DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201712050

激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层的磨削特性

戴秋莲, 张 杰, 尤芳怡

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 为研究不同磨削参数、不同质量分数及粒度的 Cr_3C_2 对激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层磨削表面质量的影响规律,探究其磨削特征及磨削表面缺陷的形成机理,采用 CBN 砂轮对激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 复合涂层进行磨削实验. 实验结果表明: Cr_3C_2/Ni基复合涂层磨削表面的加工缺陷主要产生于 Ni 合金基体中形成的堆积、犁沟、局部崩碎、裂纹,以及破碎的 Cr_3C_2 颗粒和由于破碎的 Cr_3C_2 脱落、被压碎的 Cr_3C_2 颗粒产生的表面凹坑等. 在较小的切深和较低质量分数的 Cr_3C_2 条件下,Ni 合金基体中较容易形成堆积;随着切深的增加,Ni 合金基体中的犁沟加深,局部出现崩碎;当涂层中的 Cr_3C_2 质量分数高于 20 %时,Ni 合金基体中甚至出现裂纹;涂层中 Cr_3C_2 质量分数达到 30 %时,磨削表面出现较多破碎的 Cr_3C_2 和凹坑. 在相同的磨削参数下,涂层磨削表面粗糙度随着熔覆层中 Cr_3C_2 粒径的增大而增大,随着 Cr_3C_2 质量分数的增加而降低,但 Cr_3C_2 质量分数超过 20 %时,涂层的粗糙度反而略有上升. 减小 Cr_3C_2 的粒径和提高砂轮的线速度可以减少涂层磨削缺陷的产生.

关键词: 激光熔覆;磨削特征;磨削机理;表面粗糙度;Cr_3C_2/Ni 基涂层

中图分类号: TG58 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2019)01-0122-05

Grinding characteristics of laser cladding Cr_3C_2/Ni based composite coating

DAI Qiulian, ZHANG Jie, YOU Fangyi

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: To study the effects of different grinding parameters, different mass fraction and sizes of Cr_3C_2 on ground surface quality of the laser cladding Cr_3C_2/Ni based composite coating, as well as to explore the grinding characteristics and the generation mechanism of the ground surface defects, the grinding experiment was conducted by using CBN grinding wheel, and the results show that the defects on the ground surface of laser cladding Cr_3C_2/Ni based composite coating mainly include two categories: one is generated in the Ni based alloy which includes debris adherence, grinding traces, micro-crack and cracks; the other is the broken Cr_3C_2 particles and voids generated by the pullout of the broken Cr_3C_2. The debris adherence in the Ni based alloy is easier to form under the condition of smaller depth of cut and lower Cr_3C_2 mass fraction in the coating. As the cutting depth increases, deeper grinding marks and micro-crack appear. The cracks form in the Ni based alloy when the mass fraction of Cr_3C_2 in the coating is higher than 20%. More voids are found on the ground surface when the mass fraction of Cr_3C_2 is 30%. Under the same grinding parameters, the R_a value of ground coating increases with the increase of the size of Cr_3C_2 particles and decreases with the increase of mass fraction of Cr_3C_2. However, the R_a value increases slightly when the mass fraction of Cr_3C_2 exceeds 20%. The experimental results reveal that there are fewer defects on the ground surface when the size of Cr_3C_2 is smaller and the wheel speed is higher.

Keywords: laser cladding; grinding characteristics; grinding mechanism; surface roughness; Cr_3C_2/Ni based coating

激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层具有高硬度、高耐磨性、良好的抗腐蚀性和耐高温等优点,在航空航天、汽车制造、石油开采、机械制造及维修等领域有着广阔的应用前景[1-4].

通常激光熔覆层需要后续的机械加工才能使其具备较高的精度与表面质量,从而满足使用性能的要求. 然而,Cr_3C_2/Ni 基复合涂层是由可加工性存在差异的硬质颗粒 Cr_3C_2 与 Ni 基合金所组成的复合材料,其硬质颗粒的硬度、类型、体积分数、形状和尺寸大小对复合材料磨削表面质量有显著的影响,这对如何保证熔覆层经磨削加工后获得高完整性的加工表面提出了很大的挑战[5-7]. 另一方面,如何控制在磨削过程中由于机械变形和热变形产生的裂纹及加工缺陷的形成也是磨削复合涂层的一大难题[7-8]. 因此有必要通过对激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层进行磨削实验,研究复合涂层磨削表面特征和表面缺陷形成机理,为激光熔覆技术的进一步推广应用提供理论依据.

目前,关于激光熔覆涂层磨削加工的研究很少,林允森等[9]采用电解磨削的方法,优化了电解磨削工艺参数,提高了磨削加工的效率. 本课题组喻泽文[10]采用氧化铝砂轮磨削 WC/Fe 基熔覆层,发现

收稿日期: 2017-12-09
作者简介: 戴秋莲(1965—),女,教授,硕士生导师
通信作者: 戴秋莲,lisadai@hqu.edu.cn.

WC/Fe 基涂层磨削以后 WC 颗粒会破碎，而且 WC 颗粒上会产生磨削裂纹并扩展至 Fe 合金基体上.

基于上述研究背景，本文采用 CBN 砂轮磨削激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层，研究其磨削特征及磨削表面缺陷的形成机理.

1　试验材料与方法

采用粒度为 46~109 μm 的 Ni 基自熔性粉末和不同粒度和质量分数的 Cr_3C_2 颗粒的混合粉末制备激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层. Ni 基自熔性粉末的化学成分如表 1. 采用 AXL-600AW 型脉冲激光器，工艺参数为电流 150 A，扫描速度 200 mm/min，频率 30 Hz，搭接率 60 %，氩气流速 10 L/min，粉末预置层厚度为 0.8 mm，试样块的基体是 45 钢. 图 1 为制备的激光熔覆层试样.

表 1　Ni 基粉末的化学成分

Tab.1　Chemical composition of Ni based alloy

元素	Fe	Cr	C	B	Si	Ni
质量分数/%	10.00	13.00	0.45	2.50	3.00	余量



图 1　激光熔覆层试样

Fig.1　Laser cladding sample

在超精密成形平面磨床 MSG-250 上进行磨削实验，砂轮为郑州三磨研究所生产的 120 #树脂结合剂 CBN 砂轮，磨料层厚度 5 mm，直径 200 mm，内孔直径 31.75 mm，厚度 13 mm，浓度 100 %. 用线切割机将磨削试样块尺寸切割为 15 mm × 10 mm × 10 mm，用特制夹具将磨削试样夹紧，然后将夹具固定在磨床的磁力吸盘上进行磨削实验. 进行磨削实验前，分别采用碳化硅滚轮及碳化硅油石对砂轮进行整形和修锐. 而且每组实验前对砂轮进行修锐，油石的径向进给量为 1 000 μm，以保证砂轮的锋利性. 磨削实验工艺参数：工件速度 v_w = 0.15 m/s，砂轮线速度 v_s 分别选择 38、46、54 m/s，磨削深度 a_p 分别选择 5、10、15、20 μm，磨削方式为干磨.

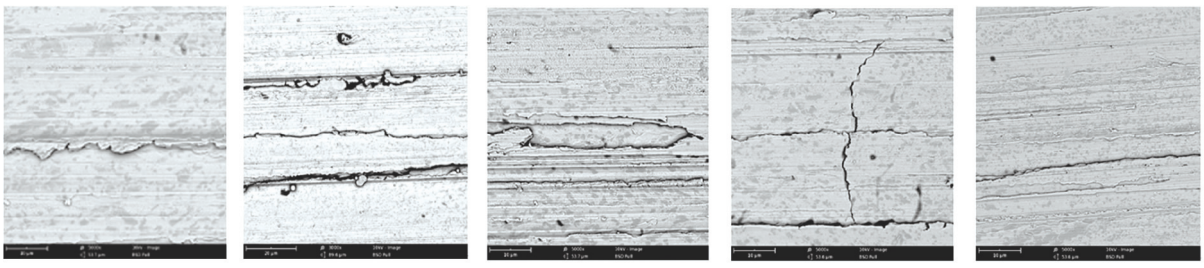
使用 Mahr XR20 粗糙度仪测量涂层磨削表面粗糙度 R_a，在垂直于磨削方向上取不同的位置测量 3 次，计算其平均值. 磨削后的试样用超声波清洗后，在 Phenom proX 内置能谱仪台式扫描电子显微镜下观察磨削后的表面形貌.

2　试验结果与分析

2.1　磨削参数对涂层表面特征的影响

选用 Cr_3C_2（粒度 46~109 μm）质量分数为 20% 的 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层，在不同砂轮线速度和切深下进行磨削实验. 研究不同磨削参数对熔覆层磨削表面的粗糙度及磨削形貌的影响.

图 2 是不同磨削参数下磨削后的涂层的表面形貌. 从图 2(a)可以看出，切深为 5 μm 时，涂层磨削表面会出现涂覆堆积现象；当切深 10 μm 时，磨削表面会出现相对较深的犁沟和平行于磨削方向的裂纹，以及一些小块的崩碎，如图 2(b)；当切深进一步增大到 20 μm 时，涂层磨削表面的沟痕更深，而且磨削表面会出现较大块的崩碎现象和交错裂纹，如图中(c)、(d)；图 2(b)、(e)切深均为 10 μm，砂轮线速度分别为 46、54 m/s 的涂层磨削表面形貌，可以看出，两者的表面均会出现犁沟，但砂轮线速度越高磨削表面犁沟越浅，表面平整度越高.



(a)v_s=46 m/s，a_p=5 μm　(b)v_s=46 m/s，a_p=10 μm　(c)v_s=46 m/s，a_p=20 μm　(d)v_s=46 m/s，a_p=20 μm　(e)v_s=54 m/s，a_p=10 μm

图 2　不同磨削参数下的涂层表面形貌

Fig.2　Surface topography of ground coatings under different grinding parameters

不同磨削参数下涂层磨削表面的粗糙度如图 3 所示. 由图 3 可以看出，粗糙度随着切深的增大而上升，随着砂轮线速度的提高而下降，此变化规律与图 2 中涂层的表面形貌变化相对应. 当砂轮线速度一定时，由于切深越大，单颗磨粒未变形切削厚度变大，磨粒对工件的挤压切削作用更明显，涂层表面缺

陷增多,所以表面粗糙度 R_a 增加. 相同切深条件下,砂轮线速度增加时,单颗磨粒的切除量减小,磨粒对工件的挤压切削作用减弱,表面质量提高,粗糙度值下降[9].

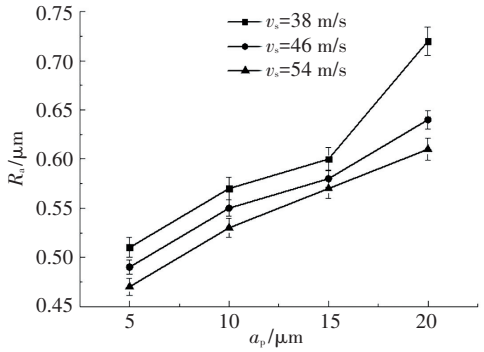


图 3 磨削参数对磨削表面粗糙度的影响

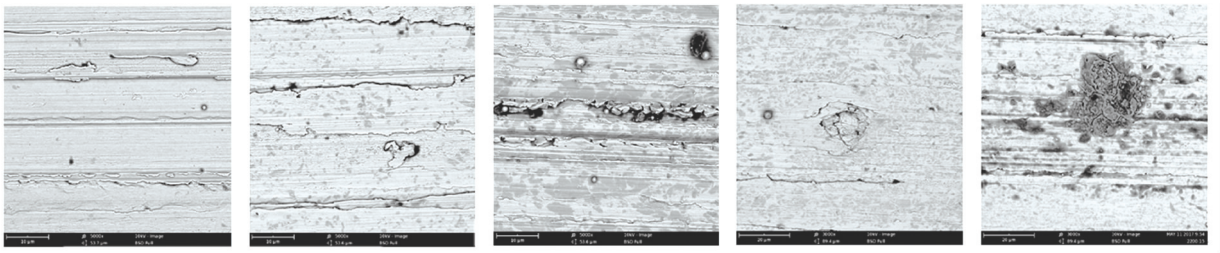
Fig.3 Effect of grinding parameters on ground surface roughness

2.2 Cr_3C_2含量对涂层磨削表面特征的影响

相同的磨削参数(线速度 46 m/s、切深 10 μm)下,对不同 Cr_3C_2质量分数(粒度为 46~109 μm)的 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层进行磨削实验.

图 4(a)~(e)和图 2(b)是不同 Cr_3C_2质量分数涂层的磨削表面形貌. 从图 4(a)可以看出,不含 Cr_3C_2的涂层经磨削加工后的表面犁沟较深,同时 Ni 合金基体有明显的堆积;当涂层的 Cr_3C_2质量分数为10 %时,涂层表面的犁沟较浅;当 Cr_3C_2质量分数为20%时,如图 2(b)所示,磨削表面除了犁沟外,还有平行于磨削方向的裂纹,以及一些小块的崩碎;Cr_3C_2质量分数增加到 30 %时,涂层表面会有较大的凹坑,以及破碎的 Cr_3C_2被压入工件表面和一些小凹坑,如图 4(d)、(e)所示.

由图 5 可以看出, Cr_3C_2质量分数<20 %时,随着 Cr_3C_2质量分数的增加,涂层磨削表面 R_a 的值有所下降; 当 Cr_3C_2质量分数从 20 %增加到 30 %时, R_a 反而略微增大. 这是因为不含 Cr_3C_2陶瓷颗粒的涂层硬度较低,塑性较高,使得犁沟两侧产生的隆起较高,所以 R_a 值较大. 随着涂层 Cr_3C_2质量分数的增加,磨削表面这些犁沟和堆积现象减弱,表面比较平整, R_a 值减小;当涂层中 Cr_3C_2质量分数为 30 %时,涂层磨削后表面出现裂纹而形成沟槽以及凹坑,使得 R_a 值略微上升.



(a) 0% (b) 10% (c) 30% (d) 30% (e) 30%

图 4 不同 Cr_3C_2质量分数的涂层磨削表面形貌

Fig.4 Grinding surface morphology of coatings with different Cr_3C_2 mass fractions

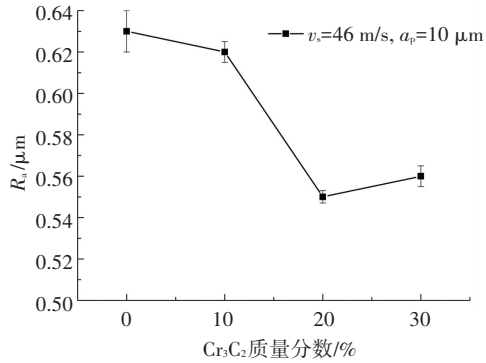


图 5 不同质量分数的 Cr_3C_2对磨削表面粗糙度的影响

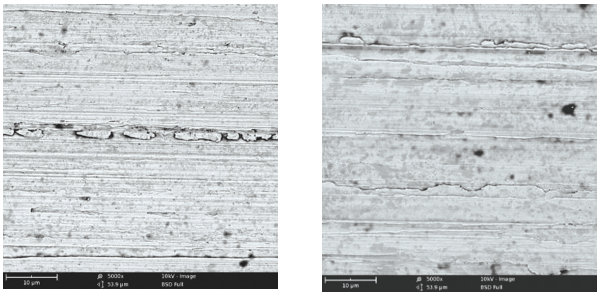
Fig.5 Effect of different Cr_3C_2 mass fractions on grinding surface roughness

2.3 Cr_3C_2粒度对涂层磨削表面特征的影响

采用上述相同的磨削参数(线速度 46 m/s、切深 10 μm),研究不同粒度的 Cr_3C_2(质量分数 20 %)对熔覆层磨削表面粗糙度及磨削表面形貌的影响.

从图 2(b)可看出, Cr_3C_2粒径为 46~109 μm 时,涂层磨削表面的犁沟较深;当 Cr_3C_2为 16~45 μm时,如图 6(a)所示,磨削表面的犁沟较浅但基体出现崩碎现象;而 Cr_3C_2粒径为 5~15 μm 时,涂层磨削表面的犁沟浅而且 Ni 合金基体中只有少量的小块崩碎现象. 这是因为相同质量分数 Cr_3C_2的 Cr_3C_2/Ni基复合涂层, Cr_3C_2的粒径越小,涂层中所含的 Cr_3C_2颗粒就越多, Cr_3C_2颗粒对 Ni 合金基体的弥散强化作用越大,涂层的硬度高而且比较均匀[11]. 由图 7 中可以看出,涂层磨削表面的粗糙度 R_a 值随着 Cr_3C_2粒径的减小而减小,可见粗糙度 R_a 的变化与涂层表面形貌的变化规律相一致.

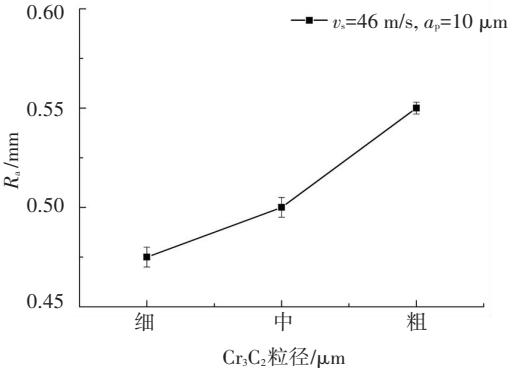
图 7 中,“细”表示 Cr_3C_2的粒径范围为 5~15 μm,“中”表示 Cr_3C_2的粒径范围为 16~45 μm,“粗”表示Cr_3C_2的粒径范围为 46~109 μm.



(a) 16~45 μm　　(b) 5~15 μm

图 6　不同 Cr_3C_2 粒度的涂层磨削表面形貌

Fig. 6　Ground surface morphology of coatings with different Cr_3C_2 particle sizes



细—粒径 5~15 μm；中—粒径 16~45 μm；粗—粒径 46~109 μm

图 7　不同粒度 Cr_3C_2 对磨削表面粗糙度的影响

Fig. 7　Ground surface roughness with different Cr_3C_2 particle sizes

2.4　Cr_3C_2/Ni 基复合涂层磨削表面缺陷形成机理

通过观察涂层磨削表面形貌发现，Cr_3C_2/Ni 基复合涂层磨削表面产生的缺陷主要有产生于 Ni 合金基体中形成的堆积、犁沟、局部崩碎、裂纹，以及破碎的 Cr_3C_2 颗粒和由于破碎的 Cr_3C_2 脱落、被压碎的 Cr_3C_2 颗粒产生的表面凹坑等.

从上述涂层表面形貌的分析可知，Ni 合金基体中形成的堆积是在磨削深度较小的条件下形成的. 当切深为 5 μm 时，由于切深较小，磨粒的作用更大地表现为划擦，耕犁深度较浅，切削作用较弱，磨削过程中磨粒在耕犁作用下将向两侧隆起的 Ni 合金基体推平，形成涂覆堆积. 当涂层中 Cr_3C_2 含量较低，磨削深度中等时，在基体中易产生较深的犁沟. 当涂层中含有较多粗粒度的 Cr_3C_2 并且采用较大的磨削深度时，就会在 Ni 合金基体中形成裂纹、崩碎和凹坑. 这是因为切深继续增加，磨粒与工件间的挤压增加，切削力增大，又由于含有较多粗粒度的 Cr_3C_2 的涂层脆性大，Cr_3C_2 与基体的结合力较弱，因此磨削过程中容易促使涂层微裂纹的扩展而形成裂纹，另一方面，由于复合涂层的脆性较大，材料的去除方式以脆性方式为主，所以会产生崩碎现象[11-14].

从图 2(b)、(d)可以看出，涂层磨削表面的裂纹有两种形式，一种是平行于磨削方向的裂纹，一种是交错裂纹，这些裂纹在涂层磨削前并不存在. 这两种裂纹主要存在于 Cr_3C_2 的粒度为 46~109 μm 且 Cr_3C_2 质量分数>20 %的涂层中. 原因是激光熔覆过程由于 Ni 基合金粉末和 Cr_3C_2 颗粒存在线胀系数等性质的差异，使得熔覆层在冷却过程中产生较大的应力，磨削时由于磨削力的叠加作用，导致裂纹的产生[8]. Cr_3C_2 质量分数较高时，涂层硬度高、脆性大，磨削力大. 当切削深度达到 10 μm 时，容易产生平行于磨削方向的裂纹，而当切深为 20 μm 时，涂层会出现如图 2(d)所示的交错裂纹，并没有出现如图 2(b)的平行裂纹. 切深为 20 μm 时，在磨削初始时期可能会出现平行裂纹，但由于材料去除量较大，材料以较大块崩碎方式去除，最终成为图 2(c)所示深度较深的崩碎现象. 交错裂纹的形成可能是磨削过程中的磨削热使磨削表面产生微裂纹或者磨料在磨削表面刮出微裂纹，后续的循环应力促使裂纹进一步扩展而产生的[12].

由图 4(d)和(e)可以看到，涂层磨削表面破碎的 Cr_3C_2 颗粒和破碎的 Cr_3C_2 又被压入工件表面，并有因破碎 Cr_3C_2 脱落而形成的凹坑. 这种缺陷主要存在于大粒度且 Cr_3C_2 质量分数为 30 %的涂层磨削形貌中. 由图 8 可知，当磨粒从 Ni 合金基体切到 Cr_3C_2 颗粒上时，由于 Cr_3C_2 的硬度远高于 Ni 合金基体，作用力会急剧增加，所以 Cr_3C_2 颗粒在磨粒切入方向的截面是受到反复冲击最严重的地方. Cr_3C_2 在磨粒切入方向的界面发生破碎，在砂轮磨粒的作用下，破碎的 Cr_3C_2 朝磨削方向运动而脱落，一部分称为磨屑，另一部分则被压入磨削加工表面，移动过后的地方会形成小凹坑[12,15].

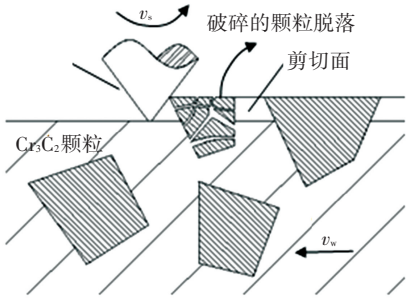


图 8　Cr_3C_2 颗粒破碎脱落机制

Fig. 8　Cr_3C_2 particle shedding mechanism

3　结　论

(1) 在以较小的切深磨削较低质量分数 Cr_3C_2 的 Cr_3C_2/Ni 基复合涂层时，在 Ni 合金基体中较容易形成堆积，随着切深的增加，Ni 合金基体中的犁

沟加深,局部出现崩碎.

(2)随着切深的增加或涂层中 Cr_3C_2 质量分数高于 20 %时,Ni 合金基体将出现裂纹. 当涂层中 Cr_3C_2 质量分数达到 30 %时,不仅基体中有较大的裂纹,而且磨削表面出现较多的凹坑. 减小 Cr_3C_2 的粒径和提高砂轮的线速度可以减少涂层磨削缺陷的产生.

(3)Cr_3C_2/Ni 基复合涂层磨削表面粗糙度 R_a 随着切深的增加而增加,随着砂轮转速的提高而降低; R_a 随着熔覆层中 Cr_3C_2 粒径的增大而增大,随着 Cr_3C_2 质量分数的增加而减少,但 Cr_3C_2 质量分数超过 20 %时,涂层的粗糙度 R_a 反而略有上升.

参考文献

[1] 李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 9
LI Jianing. Laser cladding technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 9

[2] 林成虎. 激光熔覆碳化铬一镍基复合涂层的制备与摩擦学研究[D]. 延边: 延边大学, 2013
LIN Chenghu. Study on the process and tribology of chromium carbide reinforced Ni-base composite coatings fabricated by laser cladding [D]. Yanbian: Yanbian University, 2013

[3] WANG Chenlei, GAO Yuan, WANG Rong, et al. Microstructure of laser-clad Ni60 cladding layers added with different amounts of rare-earth oxides on 6063 Al alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 1099. DOI: org/10. 1016/j. jallcom. 2018. 01. 061

[4] VERDI D, GARRIDO M A, POZA P, et al. Cr_3C_2 incorporation into an Inconel 625 laser cladded coating: Effects on matrix microstructure, mechanical properties and local scratch resistance [J]. Materials and Design, 2015, 67(4): 20. DOI: org/10. 1016/j. matdes. 2014. 10. 086

[5] ZANG Chuncheng, WANG Yanzhong, ZHANG Yidu, et al. Microstructure and wear-resistant properties of NiCr-Cr_3C_2 coating with Ni45 transition layer produced by laser cladding [J]. Rare Metals, 2015, 34(7): 491. DOI: 10. 1007/s12598-015-0492-7

[6] 俞佳, 罗来马, 郦剑, 等. 激光熔覆 Cr_3C_2/Ni 涂层的组织特征[J],功能材料, 2009, 40: 899
YU Jia, LUO Laima, LI Jian, et al. Microstructure of laser cladding Cr_3C_2/Ni coating [J]. Functional Materials, 2009,40: 899

[7] 曹根, 张凤林, 刘鹏, 等.Al/SiC 复合材料磨削加工研究进展(上)[J]. 超硬材料工程,2013, 25(6): 11
CAO Gen, ZHANG Fenglin, LIU Peng, et al. Research progress in grinding of Al/SiC composites (Part 1)[J]. Superhard Materials Engineering, 2013, 25(6): 11

[8] 周晓玉. 超细晶粒硬质合金磨削实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013
ZHOU Xiaoyu. The experimental research on grinding of ultra-fine grain cemented carbide [D]. changsha: Hunan University, 2013

[9] 林允森, 董世运,田欣利, 等. 激光熔覆硬韧材料齿面的电解磨削[J]. 中国表面工程, 2009, 22 (2):53. DOI: 1001-3806(2004)06-0591-04
LIN Yunsen, DONG Shiyun, TIAN Xinli, et al. Electrolytic grinding of tooth surface of laser cladding hard and tough material [J].Chinese Surface Engineering, 2009, 22 (2):53. DOI: 1001-3806(2004)06-0591-04

[10] 喻泽文. WC/Fe 激光熔覆涂层的制备及磨削加工性研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2016
YU Zewen. Study on WC/Fe composite coating by laser cladding and its grinding machinability [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2016

[11] KAR S, BANDYOPADHYAYA P P, PAUL S, et al. High speed and precision grinding of plasma sprayed oxide ceramic coatings[J]. Ceramics International, 2017, 43(17):15316. DOI: 10. 1016/j. ceramint. 2017. 08. 071

[12] 盛晓敏. 超高速磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 154
SHENG Xiaomin. Super-high-speed grinding technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010:174

[13] ILL A D, PAOLETTI A. A comparison between conventional abrasives in grinding of SiC-aluminum composities [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(2): 173. DOI: org/10. 1016/S0890-6955(99)00061-9

[14] DING Wenfeng, ZHAO Biao, XU Jiuhua, et al. Grinding behavior and surface appearance of (TiCp+ TiBw)/Ti-6Al-4V titanium matrix composite[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014,27(5): 1334. DOI: org/10. 1016/j. cja. 2014. 08. 0061000-9361

[15] 于晓玲. 高体积分数 SiCp/Al 复合材料精密磨削机理及表面评价研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012
YU Xiaoling. Research on precision grinding mechanism and surface evalution of SiC/Al composites with high volume fraction[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012

(编辑 杨 波)