doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.06.014

铝基非晶纳米晶复合涂层的喷涂工艺*

张秦梁,梁秀兵,张志彬,陈永雄,胡尧强

(装甲兵工程学院机械产品再制造国家工程研究中心,北京100072)

摘 要:为了研究喷涂参数对涂层性能的影响规律,采用高速电弧喷涂技术制备铝基非晶纳米晶复合涂层,利用正交试验法系统研究喷涂电流、喷涂电压、喷涂距离、喷枪移动速度和雾化空气压力对涂层性能的影响规律。优化后的工艺参数为喷涂电流 160 A,喷涂电压 36 V,喷涂距离 200 mm,喷枪移动速度 300 mm/s,雾化空气压力 0.7 MPa,喷涂参数 对涂层性能影响的主次顺序为:雾化空气压力、喷涂电压、喷枪移动速度、喷涂电流和喷涂距离。采用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)和透射电镜(TEM)对工艺优化后的涂层进行分析,同时对涂层的显微硬度 和孔隙率进行了测试。结果表明,采用优化参数制备的涂层组织结构致密,孔隙率为 1.13%,硬度可达 392 HV_{0.1},涂层 具有明显的非晶纳米晶相,非晶含量约为 24.2%。

关键词:高速电弧喷涂;铝基非晶纳米晶;孔隙率;显微硬度 **中图分类号:**TG174.442 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-9289(2015)06-0104-07

Spraying Process of Al-based Amorphous and Nanocrystalline Composite Coatings

ZHANG Qin-liang, LIANG Xiu-bing, ZHANG Zhi-bin, CHEN Yong-xiong, HU Yao-qiang (National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: To investigate the effect of spray parameters on coating properties, the Al-based amorphous and nanocrystalline composite coatings were prepared by high velocity arc spraying technique under different spraying processes. The effects of spray parameters, such as spray current, voltage, distance, gun movement speed and air pressure on the coating characterizations were investigated. The orthogonal experiment results show that the optimum spraying process parameters are sprayed by a current of 160 A, spray voltage of 36 V, pray distance of 200 mm, gun transverse speed of 300 mm/s, and air pressure of 0.7 MPa. The primary and secondary orders of spray parameters on coating performance is air pressure, spray voltage, gun transverse speed, spray current, and pray distance. The microstructures of the coatings were analyzed by the scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spetrometer (EDS), X – ray diffraction (XRD) and transmission electron microscope (TEM). The microhardness and porosity of the coating were tested. The results show that the composite coatings under the spraying parameters have a compact structure with a low porosity of about 1.13%, and the microhardness value of 392 HV_{0.1}. The volumn fraction of amorphous phase is 24.2%.

Keywords: high velocity arc spraying; Al-based amorphous and nanocrystalline; porosity; microhardness

收稿日期: 2015-05-22; 修回日期: 2015-08-26; 基金项目: *国家自然科学基金(51375492); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-13-1068)

通讯作者:张秦梁(1988-),男(汉),硕士生;研究方向:材料加工工程;Tel:(010)66719249;E-mail:zhangqinliang01@sina.com

网络出版日期: 2015-12-09 08:35; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151209.0835.008.html

引文格式: 张秦梁,梁秀兵,张志彬,等. 铝基非晶纳米晶复合涂层的喷涂工艺 [J]. 中国表面工程,2015,28(6):104-110. Zhang Q L, Liang X B, Zhang Z B, et al. Spraying process of Al-based amorphous and nanocrystalline composite coatings [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 104-110.

0 引 言

近年来,热喷涂非晶材料的研究已成为学者 们关注的焦点。非晶态合金具有极高的硬度,良 好的韧性、耐磨性和耐蚀性,目前已在电子、机 械、化工等行业得到广泛应用。

非晶材料与晶态材料相比,组织结构和成分 更加均匀,不存在晶界、位错等容易引发局部腐 蚀的晶体缺陷,具有更加优异的耐磨和防腐性 能。纳米晶材料的晶粒细小,大量原子处在晶界 上,存在高体积分数的三叉晶界,表现出了比普 通晶态材料和非晶材料更高的强度和塑性变形 能力等。同时,非晶前驱体的部分纳米化可以提 高其耐磨性能,改善材料塑性。非晶纳米晶复合 涂层的制备在工艺上要求具有很高的冷却速率 以抑制熔融态合金的结晶。在开发非晶纳米晶 等亚稳态复合材料的技术中,高速电弧喷涂是创 新型较强、发展较快的新技术之一,且具备材料 制备与成形一体化的特征,在装备维修与再制造 以及快速成形等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。

作者所在团队^[4]采用高速电弧喷涂技术,在 AZ91 镁合金表面制备出结构致密的 Al-Ni-Mm -Co 非晶纳米晶复合涂层。涂层孔隙率低于 2%, 硬度值为 311.7 HV_{0.1},结合强度为 26.8 MPa,其 耐磨性为纯铝涂层的数倍以上,综合性能优异。 文中旨在研究电弧喷涂工艺参数对铝基非晶纳 米晶涂层性能的影响,采用高速电弧喷涂系统, 在 45 钢表面制备铝基非晶纳米晶涂层,以涂层 显微硬度和孔隙率为指标,优化喷涂工艺,分析 工艺优化后涂层性能及组织形貌。

1 材料及方法

1.1 试验材料

基体材料为 45 钢,喷涂前,用丙酮清洗以除 油净化,并进行喷砂预处理。喷砂选用 710 μ m 棕刚玉,气压 0.7 MPa,喷砂角度 70°,喷砂距离 100 mm。喷涂材料为课题组研制的 Φ 2 mm 铝 基粉芯丝材,涂层合金成分选用 Al-Ni-Mm-Co 合金体系,其中 Mm 为镧系混合稀土元素,质量 分数分别为 48% ~52% Ce、25% ~28% La、 14%~17% Nd 和 4%~6% Pr 等稀土元素。

1.2 涂层制备

采用的自动化高速电弧喷涂系统由 Moto-

man 机器人控制,由自行研制的 HAS-02 型高速 喷枪和电源系统等组成。喷涂过程中以压缩空 气做雾化气体,涂层厚度保持在 300~350 μ m。选 取喷涂电流、喷涂电压、喷涂距离、喷枪移动速度和 雾化空气压力等 5 个参数。根据 $L_{16}(4^5)$ 正交表, 建立正交设计方案,如表 1 所示。

表1 正交试验因素水平表

 Table 1
 Factors and levels of the orthogonal test

Spray parameters	1	2	3	4
Spray current/A	100	120	140	160
Spray voltage/V	30	32	34	36
Spray distance/mm	150	180	200	230
Gun movement speed/ $(mm \cdot s^{-1})$	200	300	400	500
Air pressure/MPa	0.4	0.5	0.6	0.7

1.3 分析方法

显微硬度测量:采用 FM 700 型显微硬度计 测量涂层截面的显微硬度。载荷为 100 g,加载 时间为 15 s,测量前对试样涂层横截面进行研磨、 抛光、超声清洗。表面显微硬度在涂层横截面间 隔取点测量,每测量 10 次取其算数平均值。

孔隙率测量:采用装备再制造技术国防科技 重点实验室研制的图像处理软件,利用灰度法计 算涂层孔隙率。对每个涂层试样采集 10 张微观 照片,基于灰度法进行计算,取其平均值作为涂 层的孔隙率。

涂层微观结构及成分分析:采用 Quanta 200 型环境扫描电镜(SEM)观测涂层表面及横截面 微观结构,并利用其配套的能谱仪(EDS)对涂层 进行成分分析。采用德国 AXS 公司生产的 D8 型 X 射线衍射仪(XRD)分析涂层的相结构。最 后利用日本 JEM-2010 型透射电镜(TEM)观察 涂层微观组织结构。

2 结果与分析

2.1 涂层性能衡量标准

分别对试样进行硬度和孔隙率测量,并采用 综合加权评分的方式对涂层综合性能进行分析, 综合加权评分公式如下:

$$Y_i = a_{i1} y_{i1} + a_{i2} y_{i2} + \dots + a_{ij} y_{ij}$$
(1)

式中,*a_{ij}*为系数,*y_{ij}*为试验指标;下标*i、j*表示第*i*组试验的第*j*个指标。各个试验指标的变化范围为:*Z_i*(最大值与最小值的差)得:

$$Z_1 = 3.96 - 1.12 = 2.84$$
 (2)

$$Z_2 = 410 - 233 = 117 \tag{3}$$

其中,3.96 和 1.12 分别为 16 组试验中孔隙 率的最大值和最小值;410 和 233 分别为试验中 显微硬度的最大值和最小值。

根据涂层孔隙率和显微硬度对 45 钢表面铝 基非晶纳米晶涂层性能的影响程度分别给予加 权,使之在最终分值中有所反应。由于在涂层厚 度一致的情况下,铝基非晶纳米晶涂层的硬度是 由涂层结构和非晶含量决定的,而孔隙率不仅能 在一定程度上影响涂层硬度,还能影响涂层的耐 腐蚀性能和结合强度。并且孔隙率反映了涂层 的致密性,其优劣直接影响了涂层的耐腐蚀性 能,而得到优质的防腐涂层是试验的最终目的, 因此综合评分定为 100 分,孔隙率定为 60 分,显 微硬度 40 分,则可得系数为:

$$a_{i1} = -60/2.84 = -21$$
 (4)

$$a_{i2} = 40/177 = 0.23 \tag{5}$$

由于孔隙率越大则涂层质量和性能越差,设 定其系数为负值。由加权公式计算各组实验的 综合性能评分,结果如表2所示。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of the orthogonal te	est
--------------------------------------	-----

	А	В	С	D	Е	
No.	Spray current/ A	Spray voltage/ V	Spray distance/ mm	Gun movement speed/ $(mm \cdot s^{-1})$	Air pressure/ MPa	-
K1	2.392	2.785	2.570	2.598	2.893	The significance of influence
K2	2.630	2.775	2.165	1.757	2.897	factors of porosity:
K3	2.315	2.263	2.053	2.035	1.995	E>B>D>A>C
K4	1.940	1.455	2.490	2.888	1.493	The best combination:
R	0.690	1.330	0.517	1.131	1.404	$A_4 \ B_4 \ C_3 \ D_2 \ E_4$
K1	299.25	291.50	313.75	300.50	287.75	
K2	300.00	304.25	322.50	340.25	293.50	factors of microhardness:
K3	345.00	324.00	319.75	319.00	331.75	E>B>A>D>C
K4	315.50	340.00	303.75	300.00	346.75	The best combination:
R	45.75	48.50	18.75	40.25	59.00	$A_3 \ B_4 \ C_2 \ D_2 \ E_4$
K1	18.585	8.560	18.193	14.568	5.440	The significance of influence
K2	13.770	11.703	28.710	41.350	6.657	factors of integration capability:
K3	30.735	27.008	30.440	30.635	34.407	E>B>D>A>C
K4	31.825	47.645	17.572	8.362	48.410	The best combination:
R	18.055	39.085	12.868	32.988	42.970	$A_4 \ B_4 \ C_3 \ D_2 \ E_4$

由表 2 分析可知,获得涂层最优性能的喷涂 工艺参数为:喷涂电流 160 A,喷涂电压 36 V,喷 涂距离 200 mm,喷枪移动速度 300 mm/s,雾化 空气压力 0.7 MPa。

2.2 不同因素对涂层性能的影响

由正交试验结果可知各因素对涂层孔隙率和

显微硬度的影响。如图1所示,随着喷涂电流的增加,涂层孔隙率和显微硬度先增加后减小,但变化频率不同;随着喷涂电压和雾化空气压力的增加,涂层孔隙率持续减小,显微硬度则持续增加;随着喷涂距离的增加和移动速度的变快,涂层孔隙率先减小后增加,显微硬度变化与其相反。





根据两者对涂层影响因素和加权评分公式, 可得各工艺参数对涂层综合性能的影响,如图 2 所示。可以看出,雾化空气压力和喷涂电压是对 涂层性能影响较大的两个因素,涂层综合性能随 两者不断上升而持续增加;随着喷涂距离和喷枪 移动速度的增加,涂层综合性能先增加后减小; 随着喷涂电流的增加,涂层综合性能先减小后 增加。



图 2 不同因素和水平对涂层综合性能的影响 Fig. 2 Effect of the different factors and levels on the combination properties of the coatings

2.2.1 雾化空气压力

铝基非晶纳米晶涂层综合性能受雾化空气 压力的影响最大。雾化空气压力的增大,会提升 熔融粒子的雾化效果,使熔融粒子动能增大,熔 滴尺寸减小,熔滴动能增强,粒子撞击基体后扁 平化明显,使得涂层组织细化、结构致密^[5-6]。并 且压缩空气气压越大,熔滴撞击基体后冷却速度 越快,越能够形成非晶相,涂层的显微硬度越高。

2.2.2 喷涂电压

当喷涂电压较低时,弧区产生的热能不能使 喷涂粒子充分熔化,熔滴表面张力增加,喷涂粒 子之间相互结合不够紧密,导致涂层空隙增多, 涂层硬度较差。随着电压的不断升高,弧区间温 度不断增加,喷涂粒子充分熔化,粒子的热焓值 增大,熔滴表面张力减小,致使雾化后的粒子颗 粒变小且速度增加,具有较高动能,粒子撞击基 体后扁平化程度更高,相互嵌合重叠使涂层致密 性更好^[5-7]。并且高温粒子以高速撞击到基体上 迅速冷却,在此过程中,局部晶粒形核,形成纳米 晶粒,使涂层得到强化,涂层显微硬度提高。 2.2.3 喷涂电流

喷涂电流不仅影响弧区温度,还直接影响送 丝速度。增加喷涂电流,使得弧区温度升高,熔 滴温度和流动性增强,使得粒子在撞击基体后涂 层致密度提升,提高了涂层的显微硬度^[8]。随着 喷涂电流的增加,送丝速度变快,熔滴具有较大 的初始速度,送丝速度越快,单位时间内丝材熔 化量越多,雾化粒子所含的热焓就多,但如果送 丝速度过快,熔滴会变大,撞击到基体表面易产 生飞溅,进而影响涂层致密性^[5-7]。并且熔滴过大 使其在撞击基体后,温度下降速率变慢,不易形 成非晶相,导致涂层硬度降低。 移动速度过慢时,喷枪的焰流与涂层长时间 接触,使熔滴在扁平化的过程中冷却速率下降, 不易形成非晶涂层。喷枪速度过快,会使涂层沉 积率降低,涂层结构稀松,导致涂层致密性差,涂 层硬度降低。

2.2.5 喷涂距离

当喷涂距离很小时,电弧对基体的热影响过 大,涂层的内应力增加,涂层之间的结合强度降 低,同时粒子的冷却速率变慢,不易形成非晶相。 并且较短的飞行距离使得熔滴雾化不充分,粒子 沉积率下降,涂层显微硬度较差^[5-7]。但当喷涂距 离过大时,熔融粒子的飞行速度和温度越来越 低,动能减小,熔滴过冷倾向较大,凝固速度变 快,熔滴流动性变差,粒子扁平化程度降低,导致 涂层颗粒之间结合效果变差,涂层之间结合不紧 密,涂层显微硬度降低。

3 最优喷涂参数下涂层的组织与性能

3.1 形貌和成分

采用最佳喷涂工艺参数,制备铝基非晶纳米 晶复合涂层,利用 SEM 对涂层表面及横截面微 观结构进行观测,如图 3 所示。

图 3(a)为 Al-Ni-Mm-Co 涂层与基体截面 形貌,可以看出涂层的厚度约为 400 μm。涂层组 织均匀,结构致密,呈现层状结构,层与层之间结 合完好,没有明显裂纹、空隙等缺陷(见图 3(b))。

为了研究涂层中各元素的分布状况,及其对 涂层性能的影响,对涂层不同微区进行能谱分 析,结果如表3所示。

涂层主要由大量的 A 和 B 区组成,并含有部 分的 C 区,而 D 区含量很少。经 EDS 分析, A 和 B 区域共同含有的成分为 Al、Ni、Mm、和 Co, 且 Al 元素含量居多。不同之处为 A 中含有 O 元 素,而 B 中则几乎没有 O 元素存在,这是因为 A 区中含有氧化物相, 而 B 区中氧化物相的含量极 低。C 区主要元素为 Al、Ni、Co 和 O 元素, 且该 区域为 Al 富集区。D 区为涂层中个例,分布极 少,该区域 O 元素含量很高,是由于 Al 元素的高 度亲氧性造成的。

3.2 相结构

利用 X 射线衍射仪对涂层相结构进行分析, 结果如图 4 所示。



(a) Cross section



(b) Magnification of marked area in (a)

图 3 Al-Ni-Mm-Co 涂层的截面形貌 Fig. 3 Cross section morphologies of the Al-Ni-Mm-Co coating

表 3 Al-Ni-Mm-Co 涂层中各微区成分

Table 3 EDS analysis result of micro zones in the Al-Ni-Mm-Co coating (a/%)

Area	Al	Ni	Mm	Co	0
А	55.80	31.20	4.73	4.25	4.02
В	81.71	14.19	2.81	1.28	
С	90.70	2.60	0.56	0.30	5.83
D	20.17	8.57	9.64	0.73	60.89



图 4 Al-Ni-Mm-Co 涂层的 XRD 图谱 Fig. 4 XRD patterns of the Al-Ni-Mm-Co coating

由图 4 可知,工艺优化后涂层的 XRD 图谱 在 $2\theta=30^{\circ}\sim50^{\circ}$ 的范围内出现较宽的漫散射峰,该 峰为非晶相存在的典型特征,经分析为 α -Al 相、 AlNi 相、Al₃Ce 相和 Al₁₃Co₄ 相等晶化相。通过 Verdon^[9]方法对 XRD 图谱进行函数拟合计算得 到该涂层中非晶相体积分数约为 24.2%,可以认 为,涂层中具有 Al 基非晶相。

3.3 微观组织

图 5 为 Al-Ni-Mm-Co 非晶纳米晶涂层的 投射电镜明场像形貌及其选区电子衍射花样。 其中图 5(a)是涂层中非晶相的明场像形貌及其 选区电子衍射花样。从中可以看出涂层内部组 织比较均匀,微观组织衬度均一,选区电子衍射 花样的特点是中心有一漫散射的中心斑点及漫 散环。这是典型的非晶相的衍射斑点特征,说明 涂层中有完全非晶区域。

图 5(b)是涂层中非晶纳米晶微观组织形貌 及其选区电子衍射花样。衍射花样中心存在较 宽的晕及漫散的环,同时在漫散的非晶衍射环上 存在一些小的多晶衍射斑点,说明涂层是由非晶 相和纳米晶相共同组成的。



(a) Amorphous



(b) Amorphous and nanocrystalline

图 5 Al-Ni-Mm-Co 涂层的晶相微观组织形貌 Fig. 5 TEM images of Al-Ni-Mm-Co amorphous and nanocrystalline coating 将 XRD 和 TEM 结果综合分析后,可以得出 优化工艺后的涂层是由非晶相、纳米晶相和晶化 相共同的组成的。

经测量,该涂层孔隙率为1.13%,硬度值为 392 HV_{0.1}。可以认为,正是由于非晶相的存在, 使得层层叠加的粒子之间产生了塑性变形,进而 提高了涂层的致密性,且非晶相具有较高的硬 度,使得涂层硬度较高。

4 结 论

(1)影响铝基非晶纳米晶复合涂层综合性能的高速电弧喷涂工艺参数的主次顺序为雾化空 气压力>喷涂电压>喷枪移动速度>喷涂电流> 喷涂距离。

(2)涂层综合性能随着雾化空气压力的增加 而增加,随着喷涂电压的增加而增加,随着喷枪 移动速度的增加先增加后减小,随着喷涂电流的 增加先减小后增加,随着喷涂距离的增加先增加 后减小。

(3) 在雾化空气压力 0.7 MPa,喷涂电压 36 V, 喷涂电流 160 A,喷枪移动速度 300 mm/s,喷涂 距离 200 mm 的条件下制备的高速电弧喷涂铝基 非晶纳米晶复合涂层组织致密,具有明显的非晶 和纳 米 晶 相,非 晶 含 量 为 24.2%,孔 隙 率 为 1.13%,显微硬度可达 392 HV_{0.1}。

参考文献

- Xu B S. High velocity arc spray and its prospects [C].
 2000 ASM International Material Conference Proceeding, St. Louis, USA, 2000; 9-15.
- [2] 梁秀兵,陈永雄,程江波,等. 电弧喷涂亚稳态复合涂层 技术 [M]. 北京:科学出版社, 2014:2.
 Liang X B, Chen Y X, Cheng J B, et al. The arc spraying metastable composite coating technology [M]. Science Press, 2014:2 (in Chinese).
- [3] Regina M H, Pombo R, Ramon S C, et al. Comparision of aluminum coatings deposited by flame spray and by electric arc spray [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202 (1): 172-179.
- [4] 梁秀兵,张志彬,陈永雄,等. 铝基非晶纳米晶复合涂层 研究 [J]. 金属学报, 2012, 48(3): 289-297.
 Liang X B, Zhang Z B, Chen Y X, et al. Study on Al-based amorphous and nanocrystalline composite coating [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(3): 289-297 (in Chinese).
- [5] 董晓焕,张振云,李琼伟,等.工艺参数对高速电弧喷涂 Al/1Cr13复合涂层组织结构的影响[J].中国表面工程, 2012,25(1):65-70.

Dong X H, Zhang Z Y, Li Q W, et al. Effects of spray parameters on microstructure of high velocity arc sprayed Al/ 1Cr13 composite coatings [J]. China Surface Engineering, 2012, 25(1): 65-70 (in Chinese).

[6] 张志彬,梁秀兵,陈永雄,等. 高速电弧喷涂铝基非晶纳 米晶复合涂层的组织及性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012,41(5):872-876.

Zhang Z B, Liang X B, Chen Y X, et al. Microstructure and performance of al-based amorphous and nanocrystalline composite coatings prepared by high velocity arc spraying [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41 (5): 872-876 (in Chinese).

 [7] 楼淼,芦玉峰,刘振兴,等. 电弧喷涂工艺参数对 Zn-Al 合金涂层性能的影响 [J]. 金属热处理,2011,36(9):34-37. Lou M, Lu Y F, Liu Z X, et al. Effect of arc spraying parameters on performances of Zn-Al alloy coating [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(9): 34-37 (in Chinese).

- [8] 朱满,杨根仓,程素玲,等. Al₇₂Ni₁₂Co₁₆准晶颗粒/铝基 复合材料中的相转变及其力学性能[J].稀有金属材料与 工程,2010,39(9):1604-1608.
 Zhu M, Yang G C, Cheng S L, et al. Phase transition and mechanical properties of al-based composites reinforced by Al₇₂Ni₁₂Co₁₆ decagonal quasicrystalline particles [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1604 -1608 (in Chinese).
- [9] Verdon C, Karimi A and Martin J L. A study of high velocity oxy - fuel thermally sprayed tungsten carbide based coatings. Part 1: Microstructures [J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 246(1/2): 11-24.

(责任编辑:王文宇)

本刊关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标 GB/T7714-2005,并参考 CAJ-CDB/T1-1998 技术规范,采用顺序编码 著录,依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出,并将序号至于方括号内,排列于文后。参考文 献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且各项信息齐全,作者的英文名采用姓前名后格式,姓用全 称且首字母大写,名用缩写且保留大写的首字母,作者在3名以上只列前3名,后加",等";题名后应标 注文献标识类型;期刊名称(包括英文期刊)采用全称;著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式 如下:

①期刊:[序号] 作者. 文名[J]. 刊名, 出版年, 卷(期):起止页码.

②论文集:[序号] 作者.题名[C].编者.文集名,出版地:出版者,出版年,起止页码.

③学位论文:[序号] 作者.题名[D].保存地:学位授予单位,年份.

④专著:[序号] 著者名. 书名[M]. 版本. 出版地:出版者,出版年.

⑤报告:[序号] 作者名. 报告题名[R]. 出版地:出版者,出版年.

⑥标准:[序号]标准代号.标准顺序号-发布年.标准名称[S].

⑦专利:[序号] 专利所有者. 专刊题名[P]. 专利国名:专利号. 年一月一日(批准日期).

⑧报纸:[序号] 作者. 题名[N]. 报纸名, 年一月一日(版次).

⑨电子文献:[序号] 作者名.题名[J/OL]([EB/OL]或[DB/OL]).电子文献出处或可获得的地址,发表或更新日期.

另为适应国际数据库的要求,从 2014(6)期开始,本刊要求原属中文的参考文献需同时标出其对应 的英文格式。例如:

[1]何家文. 追溯历史评表面形变纳米化 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.

He J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).

(本刊编辑部 供稿)