

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170217004

TiC 生成方式对激光熔覆镍基涂层组织和性能的影响

迟 静, 李 敏, 王淑峰, 李建楠, 赵 健, 吴 杰

(山东科技大学 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 分别以 TiC 粉和 Ti+C 粉为原料, 采用外加法和原位法制备了 TiC/Ni 激光熔覆涂层, 分析了 TiC 生成方式对涂层物相组成、微观组织、硬度和磨损性能的影响。结果表明, 涂层的物相组成不受生成方式的影响; 但 Ti+C 质量分数高于 30% 时, 原位法涂层无法成型, 而外加法可获得 40%TiC 的涂层。外加法涂层中 TiC 以原料 TiC 为主, 少量溶解析出的结晶 TiC; 而原位法涂层中 TiC 全部为结晶析出, 分布更加均匀, 颗粒细小, 枝晶数量增多。原位法涂层的平均硬度和耐磨性均优于相同 TiC 含量的外加法涂层; 涂层中 TiC 含量(质量分数)由 20% 增至 30% 时, 涂层硬度升高, 耐磨性下降, 生成方式引起的磨损性能差异由 5% 降至 0.6%。

关键词: 激光熔覆; TiC; 微观组织; 磨损性能

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)04-0134-08

Effects of TiC Formation Modes on Microstructure and Performance of Ni-based Laser Cladding Coatings

CHI Jing, LI Min, WANG Shu-feng, LI Jian-nan, ZHAO Jian, WU Jie

(College of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong)

Abstract: TiC/Ni laser cladding coatings were fabricated respectively by externally added TiC powders and in-situ formed TiC with Ti+C powders. Effects of TiC formation modes on phase composition, microstructure, microhardness and wear resistance of the coatings were analyzed. Results show that TiC formation modes have little influence on phase composition of the coatings. The TiC/Ni coating is unable to form in-situ when the mass percentages of Ti+C powders in raw materials are above 30%, while the coating with 40% externally added TiC can be obtained successfully. TiC in the ex-situ coating is composed of TiC in raw materials and a small amount of crystalline TiC based on dissolution-precipitation mechanism. While TiC in the in-situ coating is crystalline, which is finer and distributed more uniformly compared with that in the ex-situ coating. Furthermore, more TiC dendrites were observed in the in-situ coating. The average microhardness and wear resistance of the in-situ coating are better than that of the ex-situ coating when the TiC content is the same. With increasing TiC content from 20% to 30%, the hardness of the coating increases, the wear resistance decreases, and the difference in wear resistance caused by the formation method decreases from 5% to 0.6%.

Keywords: laser cladding; TiC; microstructure; wear resistance

收稿日期: 2017-02-17; 修回日期: 2017-06-13

网络出版日期: 2017-06-21 09:34; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170621.0934.008.html>

通讯作者: 吴杰(1979—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 耐磨复合材料; E-mail: wujie0537@163.com

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014EMM009); 青岛市技术创新平台建设计划(14-7-2-42-gx)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2014EMM009) and Technological Innovation Construction Program of Qingdao (14-7-2-42-gx)

引文格式: 迟静, 李敏, 王淑峰, 等. TiC 生成方式对激光熔覆镍基涂层组织和性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 134-141.

CHI J, LI M, WANG S F, et al. Effects of TiC formation modes on microstructure and performance of Ni-based laser cladding coatings[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 134-141.

0 引言

磨损是材料失效的主要形式之一,在材料表面制备耐磨涂层可有效延长易磨损零部件的使用寿命,在工程应用领域具有重要意义^[1-3]。由于TiC陶瓷颗粒熔点高、硬度大、热稳定性好,作为增强相与金属基体复合能显著提高涂层性能,TiC颗粒增强耐磨涂层成为近年来的研究热点^[4-6]。王植^[7]将TiC粉预置在45钢上,制备出TiC质量分数为20%~50%的激光涂层,其中50%TiC涂层存在很多裂纹,TiC颗粒未能与基体冶金结合。Cai等^[8]把TiC粉喷涂在45钢基材上,当TiC体积分数为30%时,涂层磨损率最低(测试参数:GCr15钢对磨球,载荷6~12 N,速度0.1 m/s)。赵雪阳等^[9]对H13钢表面的TiC激光涂层进行磨损试验,结果显示20%TiC涂层耐磨性最佳(测试参数:45钢对磨环,载荷200 N,转速200 r/min)。陈灏等^[10]以Ti粉和C粉为原料,在Q235钢表面制备等离子涂层,研究表明Ti+C粉质量分数大于10%时,涂层中才有TiC的生成。Emamian等^[11]采用同步送粉的方式,使Ti粉和C粉在AISI 1030钢上形成TiC涂层,激光扫描速度由6 mm/s降为4 mm/s,涂层最高显微硬度由800 HVN升至1 200 HVN。

由文献^[4-11]可知,涂层中的TiC通过两种方式生成:一种是直接以TiC粉为原料,称为外加法;

另一种是由原料之间发生反应生成TiC,主要为Ti粉和C粉反应,称为原位法。增强相TiC的特征直接关系到涂层的组织与性能,而目前的研究主要基于一种方法(外加法或原位法)进行涂层制备和性能探索,甚少关注TiC生成方式的不同对涂层造成的影响。此外,文献^[6-11]中TiC涂层的制备方式(粉末体系、基材、制备技术及工艺条件等)和性能测试参数各不相同,无法根据已报道数据对比评价两种生成方式的差异。为此,文中在相同的试验条件下,分别以外加法和原位法制备了TiC耐磨涂层,对比研究了TiC生成方式对涂层的物相组成、微观组织、硬度和耐磨损性能的影响。

1 试验

1.1 试验材料

涂层材料包括镍基自熔性合金粉末Ni60,Ti粉,C粉和TiC粉。其中,Ni60的成分(w%)为:0.9 C,16 Cr,4.5 Si,3.6 B,3.5 Fe,余量Ni;Ti粉为多角形块状,粒度为30~70 μm (图1(a));C粉呈椭圆形,粒度为20~50 μm (图1(b));TiC粉为不规则颗粒,粒度为70~200 μm (图1(c))。基体材料选用Q235钢,尺寸为40 mm×20 mm×10 mm,化学成分(w%)为:C≤0.17,Mn≤0.14,Si≤0.35,S≤0.035,P≤0.035,余量Fe。

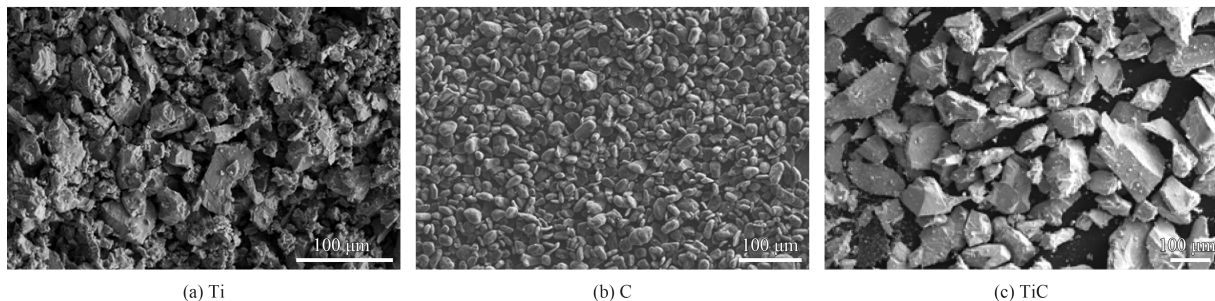


图1 原料粉末形貌

Fig.1 Morphologies of the raw material powders

1.2 试验方法

依据文献[7-10]的研究结果,原料粉末中TiC和Ti+C的质量分数确定为20%~40%,具体配比如表1所示,其中原位法试样Y-(1,2,3)中Ti粉和C粉的摩尔比为1:1。对Q235钢进行打磨和清洗,确保待熔覆表面平整和清洁。激光熔覆时,先将原料粉末用有机粘结剂涂覆在基材Q235钢表面,预制层厚度为2 mm。采用LSSK009

型数控激光熔覆加工设备进行熔覆试验,工作电流240 A,扫描速度230 mm/min,频率14 Hz,脉宽35 ms,选用Ar气作为保护气体。

试样的物相分析采用D/Max 2500PC型X射线衍射仪(XRD),利用Nova Nano SEM450场发射高分辨扫描电镜(FESEM)观察微观组织,微区成分检测采用JXA-8230型电子探针(EPMA)配置的X射线能量色散谱仪(EDS)。用FM-700型维氏显

表 1 试样编号及成分配比

Table 1 Numbers and chemical composition of samples (w/%)

Sample	TiC	Ti+C	Ni60
W-1	20		80
W-2	30		70
W-3	40		60
Y-1		20	80
Y-2		30	70
Y-3		40	60

微硬度计测定涂层硬度，载荷 100 g，加载时间 10 s。在 UMT-3 多功能摩擦磨损试验机上进行干滑动摩擦实验，对磨球为 YG 硬质合金球(90 HRA)，法向加载 100 N，滑动速度 10 mm/s，滑动时间 1 800 s；用精度为 0.1 mg 的电子天平称量磨损失重。

2 结果与分析

2.1 涂层的物相组成

在相同的激光熔覆参数下，以外加法制备的涂层成形均较好；而采用原位法制备时，当 Ti+C 质量分数达到 40%即 Y-3 试样，熔覆过程中飞溅严重，涂层中存在大量的孔洞，如图 2 所示，难以形成完整涂层。论文目的为研究 TiC 生成方式对涂层的影响，因此文中对成型良好的同含量试样 W-1 与 Y-1、W-2 与 Y-2 进行对比分析。

图 3 为涂层的 XRD 谱图，可以看出涂层的物相由 TiC、 γ -(Ni, Fe)和 $(\text{Cr, Ni, Fe})_7(\text{C, B})_3$ 构成，这表明通过外加法 and 原位法均可以制备出以 TiC 为主要增强相的激光熔覆涂层；此外，图 3 还显示所有试样的物相相同，说明 TiC 的生成方式不会改变涂层的物相组成。

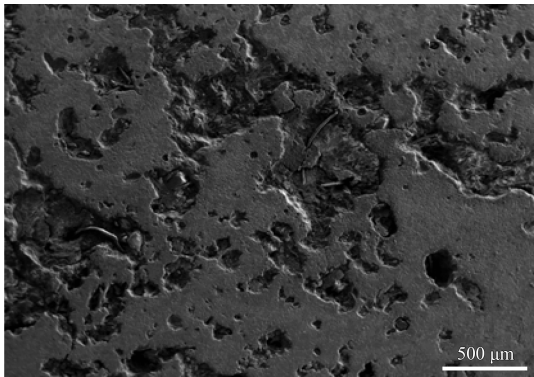


图 2 原位法涂层 Y-3 的形貌

Fig.2 Microstructure of in-situ formed Y-3 coating

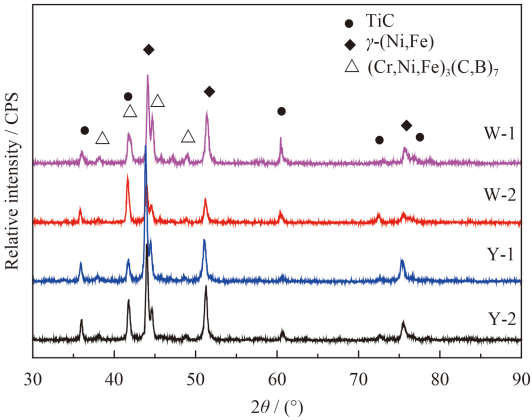


图 3 不同涂层的 X 射线衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of the different cladding coatings

2.2 涂层的微观组织

图 4(a)为外加法涂层的典型形貌，分布着尺寸较大的不规则颗粒，是加入的原料 TiC。与原始形貌相比(图 1(c))，TiC 粒度有所减小，尖锐棱角大多已经消失，边缘变得较为圆滑，这表明 TiC 在激光熔覆过程中发生了部分溶解。在激光束能量作用下，Q235 钢基材表面和其上粘附的涂层材料形成高温熔池，但 TiC 熔点高(3 067 ℃)，不易熔化，因此 TiC 是向高温熔池发生溶解；由于激光熔覆速度快，熔池迅速凝固，因而溶解并不充分，导致涂层中仍保留较多的未溶 TiC。

对图 4(a)中的矩形区域进行放大，如图 4(b)所示，主要微观组织包括暗色基体 A、亮色共晶 B、颗粒 C 和枝晶 D。表 2 的成分分析结果表明，暗色基体 A 为 γ -(Ni, Fe)；亮色共晶组织 B 位于 γ -(Ni, Fe)的晶界，是金属元素 Cr、Fe、Ni 与 C、B 所形成的化合物，结合 XRD 谱图(图 3)，确定为 $(\text{Cr, Ni, Fe})_7(\text{C, B})_3$ 。颗粒 C 尺寸约为 0.5~1.5 μm ，主要由 Ti 和 C 组成(表 2)，为 TiC；枝晶 D 的背散射图像亮度与颗粒 C 相同，EDS 结果(表 2)也显示两者成分相近，因此枝晶 D 也为 TiC。颗粒 C 和枝晶 D 与原料 TiC(图 1(c))的形貌和粒度截然不同，两者应是新生成的 TiC。在激光熔覆过程中，原料 TiC 在熔池中发生溶解，分解为 Ti 和 C，在熔体冷却凝固时，Ti 和 C 重新结晶为 TiC，以颗粒 C 和枝晶 D 的形式析出。

图 4(c)为原位法制备试样的典型形貌，存在一些气孔，其微观结构(图 4(d))与外加法涂层(图 4(b))相似，由 TiC 颗粒、TiC 枝晶、 γ -(Ni, Fe)基体和 $(\text{Cr, Ni, Fe})_7(\text{C, B})_3$ 共晶组成。

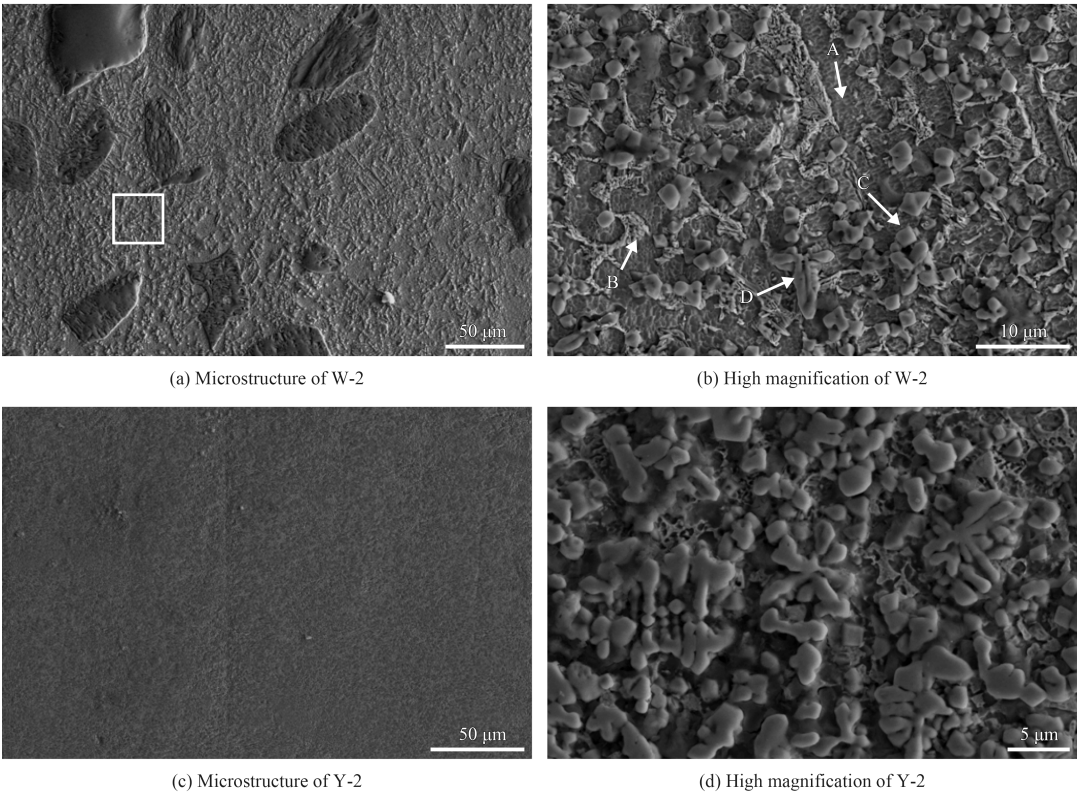


图 4 不同激光熔覆 TiC 涂层的微观形貌

Fig.4 Microstructures of different laser cladding TiC coatings

表 2 W-2 涂层的能谱分析结果

Table 2 EDS analysis results of W-2 coating		(a/%)				
Location	B	C	Ti	Cr	Fe	Ni
A		13.86	0.93	7.21	40.55	37.46
B	24.27	21.22	0.74	17.78	28.10	10.89
C		51.66	47.08		1.26	
D		57.06	41.48		1.46	

图 5 为原位法 Y-2 涂层的 EDS 面扫描结果，C 元素(图 5(b))和 Ti 元素(图 5(c))分布均匀，没有出现宏观偏析，由此表明 TiC 在涂层内部呈弥散分布。原位法是以 Ti 粉和 C 粉为原料，所以 TiC 颗粒和 TiC 枝晶均是在激光熔覆过程中由 Ti、C 反应原位生成，这与外加法涂层(图 4(b))中颗粒 C 和

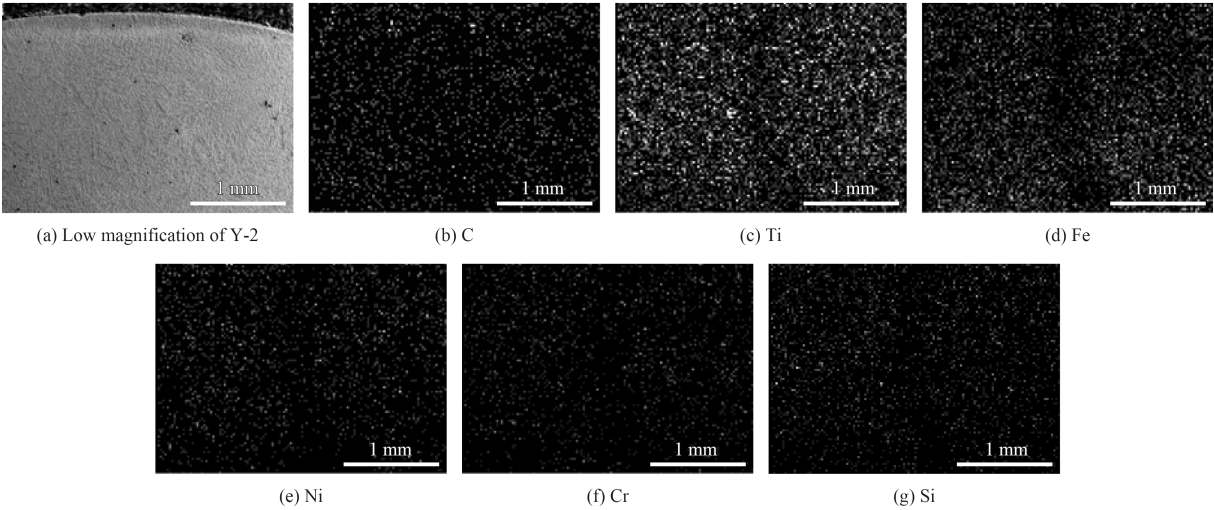


图 5 激光熔覆原位法 Y-2 涂层的元素面分布

Fig.5 Elemental mapping of in-situ formed Y-2 coating by laser cladding

枝晶 D 的形成机理一致, 因此两种方法制备的涂层中, 从熔体结晶析出的 TiC 形貌特征相似。

有所不同的是, 与外加法涂层(图 4(b))相比, 原位法涂层(图 4(d))中的 TiC 颗粒形状规则性稍差, 分布更为密集, 而且枝晶 TiC 的含量明显增多, 尺寸粗大。由上述的微观组织分析结果可知, 两种生成方式制备涂层时, 均存在 $\text{Ti}+\text{C}\rightarrow\text{TiC}$ 的反应过程, 热力学反应生成焓(ΔH)计算结果表明^[12], 该反应为强放热反应, 会瞬间释放大热量。

因此, 原位法中当 Ti 和 C 质量分数增加到 40% 即 Y-3 试样, 飞溅严重, 涂层无法成形; 而外加法中 TiC 为部分溶解, 熔体中的 Ti 和 C 的浓度相对较低, 反应释热较少, 所以利用外加法获得了 TiC 含量相对较高的涂层。

文中的研究目的是对比 TiC 生成方式对涂层的影响, 因此试验采用了相同的工艺条件, 而根据以上分析, 可以推测若适当降低激光能量输入, 使熔池总体热量下降, 原位法涂层中 TiC 的含量有望得到提高。原位法涂层以 C 为原料, 它易与熔池中的 O 反应生成 CO 气体, 而激光熔覆的冷却速度快, 在凝固过程中气体不能完全逸出, 即在涂层中形成了气孔。此外, 迅速释放的大量反应热也会使原位法涂层比外加法涂层更易出现孔洞等缺陷, 对涂层的性能产生不利影响。

2.3 TiC 的结晶形貌

从熔体中结晶析出的 TiC, 其形貌是晶体结构和生长环境共同作用的结果。TiC 空间群为 $Fm\bar{3}m$, 属于 NaCl 结构类型, Ti 和 C 离子的配位数均为 6, 都位于异种离子形成的八面体体心。TiC 的晶面表面能由高到低依次为 $\{110\}$ 、 $\{100\}$ 和 $\{111\}$ ^[13-14], 根据晶体生长定律, 晶面表面能越高, 法向生长速率越大, 随晶体的生长会逐渐缩小直至消失, 而低表面能的晶面则得以保留, 构成晶体的最终形貌, 因此 TiC 的平衡形貌是由 $\{111\}$ 晶面构成的八面体, 如图 6 所示。在激光熔覆快速冷却的非平衡条件下, 晶面的生长速率会受到外部条件如热质传输等因素的扰动而发生改变。当 $\{100\}$ 的生长速率最低时, TiC 颗粒的形貌向立方体演变(图 6)。另外, 熔池冷却速度的变化也会影响 TiC 的结晶形貌。冷却速度的增大, 会使 TiC 的 $\{111\}$ 八面体生长晶核不再均匀增厚, 而是在表面生长出分叉^[15], 这些分叉不断向熔体深

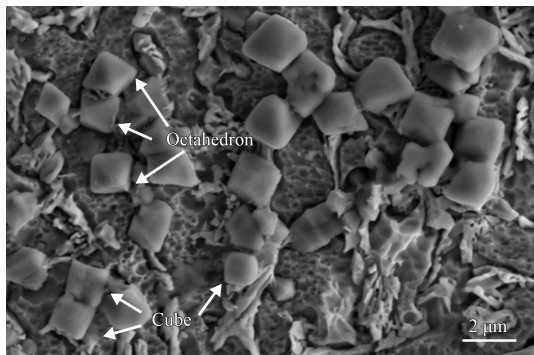


图 6 TiC 颗粒形貌

Fig.6 Morphologies of TiC particles

处推进而逐渐粗化, 最终形成枝晶 TiC。熔池中已生成的 TiC 小晶粒也会被枝晶捕获, 进行合并生长^[16]。

两种方法制备涂层时, 从熔体析出的结晶 TiC 形貌特征相同, 但对于同含量的对比试样(如 W-2 和 Y-2)而言, 由于原位法熔体中 Ti 和 C 的含量要高于外加法, 因而结晶 TiC 的数量多, 分布密集; 大量聚集成核的晶粒在生长过程中相互干扰, 限制彼此的生长空间, 从而造成原位法涂层中 TiC 形貌规则性稍差。此外, Ti-C 体系为强放热反应, 熔体中较高的元素含量会使反应释热显著增多, 熔池的冷却速度变大, 更利于枝晶 TiC 的形成; 同时原位法中较多的 TiC 颗粒也更易被枝晶合并, 使其 TiC 枝晶数量明显多于外加法涂层, 尺寸粗大。

2.4 涂层的显微硬度

图 7 为激光熔覆涂层的显微硬度, 可以看出, 基材 Q235 钢硬度约为 200 $\text{HV}_{0.1}$, 各涂层的硬度远大于基材, 最高显微硬度值均在 1 100 $\text{HV}_{0.1}$ 以

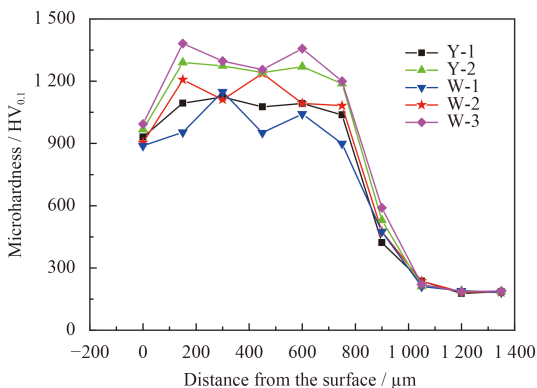


图 7 不同激光熔覆涂层的显微硬度

Fig.7 Microhardness of the different laser cladding coatings

上; 沿涂层横截面, 硬度的分布趋势一致: 表层硬度略低于亚表层, 这与表层受激光束作用时间长, 元素烧损较严重有关; 由于基体的稀释作用, 造成涂层底部比中部硬度显著下降。随涂层中 TiC 含量的增加, 两种生成方式制备涂层的平均硬度都呈现上升趋势, 这是因为 TiC 硬度高, 其数量的增加会使涂层硬度升高。

对比而言, 原位法涂层的硬度分布比外加法涂层更加均匀, 且平均硬度值(Y-1: 968 HV_{0.1}; Y-2: 1 108 HV_{0.1})要高于同含量外加法的对比试样(W-1: 908 HV_{0.1}; W-2: 1 015 HV_{0.1}; W-3: 1 154 HV_{0.1})。TiC 生成方式对涂层硬度产生影响的主要原因是, 在 TiC 含量一定的情况下, 外加法涂层未熔 TiC 粒度大, 因而颗粒数量少; 此外, 由于原料 TiC 为部分溶解, 所以 γ -(Ni, Fe)基体上结晶析出的 TiC 也少, 较多裸露的低硬度基体降低了涂层的平均硬度。而原位法涂层中的 TiC 均是从熔体结晶析出, 数量多, 分布均匀, 这从图 4(d)和图 4(b)中可以明显看出, 从而涂层显微硬度值高, 起伏变化较小。

2.5 涂层的耐磨损性能

由图 8 的摩擦因数曲线可知, 涂层的摩擦因数都明显低于基材, 其中原位法 Y-1 涂层摩擦因数最小为 0.39, 外加法涂层 W-1 的摩擦因数则为 0.58; 而另一组对比试样 W-2 和 Y-2 的摩擦因数却非常相近。图 9 的磨损失重数据显示, 涂层显著提升了基材的耐磨性能, 其磨损量随 TiC 含量增加而升高。与基材相比, 原位法涂层 Y-1 和 Y-2 的磨损量分别降至 7%和 13.4%; 外加法涂层 W-1 和 W-2 的磨损量分别降至 12%和 14%。从而可

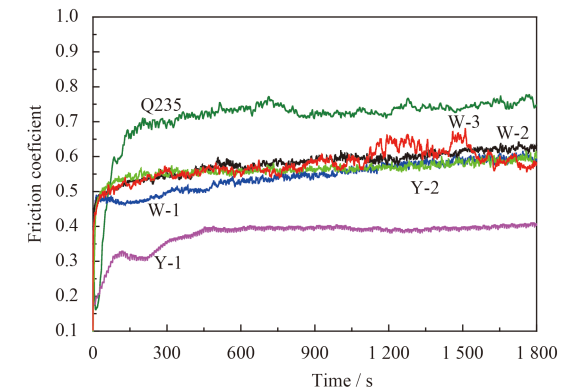


图 8 不同激光熔覆涂层的摩擦因数
Fig.8 Friction coefficient of the different laser cladding coatings

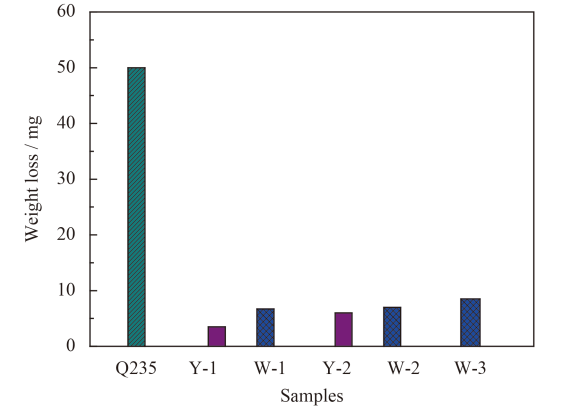


图 9 不同激光熔覆涂层的磨损失重
Fig.9 Weight loss of the different laser cladding coatings

以看出, 原位法涂层的耐磨性优于同含量的外加法涂层, 但随 TiC 质量分数由 20%增到 30%, 生成方式引起的磨损性能差异缩小, 由 5%减为 0.6%。

涂层 Y-1 和 W-1 的磨损表面形貌相似, 如图 10 所示, 主要由平行于滑动方向的细小犁沟和脆性剥落坑构成; 随着涂层 TiC 含量增加, 涂层 Y-2 和 W-2 的磨损表面犁沟减少, 剥落痕迹越来越明显。究其原因, 在磨损过程中较软的 γ -(Ni, Fe)基体受到对磨球的微观切削作用, 形成犁沟; 而涂层中 TiC 硬度高, 可以支撑外加载荷, 对基体起到很好的保护作用, 有效阻止切削的进行。但高硬度的 TiC 在高载荷周期性重复作用下, 会产生疲劳磨损或由于应力集中而萌发裂纹, 进而从表面脱落。涂层 TiC 含量升高时, 虽对基体的保护增强, 但同时由于 TiC 颗粒增多, 试样平均硬度升高, 裂纹更易产生, 脆性剥落程度加重。此外, Ti 和 C 反应释放出的热量, 会使涂层易于形成气孔等缺陷, 因此涂层 TiC 含量的增加引起缺陷增多, 磨损加重。TiC 生成方式对涂层耐磨性产生影响的原因是, 原位法涂层中 TiC 弥散分布, 对基体保护作用强; 而外加法涂层中未熔 TiC 粒度大, 数量少, 较多面积的基体不受保护; 此外, 大粒度的未溶 TiC 与基体结合力弱, 更易脱落, 其脱落后引起的磨损失重增值显著, 因此原位法涂层耐磨性优于同含量的外加法涂层。但与外加法涂层存有较多未熔原料 TiC 不同, 原位法涂层的 TiC 全由 Ti 和 C 反应形成, 因此当其含量增加时, 释放热量急剧上升, 所引发的气孔等缺陷多于外加法涂层, 从而导致原位法涂层 Y-2 与外加法涂层 W-2 的耐磨性差异减小。

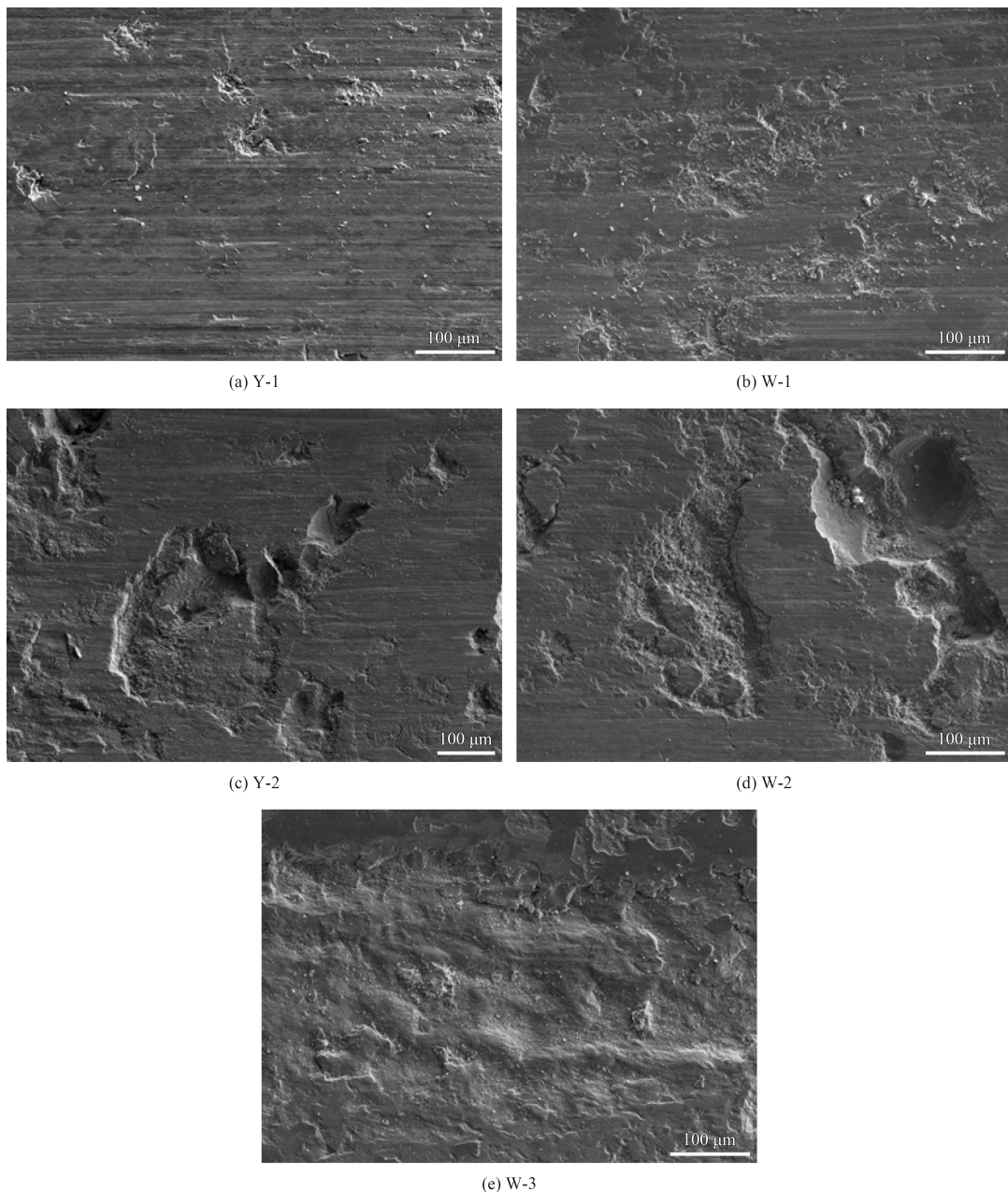


图 10 不同激光熔覆涂层的磨损表面形貌

Fig.10 Worn surfaces morphologies of the different laser cladding coatings

3 结 论

(1) 采用外加法(以微米 TiC 为原料)和原位法(以微米 Ti+C 粉为原料)均能制备出 TiC/Ni 激光涂层;受 Ti-C 强放热体系的制约, TiC 质量分数高于 30%的涂层需用外加法制备。

(2) 外加法涂层中的 TiC 包括未溶原料 TiC 和少量从熔体中析出的结晶 TiC, 而原位法涂层中全部为结晶 TiC。结晶 TiC 为细小的八面体、立方体和枝晶, 其形貌不受 TiC 生成方式的影响,

但在原位法涂层中分布更均匀。

(3) 原位法涂层的平均硬度和耐磨性均优于相同 TiC 含量的外加法涂层;但随着 TiC 含量的增加, 原位法涂层产生的气孔等缺陷, 导致磨损性能下降;当 TiC 质量分数增至 30%时, 生成方式引起的磨损性能差异降为 0.6%。

参考文献

- [1] 陈希章, 胡科, 袁其兵. 激光熔敷原位合成 WC 增强铁基复合涂层的组织和性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 118-124.

- CHEN X Z, HU K, YUAN Q B. Microstructure and performance of WC reinforced Fe-base composite coating synthesized in-situ produced by laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 118-124 (in Chinese).
- [2] FU Y, ZHANG X C, SUI J F, et al. Microstructure and wear resistance of one-step in-situ synthesized TiN/Al composite coatings on Ti6Al4V alloy by a laser nitriding process[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 67: 78-85.
- [3] 徐金涛, 李安, 刘栋, 等. 激光熔覆Cr₃Si/γ多相涂层耐蚀性和耐磨性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303006.
- XU J T, LI A, LIU D, et al. Research on corrosion resistance and wear resistance of laser cladding Cr₃Si/γ multi-phase coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303006 (in Chinese).
- [4] 陈大智, 何剪太, 张阳德, 等. 医用钢316L表面制备TiC/Ni涂层的反应喷涂锻造工艺[J]. 中国表面工程, 2014, 27(3): 65-70.
- CHEN D Z, HE J T, ZHANG Y D. Technology of reactive spray forging to TiC/Ni coating on the surface of 316L steel for medical use[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(3): 65-70 (in Chinese).
- [5] MURRAYA J W, ALODIA S J, FAYB M W, et al. Formation mechanism of electrical discharge TiC-Fe composite coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 143-151.
- [6] TANG J M. Mechanical and tribological properties of the TiC-TiB₂ composite coating deposited on 40Cr-steel by electro spark deposition[J]. Applied Surface Science, 2016, 365: 202-208.
- [7] 王植, 雷剑波, 姜伟, 等. 激光熔覆Fe基TiC涂层的组织与性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21(1): 44-49.
- WANG Z, LEI J B, JIANG W, et al. Microstructure and properties of Fe-based TiC laser cladding coatings[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2016, 21(1): 44-49 (in Chinese).
- [8] CAI B, TAN Y F, HE L, et al. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23: 1681-1688.
- [9] 赵雪阳, 刘英, 夏一龙, 等. H13钢激光熔覆TiC/Ni合金复合涂层的组织与耐磨性[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(4): 190-196.
- ZHAO X Y, LIU Y, XIA Y L, et al. Microstructure and wear resistance of TiC/Ni based alloy composite coatings on H13 steel by laser cladding[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2016, 37(4): 190-196 (in Chinese).
- [10] 陈灏, 羊建高, 陈米宋. 等离子束表面冶金原位颗粒增强TiC复合超厚涂层研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40: 365-368.
- CHEN H, YANG J G, CHEN M S. In-situ synthesis of TiC particle reinforced Fe base alloy composite ultra-thick coating by plasma jet surface metallurgy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40: 365-368 (in Chinese).
- [11] EMAMIAN A, CORBIN S F, KHAJEPOUR A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality an in-situ formed microstructure of Fe-TiC composite coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 25: 2007-2015.
- [12] 曹磊. 熔铸法制备TiC/Ti-6Al-4V复合材料组织与力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- CAO L. Research on microstructure and mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites fabricated by melting-casting process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [13] XIA Y, XIONG Y, LIN B, et al. Shape-controlled synthesis of metal nanocrystals: simple chemistry meets complex physics[J]. Angewandte Chemie (International Edition), 2009, 48: 60-103.
- [14] FANG L H, WANG L, GONG J H, et al. First-principles study of bulk and (001) surface of TiC[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 5: 857-862.
- [15] 王华明, 于利根, 李晓轩, 等. MC碳化物准快速凝固形态与生长机制研究[J]. 金属学报, 1999, 35(12): 1246-1248.
- WANG H M, YU L G, LI X X, et al. Growth morphology and mechanism of MC carbide under quasi-rapid solidification conditions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(12): 1246-1248 (in Chinese).
- [16] 裴宇韬. 激光熔覆TiCp/Ni合金自生梯度涂层及其自生机制[J]. 金属学报, 1998, 34(9): 987-991.
- PEI Y T. Laser clad TiCp/Ni alloy functionally gradient coating and its in-situ formation mechanism[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 34(9): 987-991 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)