

液氮冷却对铁基形状记忆合金车削加工性能的影响研究

魏鑫^{1,2}, 国凯^{1,2}, 孙杰^{1,2}, 宋戈³, 李卫东³, 孙超³

¹山东大学机械工程学院; ²山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室;

³成都飞机工业(集团)有限责任公司

摘要: 针对铁基形状记忆合金常规冷却切削条件下因材料自身相变点及热滞性所出现的表面加工质量差、超弹性性能受损、切削效率低等问题,研究液氮冷却对改善形状记忆合金性能的影响。设计液氮喷淋低温冷却车削 Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C 系形状记忆合金试验,研究了液氮喷淋低温冷却、常规水基切削液冷却、干切削等不同冷却方式、不同工艺参数下切削振动以及表面粗糙度的变化特性,分析了不同冷却方式对切削表层微观组织结构的影响。结果表明,液氮冷却能较好地改善铁基形状记忆合金的切削性能及微观组织。

关键词: 铁基形状记忆合金;外圆车削;液氮冷却;切削性能;表面质量

中图分类号: TG506.3;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.007

Research on Investigation on Cutting Effect of Cylindrical Turning Fe-based Memory Alloy with Liquid Nitrogen as Coolant

Wei Xin, Guo Kai, Sun Jie, Song Ge, Li Weidong, Sun Chao

Abstract: Aiming at the technical problems such as poor surface quality, hyper elastic property damage and low cutting efficiency in conventional cooling cutting of the Fe-based shape memory alloy, the effect of liquid nitrogen cooling on improving the properties of shape memory alloy is researched. A Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C series shape memory alloy turning experiment which using the liquid nitrogen as the cooling lubricant is designed. The characteristics of cutting vibration and surface roughness variation under different process parameters and cooling modes, such as liquid nitrogen spray low-temperature cooling, conventional water-based cutting fluid cooling and dry cutting are studied. The result shows that the liquid nitrogen cooling method can significantly improve the cutting performance and microstructure of Fe-based shape memory alloy.

Keywords: Fe-based shape memory alloy; cylindrical turning; liquid nitrogen cooling; machinability; surface integrity

1 引言

铁基形状记忆合金是继镍钛形状记忆合金、铜基形状记忆合金之后开发的第三代形状记忆合金材料。与传统两代形状记忆合金相比,以 Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C 系为代表的铁基形状记忆合金相变温度适中,力学性能和加工性能优良,且相对于镍钛记忆合金和铜基形状记忆合金而言,铁基形状记忆合金的原材料价格较为低廉,同时具有超弹性、高阻尼及良好的导电性和优秀的耐腐蚀性^[1,2],因此在管道连接、形状记忆夹具、紧固件等方面具有较高的工程应用前景,受到国内外研究者的广泛关注^[3,4]。

国内外研究人员和机构对形状记忆合金的组织材料及切削加工性能进行了大量探索。韩荣第等^[5]对 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 形状记忆合金进行了外圆切削试验,结果显示其切削温度比 45 钢高出 3-4 倍,刀具急剧磨损,选用 K 类硬质合金刀具,在 40m/min

的切削速度下车削可有效改善其切削性能;Sato A. 等^[6]和 Fairuz M. A. 等^[7]采用快淬法使 Fe-16Mn-8Cr-6Ni-3Si-0.2 硼合金形成 1.5-5μm 的超细晶粒,当该合金经弯曲变形量为 10% 时,可以达到 5% 的恢复变形量,这是目前 FeMnSi 基形状记忆合金不经时效处理可以达到的最好水平;Lin H. C. 等^[8]和 Cetin M. H. 等^[9]对形状记忆合金采用离子氮化工艺进行表面改性,极大增强了材料的耐磨性和耐蚀能力;杨晓康等^[10]通过改变形状记忆合金丝的矫直温度等工艺参数,改善了 TiNi 丝材的硬度及屈服强度、抗拉强度、延伸率等力学性能,明显改善丝材切削性能。

铁基形状记忆合金的应用前景广阔,但受材料自身相变点、热滞性及硬度的影响,其实际加工过程中仍会遇到材料超弹性降低、切削振动过大、表面加工质量差等问题^[11]。当前,国内外研究机构多着重于对材料性能改进及材料配比的测试开发,缺乏对铁基形状记忆合金切削性能的系统研究。针对铁基形状记忆合金存在的切削加工问题,为提升其表面

加工质量和降低切削振动,本文采用液氮冷却的超低温切削^[12]和外圆车削对 Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C 系形状记忆合金进行加工试验,从切削振动、加工表面粗糙度与金相组织三方面进行重点分析。

2 液氮冷却车削试验设计

为了获得液氮冷却方式对铁基形状记忆合金切削性能的影响,对 Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C 合金棒进行液氮喷淋条件下的外圆车削试验,通过干切削和湿切削(常规冷却)条件下的切削情况对比,分析其振动情况及加工表面质量。

2.1 试样准备

将 Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C 系形状记忆合金(见图1)用真空感应炉熔炼后锻成坯料,制成常用尺寸的空心管类工件。工件外径 $\phi 14\text{mm}$,内径 $\phi 9\text{mm}$,长度 95mm 。用低熔点合金进行管内部空心填充,以提高车削过程中的材料刚性;为区分不同加工参数下的切削表面,且不发生相关干扰,将各工件的待车削区域通过车削沟槽分隔为 5 小段,每段管长 10mm ,相邻段间槽宽 3mm ,对每小段工件采用不同加工参数进行车削试验。

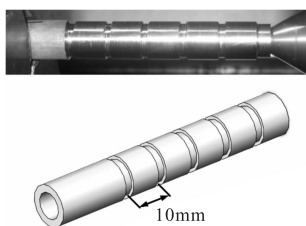


图1 Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C 合金管毛坯

采用德国布鲁克公司生产的 Tiger S8 型号 X 射线荧光光谱仪对工件材料进行化学成分分析,具体成分见表 1。

表1 材料元素成分 (wt. %)

元素	C	Si	Cr	Mn	Ni	Fe
含量	4.1-6.1	0.7	17.2	1.0-1.3	6.9-8.1	剩余

2.2 试验设备

采用韩国大宇 PUMA200M 车削加工中心,选用日本三菱 DCMT11T304-MVVP15TF 可转位硬质合金数控刀片。切削振动测量系统主要由扬州科动 KD10005LA 加速度传感器、安正数据采集系统以及振动信号采集分析系统三部分组成。

进行液氮冷却试验时,采用 DPL-150MP 型自增压液氮罐提供低温液氮,液氮喷口温度约为 -190°C 。采用德国 FUCHSJ3 水溶性辅助切削液进行常规冷却。用振动采集系统对加工过程中的振

动信号进行采集。图 2 为试验系统功能模块,X、Y、Z 分别表示振动加速度传感器信号采集的三个方向。图 3 为车削加工试验过程。

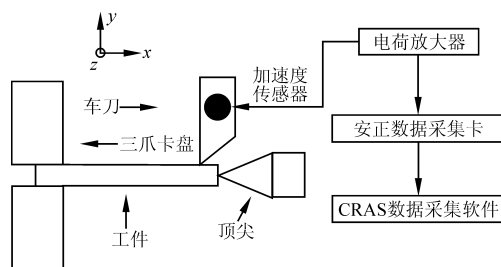
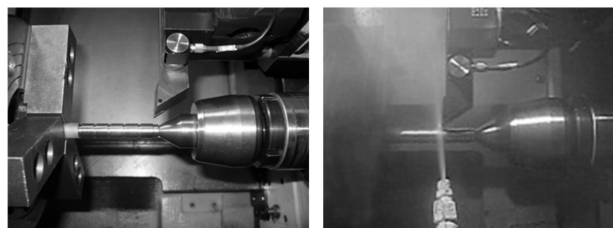


图2 试验系统功能模块



(a) 安装示意

(b) 液氮喷淋车削

图3 车削加工试验过程

2.3 试验加工参数

对工件试样进行外圆车削试验,以切削振动、工件表面粗糙度及金相组织结构为研究对象,对无切削液、常规浇注和低温液氮冷却三种冷却方式下的加工效果进行研究。冷却条件见表 2,相关加工参数见表 3。

表2 车削试验冷却条件

试验序号	介质类型	润滑条件
1	无	干切削
2	5% 水溶性冷却介质	湿切削
3	液氮	低温冷却

表3 车削加工参数

车削参数	参数值
车削模式	外圆车削
切削速度 V_c (m/min)	22.0, 36.3, 50.6, 64.9, 79.2
进给量 f (mm/r)	0.05
切削深度 a_p (mm)	0.1
湿切削冷却介质流量 (L/min)	6
液氮流量 (L/min)	2

3 试验结果及分析

试验采用液氮冷却切削、干切削和湿切削三种车削加工方式,通过比较加工过程中的切削振动、车削表面粗糙度及金相组织,对不同冷却方式下材料所表现出的切削性能进行分析。

3.1 不同冷却条件下切削振动对比

不同冷却方式条件下的切削振动情况对比见图

4. 图4a为主运动切削速度方向的切向车削振动变化曲线,图4b和图4c分别为切深方向径向车削振动和进给轴向车削振动的变化曲线。在整个车削加工过程中,随着切削速度 V_c 不断增加,由于缺乏冷却手段,干切削的切削温度增加最快。当切削速度增至20-35m/min时,Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C合金发生金属热软化,干切削切屑流动阻力减小,切削力减小致使切削振动降低。当切削速度达到一定值时,切削温度升高并接近材料熔点。继续提高切削速度,切削温度升高趋势减缓,当超过温度临界值时,切削力会随切削速度的提高而增大,进而振动增大。因此在干切削状态下,切削振动始终呈现先下降后上升的走向,工件切削温度的上升速度高于其它两种切削方式,趋势表征明显,而其它两种冷却条件下的切削振动无明显变化规律。

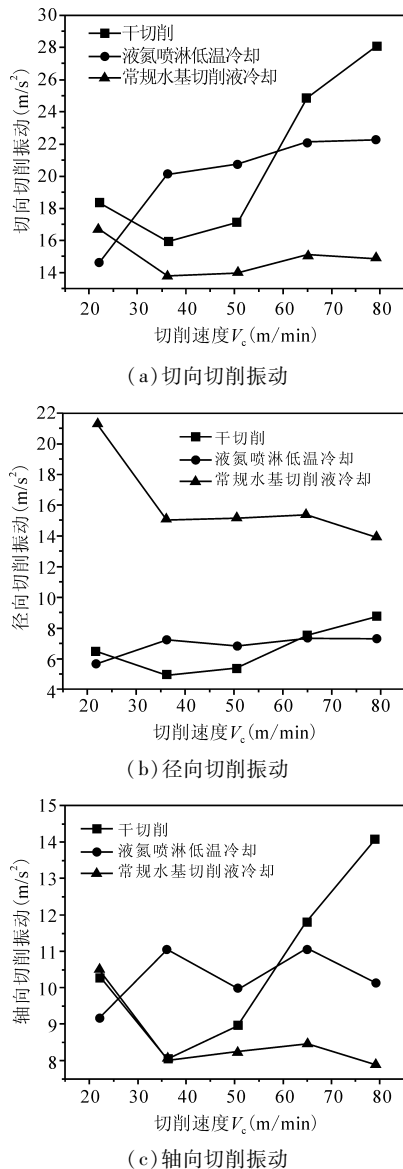


图4 不同冷却条件下的切削振动变化

车削时,工件在主运动切削速度方向所受切削振动最大,因此切向振动可看作加工过程的主要振动。在主要振动方向上,干切削时切削振动呈现先降后升的趋势(见图4a)。当切削速度超过58m/min时,干切削振动加速度信号高于液氮冷却切削和湿切削;随着切削速度增大,液氮低温冷却切削与湿切削切向振动趋向平稳,而干切削切向振动则呈现不断上升趋势;从振动信号整体趋势来看,在液氮低温冷却切削和湿切削条件下,振动信号始终保持较为稳定的分布,波动幅度较小,加工可靠性明显优于干切削。

由三种冷却方式下径向切削振动对比可知(见图4b):受大流量水溶性冷却液沿工件径向方向的喷射力影响,刀具在湿切削时径向所受振动远高于干切削和液氮低温冷却切削,其径向振动数值基本等同于同等切削速度下的主振动方向——切向振动信号大小;干切削条件下的径向振动呈现随切削速度增大而先下降后增大的趋势,作为非主要振动方向,其斜率变化幅度远小于主振动方向;液氮低温冷却切削条件下的径向振动稳定分布无明显变化趋势,且在高切削速度条件下的振动信号明显低于干切削。图4c中,轴向切削振动变化曲线的变化规律与主切削振动方向类似,干切削条件下切削振动呈现先降后升的趋势,液氮低温冷却切削和湿切削条件下,振动信号始终保持稳定分布。

3.2 不同冷却条件下工件表面粗糙度对比

图5为不同冷却方式下的工件加工表面粗糙度。由图可知,与干切削相比,在不同切削速度下,液氮低温冷却切削和湿切削均可产生较低的表面粗糙度。前者可迅速降低切削加工区温度,并依靠低温使空气中的水蒸气在切削区液化形成雾状膜,产生润滑效应;后者基于水溶性切削液在切削区形成的液膜,产生润滑作用,以降低工件表面粗糙度。两者润滑效果相近,但湿切削条件下的表面粗糙度略小于液氮冷却条件下。而干切削由于缺乏冷却液所形成的润滑作用,表面粗糙度较高,加工表面质量不稳定。

3.3 不同冷却条件下金相组织对比

图6为Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C系形状记忆合金在干切削、液氮低温冷却切削和湿切削条件下得到的金相组织。相比干切削,后两种冷却方式所获得组织的晶粒更加细小,并伴有针状组织生成,金属产生晶格畸变,组织的细化程度得到进一步加强。

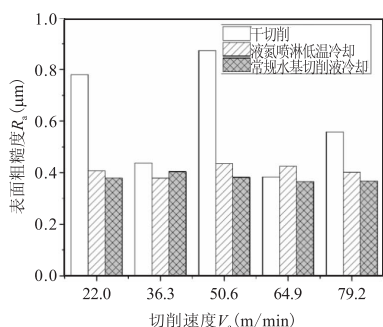


图5 不同冷却条件下的表面粗糙度变化

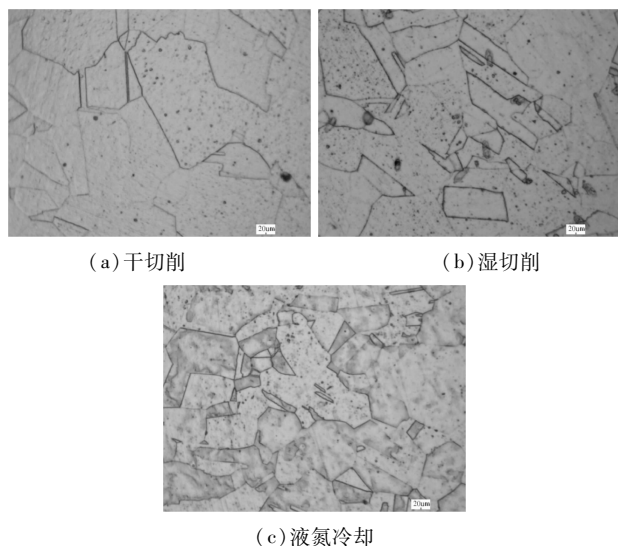


图6 不同冷却条件下的金相组织结构

4 结语

本文对铁基形状记忆合金进行外圆车削试验,分析了不同冷却方式(包括干切削、液氮冷却和水溶性切削液)对切削振动、工件表面粗糙度和金属微观组织结构的影响及关系。

(1)与干切削相比,液氮低温切削和湿切削条件下所得工件加工表面粗糙度明显更低,微观组织结构更优秀。

(2)加工过程中,液氮低温切削和湿切削的切削振动受切削速度的影响明显小于干切削。

(3)与湿切削相比,液氮低温切削时,刀具所受径向切削振动显著降低,加工过程更加平稳。

参考文献

- [1]雷竹芳. 铁基形状记忆合金及其应用[J]. 材料开发与应用,2000,15(2):40-45.
- [2]李敏,黎厚斌. 形状记忆材料研究综述[J]. 包装学报,2014(4):17-23.
- [3]Yang J H, Chen H, Wayman C M. Development of Fe-based shape memory alloys associated with face-centered cubic-

hexagonal close-packed martensitic transformations; Part II. transformation behavior [J]. Metallurgical Transactions A, 1992,23(5):1439-1444.

- [4]周迎春,田延军,冯世宏,等. FeMnSiCr 铁基形状记忆合金管接头耐腐蚀抗氧化性能的研究[J]. 金属热处理,2004,29(4):37-38.
- [5]韩荣第,于付. Ni-Ti 形状记忆合金的切削试验[J]. 宇航材料工艺,1995(6):48-51.
- [6]Sato A, Masuya T, Morishita M, et al. Strengthening of Fe-Mn-Si based shape memory alloys by grain size refinement [J]. Materials Science Forum,2000,327-328:223-226.
- [7]Fairuz M A, Nurul Adlina M J, Azmi A I, et al. Investigation of chip formation and tool wear in drilling process using various types of vegetable-oil based lubricants [J]. Applied Mechanics and Materials,2015,799-800.
- [8]Lin H C, Lin K M, Chen Y S, et al. Ion nitriding of Fe-30Mn-6Si-5Cr shape memory alloy: II. Erosion characteristics [J]. Surface & Coatings Technology,2005,194(1):74-81.
- [9]Cetin M H, Ozcelik B, Kuram E, et al. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method [J]. Journal of Cleaner Production,2011,19(17-18):2049-2056.
- [10]杨晓康,杨宏进,雷亚军,等. 钛镍丝材切削性能改进 [J]. 材料开发与应用,2008,23(6):9-11.
- [11]Jia D, Li C, Zhang D, et al. Experimental verification of nanoparticle jet minimum quantity lubrication effectiveness in grinding [J]. Journal of Nanoparticle Research,2014,16(12):1-15.
- [12]陈冲,赵威,何宁,等. 液氮冷却下大进给铣削 TC4 钛合金的试验研究 [C]. 现代切削与测量工程国际研讨会,2014.

第一作者:魏鑫,硕士研究生,山东大学机械工程学院,山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室,250061 济南市

First Author: Wei Xin, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China

通信作者:国凯,助理研究员,山东大学机械工程学院,山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室,250061 济南市

Corresponding Author: Guo Kai, Research Assistant, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China