

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.04.003

激光熔覆 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 高熵合金 涂层刀具的性能*

张爱荣¹, 梁红玉^{1,2}, 李 焯¹

(1. 太原工业学院 机械工程系, 太原 030008; 2. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 利用激光熔覆技术制备了 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 高熵合金涂层刀具, 研究了激光快速凝固和经过 1 000 °C 退火处理的 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 高熵合金涂层微观组织和硬度、摩擦磨损性能, 并比较了普通高速钢及高熵合金涂层刀具的切削加工性能。结果表明: 激光熔覆 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 高熵合金涂层的主要相结构为 bcc 相, 涂层具有较好的高温稳定性。激光熔覆高熵合金涂层刀具表面硬度高, 摩擦因数小, 断屑效果好, 被加工材料表面光洁度高。

关键词: 高熵合金; 激光熔覆; 涂层刀具; 高速切削

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)04-0027-05

Property of AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} High-entropy Alloy Coating Tool Prepared by Laser Cladding

ZHANG Ai-rong¹, LIANG Hong-yu^{1,2}, LI Ye¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008; 2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} high-entropy alloy coated cutting tools was prepared by laser cladding. The microstructure, hardness, friction and wear properties of the AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} high-entropy alloy coatings prepared by laser rapid solidification and annealing treatment at 1 000 °C were studied. The machinability of the high-speed-steel tools and high-entropy alloy coated tools was compared. Results show that the main alloy structure of the coating is a body centered cubic (BCC) and the coating performs high temperature stability. The high-entropy coated cutting tool is characterized by higher hardness, lower friction coefficient, better chip breaker, and better surface finish of the machined materials.

Key words: high-entropy alloy; laser cladding; coated cutting tools; high speed cutting

0 引 言

高速切削过程中, 刀具不仅应该具有优良的抗冲击和耐磨性能还应当具有极高的红硬性和化学稳定性以及良好的断屑效果, 并能够适应更大的金属切削范围^[1-2]。突破传统涂层材料选择思路, 选用包含多种主要元素的高熵合金作为涂层材料, 可使涂层刀具的综合性能得到更大的提高。

高熵合金的概念最先由中国台湾清华大学的

科学家在 20 世纪 90 年代中期提出并进行了研究, 直到 2004 年才有研究成果出现。

Yeh J. W. 等人的研究表明^[3], 在高混合熵的作用下, 高熵合金呈现简单的体心立方或面心立方结构, 有些成分的高熵合金在铸态会析出纳米相结构甚至非晶质结构。对于快速凝固或真空镀膜而言, 由于原子大小差异会造成晶格扭曲, 高熵合金会展现纳米化, 甚至非晶化的倾向^[4]。高熵

收稿日期: 2013-03-17; 修回日期: 2013-06-25; 基金项目: * 北京科技大学新金属材料国家重点实验室开放基金(2010Z-05)

作者简介: 张爱荣(1966-), 女(汉), 山东宁阳人, 讲师, 硕士; 研究方向: 金属切削加工

网络出版日期: 2013-07-05 10:26; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130705.1026.001.html>

引文格式: 张爱荣, 梁红玉, 李焯. 激光熔覆 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 高熵合金涂层刀具的性能 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 27-31.

合金由于特别的组织结构,具有很多良好的性能,通过适当的合金配方设计,可获得高硬度、耐磨、耐高温软化及高温氧化、耐腐蚀等特性组合^[5-6]。

迄今为止,高熵合金主要采用真空电弧炉熔炼和熔铸等方法制备,少数文献报道了采用电化学沉积和磁控溅射制备高熵合金薄膜的方法^[7-8]。但这些方法所制备的薄膜厚度仅能够达到微米尺度,难以发挥高熵合金力学性能方面的优势,且对基底材料有一定的要求^[8]。激光熔覆具有快速加热和快速凝固的特点($10^4 \sim 10^6$ °C/s),所能制备的涂层厚度可达到毫米以上,目前激光熔覆技术已经用于制备非晶涂层^[9-10]。

文中采用激光熔覆技术制备了具有主要相为bcc结构的 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25}高熵合金涂层刀具,重点讨论了激光快速凝固和高温退火对涂层组织结构及刀具摩擦磨损性能、切削加工性能的影响。

1 材料制备方法

1.1 涂层材料成分设计

选取 Al-Cr-Co-Fe-Ni-Mo-Ti-Si 合金系粉末制备刀具涂层材料,其成分如表 1 所示。

表 1 涂层材料成分/(摩尔比)

Table 1 Composition of coated material/(molar ratio)

Element	Al	Cr	Co	Fe	Ni	Mo	Ti	Si
Content	1	1	1	1	1	1	0.75	0.25

1.2 激光熔覆涂层制备

激光熔覆设备为 HUST-5000 横流 CO₂ 激光器,配套机床为 JKR5170 多功能数控设备,激光波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$,基体为 W18Cr4V 高速钢铣刀。涂层材料采用纯度高于 99.5%,粒度 $6 \sim 8 \mu\text{m}$ 的合金粉末混合而成。将混合粉末研磨均匀后涂覆在基体表面(厚度约为 1 mm),熔覆后形成 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 刀具涂层,如图 1 所示。熔覆过程用氩气为保护气体,纯度为 99.9%,熔覆参数为:激光功率 2.5 kW,扫描速率 400 mm/min,光斑直径 3 mm,熔覆后涂层在氩气保护下于 1 000 °C 退火 3 h。

采用 XJP-6A 倒置金相显微镜观察涂层的微观组织,KYKY-3800B 型扫描电镜观察涂层表面形貌,并应用 TF-5500 型 X 射线衍射仪对涂层相结构进行分析。采用 HVT-1000 维氏硬度

计测量涂层表面硬度,试验力 200 N,试验力保持时间 10 s,显微镜倍率 40 倍,压头钢球 $\Phi 10 \text{ mm}$ 。MMW-1 立式万能摩擦磨损试验机测量涂层摩擦磨损性能,在 XCG24A 万能铣床上观察刀具断屑效果及被加工材料表面状况。



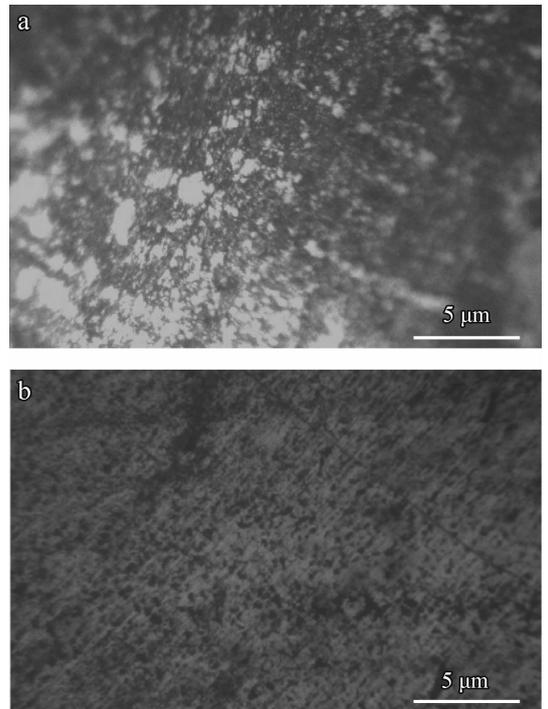
图 1 激光熔覆高熵合金涂层铣刀

Fig. 1 High-entropy alloy coated cutting tools prepared by laser cladding

2 结果与讨论

2.1 涂层微观组织

激光熔覆高熵合金涂层表面及横断面微观金相组织如图 2 及图 3 所示。



(a) Before annealing (b) After annealing

图 2 熔覆态及退火后高熵合金涂层表面微观组织
Fig. 2 Surface microstructure of high-entropy alloy coating before and after annealing

从图中可知,熔覆后涂层内部组织粗大不均匀,与基体的结合面呈高低起伏状态。经 1 000 °C

保温 3 h 退火后涂层组织细小均匀,涂层与基体的结合情况得到明显改善。

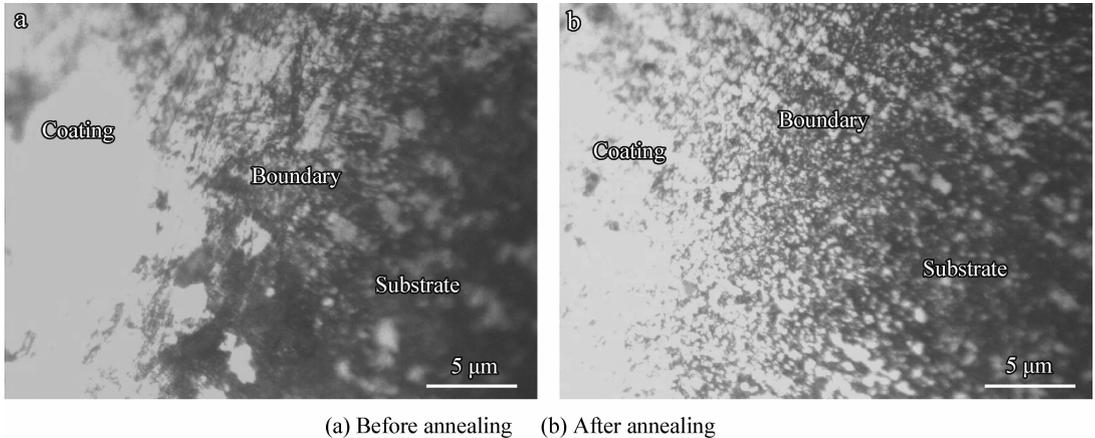


图 3 熔覆态及退火后高熵合金涂层横断面微观组织

Fig. 3 Cross-section microstructure of high-entropy alloy coating before and after annealing

2.2 涂层的相结构

图 4 为熔覆态和经 1 000 °C 退火的高熵合金涂层 XRD 图谱。从图可知,熔覆态和退火处理后涂层的 2 个衍射峰 2θ 分别为 44.5° 和 65.0° ,与 bcc 结构的 α -Fe 衍射峰相似,表明涂层的主要相结构为 bcc 相。经过 1 000 °C 高温退火后,XRD 谱中未见新相析出,表明涂层凝固后获得的 bcc 结构固溶体具有良好的高温稳定性。

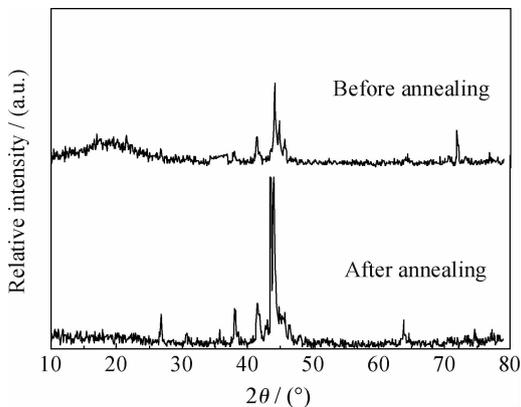


图 4 熔覆态及退火后高熵合金涂层 XRD 图谱

Fig. 4 XRD results of high-entropy alloy coating before and after annealing treatment

2.3 涂层的表面形貌

图 5 为熔覆态和经 1 000 °C 退火的高熵合金 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 涂层粉末颗粒的表面 SEM 形貌。从图中可知,熔覆后涂层表面起伏

大、质量差,退火后涂层表面致密均匀。表明退火后的高熵合金涂层组织更稳定,有利于提高刀具的切削加工性能。

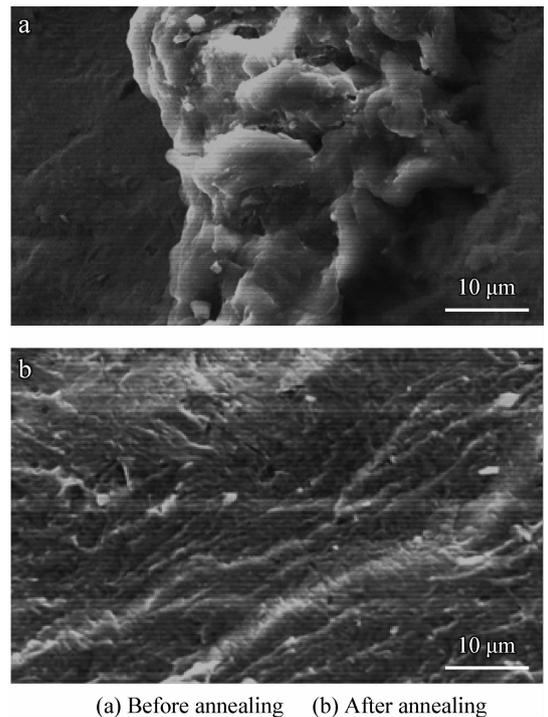


图 5 熔覆态及退火后高熵合金涂层表面 SEM 形貌
Fig. 5 SEM morphologies of high-entropy alloy coating before and after annealing

2.4 涂层的表面硬度

表 2 为熔覆态及退火后涂层的表面硬度。试验表明熔覆态及热处理后涂层表面硬度较高,分别

为 553 HV_{0.2} 及 408 HV_{0.2}。经过 1 000 °C 退火后 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 高熵合金涂层表面硬度有所下降,表面硬度的降低有利于提高涂层材料的韧性,从而提高刀具的切削加工性能。

表 2 退火前后高熵合金涂层的表面硬度

Table 2 Surface hardness of high-entropy alloy coating before and after annealing

Coatings	Hardness/HV _{0.2}			Average/HV _{0.2}
Before annealing	529	549	582	553
After annealing	386	403	435	408

2.5 刀具的摩擦磨损性能

在载荷 50 N, 转速 100 r/min, 室温条件下, 比较普通高速钢及高熵合金涂层刀具的摩擦磨损性能, 如图 6 和图 7 所示。当转速、试验力、温度一致时, 高熵合金涂层刀具平均摩擦力较低为 3.9 N,

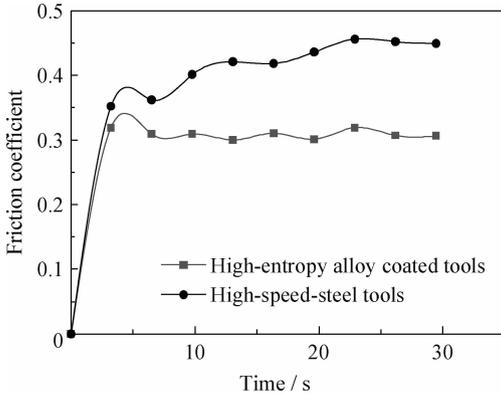
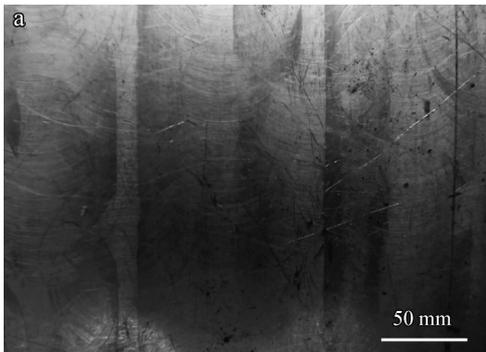


图 6 普通高速钢刀具及高熵合金涂层刀具摩擦因数与时间关系

Fig. 6 Relationship between friction coefficient and time of the high-speed-steel tools and high-entropy alloy coated tools



(a) Machined by high-speed-steel tools

平均摩擦因数为 0.306, 而普通高速钢刀具的平均摩擦力为 5.467 N, 平均摩擦因数为 0.449。表明高熵合金涂层可改善刀具的表面质量, 提高刀具的耐磨性能。

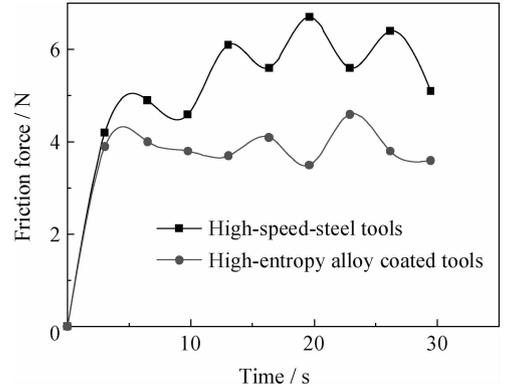
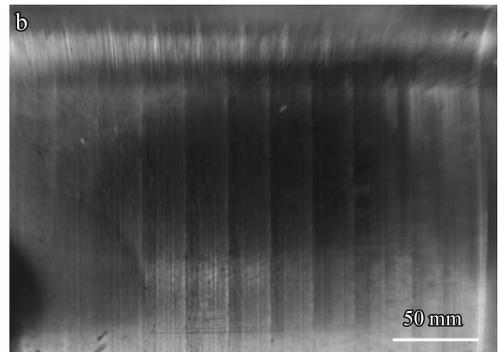


图 7 普通高速钢刀具及高熵合金涂层刀具摩擦力与时间关系

Fig. 7 Relationship between friction and time of the high-speed-steel tools and high-entropy alloy coated tools

2.6 刀具的切削性能

保持进给量为 25 mm, 切削深度为 10 mm, 主轴转速为 600 r/min, 被加工材料为 2A12 铝合金, 其硬度为 HRB 57.2。试验得到普通高速钢刀具所加工的工件切屑较大, 而且很粘刀, 采用高熵合金涂层铣刀铣削的工件切屑较小。比较两种刀具被加工材料的表面光洁度, 如图 8 所示。在高速铣削时, 普通高速钢铣刀被加工材料表面光洁度不高; 高熵合金涂层铣刀被加工材料表面光洁度得到明显改善。由于高熵合金涂层刀具表面质量好, 硬度、耐磨性能高, 使刀具的切削加工性能得到明显改善, 有利于提高被加工材料的表面质量, 可用于对材料表面质量要求较高的零件加工。



(b) Machined by high-entropy alloy coated tools

图 8 普通高速钢及高熵合金涂层刀具被加工材料的表面形态

Fig. 8 Surface morphologies of the materials machined by the high-speed-steel tools and high-entropy alloy coated tools

3 结 论

(1) 熔覆态和经 1 000 °C 退火的高熵合金涂层 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 主要为 bcc 结构。经过 1 000 °C 高温退火后,涂层表面质量好,组织更均匀,涂层与基体的结合情况得到明显改善,但涂层硬度有所降低。退火后未见新相析出,表明获得的 bcc 结构固溶体具有良好的高温稳定性。

(2) 普通高速钢刀具加工过程中摩擦力及摩擦因数高,切屑很粘刀,被加工材料表面光洁度不高。采用同样的铣削参数,高熵合金涂层刀具加工过程中摩擦力及摩擦因数明显降低,被加工材料表面光洁度较好。

参考文献

- [1] 戚正风,任瑞铭. 国内外刀具材料发展状况 [J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 15-16.
- [2] 赵炳桢. 现代刀具创新的特点 [J]. 工具技术, 2008, (10): 14-16.
- [3] 叶均蔚,陈瑞凯,林树均. 高熵合金的发展概况 [J]. 工业材料杂志, 2005, 224(8): 71-79.
- [4] 梁秀兵,魏敏,程江波,等. 高熵合金新材料的研究进展 [J]. 材料工程, 2009, 12: 75-79.
- [5] Wang F J, Zhang Y, Chen G L. Atomic packing efficiency

and phase transition in a high entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 478(1/2): 321-324.

- [6] Zhou Y J, Zhang Y, Wang F J, et al. Phase transformation induced by lattice distortion in multiprincipal component CoCrFeNiCu_xAl_{1-x} solid solution alloys [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(24): 241917-241917-3.
- [7] Jiang N, Shen Y G, Zhang H J, et al. Superhard nanocomposite Ti-Al-Si-N films deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering [J]. Materials Sciences and Engineering: B, 2006, 135(1): 1-9.
- [8] Zhang H, Pan Y, He Y Z, et al. Microstructure and properties of 6FeNiCoSiCrAlTi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(6): 2259-63.
- [9] Lin C Y, Cho Y H. Elucidating the microstructural and tribological characteristics of NiCrAlCoCu and NiCrAlCoMo multi-component alloy clad layers synthesized in situ [J]. Surface and Coating Tehnology, 2009, 203(12): 1694-701.
- [10] Huang P K, Yeh J W. Inhibition of grain coarsening up to 1 000 °C in (AlCrNbSiTiV)N superhard coatings [J]. Scripta Materialia, 2010, 62(2): 105-108.

作者地址: 山西太原迎新街北一巷二号 030008
太原工业学院机械工程系
Tel: (0351) 3569 376 (梁红玉)
E-mail: lhy0351@163.com

• 学术动态 •

2013 中国表面工程设备材料行业“出新环保杯”十佳评选启动

为充分发挥行业协会在行业经济发展中的协调、自律、引导、推动和桥梁作用,推进表面处理行业规范、有序、稳定发展,中国表面工程协会市场工作委员会、中国表面工程协会设备材料工作委员会联合工作小组将开展首届(2013)中国表面工程设备材料行业“出新环保杯”十佳评选活动。

本次活动面向所有表面处理行业企业,以及为表面处理行业做出突出贡献的精英领导人(含港台企业及个人,跨国公司及个人等),坚持自愿参与与行业推荐相结合的原则,采用专家评价和用户评议相结合的评选方式,设立中国表面工程设备材料行业十佳民族品牌奖、中表协市场工作委员会、中表协设备材料工作委员会十佳会员奖、中国表面工程设备材料行业十佳杰出人物奖、中国表面工程设备材料行业(材料类)十佳企业奖等 7 个奖项。活动组委会将于 2013 年 11 月在浙江金华召开“首届(2013)中国表面工程设备材料行业‘出新环保杯’十佳评选”表彰大会。届时将为所有获奖企业及企业人物颁奖。评选结果将通过所有宣传渠道进行公示和报道。

(摘自中国表面工程协会设备材料工作委员会网)