

铜元素对FeCr合金激光熔覆层性能影响及铣削加工减振机理研究

赵彦华^{1,2} 孙杰^{1,2} 李剑峰^{1,2}

¹山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061

²高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061

摘要 针对大型离心式管线压缩机叶片激光熔覆修复层难加工问题,进行激光熔覆减振合金配方与修复层铣削加工一体化工艺理论研究。使用添加不同质量分数铜元素的FeCr合金粉料在KMn钢基体上制备激光熔覆修复层;通过扫描电镜、X射线衍射仪及能谱分析仪对修复层微观组织及物相组成进行观察分析;对修复层显微硬度进行测试;对修复层室温干摩擦情况下的耐磨性进行测试;采集修复层侧铣过程中的振动信号,分析铜元素质量分数对修复层铣削振动及表面粗糙度的影响。结果表明,铜元素的加入起到细化晶粒的作用,含铜修复层的硬度、耐磨性均优于不含铜元素的修复层;含铜修复层铣削振动有显著降低,有效避免了颤振出现。

关键词 激光技术;铜元素;晶粒细化;侧铣;加工振动抑制

中图分类号 TG249;V261.2+3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303003

Effect of Cu on Properties of FeCr Laser Cladding Layer and Machining Vibration Suppressing in Side Milling

Zhao Yanhua^{1,2} Sun Jie^{1,2} Li Jianfeng^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

²Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture Ministry of Education, Jinan, Shandong 250061, China

Abstract Aiming at the processing difficulties of laser cladding remanufacturing layer of large centrifugal pipeline compressor blade, cladding damping alloy formula and repaired layer milling process theory are investigated. The laser cladding repaired layers are prepared by FeCr alloy and Cu mixed powder on KMn steel substrate. The microstructure, phase constitution, hardness and wear resistance of the repaired layer are investigated by scanning electron microscope, X-ray diffractometer, energy dispersive spectrometer, Vickers digital micro-hardness tester, sliding wear tester and optical profiler. Vibration signal is collected during side milling process of repaired layer. The impact of Cu on machining vibration and surface roughness is investigated. The results show that, the grain size decreases dramatically and the microstructure of repaired layer is refined with the Cu content increasing. The hardness and wear resistance of coatings with Cu are improved significantly. Machining vibrations of repaired layer with Cu are obviously reduced, and the chatter is effectively avoided occurring.

Key words laser technique; Cu element; grain refinement; side milling; machining vibration suppressing

OCIS codes 000.2658; 140.3470; 160.3900

收稿日期: 2014-08-26; 收到修改稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家973计划(2011CB013403)、泰山学者建设工程资助

作者简介: 赵彦华(1987—),男,博士研究生,主要从事机械装备再制造方面的研究。E-mail: zhaoyanhua_007@163.com

导师简介: 孙杰(1967—),男,博士,教授,主要从事难加工材料高速切削、激光加工技术等方面的研究。

E-mail: sunjie@sdu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

离心式压缩机作为一种重要的能量转换机械装置,广泛应用于能源、电力、石油、化工、天然气输送、冶金等行业,在国民经济发展及国防军事领域占有重要地位。随着我国可持续发展重大战略推进,蕴含着高附加值的离心压缩机再制造研究越来越受到重视^[1]。激光熔覆技术是机械装备再制造的有效方法^[2-4],也可作为大型离心式管线压缩机叶片再制造的有效手段。为了适应恶劣的服役环境、保证再制造产品使用寿命,压缩机叶片激光熔覆修复层需要具有优异的硬度、耐磨性;同时还要避免因高硬度、高耐磨性导致的修复层机械加工过程中振动剧烈、表面质量较差等问题。因此,研究兼具优异硬度、耐磨性及减振性能的激光熔覆合金粉料配方具有重要意义。

添加异质元素是提高合金阻尼性能的有效手段之一,近年来针对镁合金、锌合金、铁合金等阻尼强化的研究较为常见^[5-6]。张忠明等^[7]通过在锌合金中加入铜元素,达到优化组织结构、提高阻尼性能的目的;李吉庆^[8]通过添加铜元素提高了镁锂合金阻尼性能;Azcoitia等^[9]研究指出铝、钼元素的加入可以提高铁铬合金的阻尼性能;Baik^[10]研究指出在锰质量分数为17%时铁锰合金具有最优的阻尼性能。异质元素的加入也可以起到提高合金硬度等组织性能的作用,如赵荣达^[11]、秦斌等^[12]分别研究并指出在1Cr13钢种加入铜元素可以提高本体硬度、强度及韧性;ZEREN等^[13]研究了铜元素对Al-Si-xCu合金微观结构和硬度的影响,指出随着铜质量分数的增加合金硬度增加;李建春^[14]研究了铜元素对锌合金组织性能的影响,得出铜元素可以提高锌合金硬度的结论。因此,异质元素的加入既可以提高合金的阻尼特性,也可以提高合金的硬度等性能。目前尚未见以提高硬度、耐磨性同时兼顾切削加工振动抑制作用的激光熔覆层阻尼强化相关研究。

铣削加工过程中的振动会严重影响工件表面质量、刀具耐用度及生产效率^[15]。多年来许多学者针对具有薄壁特征工件加工过程中抑制振动、避免颤振问题进行了广泛研究,如通过变齿距刀具^[16]、多重调谐质量阻尼器^[17]、加工过程在线监控及加工参数实时调节^[18]、主轴转速程序控制^[19]等手段抑制加工振动。目前针对切削加工振动抑制的研究大都从被加工工件之外的因素(机床、刀具、加工参数等)入手,尚未出现通过增加工件自身减振性能(阻尼强度)达到抑制振动目的的研究。

本文选择用于大型离心式管线压缩机制造的低合金高强度钢(KMN钢)为基体材料,使用添加不同质量分数铜元素的FeCr合金粉料制备激光熔覆修复层,对修复层微观组织、物相组成、显微硬度、耐磨性等进行分析评价;对激光熔覆修复层进行侧铣加工试验,采集振动信号并进行时频域分析,结合修复层加工表面完整性分析铜元素对激光熔覆修复层减振性能的影响,并对试验现象及机理进行讨论。

2 试验材料与方法

2.1 激光熔覆修复试验及修复层性能测试

使用铜质量分数0~16%的FeCr合金粉料在KMN钢基体上进行激光熔覆修复试验。试验所用KMN钢、FeCr合金粉料化学成分质量分数如表1所示,使用纯度不低于99.5%的铜粉与FeCr合金粉料混合,铜元素在合金粉料中的质量分数分别为0、4%、8%、12%和16%,合金粉料平均粒度为220目(0.065 mm)。采用额定功率为6 kW的多模横流CO₂激光器进行试验,激光参数设定为:激光器输出功率为4 kW,光斑直径为3 mm,扫描速度为500 mm/min,熔覆搭接率为40%,单层修复层厚度为0.5±0.05 mm,修复层总厚度为2±0.2 mm。KMN钢基体及制得修复层外形如图1所示,基体尺寸长(L_s)、宽(W_s)、高(H_s)分别为120、78、5 mm,修复层尺寸 L_c 、 W_c 、 H_c 分别为40、20、2 mm。

表1 FeCr合金粉料及KMN钢化学元素组成(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of FeCr alloy powder and KMN steel (mass fraction, %)

Chemical element	C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	B	Fe
KMN	0.13~0.18	0.5~0.8	0.17~0.37	0.9~1.1	2.2~2.5	-	≤0.30	≤0.030	≤0.030	-	Balance
FeCr alloy powder	0.15	-	1.1	1.0	17.35	1.35	-	-	-	≤1.26	Balance

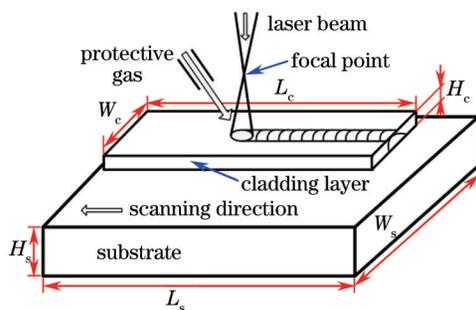


图1 激光熔覆层及基体外形示意图

Fig.1 Schematic illustration of laser cladding layer and substrate

使用扫描电镜(SEM)对经镶嵌、研磨、抛光的修复层剖面进行微观组织形貌分析;使用X射线衍射仪(XRD, 铜靶, $K_{\alpha}=1.5406$, 40 kV, 30 mA, $2\theta=20^{\circ}\sim 90^{\circ}$)、能谱分析仪(EDS)对修复层所含物相进行了测试。使用MH-6显微硬度计对修复层剖面硬度分布进行测试,加载为0.098N,载荷保持时间为5s,对相同深度位置取3个点进行硬度测量后取平均值。分别对不同铜质量分数的修复层试样使用UMT-2摩擦磨损试验机在室温、无润滑条件下进行滑动摩擦试验,使用GCr15钢球作为摩擦试验的对磨副,其直径为9.525 mm,试验时工件表面作用0.147 N 垂直载荷,滑动速度为5 m/s,总时间为15 min,使用白光干涉仪(Veeco NT9300, USA)测试磨痕体积作为衡量耐磨性的指标。

2.2 修复层铣削振动性能测试

在三轴联动数控加工中心(ACE-V500, Daewoo)上进行激光熔覆修复层干切削侧铣加工试验,如图2所示。考虑到激光熔覆修复层试样尺寸较小的限制,选择固定的切削速度 V 和径向切深 a_e ,以每齿进给量 f (单位 mm/z, z 为刀具齿数)和轴向切深为变量,设计四水平的单因素铣削试验,具体铣削参数如表2所示。使用安装在主轴上的加速度传感器(KD9002)测试加工过程中的振动信号,采样频率为4096 Hz;振动信号经过信号放大器(AZ802A)后由信号采集箱(Denmark B&K)采集,使用MATLAB软件对振动信号进行分析处理。铣削试验使用的刀具为直径20 mm的四齿整体硬质合金立铣刀,型号为Kennametal F4AJ2000ADN30。使用白光干涉仪(Veeco NT9300, USA)测试加工表面粗糙度。修复层试样在铣削试验时首先进行粗加工,使其表面质量趋于一致。

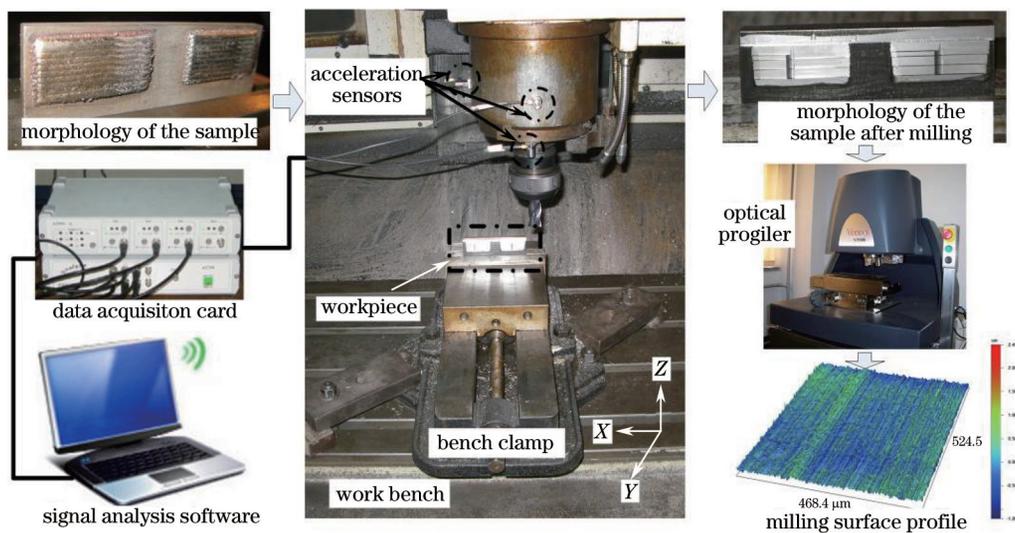


图2 试验设备及试验现场

Fig.2 Milling experimental setup

3 试验结果与分析

3.1 激光熔覆层特征分析

3.1.1 微观结构及物相

铜质量分数为4%的修复层第一层横截面微观形貌如图3(a)所示,修复层微观组织致密,无气孔、裂纹等

表2 激光熔覆层铣削参数

Table 2 Milling conditions of laser cladding layers

Exp.#	Feed f /(mm/z)	Axial Doc a_p /mm	Cutting speed V /(m/min)	Radial Doc a_e /mm
1	0.02	4	150	0.3
2	0.04	4	150	0.3
3	0.06	4	150	0.3
4	0.08	4	150	0.3
5	0.02	8	150	0.3
6	0.02	12	150	0.3
7	0.02	16	150	0.3

缺陷;修复层主要由树枝晶、胞状晶及枝间共晶组成。其他不同铜质量分数的修复层具有相似微观组织结构,不再赘述。为了获得铜元素对激光熔覆层微观组织结构的影响规律,对各修复层第一层中间位置[图3(a)中方框所在位置]微观形貌进行观察,如图3(b)~(f)所示,分别对应铜质量分数为0~16%。通过对比发现,不含铜的修复层晶粒最为粗大,枝晶生长方向性明显,随着铜质量分数从4%增大到16%,修复层晶粒不断细化,当铜质量分数达到16%时,晶粒最为细小,枝晶生长的方向性明显减弱。使用X射线衍射仪分析获得了各激光熔覆修复层衍射图谱(如图4所示),对比三条XRD曲线可看出随着铜质量分数增加部分衍射峰有一定增强,通过标定可知此处物相为Cu、Cu₃Fe₁₇,即随着铜的加入产生了含铜物相Cu、Cu₃Fe₁₇。通过晶间EDS图谱分析(图5所示)可以看出,晶界处铜、铬含量高于晶内,说明含铜相及富铬物相在晶界处聚集,富铬物相主要为Fe-Cr、Cr₉Si_{0.9}。通过标定可知修复层的其他物相为Fe、Fe_{9.7}Mo_{0.3}以及Fe_{0.64}Ni_{0.36}。

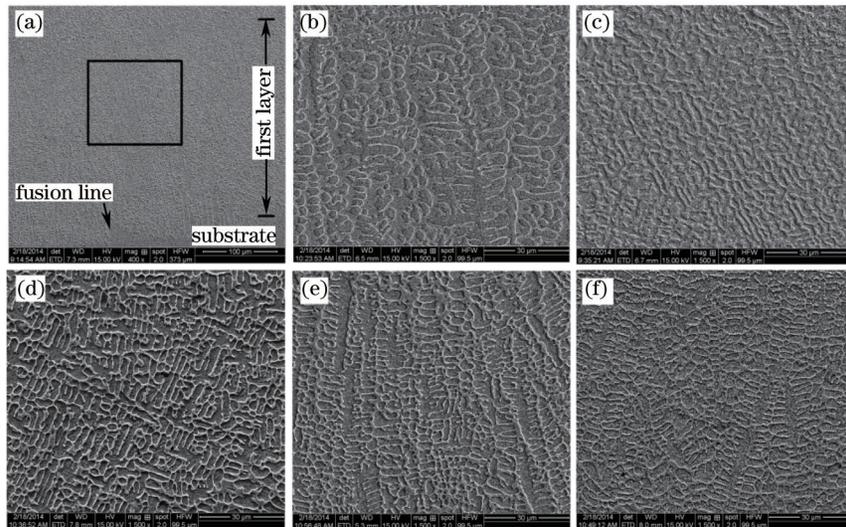


图3 激光熔覆修复层微观组织结构。(a) 铜质量分数4%时修复层首层;(b) 0%;(c) 4%;(d) 8%;(e) 12%;(f) 16%
Fig.3 Microstructure of laser cladding layer with different Cu contents. (a) First layer of 4% content of Cu; (b) 0%; (c) 4%; (d) 8%; (e) 12%; (f) 16%

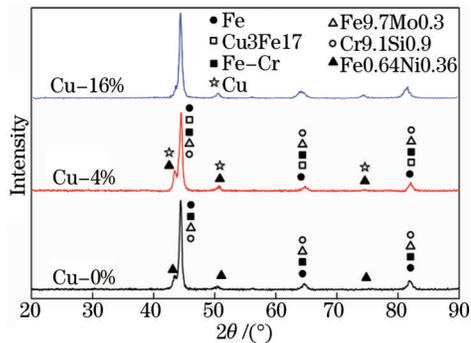


图4 激光熔覆修复层X射线衍射仪物相分析图谱
Fig.4 XRD spectra for the laser cladding layers

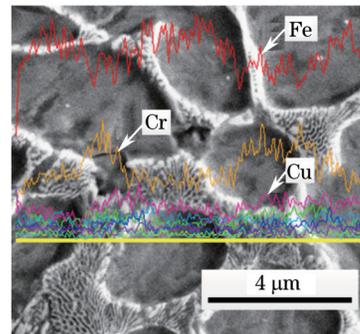


图5 晶间能谱分析图谱
Fig.5 EDS of intergranular spectra

有研究指出铜元素的加入可以起到细化钢材晶粒的作用^[20-22],晶粒细化的原因为铜在铁中的固溶度非常小,并且晶界处晶格错配度高,修复层中更多的铜及富铜相偏聚在晶界上及晶界附近,在晶粒生长过程中对晶界移动及晶粒生长起到抑制作用;且铜原子直径相对较大,对本体晶粒生长也具有一定的抑制作用。

3.1.3 显微硬度测试分析

使用显微硬度计(MH-6)对各激光熔覆修复层显微硬度进行了测试,获得不同深度的硬度平均值及误差并绘制成硬度分布曲线,如图6所示。可以看出当铜元素质量分数在0~12%的范围内,随着铜含量的增加修复层的硬度逐渐升高,铜质量分数为12%时的修复层平均硬度为633.6 HV,是不含铜修复层平均硬度(555.3 HV)的1.14倍,是基体KMN钢硬度(316 HV)的2倍。随着铜质量分数的进一步提升,修复层硬度略有下降,当铜质量分数为16%时其平均硬度为611.3 HV。另外可以看出相比于不含铜的修复层,随着铜元素的加入,修复层的硬度分布变得更加均匀。

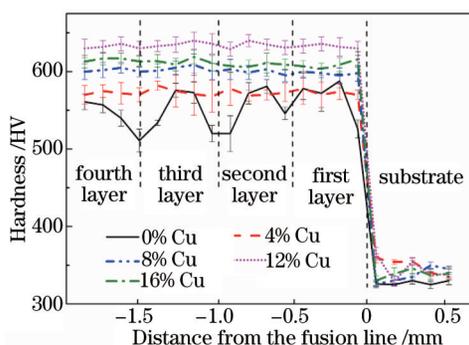


图6 激光熔覆修复层显微硬度分布曲线

Fig.6 Cross-section microhardness profile of laser clad layers

铜元素的加入使得修复层晶粒得到细化,通常来说细晶粒金属比粗晶粒金属有更高的强度、硬度^[23],这是因为细晶粒受到外力发生塑性变形可分散在更多晶粒内进行,塑性变形较均匀,应力集中较小。因此,与粗晶粒金属相比,在承受相同外力的情况下细晶粒金属局部抵抗硬物压入其表面的能力更高,即硬度更高。此外,晶粒越细,晶界面积越大、晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展;细晶强化也是工业上提高材料强度、硬度的有效手段。第二相强化也是合金硬度提高的原因之一,以细小弥散颗粒分布于基体相中的第二相与位错产生交互作用,阻碍位错运动,从而提高合金的变形抗力。因此,在铜质量分数在0~12%范围升高时修复层硬度随之升高。当修复层中铜质量分数增大到16%时硬度出现小幅下降。原因是纯铜硬度远低于铁基合金,大量铜元素的加入降低了合金的平均硬度;另外过量的铜在激光熔覆熔池凝固过程中会与杂质反应,残留在合金溶液中未被排出的反应物形成氧化物夹杂,在凝固后的合金中分布不均匀,致使合金在受外力过程中易产生应力集中,也是导致修复层硬度下降的原因^[14]。

3.1.4 耐磨性分析

各激光熔覆修复层的磨损率如图7所示。可以看出铜质量分数在0~12%的范围内,随着铜质量分数的增加磨损率逐渐降低,即耐磨性逐渐增强;当铜质量分数升高到16%时,修复层磨损率小幅上升,即耐磨

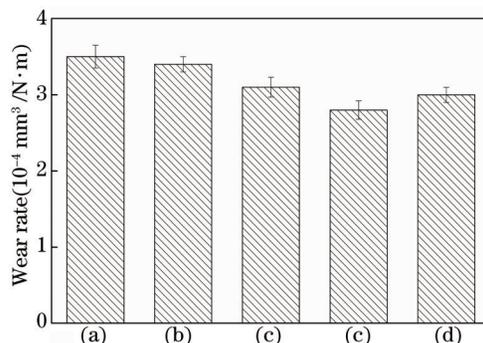


图7 不同铜质量分数下各激光熔覆修复层的磨损率。(a) 0%; (b) 4%; (c) 8%; (d) 12%; (e) 16%

Fig.7 Wear rates of laser clad layers with different Cu contents. (a) 0%; (b) 4%; (c) 8%; (d) 12%; (e) 16%

性有所降低。修复层磨损率随铜质量分数的变化趋势与修复层硬度随铜质量分数的变化趋势相同,即铜元素加入引起的细晶强化效应在直接影响强度、硬度的同时也影响了修复层的耐磨性,晶粒越细硬度及耐磨性越好。当铜质量分数达到16%时,随着修复层硬度的下降,其耐磨性也出现了一定的降低。但含铜的修复层其耐磨性总是优于不含铜的FeCr合金修复层。

3.2 铜质量分数对铣削加工稳定性的影响

将采集的铣削过程振动信号分别进行时域、频域分析,以探究添加铜元素对铣削加工稳定性的影响。

3.2.1 时域信号分析

各切深参数下不含铜的修复层Y方向振动加速度幅值均大于含铜元素的修复层,如图8所示,其中 $V=150\text{ m/min}$, $a_c=0.3\text{ mm}$, $f=0.02\text{ mm/z}$ 。随着铜质量分数从4%增加到16%,各切深参数下修复层铣削振动幅值逐渐降低。当铜质量分数达到16%时,铣削过程振动幅值最低。每齿进给量下铜质量分数对铣削过程振动的影响如图9所示,其中 $V=150\text{ m/min}$, $a_p=4\text{ mm}$, $a_c=0.3\text{ mm}$,可以看出铜质量分数对振动影响的基本趋势与图8所表现出的趋势是相同的。不含铜的修复层铣削加工振动幅值大于含铜元素的修复层。随着铜质量分数的增加,各每齿进给量下修复层铣削振动幅值逐渐降低,铜质量分数达到16%时振动幅值达到最小值。通过Y方向振动时域信号可以看出,铜元素的加入起到了降低修复层铣削振动的作用。

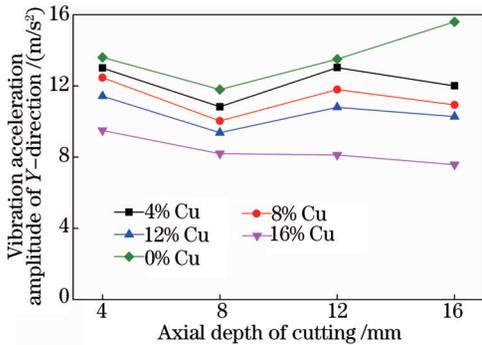


图8 不同切深下铜质量分数对振动幅值的影响
Fig.8 Effect of mass fraction of Cu on the vibration at different axial depths of cutting

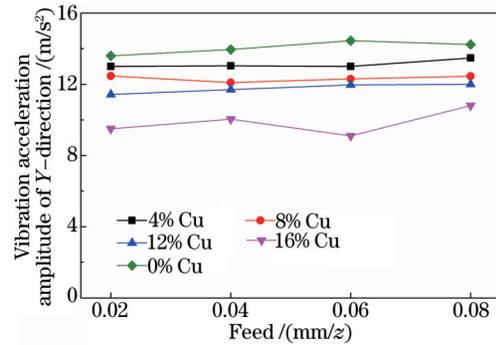


图9 不同每齿进给量下铜质量分数对振动幅值的影响
Fig.9 Effect of mass fraction of Cu on the vibration at different feeds

3.2.2 频域信号分析

对采集到的振动信号进行快速傅里叶变换(FFT)后对得到的频域信号进行分析。每组试验参数下的振动信号均进行了处理,现仅对具有代表性的第7组试验参数下的频域信号进行描述。

刀齿通过率(TPF, T_{TPF})为主轴转动频率(SF, H_{SF})与铣刀齿数(N)的乘积,其表达式分别为

$$T_{TPF} = N \cdot H_{SF}, \quad (1)$$

式中 N 为铣刀齿数; SF 为主轴转动频率,表示为

$$H_{SF} = \frac{n}{60} = \frac{1000V}{60\pi d}, \quad (2)$$

式中 n 是主轴转速,单位为 r/min ; V 是铣削速度,单位为 m/min ; d 为铣洗直径。

当切削处于稳定阶段时,其振动频谱幅值会出现在其变化频率即主轴转动频率的整数倍处,如果振动频谱幅值出现在非主轴转动频率整数倍处,则说明此频率处发生了异常振动;同时频谱信号幅值大小也可以说明切削过程中振动强弱。第7组试验参数下铜质量分数对振动频谱的影响如图10所示,其中 $V=150\text{ m/min}$, $a_p=16\text{ mm}$, $a_c=0.3\text{ mm}$, $f_z=0.02\text{ mm/z}$ 。从图中可以看到,不同铜质量分数修复层频谱信号具有明显的周期性,且峰值大都出现在主轴转动频率整数倍或刀齿通过率处,只有不含铜元素修复层在非主轴转动频率整数倍处出现了振动频谱信号峰值,即893 Hz处,如图10(b)所示,结合较大振动时域信号及现场出现的刺耳噪声,可以推断在该组加工参数下不含铜修复层铣削过程出现了颤振。随着铜元素的加入,异常频谱峰值信号与刺耳的噪声均消失,说明铜元素的加入使修复层具有减振性能,抑制了颤振的出现。对比图10(b)、(c)可以看出,即使是具有最高硬度、耐磨性的铜质量分数为12%的修复层,其振动频谱最大峰值与不含铜修复层相比也有明显降低,并且图10(c)中各频谱峰值的平均值远小于图10(b)中各频谱峰值的均值。

其他各含铜元素修复层的频谱信号曲线也有相同的趋势。这说明加入铜元素的修复层铣削加工稳定性要优于不含铜元素的修复层,这与分析振动时域信号所得的结论吻合。

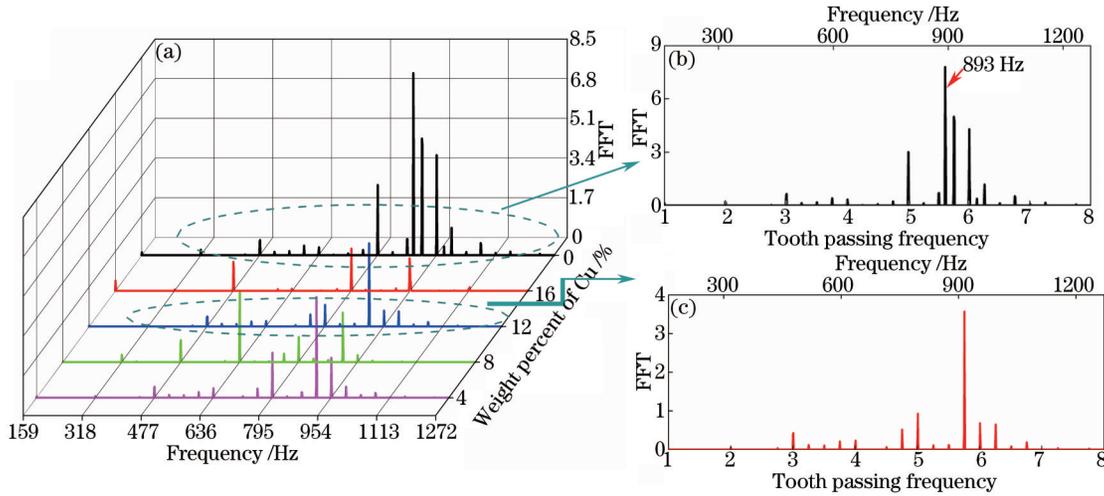


图10 第7组试验参数下修复层铣削振动频域信号。(a) 五组修复层;(b) 不含铜修复层;(c) 铜质量分数12%修复层

Fig.10 FFT of milling vibration at No.7 experiment for (a) five coatings; (b) coating without Cu; (c) coating with 12% content of Cu

3.3 铜质量分数对铣削表面粗糙度的影响

各轴向切深、每齿进给量下铜质量分数对铣削表面粗糙度 R_a 的影响分别如图11、12所示,其中,图11情况中 $V=150\text{ m/min}$, $a_e=0.3\text{ mm}$, $f_z=0.02\text{ mm/z}$,图12情况中 $V=150\text{ m/min}$, $a_p=4\text{ mm}$, $a_e=0.3\text{ mm}$ 。从图中可看到,相同切削参数下,铜质量分数变化对铣削加工表面粗糙度的影响规律是相同的,即不含铜的修复层表面粗糙度值大于含铜的修复层的表面粗糙度;随着铜元素含量的增加,表面粗糙度值逐渐降低,铜质量分数达到16%时表面粗糙度值最小。

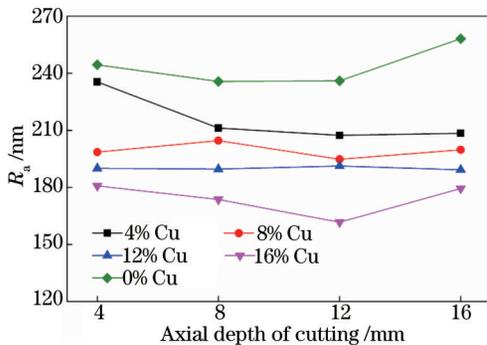


图11 不同切深下铜质量分数对表面粗糙度值的影响

Fig.11 Effect of mass fraction of Cu on the surface roughness at different axial depths of cutting

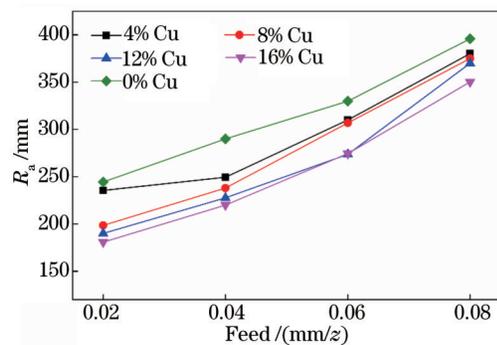


图12 不同每齿进给量下铜质量分数对表面粗糙度值的影响

Fig.12 Effect of mass fraction of Cu on the surface roughness at different feeds

切削加工过程中的振动对加工表面质量有直接影响,振动剧烈时所得到的加工表面质量必然会较差,因此铜质量分数对加工表面粗糙度的影响规律与铜质量分数对铣削加工振动的影响规律是相同的,不含铜的修复层剧烈振动降低了铣削加工稳定性,表面质量最差;铜质量分数达到16%时修复层硬度较低,铣削过程振动弱且较为平稳,所得的表面质量最优。相对其他切深而言,切深为16 mm时不含铜的修复层表面粗糙度值有明显上升,结合上文的时频域信号分析可知,这是因为在该参数下铣削过程中发生了颤振造成的。

3.4 减振机理分析

铣削过程稳定性的提高可归结为铜元素的加入提高了修复层的阻尼特性,使得修复层具有一定减振性能,阻尼性能的提高可以通过 Granato1 Lücke(G-L)位错阻尼理论^[24]和界面阻尼理论^[25]解释。G-L理论认为在振动条件下,晶体中点缺陷与位错产生弹性交互作用,使晶体形成了机械滞后现象,从而造成了振动能量的内耗。合金中的固溶原子、杂质原子及空位被称为弱钉扎点,随着铜元素的加入,铁基合金修复层的弱钉扎

点增多、位错密度增大,进而导致内耗增加。界面阻尼理论认为合金中的多相界面会由于各种原因产生滑动,从而产生了应力松弛,消耗振动能量。随着铜元素的加入,修复层晶粒细化、晶界数量增加,相邻晶粒及相邻相之间界面间相对滑动、内摩擦增加进而增加了内耗,即晶粒尺寸越小、量越多、界面面积越大,相对滑动消耗的振动能量越多。因此加入铜元素的激光熔覆修复层可以消耗掉更多振动能量,提高自身的阻尼性能,使得铣削加工的振动减弱,达到了抑制加工振动的目的。

结合对修复层硬度、耐磨性的分析,铜元素的加入使得 FeCr 修复层既具有较高的硬度、耐磨性,还可降低铣削加工过程中的振动,提高表面质量,因此,Fe-Cr-Cu 合金粉料适合于离心式压缩机叶片的修复再制造。铜质量分数为 12% 的修复层具有最高的硬度、耐磨性,同时具有相对较好的减振性能,铣削表面质量较高,可作为最优合金粉料配方用于压缩机叶片激光熔覆再制造。

4 结 论

通过在 FeCr 合金粉料中添加铜元素,制得了具有铣削振动抑制功能的激光熔覆修复层;对修复层的主要特性进行了测试分析,对铜元素引起的加工振动、表面质量变化进行了分析讨论,主要结论如下:

- 1) 铜元素的加入起到了细化晶粒的作用,随着铜含量的增加修复层晶粒细化程度有所提升。
- 2) 与不含铜的修复层相比,加入铜元素后修复层硬度、耐磨性均有了显著提升,这是由加入铜元素后细晶强化及第二相强化效应引起的。
- 3) 与不含铜的修复层相比,加入铜元素后修复层铣削过程中振动显著降低,表面质量显著提高,铜元素的加入有效提高了修复层的阻尼特性。

参 考 文 献

- 1 Shu Linsen, Cao Huajun, Xu Lei, *et al.*. 3D characteristic modeling method and application for remanufactured impeller of centrifugal compressor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 184-190.
舒林森,曹华军,许磊,等.离心压缩机再制造叶轮结构特征三维建模方法及应用[J].机械工程学报,2014,50(3):184-190.
- 2 Feng Hui, Li Jianfeng, Sun Jie. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803003.
封慧,李剑峰,孙杰.曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J].中国激光,2014,41(8):0803003.
- 3 Li Jianing, Gong ShuiLi, Wang Xichang, *et al.*. Physical and surface performance of laser clad Ni based coating on a TA15-2 alloy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103008.
李嘉宁,巩水利,王西昌,等.TA15-2合金表面激光熔覆Ni基涂层物理与表面性能[J].中国激光,2013,40(11):1103008.
- 4 Liu Haiqing, Liu Xiubo, Meng Xiangjun, *et al.*. Study on γ -NiCrAlTi/TiC+TiWC₂/CrS+Ti₂CS high-temperature self-lubricating wear resistant composite coating on Ti-6Al-4V by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 41(3): 0303005.
刘海青,刘秀波,孟祥军,等.Ti-6Al-4V合金激光熔覆 γ -NiCrAlTi/TiC+TiWC₂/CrS+Ti₂CS高温自润滑耐磨复合涂层研究[J].中国激光,2013,41(3):0303005.
- 5 Golmakaniyoon S, Mahmudi R. Microstructure and creep behavior of the rare-earth doped Mg-6Zn-3Cu cast alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(3): 1668-1677.
- 6 Lu Xili, Chen Feng, Li Weishu, *et al.*. Effect of Ce addition on the microstructure and damping properties of Cu-Al-Mn shape memory alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 480(2): 608-611.
- 7 Zhang Zhongming, Wang Jincheng, Xu Donghui, *et al.*. Effect of Al, Cu, Mg content on microstructure and damping capacity of zinc based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous metals, 1999, 9(S1): 1-6.
张忠明,王锦程,徐东辉,等.铝、铜、镁对铸态锌基合金组织和阻尼性能的影响[J].中国有色金属学报,1999,9(S1):1-6.
- 8 Li Jiqing. Study on Preparation and Ageing Precipitation Behavior of Superlight Mg-Li Alloy with Cu Addition[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. 26-36.
李吉庆.含铜超轻镁锂合金制备及其时效析出行为研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.26-36.
- 9 Azcoitia C, Karimi A. Magnetomechanical damping in Fe-Cr alloys and effect of Al and Mo addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 310(1): 160-164.
- 10 Baik S. High damping Fe-Mn martensitic alloys for engineering applications[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 198(3):

- 241-252.
- 11 Zhao Rongda. Influence of Copper on Microstructure and Properties of Low Carbon Martensite Antibacterial Stainless Steel[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2009. 26-33.
赵荣达. 铜含量对低碳马氏体抗菌不锈钢组织和性能的影响[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009. 26-33.
- 12 Qin Bin, Ma Yongzhu, Jiang Laizhu. Study on the properties of Cu-containing martensitic stainless steel[J]. Baosteel Technology, 2013, 2: 43-46.
秦 斌, 马永柱, 江来珠. 含铜马氏体不锈钢的性能研究[J]. 宝钢技术, 2013, 2: 43-46.
- 13 Zeren M, Karakulak E, Gümüş S. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(8): 1698-1702.
- 14 Li Jianchun. Effect of Mn and Cu content on microstructure and properties of Zn-Al alloy[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2009, 45(6): 331-334.
李建春. 锰、铜含量对锌铝合金组织与性能的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2009, 45(6): 331-334.
- 15 Choudhury S K, Sharath M S. On-line control of machine tool vibration during turning operation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 47: 251-259.
- 16 Huang Panling, Li Jianfeng, Sun Jie, *et al.*. Study on performance in dry ailing aeronautical titanium alloy thin-wall components with two types of tools[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 67: 258-264.
- 17 Yang Y, Muñoz J, Altintas Y. Optimization of multiple tuned mass dampers to suppress machine tool chatter[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(9): 834-842.
- 18 Siddhpura M, Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 61: 27-47.
- 19 Al-Regib E, Ni J, Lee S. Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(12): 1229-1240.
- 20 Hu Wenquan, Hu Shiju, Zhang Weiqiang. Influence of copper on antibacterial property and mechanical property of low-carbon martensite stainless steel[J]. Material & Heat Treatment, 2009, 38(2): 32-34.
胡文全, 胡世菊, 张伟强. 铜对低碳马氏体不锈钢抗菌性和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(2): 32-34.
- 21 Li Na. Study on effects of copper in steel[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2011, 34(2): 160-165.
李 娜. 铜在钢中的作用综述[J]. 辽宁科技大学学报, 2011, 34(2): 160-165.
- 22 Ouyang Huangsheng. Effects of Cu Content on the Microstructure and Mechanical Properties of 9Ni Cold Steel[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. 14-16.
欧阳凰生. Cu含量对9Ni低温钢显微组织与力学性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012. 14-16.
- 23 Zhang Lingfeng, Xiong Yi, Zhang Yi, *et al.*. Microstructure of high manganese steel by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 226-229.
张凌峰, 熊 毅, 张 毅, 等. 高锰钢在激光冲击作用下的微观特征[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 226-229.
- 24 Granato A, Lücker K. Application of dislocation theory to internal friction phenomena at high frequencies[J]. Appl Phys, 1956, 27(7): 789-805.
- 25 Liu Xianlan. Study on Mechanical Properties and Damping Capacities of Mg-Zn-Nd-Cd-Zr Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2012. 11-14.
刘先兰. Mg-Zn-Nd-Cd-Zr合金的力学性能和阻尼性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. 11-14.

栏目编辑: 宋梅梅