

文章编号: 1000-3851(2003)05-0016-06

陶瓷颗粒增强镍合金复合涂层冲蚀磨损的试验研究

孙永立¹, 龚正春², 关国军², 陆慧林¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 哈尔滨 150046)

摘要: 以 WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 陶瓷颗粒为增强相, 镍合金粉末为基体, 运用等离子喷涂技术制备四种陶瓷/镍合金复合涂层。采用冲蚀磨损试验机和正交试验方法, 进行陶瓷颗粒相浓度、磨粒粒度、冲蚀角和速度对陶瓷颗粒/镍合金复合涂层抗冲蚀磨损性能影响的试验研究。采用表面形状测量仪对陶瓷颗粒/镍合金复合涂层磨损表面形貌进行测量和分析。试验结果得到 WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 四种陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损率的经验关联式。

关键词: 陶瓷颗粒; 复合涂层; 冲蚀磨损

中图分类号: TB331; TB330 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY OF EROSIVE WEAR RESISTANCE OF CERAMIC PARTICLES REINFORCED NICKEL ALLOY COMPOSITE COATINGS

SUN Yongli¹, GONG Zhengchun², GUAN Guojun², LU Huilin¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Harbin Boiler Company Ltd., Harbin 150046, China)

Abstract: Four kinds of ceramic particles of WC, ZrO₂, Cr₂O₃ and Al₂O₃ were used as an reinforced phase and the nickel alloy powder as a matrix, the erosive wear properties of four types of composite coatings fabricated with plasma spraying were experimentally studied with the wear test equipment. The erosion surface characteristics of composite coating were measured by means of the surface appearance measuring meter. The effects of the ceramic particle volume fraction, abrasive particle size, impinging angle and velocity on the erosion loss of ceramic particles/nickel alloy composite coatings were investigated with the orthogonal test method. The empirical equations of the erosion loss weight are obtained for the WC, ZrO₂, Cr₂O₃ and Al₂O₃ particles/nickel alloy composite coatings with the multiple regression method.

Key words: ceramic particles; composite coating; erosive wear

含有大量固体颗粒的气体冲击或冲刷金属材料表面造成冲蚀磨损是工业生产中较多机器设备、零部件损坏报废的重要原因之一。如在冶金、煤矿等工业部门中大量使用风机用于含有固体颗粒的气体输送, 在气流携带下, 固体颗粒对风机叶片、衬板等部件造成严重的冲蚀磨损, 降低了部件使用寿命。因此, 研制具有抗冲蚀、性能优良的金属表面涂层材

料, 在实际工程中具有重要的意义。

陶瓷材料具有良好的抗磨损和耐腐蚀等能力, 被广泛应用于各个工业领域。但纯陶瓷材料的韧性较差, 限制了它的应用范围。陶瓷颗粒/镍合金复合涂层具有良好的综合性能, 既有纯陶瓷材料抗冲蚀磨损等性能, 又有镍合金材料所具有的韧性, 因而陶瓷颗粒/镍合金复合涂层具有一定的韧性和良好的

抗冲蚀磨损性能等,备受研究者的高度重视而成为研究的热点。然而,陶瓷颗粒/镍合金复合涂层抗冲蚀磨损特性与诸多因素有关,难以从理论分析获得其精确结果。本文作者将以 WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 四种陶瓷颗粒作为增强相,镍合金粉末作为基体,采用等离子喷涂方法制备陶瓷颗粒/镍合金复合涂层。采用冲蚀磨损试验机进行冲蚀磨损的实验。采用表面形状测量仪进行陶瓷颗粒/镍合金复合涂层磨损表面形貌的测量。试验研究不同增强相体积浓度、磨粒粒度、冲蚀角和气流速度对陶瓷颗粒/镍合金复合涂层抗冲蚀磨损特性的影响。

1 试样制备和试验系统

试验件尺寸为 100 mm × 100 mm × 5 mm, 经预处理后的碳钢板。采用 WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 四种陶瓷颗粒作为增强相,镍合金粉末作为基体。陶瓷颗粒粒度为- 140 目 ~ + 320 目, 将镍合金粉末与陶瓷颗粒按不同比例充分均匀混合,用等离子喷涂试验机(R-750C),在碳钢板表面制备出一定厚度的陶瓷颗粒/镍合金复合涂层试样。

采用改进 ASTM E704 标准冲蚀磨损试验机,进行冲蚀磨损的实验,见图 1。来自压缩机的压缩空气,经稳压罐、流量计、控制调节阀等,携带一定流量的磨粒进入试验机。试验选用白刚玉砂作为冲蚀磨损磨粒。陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损性能受气流速度、试验件的空间位置以及陶瓷颗粒相浓度等因素的影响。本试验将侧重于研究陶瓷颗粒相体积浓度、磨粒粒度、冲蚀角和速度对陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损特性的影响。采用正交试验方法,按四因素三水平设计正交试验。采用具有较高精度的电子天秤(MP2000型)测量磨损前后试件的重

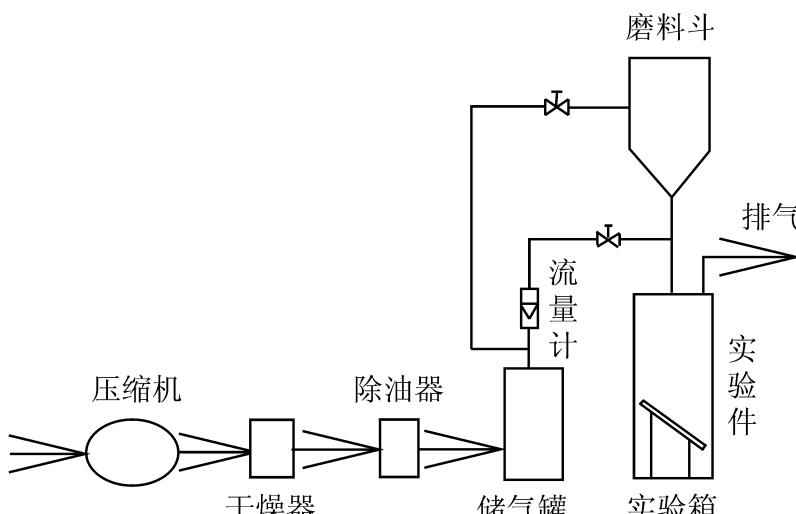


图 1 冲蚀磨损试验机及系统

Fig. 1 Erosive wear equipment and testing system

量,确定磨损率。采用表面形状测量仪(2302型)测量陶瓷颗粒/镍合金复合涂层磨损表面形貌,分析陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损特性。

2 实验结果和分析

图 2 表示增强相体积浓度 20% 时 WC 颗粒/镍合金复合涂层的金相组织照片。由金相组织可见,WC 颗粒/镍合金复合涂层的组织呈现非均匀分布结构,由白色镍合金粉末和黑色 WC 颗粒构成复杂的分布结构。由于等离子喷涂温度较高,镍合金粉末熔化并形成镍基固溶体,WC 颗粒与镍基固溶体部分互溶,陶瓷颗粒随机弥散分布于镍合金复合体中。

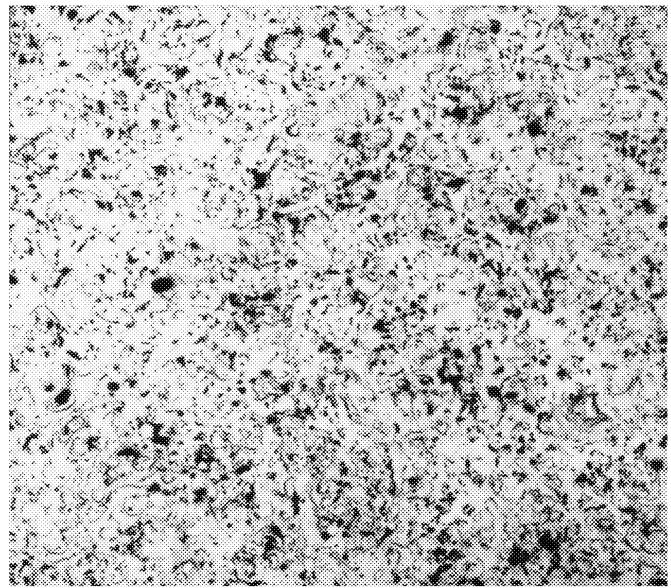


图 2 20% WC 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的金相组织 50×

Fig. 2 Microstructure of 20% WC ceramic particles/nickel alloy composite coating 50×

图 3 表示 WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 四种不同陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的冲蚀磨损率随颗粒速度的变化趋势。冲蚀表面的磨粒动能与其速度平方成正比。随着颗粒速度的提高,颗粒的动能增加,冲击涂层产生的切削磨损和变形磨损作用加强,使涂层的冲蚀磨损率增加。假设磨粒撞击涂层表面时颗粒不变形、不破碎,由金属切削理论可知,涂层被切屑切削所需的切削力为

$$F = kbZ^a \quad (1)$$

其中:k 为涂层性能常数;b 和 Z 为所切削的宽度和深度。根据冲蚀理论,颗粒冲蚀涂层表面变形的深度为

$$Z = k d_s u_s \sin T / H_d \quad (2)$$

其中:k₁ 为比例常数;T 为冲蚀角;H_d 为涂层的冲击硬度;d_s 和 u_s 为磨粒的直径和速度。磨粒冲击涂层具有的动能为

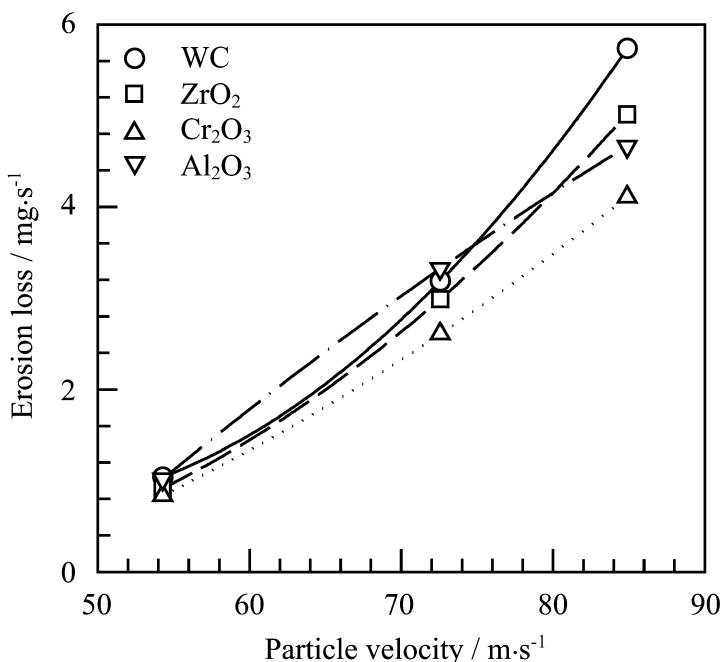


图 3 颗粒速度对冲蚀磨损率的变化关系

Fig. 3 Erosive loss distributions as a function of particle velocity

$$E = m_s u_s^2 \cos^2 T / 2 \quad (3)$$

其中: m_s 为磨粒质量。涂层被磨粒切削的长度为

$$\bar{L} = m_s u_s^2 \cos^2 T / [2kb(k_d d_s u_s \sin T - H_d)^a] \quad (4)$$

考虑磨粒撞击涂层表面微元面积 S 的频率因子, 单位时间内磨粒撞击微元面的粒子数为

$$N = u_s Z S \sin T / mg \quad (5)$$

其中: u_s 为磨粒浓度。则单位时间磨粒撞击涂层表面的磨损量为

$$M = \frac{k_d}{k} \frac{Z d_s S}{8g} \frac{d_s u_s^4 \sin^2 2T}{H_d [k d_s u_s \sin T - H_d]^a} \quad (6)$$

对于一定的陶瓷颗粒/镍合金复合涂层、磨粒直径和冲蚀角下, 由式(6)可见, 磨损量与磨粒速度有如下关系

$$M = A_u u_s^{4-a} \quad (7)$$

其中: A_u 为系数。由实验结果可得: WC, ZrO_2 , Cr_2O_3 和 Al_2O_3 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的系数 a 分别为 0.1909, 0.1963, 0.4399 和 0.5975。而对碳钢、镍铬耐热合金钢和铝分别为 0.78, 0.66 和 0.8。系数 a 反映磨粒撞击力对涂层表面切削深度的影响, 其值大小也反映被切削表面抗冲蚀的能力。镍铬耐热合金钢系数 a 小于碳钢和铝, 表明镍铬耐热合金钢具有较高的抗冲蚀能力。实验结果表明: 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的系数 a 小于镍铬耐热合金钢, 表明陶瓷颗粒/镍合金复合涂层呈现良好的抗冲蚀磨损的性能。由式(7)可见, WC, ZrO_2 , Cr_2O_3 和 Al_2O_3 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损量与速度的 3.4 次方 ~ 3.8 次方成正比, 这与以冲蚀磨损

的微切削理论的 Finnie 理论, 基于冲蚀磨损的变形磨损理论的 Bitter 模型等研究的磨损率与速度 3.3 次方 ~ 4.0 次方成正比是相吻合的。因此, 在较低的气流速度下, 镍合金复合涂层能更好地发挥其抗冲蚀磨损作用。

图 4 表示 WC, ZrO_2 , Cr_2O_3 和 Al_2O_3 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损率与陶瓷颗粒体积浓度的关系。由图可见, 随着陶瓷颗粒体积浓度的增加, 冲蚀磨损率逐渐下降, 达到最低磨损率后, 冲蚀磨损率随陶瓷颗粒增强相体积浓度而增加。当陶瓷颗粒体积浓度逐渐减小到零时, 冲蚀磨损特性将趋于纯镍合金粉末涂层的特性, 使冲蚀磨损率增加。相反, 当陶瓷颗粒体积浓度接近 100% 时, 冲蚀磨损特性将趋于纯陶瓷颗粒等离子喷涂材料的特性。由于涂层脆性的增加, 使冲蚀磨损率增加。在等离子喷涂过程中, 镍合金粉末形成镍基固溶体, 使镍合金复合体得到明显固溶强化, 韧性显著提高。而陶瓷颗粒相随机分布在镍合金复合体中, 使得基体得以弥散强化和细晶强化, 从而提高陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的抗磨性。当陶瓷颗粒相浓度较小时, 涂层中陶瓷颗粒增强相量少, 涂层的抗冲蚀能力下降。当陶瓷颗粒相浓度较大时, 涂层中镍合金固溶体量减少, 涂层表面疏松、多孔, 内部缺陷增多。在冲蚀磨损时, 缺陷易成为裂纹源, 并加速扩展, 使涂层表面出现脱落, 抗磨性能下降。由图 4 可见, 对四种不同的陶瓷颗粒增强相, 随着浓度变化存在着最小的冲蚀磨损率, 其值在

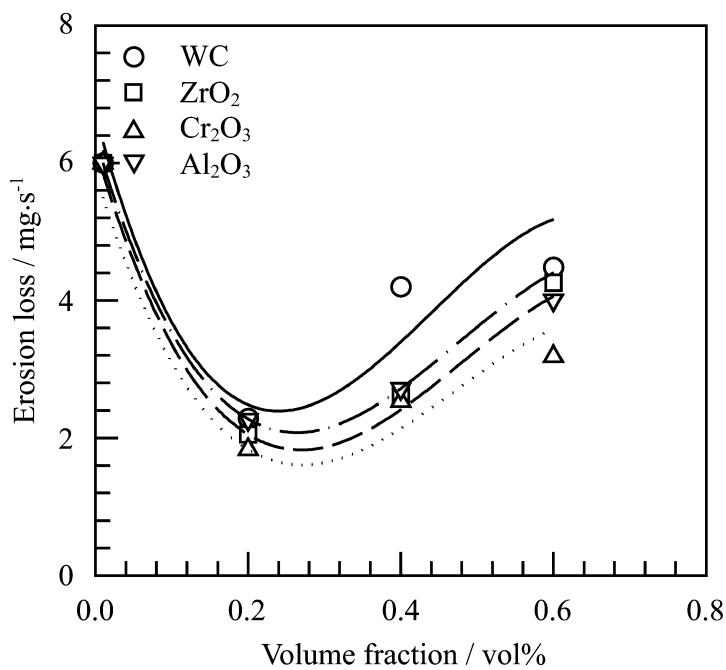


图 4 陶瓷颗粒体积浓度对冲蚀磨损率的关系

Fig. 4 Profile of erosion loss with volume

fraction of ceramic particles

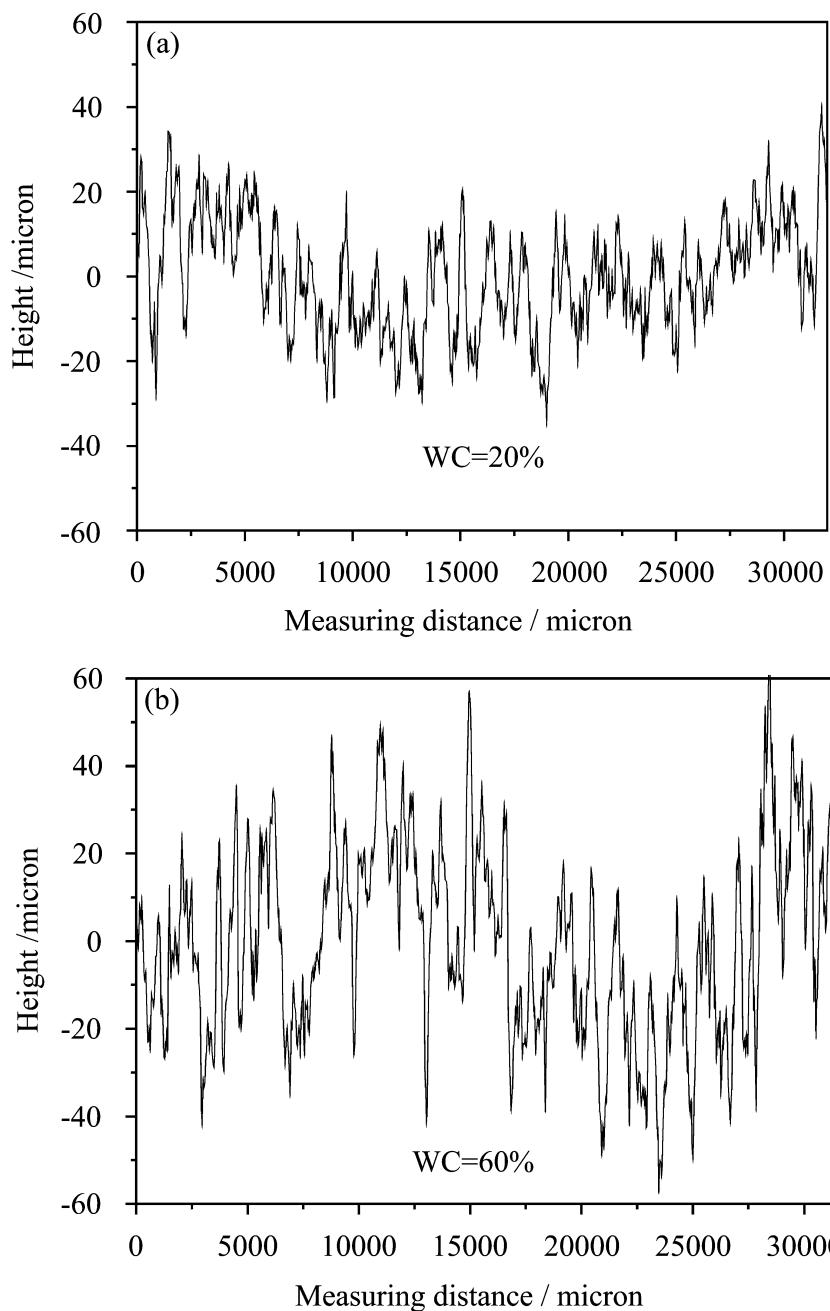


图 5 20% 和 60% WC 陶瓷颗粒/镍合金

复合涂层磨损表面高度的变化

Fig. 5 Appearance height distributions of surface abrasion in the WC ceramic particles/nickel alloy composite coating at the volume fraction of 20 and 60 percent

20 % ~ 30 % 范围内。图 5 表示 WC 颗粒体积浓度为 20 % 和 60 % 时测得的磨损表面轮廓高度的变化。磨损表面轮廓高度变化揭示涂层表面冲蚀磨损的机理。由图可见, 在相同颗粒速度下, 浓度 20 % 时磨损表面轮廓高度的变化幅值小于浓度 60 % 时的变化范围, 表明在低浓度时陶瓷颗粒/镍合金复合涂层是均匀冲蚀磨损, 而在高浓度时陶瓷颗粒/镍合金复合涂层出现局部的脱落。由图 5 可以得出不同磨损表面轮廓高度的概率分布, 如图 6 所示。在陶瓷颗粒体积浓度 20 % 时, 最大概率下的磨损表面轮廓高度为 40 μm 。而在浓度 60 % 时, 最大概率下的磨损表面轮廓高度增加至 60 μm , 分布范围也变宽。由此可见, 在 20 % 体积浓度下, 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损主要是相对均匀的磨削作用。而当浓度增加 60 % 时, 变形磨损作用加强, 涂层产生局部疲劳脱落, 从而造成冲蚀磨损率的增加。

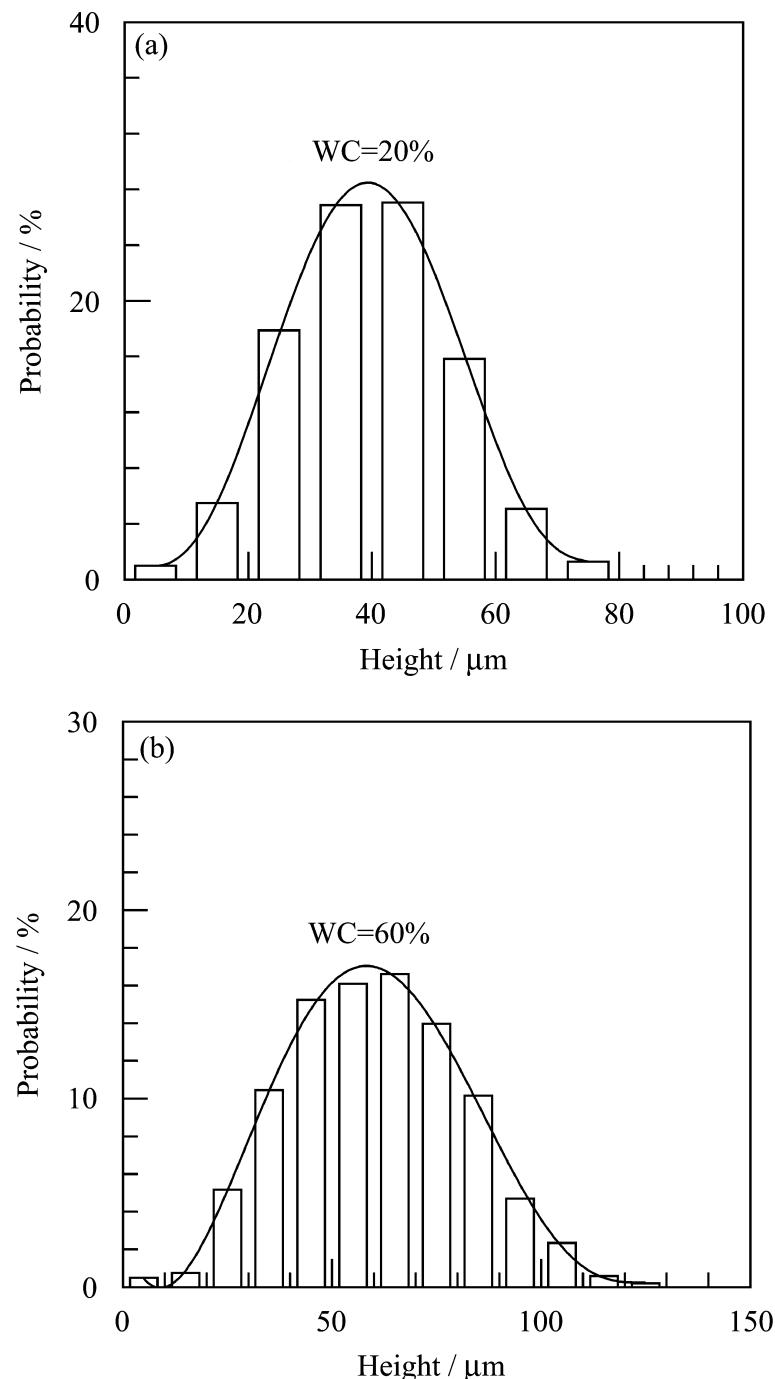


图 6 20% 和 60% WC 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的冲蚀磨损表面轮廓高度的概率分布

Fig. 6 Probability distributions of appearance height of surface abrasion in the WC ceramic particles/nickel alloy composite coatings at the volume fraction of 20 and 60 percent

图 7 表示磨粒粒径对 WC, ZrO_2 , Cr_2O_3 和 Al_2O_3 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损率的影响。由图可见, 随着磨粒粒度增加, 涂层冲蚀磨损率增大, 尤其是磨粒粒度从 95 μm 增加到 195 μm , 涂层冲蚀磨损率迅速增加。再继续增大磨粒粒度, 涂层冲蚀磨损率增加缓慢。由式(3)可见, 随着磨粒直径增加, 磨粒质量增大, 磨粒冲刷表面的动能增加, 使冲蚀磨损率增加。当磨粒直径达到 385 μm 时, 一方面, 随着磨粒直径增加, 磨粒冲蚀磨损能力增大, 使冲蚀磨损率增加。另一方面, 由式(5)可见, 在相同颗粒流率下, 随着磨粒直径增大, 颗粒浓度减小, 磨粒与涂层的碰撞频率下降。二者共同作用结果使冲蚀磨损率增加趋势减小。

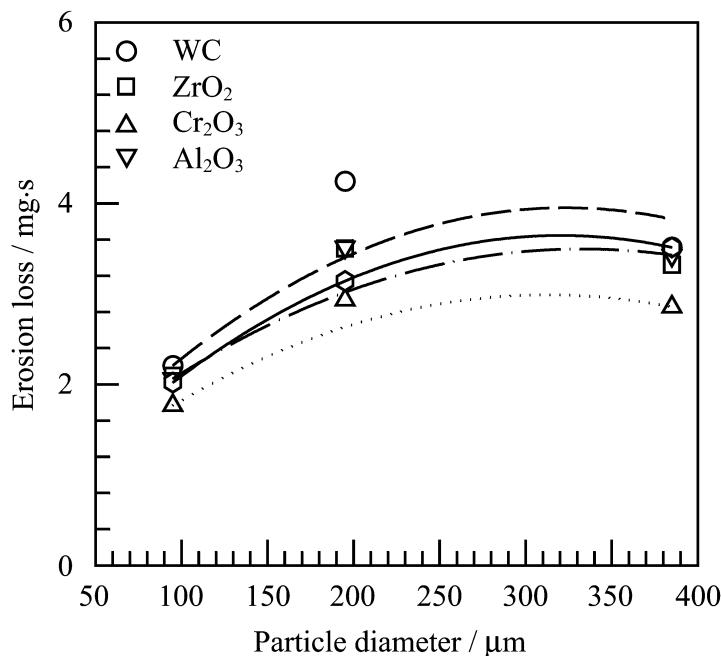


图 7 磨粒粒径对冲蚀磨损率的影响

Fig. 7 Influence of particle diameters on erosive loss of ceramic particles/nickel alloy composite coatings

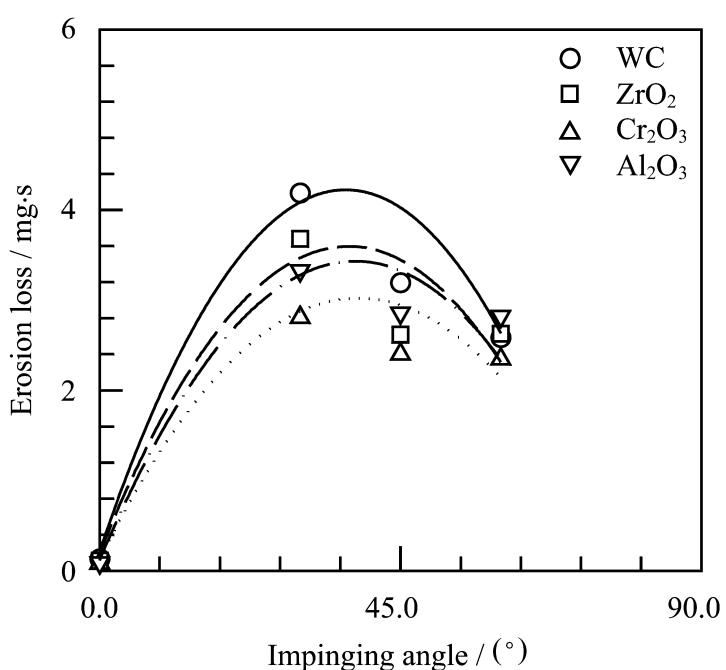


图 8 冲蚀角对冲蚀磨损率的影响

Fig. 8 Effects of impinging angle on erosion loss of ceramic particles/nickel alloy composite coatings

图 8 表示冲蚀角对冲蚀磨损率的影响。镍合金复合涂层的颗粒冲蚀磨损方式主要来自两种方式：切削磨损和变形磨损。塑性材料主要表现为切削磨损，冲蚀磨损率随着冲蚀角增大而减小；脆性材料主要表现为变形磨损，冲蚀磨损率随着冲蚀角增大而增大。由式(1)磨粒与表面质点间撞击力 F 可分解为垂直分量 $F_N = F \sin T$ 与水平分量 $F_t = F \cos T$ 。垂直分量使硬质点对材料表面造成冲击作用，而水平分量使硬质点与材料表面产生相对位移，造成切削作用。在正向冲击($T=90^\circ$)时，冲蚀磨损主要是正向应力造成的磨损，而切向应力可忽略不计。相反在冲蚀角 T 为零时，冲蚀磨损主要是切向应力造成的磨损，而正向应力可忽略不计。随着冲蚀角 T 减小，正向应力逐渐减小，切向应力逐渐增大。在某一冲蚀角下，正向应力和切向应力的合力作用达到最大，此时引起的冲蚀磨损率达到最大。通常塑性材料在冲蚀角为 $20^\circ \sim 30^\circ$ ；脆性材料在接近 90° 时冲蚀磨损率达到最大。陶瓷颗粒/镍合金复合涂层具有塑脆两种组织(镍合金和陶瓷颗粒硬质相)，陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的冲蚀磨损是这两种磨损的综合和叠加，因而表现出介于两者之间的冲蚀磨损率。在小冲蚀角下，涂层中塑性相起主要作用，即涂层中的粘接相对冲蚀磨损率影响最大。随着冲蚀角增加，涂层中的硬质相起的作用增强。由图可见，随冲蚀角增大，陶瓷颗粒/镍合金复合涂层的冲蚀磨损率增加，在某冲蚀角下冲蚀磨损率达到最大。之后，冲蚀磨损率随着冲蚀角增加而减小。最大冲蚀磨损率位置由方程(6) $dM/dT = 0$ 条件确定。在磨粒直径、密度等参数一定时，对方程(6)微分整理得

$$\operatorname{tg}^2 T = \frac{2 - a}{a} \quad (8)$$

可得 WC , ZrO_2 , Cr_2O_3 和 Al_2O_3 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层最大冲蚀磨损率时的冲蚀角分别为 43.58° , 43.50° , 41.46° 和 40.0° 。碳钢最大冲蚀磨损

率的冲蚀角为 38.0° 。图 9 表示在冲蚀角 T 为 30° 和 60° 时， ZrO_2 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损表

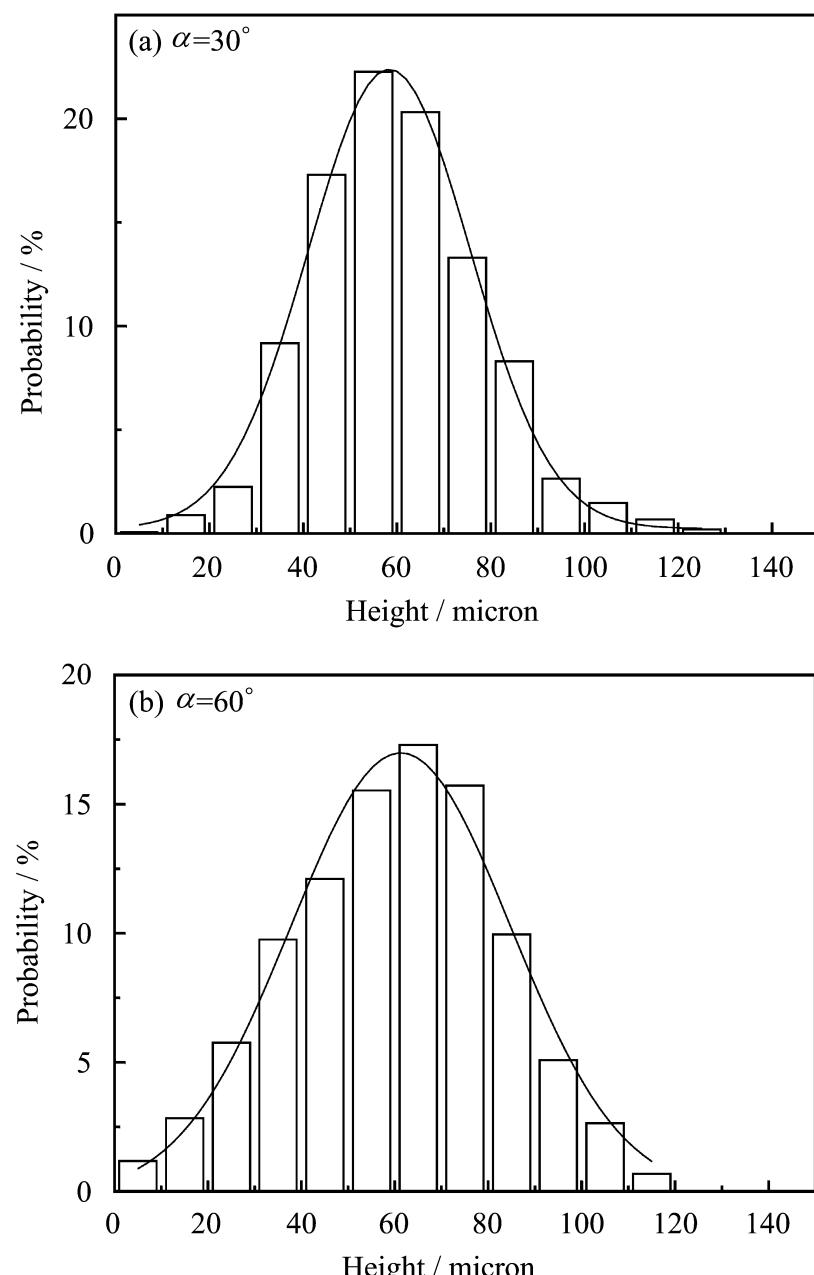
图 9 冲蚀角 30 和 60 时 ZrO_2 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损表面轮廓高度的概率分布

Fig. 9 Probability distributions of appearance height in the ZrO_2 ceramic particles/nickel alloy composite coatings at the impinging angle of 30 and 60 degrees

面轮廓高度概率密度分布。在冲蚀角 30° 时, 概率密度分布较窄, 最大概率下的磨损表面轮廓高度约为 55 μm。在冲蚀角 60° 时, 最大概率下的磨损表面轮廓高度约 65 μm, 概率分布变宽。这是由于切向应力造成的切削作用和正向应力引起的变形磨损的共同作用使冲蚀磨损率增大的缘故。

WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损率与诸多因素有关。在本实验范围内, 冲蚀磨损率可表示如下的函数形式

$$M = f(u_s, X, T, d_s) \quad (9)$$

或表示为指数积的关系

$$M = a_1 X^2 T^3 d_s^{a_3} u_s^{a_5} \quad (10)$$

式中: a₁, a₂, a₃, a₄ 和 a₅ 为特定系数, 可按最小二乘法确定。基于实验结果, 回归可得各系数, 如表 1 所示。

表 1 各回归系数

Table 1 Values of regression coefficients

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	R
WC	1. 191 × 10 ⁻⁸	0. 385	0. 376	- 0. 421	3. 690	0. 972
ZrO ₂	0. 829 × 10 ⁻⁸	0. 442	0. 382	- 0. 447	3. 753	0. 963
Cr ₂ O ₃	1. 171 × 10 ⁻⁸	0. 331	0. 409	- 0. 064	3. 608	0. 956
Al ₂ O ₃	3. 883 × 10 ⁻⁸	0. 347	0. 399	- 0. 148	3. 381	0. 947

表中也给出回归方差 R 值。方程(10)和表 1 系数的适用范围为: 速度 = 30 m/s ~ 90 m/s; 冲蚀角 T = 20° ~ 80°; 陶瓷颗粒浓度 = 20% ~ 80%; 磨粒粒径 = 80 微米 ~ 450 微米。由表可见, 方程(10)和实验结果具有较高的相关性。图 10(a), 图 10(b) 表示 WC 和 Al₂O₃ 两种陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损率试验值与计算值的变化。可见, 方程(10)计算结果与实验值相吻合。

3 结 论

以 WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 四种陶瓷颗粒为增强相, 镍合金粉末为基体, 采用等离子喷涂试验机制备陶瓷颗粒/镍合金复合涂层。采用改进的冲蚀磨损试验机进行冲蚀磨损的实验。采用表面形状测量仪研究陶瓷颗粒/镍合金复合涂层磨损表面形貌。试验研究陶瓷颗粒相浓度、磨粒粒度、冲蚀角和速度对冲蚀磨损的影响, 试验结果得到 WC, ZrO₂, Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 颗粒/镍合金复合涂层抗冲蚀磨损率的经验关联式。

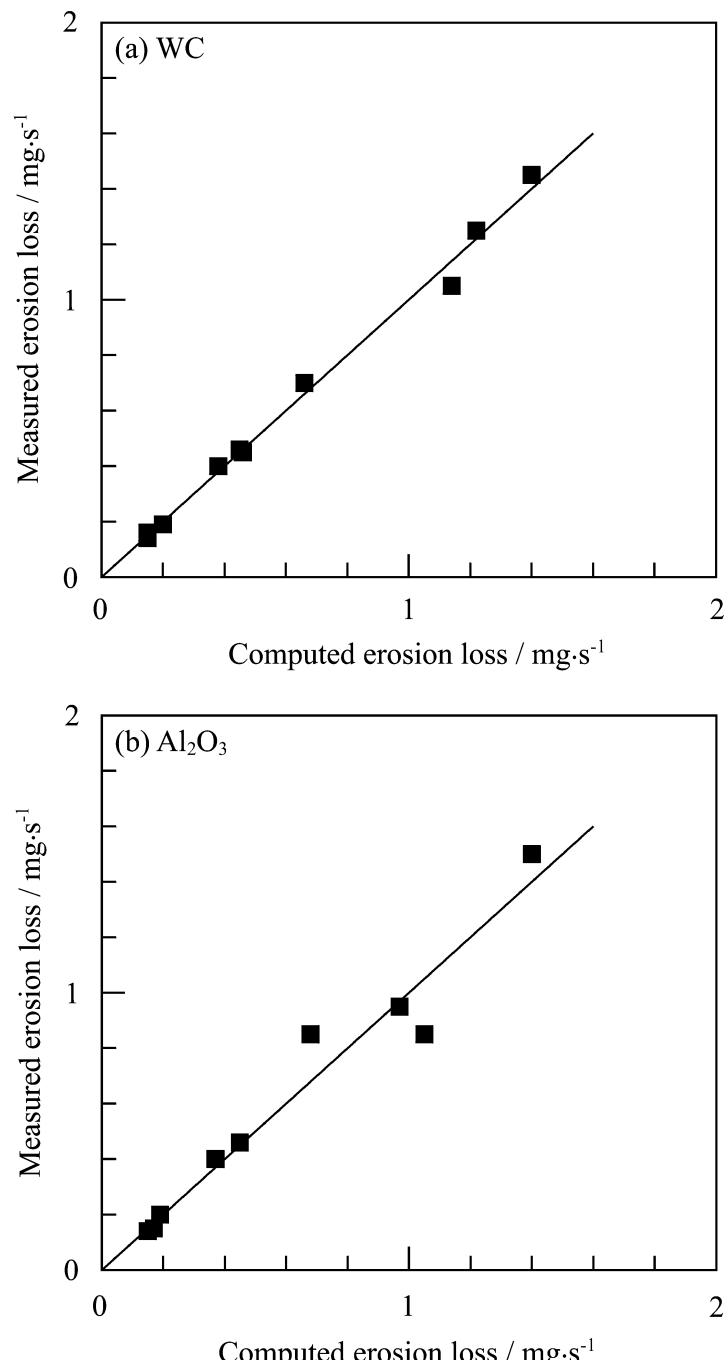


图 10 WC 和 Al₂O₃ 陶瓷颗粒/镍合金复合涂层冲蚀磨损率试验值与计算值的比较

Fig. 10 Comparisons of erosion loss between experiments and predictions of WC and Al₂O₃ ceramic particles/nickel alloy composite coatings

参考文献:

- [1] Finnie I. The mechanism of erosion of ductile metals [M]. London: Pergamon Press, 1958. 31- 45.
- [2] 李建明. 磨损金属学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 185- 212.
- [3] 陈学定, 韩文政. 表面涂层技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 63- 69.
- [4] Bahadur S, Chennan Y. Friction and wear behavior of tungsten and titanium carbide coatings [J]. Wear, 1996, 196(1): 156- 163.
- [5] Westergard R, Axen N, Wiklund U, Hogmark S. An evaluation of plasma sprayed ceramic coatings by erosion abrasion and bend testing [J]. Wear, 2000, 246(1): 12- 19.