花沉积技术操作简单,且具有低能耗和加工成本低等优点,近年来在工程领域得到了越来越多的应用,已经由最初用于刀模具的强化与修复扩展到水利、能源、航空、航天、军事、医疗等诸多领域^[5-9],是再制造技术的重要技术手段之一。虽然电火花沉积技术在生产中获得了广泛应用并产生了巨大的经济效益,且国内外很多学者专家也一直在进行电火花沉积技术的研究,如 BURKOV 等^[10]、PODCHERNYAIECA 等^[11]、KONOVAL 等^[12]、TKACHENKO 等^[13]及王要利等^[14]、徐广晨等^[15]、LUO 等^[16]研究了不同基体如钛合金、镍合金、35CrMo 钢等材料上进行电火花沉积不同电极如 TiB₂、WC 和 Ni-Al 等合金材料,他们主要研究在不同基体材料上电火花沉积不同电极材料所形成的沉积层的显微硬度、耐磨性、耐腐蚀性、物相结构和厚度等内容。但关于电火花沉积的实现条件、表面润湿性的分析、物相形成机理、电火花沉积的界面和结合机理等方面的分析仍然没有系统的解释。本文作者采用电火花沉积工艺把硬度极高的 WC-4Co 陶瓷硬质合金熔覆于铸钢材料表面,然后分析了沉积层表面润湿性、沉积层物相形成机理、界面组织分析、界面元素扩散分析、界面结合机理及涂层显微硬度的变化。电火花沉积 WC-4Co 陶瓷硬质合金涂层界面行为的研究对于电火花沉积涂层更深入的探索具有借鉴意义,对于电火花沉积技术的推广和应用也具有参考意义。

1 实验

1.1 沉积材料及沉积层制备

基体材料是石家庄某钢厂废旧的轧辊铸钢材料上截取下来的。电极材料采用亚微米陶瓷硬质合金 WC-4Co 电极材料,它主要成分为 96%WC 和 4%Co。沉积工艺采用新型 DZS-4000 型电火花沉积设备,该设备是采用手动操作氩气保护下完成的,沉积时沉积枪转速为 2500 r/min。先利用电火花线切割将从轧辊上截取下来的轧辊钢制成 100 mm×10 mm×3 mm 的片条状试样,用 1000 号 SiC 金相砂纸把试样磨平,再用丙酮溶液清洗,按照表 1 给出的工艺规范进行沉积

WC-4Co 电极材料,沉积后再用电火花线切割制成 10 mm×10 mm×3 mm 试样,然后用 XQ-2B 型金相镶嵌机镶嵌试样,镶嵌后的试样后用 P-2 型金相抛光机把试样涂层横截面抛光成光亮如镜的金属表面,腐蚀后再进行试验检测。沉积时保护气体氩气流量设定在 7.5 L/min,电极的伸长长度为 3 mm。

表 1 沉积工艺的操作参数

Table 1 ESD process parameters

Power/ W	Voltage/ V	Frequency/ Hz	Deposition time/ (min·cm ⁻²)	Argon gas/ (L·min ⁻¹)
3300	160	1800	2	7.5

1.2 试验方法

采用 DPMMax2RB 型 X 射线衍射仪分析了沉积层的相组成。采用 LEO1450 型扫描电镜对沉积层的表面形貌和截面形貌进行了观察分析,并结合能谱、XRD 分析确定沉积层的相分布和界面的元素分布。沉积层经抛光后,采用 HVS1000 型显微硬度计测量涂层截面的显微硬度,载荷为 300 N,加载时间为 20 s。

2 结果与分析

2.1 沉积层表面润湿性的分析

表面的润湿性主要是指液体在固体表面的铺展能力,这里主要是指熔融的 WC-4Co 材料在与工件表面接触后,排除气体介质而自动铺展的行为,即液固相界面取代气固相界面,同时液体表面增大的过程。图 1 所示为扫描显微镜下的沉积层表面显微形貌。电火花沉积亚微米 WC-4Co 铸钢表面强化层整体形貌呈橘皮状,局部看熔滴凝固后的形貌成薄饼状,四周成溅射状,边缘还有许多凝固的小颗粒。由于电火花放电时可产生 8000~25000 °C 以上的高温,使得基体和电极材料熔化甚至气化,发生冶金反应。同时,受到电火花放电冲击力的作用,电极材料和基体材料以及冶金反应产物的混合熔化物以小液滴的形式飞溅出去,落在放电圆坑的四周,温度迅速降低最终凝固。其中,涌溅区的金属颗粒和基体材料在下一次的脉冲放电中,将会发生重熔或冶金反应。电火花沉积层表面实际上是由无数沉积点多次堆叠重熔而形成的,分析认为电火花沉积过程中沉积材料在工件上的润湿属于强制铺展润湿。沉积材料是在接触放电通道中很大的电磁力和动能以及热爆炸等外力作用下在工件表面有较快速度的铺展,润湿程度的大小可以用润湿角来衡量;

沉积后,熔滴铺展形成薄饼状,润湿角极小,几乎接近于 0,润湿效果非常好。电火花沉积工艺的这种强制润湿,也是沉积层与基体结合非常牢固的一个原因。由图 1 可见,铸钢表面电火花强化层表面的橘皮状形貌是由多次脉冲放电产生的强化点和放电凹坑所构成。这种无方向性、大小均匀的放电凹坑有利于储存润滑油,对改善工件表面的耐磨性非常有利。

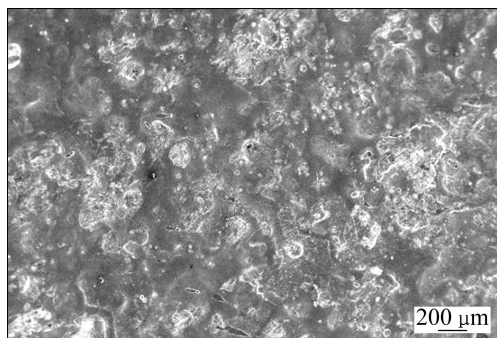


图 1 铸钢电火花沉积 WC-4Co 涂层表面形貌图

Fig. 1 Surface morphology of ESD WC-4Co coatings of cast steel

2.2 沉积层界面相结构分析

图 2 所示为亚微米 WC-4Co 电极材料在铸钢试样表面电火花沉积后涂层的 XRD 谱。从图 2 可以看出,沉积层主要由 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Si_2W 和 W_2C 等相组成。从图 2 还可以看出,XRD 谱在 $35^\circ\sim 50^\circ$ 间的宽化漫衍射峰更加明显,尖锐峰更加减弱,且在 $70^\circ\sim 80^\circ$ 之间也存在漫衍射峰,这是包含一部分非晶态结构的 XRD 谱,说明由电火花沉积 WC-4Co 制备的沉积层比电极成分本身的非晶化程度更高,也说明电火花沉积层内存在的非晶态结构组织。由于电火花沉积工艺的特点相当于微焊接工艺,在高温极短时间内,电极材料与基体材料在基体表面形成微小熔化区。熔化后,硬质合金中的碳向钢中扩散,导致硬质合金中含碳量降低,在结合面硬质合金一侧形成衍射峰较高的 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 物相。在衍射峰标定过程中, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 与 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 的衍射峰比较相近,但由于 Co 元素的熔点低,在沉积过程中散失较多,导致界面处 Co 含量较少。因此, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 的含量要大于 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 的含量。除了出现 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 物相外,还出现了 Si_2W 和 W_2C 相,这是因为沉积过程中,金属基体中的 Fe 和 Si 元素向 WC-4Co 硬质合金发生一定的扩散,其中 Fe 扩散能力较强。同时,WC-4Co 合金中的 W 和 C 元素也向熔合区进行了扩散。由于 Fe 对 C 具有较强的溶解能力,Fe 可与 C 形成 Fe_2C 间隙化合物,

而 Si 对 W 也足够的溶解能力,所以 W 与 Si 形成 Si_2W 间隙化合物。上面复杂物相的形成是由于在高温高压微区内发生了一些复杂的物理化学变化,化学反应如下所示:

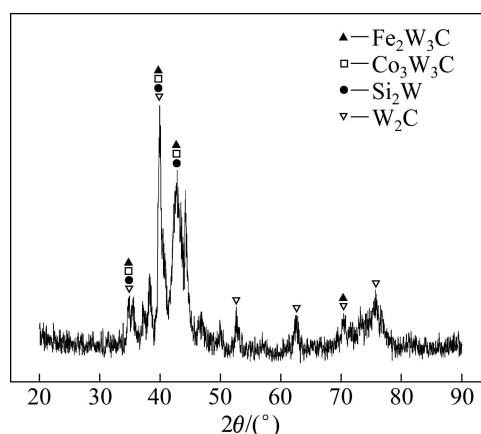
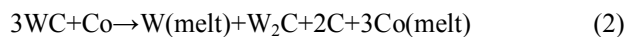


图 2 铸钢表面电火花沉积 WC-4Co 沉积层的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of ESD WC-4Co coatings of cast steel

2.3 沉积层界面组织分析

图 3(a)所示为电火花沉积亚微米 WC-4Co 沉积层截面的 SEM 像。经村上试剂侵蚀可以看到电火花沉积层的表面为不易腐蚀的白亮层,在白层内侧是过渡层区域,然后为心部组织;沉积层厚度大约为 $20\mu\text{m}$ 。图 3(b)显示的颗粒非常细小,达到纳米尺寸,图中白框内的颗粒范围为 $10\sim 120\text{nm}$ 。电火花表面沉积时,加热速度达到 $1\times 10^7^\circ\text{C/s}$,电极和工件表面的微小区域瞬时被熔化,其临近未熔区域也产生相变。迅速加热使钢的相变点上升,但升高的温度有限,相变温度范围变宽。加热相变奥氏体化极不均匀,缺陷密度很高。而在电火花沉积过程中工件局部超高温(最高可达 25000°C)所形成得空位浓度很高。实际上快速加热是一种非平衡态,快速加热形核率高,在新相周围将会出现空位,最终使得其空位浓度远高于平衡态的。此外,还形成很多位错,它们也使新相形核,因此,快速加热所得到晶粒细化。工件在整个电火花沉积过程中升温很小,局部超高温又是以 $1\times 10^6^\circ\text{C/s}$ 冷却,马氏体相变转变中又进一步提高位错的密度,同样使晶

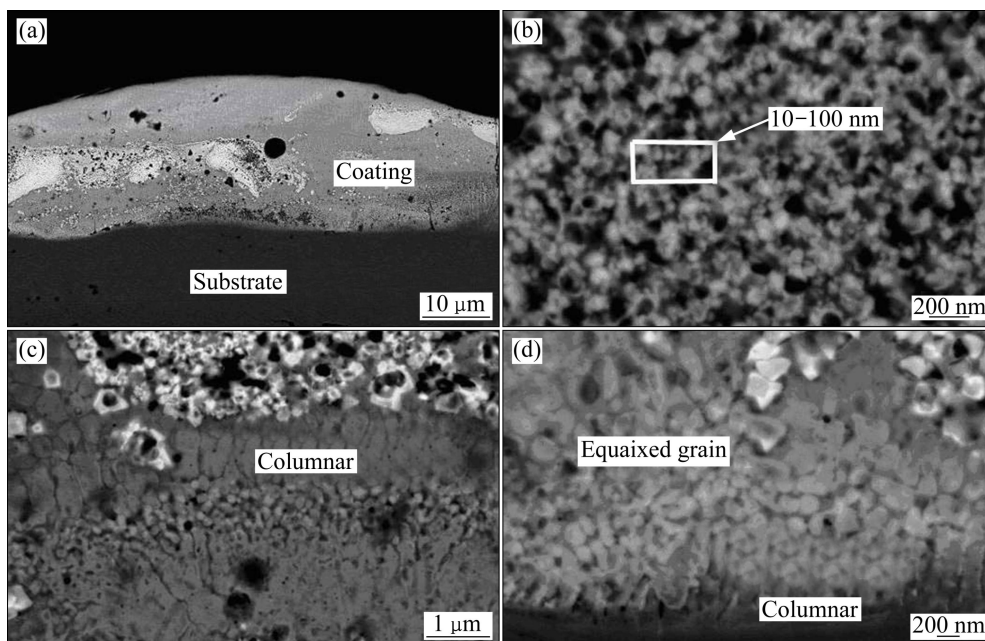


图 3 电火花沉积 WC-4Co 沉积层界面图

Fig. 3 Cross-section morphologies of ESD WC-4Co coatings of cast steel: (a) Macro cross section of coating; (b) White particles of middle coating; (c) Center and bottom of coating; (d) Bottom of coating

粒进一步细化, 晶粒的细化又增加了晶界量, 晶界越多, 金属的强度也越大^[17-19]。在电火花沉积过程中还同时伴随着电极与工件的撞击, 由工件与电极撞击中产生得弹性形变, 由撞击中产生的弹性应变和温度等效应变也在一定程度上引起了组织细化。总结上面说明电火花沉积层中超细晶组织是电火花沉积过程中撞击应变、弹性应变、晶界增加、快速加热、等效应变及位错和空位增加的联合作用引起的组织细化^[20]。图 3(c)所示为电火花沉积层中下部的组织结构图, 从图 3(c)中可以看出, 里边有柱状晶和细小等轴颗粒组成的。由图 3(d)也可以看出, 沉积层底部靠近基体的过渡层组织为柱状晶结构, 在柱状晶结构区域与沉积层白色细小颗粒区之间的是等轴晶区域。图 3(c)和(d)的柱状晶和等轴晶组织形成的原因主要是因为电火花沉积是一种快速加热、快速凝固的过程, 液态成分起伏较大, 熔池中微区成分不均匀不可避免, 这种由于固液界面一定区域的成分起伏而造成的过冷会使过渡层组织出现一定特殊结构形式。当温度梯度与实际结晶温度有少量的相交, 即具有较小的成分过冷的条件下, 便出现柱状结晶。此时, 由于平面结晶处于不稳定的状态, 凝固界面长出许多平行束状的凸起伸入过冷的液体中, 最后形成柱状晶结构。当液相中的温度梯度很小, 能在液相中形成较宽的成分过冷区, 此时的温

度和成分都比较均匀, 也就决定了晶粒不会在某一方面上优先生长, 整体趋向于各向同性, 最终形成了等轴晶。

由图 3(b)可以看出, 对沉积层上弥散分布着白色颗粒、灰色区域和黑色颗粒区域进行 EDX 能谱分析。图 4 所示为图 3(b)图中白色颗粒、灰色区域和黑色区域能谱分析。由图 4 可以看到, 它们的主要成分都为 W、Fe、Co 和 C 元素, 但是含量不一样, 白色颗粒区域 W 含量最高, Fe 含量最少; 浅灰色区域的 Co 和 C 量最高, Fe 含量仅高于白色颗粒区域的, W 含量低于白色颗粒区域的; 黑色颗粒区域含 Fe 含量最高, W 和 C 含量最低, 而 Co 含量仅比白色颗粒区域的略高。结合图 2 的 XRD 谱分析可以判断, 白色颗粒区域主要包含的化合物为 W_2C , 灰色区域主要化合物为 Co_3W_3C 和 Fe_3W_3C , 黑色区域主要化合物是 Si_2W 。由此表明, 电火花沉积层的外层是以 Fe_3W_3C 和

表 2 图 3(b)各区域处的元素含量

Table 2 Element content of different areas shown in Fig. 3(b)

Area	Mass fraction/%			
	W	Co	Fe	C
White	54.88	1.25	20.34	23.53
Gray	40.76	2.05	33.59	23.60
Black	34.93	1.26	42.91	20.90

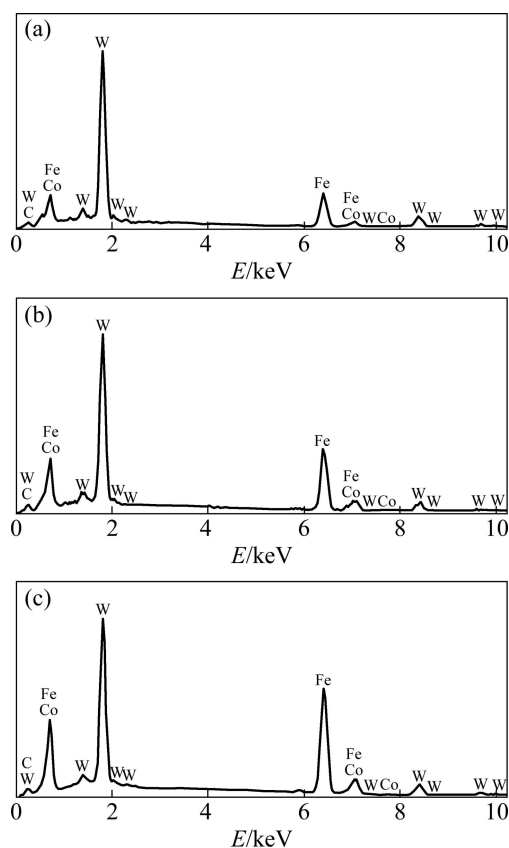


图 4 图 3(b)图中白色颗粒、灰色颗粒和黑色颗粒区域的 EDS 谱

Fig. 4 EDS spectra of white particles (a), gray particles (b) and black particles (c) shown in Fig. 3(b)

$\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 为基体, 在 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 的基体上弥散分布着细小白色 W_2C 颗粒和黑色 Si_2W 颗粒。

2.4 沉积层界面元素扩散分析

为了了解电火花沉积 WC-4Co 沉积层中合金元素分布情况, 对沉积层区域进行了线能谱分析。图 5(a)和(b)是沉积层线扫描的结果, 图 5(b)显示了各种合金元素在界面区域的分布与含量。由图 5(b)可以看出, 基体金属中的 Fe 和 C 元素向沉积层发生一定距离的扩散, 其中 Fe 的扩散能力较强, 扩散距离约为 $20\ \mu\text{m}$, 含量较高。WC-4Co 合金中的 W、Co 和 C 元素也向沉积层内进行扩散, 扩散距离约为 $20\ \mu\text{m}$, C 也有一定程度的扩散, 由于 WC-4Co 硬质合金中 C 元素含量 (7.2%, 质量分数), 铸钢基体的 C 元素含量 (0.68%, 质量分数)。所以, 界面处的 C 元素除一小部分是由于基体钢的熔化而进入熔融区域得来的, 大部分是由 WC-4Co 合金扩散而来。正常的 WC-4Co 合金为 Co-W-C 体系, 但在沉积过程中, 由于大量 Fe 元素的

扩散, 使 WC-4Co 合金一侧 Fe 元素浓度很高, 再加上 Co 元素熔点低, 沉积过程中有一定程度的散失, Fe 会取代 Co 而形成一部分 Fe-W-C 体系, 在界面处硬质合金一侧占主导作用。从图 5(b)所示的线扫描元素变化图可以看出, 从沉积中的白亮层开始到过渡层时, 元素发生了明显剧烈变化, 到了中间的区域元素又有了变化, 这个区域对照图 5(a)所示的浅灰色区域内, 实际上这个区域为电火花沉积层的扩散区, 也即热影响区, 再往里过渡到基体, 这时 Fe 元素明显提高很多, W 元素下降得也很快。由元素变化图可以看出, 电火花沉积 WC-4Co 涂层是由白亮层、过渡层和热影响区 3 部分组成。

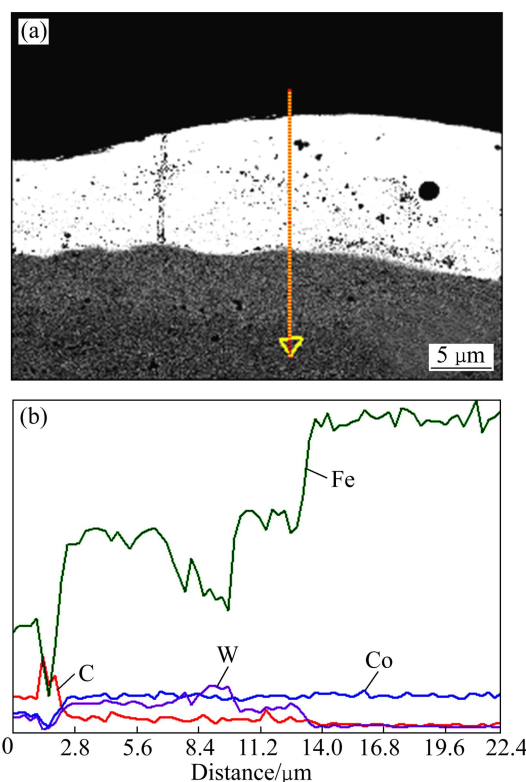


图 5 沉积层的形貌及界面线能谱分析

Fig. 5 Morphology and line spectra analysis of coating: (a) Line scan of interface; (b) Element change of line scan

2.5 界面结合机理分析

铸钢材料和电极材料 WC-4Co 之间发生结合的条件是金属元素间形成金属化合键或者发生化学反应产生共价键。当两个理想的平整清洁表面接触时, 不需消耗能量就能发生结合。但是实际中的表面都有一层氧化膜和一些吸附的气体层, 从而阻止金属键的形成。但现实中任何固体的表面都会有微观起伏, 对于电火花沉积来说这更有利于放电的进行。电火花沉积过程中由于电磁力和热爆炸等因素的作用, 在放电点工件

表面的材料被熔化甚至抛出,这有利于氧化膜的破碎和去除,为沉积创造较为清洁平整的表面。给沉积材料熔滴在工件表面产生相互融合以及原子间的结合提供条件。同时,沉积点处存在的气体以及杂质一并被清除,使电火花沉积进一步实现。为了使得电极材料熔滴在铺展凝固后形成结合良好的表面,需要两种材料的元素的原子之间的作用距离在几个埃之内,使得引力和斥力作用平衡,也就是说原子之间相互作用的能量是最低的。为了获得铸钢材料和 WC-4Co 材料的牢固链接,这两种材料原子间能量必须最低,这样的两个界面间才能实现界面上的充分润湿,由于电火花沉积属于强制润湿,且电火花沉积提供的高温和高压使连接的两个表面层的每个原子都会与对应表面层的原子达到原子间距,并由于界面高温的激活以及表面缺陷的存在而易于形成键合。也可以说是电火花沉积的温度很高,可以认为大多数原子被激活,可以参与沉积材料原子和工件表面原子之间的物理化学反应。在形成物理结合后,界面两侧原子之间发生相互扩散作用会产生新的化合物,从而实现两种材料之间的冶金结合^[21]。

2.6 沉积层硬度变化

图 6 所示为沉积层的硬度进行测量的结果。结果表明,电火花沉积层具有较高的硬度,最高可达 1990.6 HV,平均硬度为 1803.1 HV,过渡层显微硬度为 880 HV,沉积层的硬度显著高于基体硬度(350.5 HV)。由上可知,沉积层的组织中含有高硬度的复杂的碳化物等,这些粒状细小的高硬度的碳化物又是以弥散形式分布的,由于电火花沉积是由加热和冷却瞬间完成的,存在着高密度的位错和较高的残余应力,这些都导致沉积层具有较高的显微硬度。

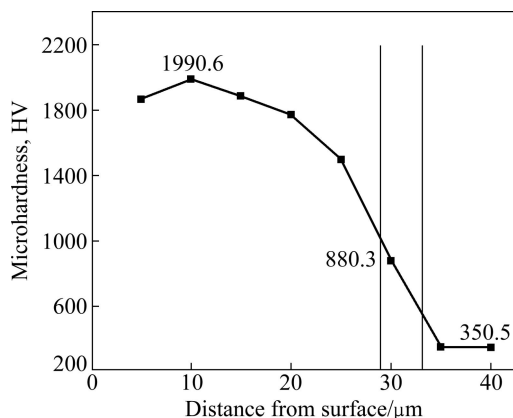


图 6 沉积层的显微硬度分布

Fig. 6 Microhardness evolution of deposition coating

3 结论

1) 在铸钢材料上,电火花沉积亚微米 WC-4Co 陶瓷硬质合金时,沉积层中细小的 Fe_2C 和 Si_2W 等硬质相颗粒弥散分布于 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 沉积层上,提高沉积层的硬度和耐磨性。

2) 电火花沉积属于强制润湿,润湿效果非常好,沉积层与基体呈冶金结合;沉积层组织致密,沉积层厚度大约为 20 μm,沉积层出现大量的超细组织颗粒,部分颗粒可达纳米尺寸;过渡层出现一些超细柱状晶和等轴晶组织结构。超细组织的主要原因是快速加热使形核率提高组织细化;快速加热和快速冷却使晶界、位错和空位增加促使新相形核组织细化;撞击中产生的弹性应变和温度等效应变引起了组织细化。

3) 沉积层硬度分布不均匀,硬质相较多区域的硬度较高,最高可达 1990.6 HV,平均硬度为 1803.1 HV,过渡层显微硬度为 880 HV。

REFERENCES

- [1] WANG Jian-sheng, MENG Hui-min, YU Hong-ying, FAN Zi-shuan, SUN Dong-bai. Surface hardening of Fe-based alloys powders by Nd:YAG laser cladding followed by electrospark deposition with WC-Co cemented carbide[J]. Rare Metals, 2010, 29(4): 380-384.
- [2] LIN Nai-ming, LI Mao-lin, ZOU Jiao-juan, WANG Xiao-guang. Study on fabrication and corrosion resistance of Ni-based alloy coating on P110 steel by electrospark deposition[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(5): 1365-1370.
- [3] 罗 成, 董仕节, 熊 翔. 电火花振动沉积 TiC 功能涂层的显微组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(2): 123-127.
LUO Cheng, DONG Shi-jie, XIONG Xiang. Microstructure and properties of functional coating on spot-welding electrode prepared by vibrating electrospark deposition of TiC[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(2): 123-127.
- [4] WANG Jian-sheng, MENG Hui-min, YU Hong-ying, FAN Zi-shuan, SUN Dong-bai. Characterization and wear behavior of WC-0.8Co coating on cast steel rolls by electro-spark deposition[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(6): 707-713.
- [5] WANG Mao-cai, WANG Wei-fu, XIE Yu-jiang. Electro-spark epitaxial deposition of NiCoCrAlYTa alloy on directionally solidified nickel-based superalloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(5): 795-801.

- [6] 王建升, 郭 鹏, 严大考. 铸钢 0Cr13Ni5Mo 表面 WC-8Co 电火花沉积层的特性研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 256–260.
- WANG Jian-sheng, GUO Peng, YAN Da-kao. Researching on the character of Electro-spark Deposition WC-8Co strengthened coating on the surface of the ZG0Cr13Ni5Mo[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(5): 256–260.
- [7] ALEXANDER V R, ORHAN S. The use of bipolar current pulses in electro spark alloying of metal surfaces[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 168(2): 129–135.
- [8] WANG Jian-sheng, MENG Hui-min, YU Hong-ying, FAN Zi-shuan, SUN Dong-bai. Wear characteristics of spheroidal graphite roll WC-8Co coating produced by electro-spark deposition[J]. Rare Metals, 2010, 29(2): 174–178.
- [9] TANG Chang-bin, LIU, Dao-xin WANG Zhan, GAO Yang. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(15): 6364–6371.
- [10] BURKOY A A, PYACHIN S A. Investigation of WC-Co electrospark coatings with various carbon contents[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 2034–2042.
- [11] PODCHERNYAEVA I A, PANASYUK A D, YURECHKO D V, PARAMONOV A M. High-energy electrospark surface strengthening of steels with composite ceramics[J]. Powder Metallurgy & Metal Ceramics, 2014, 52(11): 656–662.
- [12] KONOVAL V P, UMANSKII O P, PANASYUK A D, LUKYANCHUK O F. Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the properties of electrospark-deposited coatings. I. Mass transfer rate and coating composition[J]. Powder Metallurgy & Metal Ceramics, 2014, 53(1): 31–39.
- [13] TKACHENKO Y G, TKACHENKO D Z, YURCHENKO V F, BRITUN L P, ISAEVA V T. Structure and properties of wear-resistant spark-deposited coatings produced with a titanium carbide alloy anode[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2013, 52(5): 306–313.
- [14] 王要利, 于 华, 石红信, 邱然峰, 张柯柯. 40Cr 钢表面电火花沉积 WC 的界面行为[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(8): 173–176.
- WANG Yao-li, YU Hua, SHI Hong-xin, QIU Ran-feng, ZHANG Ke-ke. Interface behavior of WC coatings on 40Cr steel by electro-spark deposition[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(8): 173–176.
- [15] 徐光晨, 陈翌庆, A LUO, A K SACHDEV. 铝合金表面处理对 AM60/A390 液固扩散连接界面组织及性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 855–862.
- XU Guang-chen, CHEN Yi-qing, A LUO, A K SACHDEV. Effect of aluminum surface treatment on structures and properties of liquid-solid diffusion bonding interface of AM60/A390[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 855–862.
- [16] LUO Cheng, XIONG Xiang, DONG Shi-jie. TiB₂/Ni coatings on surface of copper alloy electrode prepared by electrospark deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(2): 317–321.
- [17] 张瑞珠, 郭 鹏, 王建升, 严大考, 李静瑞. 铸钢 0Cr13Ni5Mo 表面电火花沉积 YG8 涂层的组织和性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3367–3371.
- ZHANG Rui-zhu, GUO Peng, WANG Jian-sheng, YAN Da-kao, LI Jing-rui. Microstructures and properties of YG8 coating on 0Cr13Ni5Mo cast steel fabricated by electro-spark deposition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(12): 3367–3371.
- [18] 乔生儒, 韩 栋, 李 玖. 钢铁表面电火花淬火组织超细化及机理[J]. 机械工程材料, 2004, 28(8): 7–9.
- QIAO Sheng-ru, HAN Dong, LI Jiu. Extra-fine-structure obtained by electrical spark discharge quenching on steel surface[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004, 28(8): 7–9.
- [19] MECEKOV I I, GERIKEN D S, MAZIANKO B F. The problem of mass migration of metal in mechanical accelerator under the conditions of pulsed discharge[J]. Metal Physics and New Technology, 1996, 18(4): 52–53. (in Russia)
- [20] PICAS J A, XIONG Y, PUNSET M. Microstructure and wear resistance of WC-Co by three consolidation processing techniques[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(2): 344–349.
- [21] 韩 春. 电火花沉积 WC-12Co 涂层界面研究及温度场应力场模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 20–22.
- HAN Chun. Research of WC-12Co coating interface and numerical simulation and analysis of temperature field and stress field for Electro spark deposition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 20–22.

(编辑 李艳红)