

硬质合金刀具涂层与 42CrMo 钢的元素扩散研究

李刚^{1,2}, 张松^{1,2}, 石文浩^{1,2}, 丁泽³, 杜春刚³

¹山东大学; ²山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室; ³潍柴动力股份有限公司

摘要: 扩散磨损是 42CrMo 钢加工过程中刀具的主要磨损机理, 因此抗扩散能力是评价硬质合金刀具涂层性能的主要技术指标之一。本文针对不同温度下的 42CrMo 钢与五种不同涂层之间的扩散性能进行了试验研究。采用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线能谱仪 (EDS) 观察并分析了主要元素的扩散情况, 借助纳米压痕仪测试了扩散前与扩散后涂层表面的硬度值并进行了对比分析。研究表明, 元素的扩散距离与温度呈正相关关系, Ti 元素的扩散程度比 Fe 元素剧烈, TiN-TiCN-TiN-Al₂O₃-TiN 涂层的扩散距离最小, 硬度降低程度也较低, 在所有涂层中表现出了最好的抗扩散能力。

关键词: 涂层; 42CrMo 钢; 抗扩散能力; 纳米压痕

中图分类号: TG135.5; TC335.86; TH161

文献标志码: A

Study on Element Diffusion between Coating Materials and 42CrMo Steel

Li Gang, Zhang Song, Shi Wenhao, Ding Ze, Du Chungang

Abstract: The diffusion wear of cutting tools is the main wear mechanics in processing 42CrMo steel. As a result, The diffusion resistance is one of the most important criteria to choose coating materials. In this paper, the element diffusion experiments were carried out between coating materials and 42CrMo steel at different temperatures. X-ray energy dispersive microanalysis and a scanning electron microscope were used to analysis the diffusion distance of main elements. NanoTester Vantage was used to detect the decline of microhardness of coatings. The results showed that diffusion distance increases as the increase in temperature, the titanium (Ti) element diffused for a longer distance than iron (Fe) element, and the TiN-TiCN-TiN-Al₂O₃-TiN coating material manifested the shortest diffusion distance and less decline of microhardness.

Keywords: coating materials; 42CrMo; diffusion resistance; nanoindentation

DOI: 10.16567/j.cnki.1000-7008.2017.10.003

1 引言

作为一种典型的低合金中碳钢, 42CrMo 钢具有极高的强度和韧性, 调质处理后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力^[1], 被广泛应用于轴承、齿轮及发动机曲轴等零部件的制造^[2,3]。由于其具有高硬度和强度, 切削加工具有切削力大、切削温度高的特点, 使得刀具与工件接触面之间的化学元素获得足够的能量, 发生相互扩散, 从而改变刀具的化学成分, 降低刀具材料的性能, 使扩散磨损成为刀具的主要磨损原因^[4]。

刀具涂层技术是近年发展起来的一种材料表面改性技术, 能够有效解决刀具表面的硬度、耐磨性以及润滑性能等问题, 如 TiN、TiAlN、AlCrN 等涂层刀具已经被广泛应用^[5]。作为化学屏障和热屏障, 涂层的存在能改善刀具的受力和传热情况, 减小刀具的磨损, 从而极大提高刀具使用寿命^[6]。然而, 不

同涂层具有不同的性能, 适合于加工不同的工件材料, 因此, 根据所加工的工件材料合理选择刀具涂层, 对切削加工至关重要。就 42CrMo 钢而言, 抗扩散能力则是选择涂层的重要技术指标之一^[7]。

近年来, 国内外一些学者从抗扩散磨损能力方面对刀具材料的选择进行了研究。Molinari A. 等^[8]建立了高速切削中刀具扩散磨损的理论建模, 随后通过试验研究了切削过程中刀具和切屑的扩散现象, 进而验证了模型的有效性。Zhang S.^[9]研究了高速切削钛合金时硬质合金刀具的扩散磨损现象, 并用吉布斯方程分析了扩散机理。李友生^[10]采用理论分析与试验验证相结合的方法, 从元素扩散和高温氧化两方面对硬质合金刀具与钛合金的化学性能进行了匹配。徐暄等^[11]采用扩散偶装置对几种硬质合金刀具材料与不锈钢之间的元素扩散现象进行了研究, 表明不同的粘结剂元素会影响硬质合金刀具基体元素的扩散。石磊^[12]从化学、物理、力学三个方面对钛合金和几种不同硬质合金刀具之间的匹配进行了研究。Ngai T. L. 等^[13]用铝合金和几种不同的硬质合金刀具材料制成的扩散偶模拟了切削

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项 (2015ZX040003-005)
收稿日期: 2017 年 4 月

时的扩散现象,并与车削试验中的扩散现象进行了对比。上述学者对刀具材料的研究主要集中在普通硬质合金刀具上,对应用越来越广泛的涂层的研究较少。

本文采用特制的扩散偶装置和涂层试样,对 5 种涂层与 42CrMo 钢之间的元素扩散情况进行了试验研究和分析,重点研究了 Ti 元素与 Fe 元素的扩散规律以及扩散后各种涂层表面的硬度变化情况,据此对 5 种涂层的抗扩散能力进行排序,为切削加工 42CrMo 钢时刀具涂层的选择提供了参考。

2 扩散试验

2.1 试验材料

工件材料为经过调质处理的 42CrMo 钢,其化学成分和主要物理力学性能分别见表 1 和表 2。

表 1 42CrMo 钢的化学成分 (wt%)

| | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 成分 | C | Si | Mn | S | P |
| 含量 | ≤0.45 | ≤0.37 | ≤0.8 | ≤0.03 | ≤0.03 |
| 成分 | Cr | Ni | Cu | Mo | Fe |
| 含量 | 1.1 | ≤0.03 | ≤0.03 | 0.22 | 余量 |

表 2 42CrMo 钢的物理力学性能

| | | | | |
|----------------------------|------------|------------------------------|---------------|-----|
| 密度 (g/cm ³) | 硬度 (HB) | 抗拉强度 σ _b (MPa) | 杨氏模量 (GPa) | 泊松比 |
| 7.9 | 210 | 1300 | 206 | 0.3 |

将清洗后的 42CrMo 钢试样置于 4% 的硝酸酒精溶液下腐蚀 30s,在金相显微镜下观察其金相组成(见图 1),可见,42CrMo 钢的主要组织成分为铁素体(白亮处)和珠光体(黑暗处)。

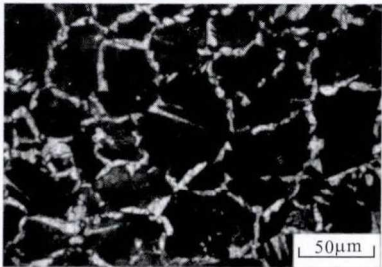


图 1 42CrMo 钢金相组织

考虑到实际生产过程中的实用性和经济性,选择 YG6 硬质合金作为基体制备了 5 种适合加工 42CrMo 钢的涂层,涂层具体信息见表 3。

表 3 涂层信息

| 涂层编号 | 涂层材料 | 耐用温度(K) | 涂层工艺 | 涂层厚度(μm) | 涂层表面形貌 | 涂层截面形貌 |
|------|--|---------|------|----------|--------|--------|
| 1 | TiN | 900 | PCVD | 3.5 | | |
| 2 | TiN-TiCN-TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 1300 | CVD | 9.6 | | |
| 3 | TiN-TiCN-TiN-Al ₂ O ₃ -TiN | 1300 | CVD | 9.2 | | |
| 4 | TiAlN | 1200 | PVD | 4.8 | | |
| 5 | AlTiN | 1200 | PVD | 4.6 | | |

2.2 扩散试验方法

扩散试验装置如图2所示,夹板材料为316L不锈钢,可在1200K高温下正常工作。涂层通过气相沉积法涂覆在4mm×4mm×14mm的YG6硬质合金基体上,42CrMo钢材料经线切割加工成4mm×4mm×14mm的条状,表面研磨并抛光至无划痕。装夹时,将42CrMo钢试样的抛光面与涂层紧贴,并将两种试样的端面对齐,以便于后处理和结果观察。

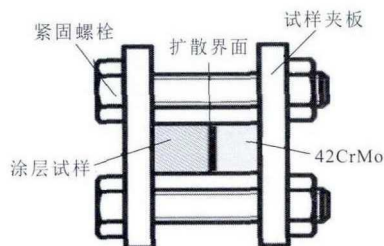


图2 扩散试验装置

由于扩散磨损是切削速度较快、切削温度较高时的主要磨损机理,为了模拟切削过程中的高压环境,利用扭矩扳手控制螺栓的扭紧力矩,统一为15N·m。装夹完成后,将扩散装置放入电阻炉中加热,以模拟切削时的高温环境。试验中由KYT智能温度控制仪控制电阻炉温度,加热温度范围为0~1500K。为探究温度对涂层抗扩散性能的影响情况,设置了900K、1000K、1100K、1200K四个组,保温时间均为2小时。试验结束后,将试样置于空气中冷却至室温。由于高温下的氧化作用,试样表面会出现氧化层,因此,在观察SEM和EDS之前,先对试样端面进行研磨抛光处理,以去除氧化层。

2.3 测试方法

(1) 元素扩散测试

由涂层具体信息表可知,5种涂层均含有Ti元素,而42CrMo钢中主要为Fe元素,且Ti和Fe元素的化学活性较高,相比于其他元素,扩散现象较为剧烈。因此在对试验结果进行分析时,重点考察Fe和Ti元素的扩散情况。

如图3所示,考虑到线扫描方法的直观性和点扫描方法的准确性,采用如下两种方法对试样的元素扩散情况进行分析。

①如图3中1所示,垂直于扩散界面进行EDS元素线扫描分析,观察元素沿扫描线的含量分布变化趋势,可直观地反映出界面两侧的元素扩散情况。

②垂直于扩散界面,每隔一定距离对该点处的元素含量进行分析,如图3中2所示。得到该列点的元素含量后,以点与扩散界面之间的距离为横坐

标,以Fe、Ti元素含量为纵坐标绘制元素含量变化曲线,可以对元素的扩散距离及扩散程度做出准确的定性分析。

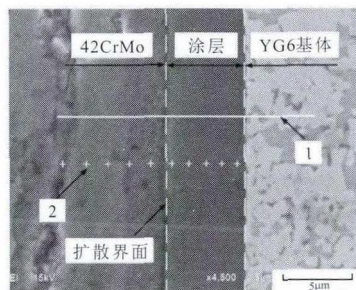


图3 试验结果分析方法

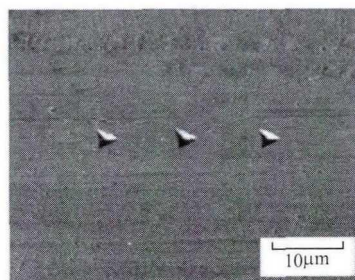


图4 纳米压痕SEM图

(2) 纳米压痕测试

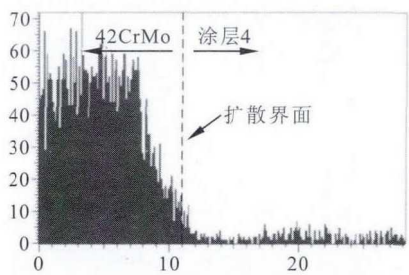
由于涂层厚度较薄,传统的硬度测量方法无法准确测量出涂层硬度,因此采用NanoTest Vantage纳米压痕试验仪对涂层原试样及扩散后的涂层试样表面进行硬度测定。为保证结果的正确性,每个试样随机取3个点进行硬度测试,测试压痕如图4所示,结果取其平均值。测试过程中,为防止压头压入深度超过涂层本身厚度,所有实验组统一设定压入深度为400nm、加载与卸载力速率均为3mN/s、保载时间为15s。

3 试验结果与分析

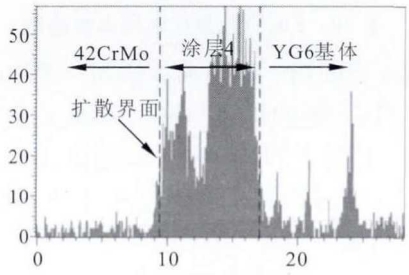
3.1 元素扩散结果与分析

(1) 元素线扫描结果与分析

图5和图6分别为1200K试验组涂层4与涂层5中的Fe元素与Ti元素线扫描结果。由图可见,在扩散界面附近,有一定量的Fe元素侵入到了涂层区域。同样的,也有一定量的Ti元素从涂层区域侵入到了42CrMo钢区域中。该现象说明涂层与42CrMo钢之间确实发生了元素的相互扩散现象。在对所有试验组进行线扫描分析后发现,所有试验组中均出现了Fe元素与Ti元素的扩散现象,但扩散程度不尽相同。为进一步确定元素的扩散程度及扩散深度,需要用点扫描方法对试验结果进行分析。

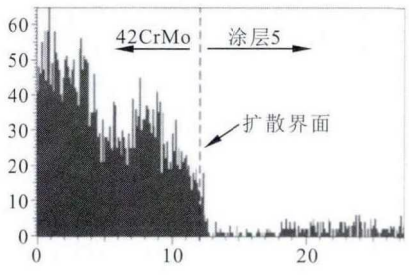


(a) Fe 元素线扫描结果

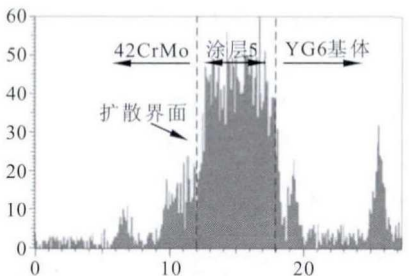


(b) Ti 元素线扫描结果

图 5 涂层 4 试验组元素线扫描图(1200K)



(a) Fe 元素线扫描结果



(b) Ti 元素线扫描结果

图 6 涂层 5 试验组元素线扫描图(1200K)

(2)元素点扫描结果与分析

图 7 为 1200K 温度下涂层 2 扩散界面处 EDS 点扫描示意图,在界面两侧间隔一定距离分别取 5 个点,以扩散界面处为坐标 0 点,界面左侧坐标为负,右侧坐标为正。点 1 到点 10 与扩散界面的距离及各点处 Ti 元素和 Fe 元素的含量如表 4 所示。

根据表 4 数据绘制扩散曲线见图 8。可见,在 1200K 温度下保温 2h 后,42CrMo 钢与涂层 2 中的 Fe 与 Ti 元素发生了相互扩散。扩散界面右侧为涂层区域,该区域中 Fe 元素的含量在距离界面 5.5 μm 处下降为 0;同理,来自于涂层的 Ti 元素含量在

42CrMo 钢区域中距界面约 6 μm 处下降为 0,说明 Fe 与 Ti 元素扩散的深度分别为 5.5 μm 和 6 μm 。

表 4 各点元素含量表

| 点编号 | 与扩散界面间距离(μm) | 元素含量质量百分比(wt%) | |
|-----|---------------------------|------------------|-------|
| | | Ti | Fe |
| 1 | -5.5 | 1.38 | 56.21 |
| 2 | -4.3 | 1.40 | 53.70 |
| 3 | -3.1 | 1.54 | 51.47 |
| 4 | -1.8 | 3.79 | 49.67 |
| 5 | -0.2 | 4.47 | 27.93 |
| 6 | 0.3 | 47.30 | 1.26 |
| 7 | 1.4 | 45.15 | 1.20 |
| 8 | 1.9 | 46.23 | 0.95 |
| 9 | 2.6 | 50.42 | 0.60 |
| 10 | 3.3 | 49.76 | 0.00 |

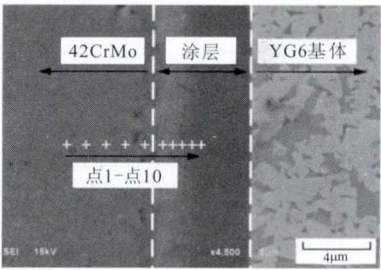


图 7 42CrMo 钢与涂层 2 扩散界面 EDS 打点(1200K)

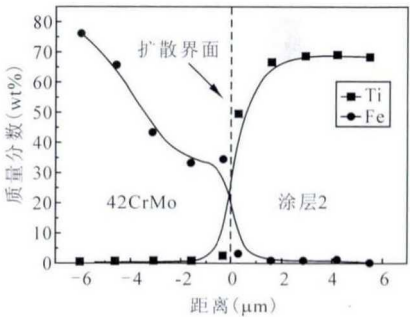
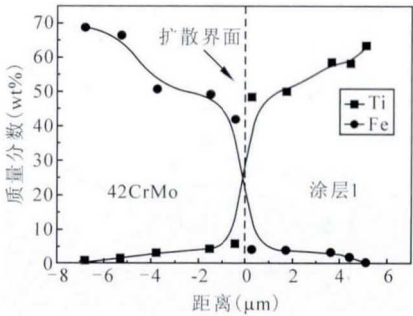


图 8 涂层 2 扩散曲线(1200K)

用同样的方法得到 5 个试验组中不同涂层与 42CrMo 钢间元素的扩散曲线,其中 1200K 试验组另外 4 种涂层(涂层 1、涂层 3、涂层 4、涂层 5)的扩散曲线如图 9 所示。



(a) 涂层 1 试验组

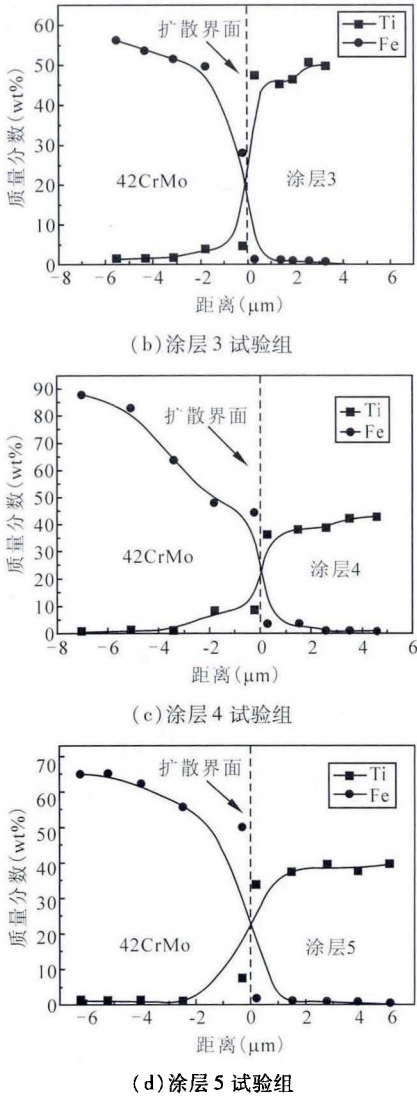
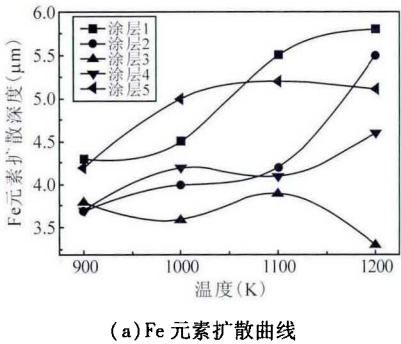


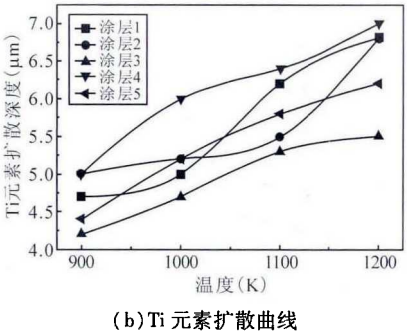
图9 涂层扩散曲线(1200K)

通过以上扩散曲线图可以看出,在相同温度下,不同涂层与42CrMo钢之间的元素扩散深度和扩散趋势有所不同,同一试验组中Ti元素和Fe元素的扩散深度和扩散趋势也有差异。

为了探究保温温度与元素扩散情况的关系,在得到所有试验组的扩散曲线后,分别绘制不同涂层中Fe和Ti在不同温度下的扩散距离—温度曲线(见图10)。



(a) Fe元素扩散曲线



(b) Ti元素扩散曲线

图10 Fe、Ti元素扩散距离曲线图

分析扩散距离—温度曲线图可得到如下结论: Fe元素与Ti元素的扩散深度均随温度的增大而增大;在相同温度下,Ti元素的扩散距离大于Fe元素;由Fe元素的扩散深度曲线可知,5种涂层抵抗Fe元素入侵能力排序为:涂层3>涂层2,涂层4>涂层5>涂层1;5种涂层保护Ti元素流失的能力排序为:涂层3>涂层2,涂层5>涂层1>涂层4。

3.2 涂层硬度变化

由仪器自带软件分析得到涂层硬度值结果见表5。由表可见,每组试验结果的上下偏差均在10%以内,因此试验结果准确性较高。从硬度测试结果可以看出,在扩散试验之后所有涂层的表面硬度均出现了不同程度的下降,其中涂层2与涂层3两种涂层的硬度降低程度最小(分别为6.40%、7.80%)。按照硬度降低程度对涂层的抗扩散性能进行排序:涂层2>涂层3>涂层4>涂层1>涂层5。因此,在抵抗因元素扩散导致的硬度下降方面,涂层2与涂层3表现出了较好的性能。

表5 涂层硬度测试结果统计表

| 涂层编号 | 处理 | 硬度值 (GPa) | 上偏差 (GPa) | 下偏差 (GPa) | 硬度降低百分比 (%) |
|------|-----|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 处理前 | 24.38 | +1.49 | -1.68 | 12.98 |
| | 处理后 | 21.22 | +1.53 | -2.09 | |
| 2 | 处理前 | 26.18 | +0.67 | -0.55 | 6.40 |
| | 处理后 | 24.50 | +1.11 | -0.76 | |
| 3 | 处理前 | 26.15 | +0.45 | -0.75 | 7.80 |
| | 处理后 | 24.10 | +1.54 | -0.88 | |
| 4 | 处理前 | 21.23 | +0.13 | -0.13 | 11.54 |
| | 处理后 | 18.78 | +1.67 | -3.76 | |
| 5 | 处理前 | 24.01 | +3.86 | -3.73 | 20.27 |
| | 处理后 | 19.51 | +2.98 | -2.47 | |

4 结语

本文通过5种涂层与42CrMo钢材料之间的扩散试验,得到了主要元素的扩散曲线,对Fe与Ti元素的扩散规律进行了探究,并对扩散后涂层的硬度变化情况进行了比较。

(1)在所有试验组中,Ti元素与Fe元素均发生了扩散现象;在相同试验条件下,Ti元素的扩散距离与扩散程度比Fe元素剧烈。Ti元素与Fe元素两种的扩散程度均随温度的升高而增大,可见切削温度的升高会加剧刀具的扩散磨损。

(2)通过比较各温度下不同涂层试验组中Fe元素和Ti元素的扩散情况,对5种涂层的抗扩散能力进行了排序,研究发现5种涂层抵抗Fe元素入侵的能力为:涂层3>涂层2,涂层4>涂层5>涂层1;5种涂层保护Ti元素流失的能力排序为:涂层3>涂层2,涂层5>涂层1>涂层4。

(3)纳米压痕硬度测试结果表明,各种涂层在扩散试验后均出现了硬度降低现象,其中涂层2与涂层3扩散后的硬度下降程度最低。

综合以上试验结果可以看出,涂层3在抗元素扩散方面和抗硬度下降方面均表现出了较好的性能,说明这种涂层在5种涂层中具有最强的抗扩散能力,因此用这种涂层制成的刀具在加工42CrMo钢时会有较强的抗扩散磨损能力。本文研究可以为42CrMo钢选择合适的刀具涂层提供参考,从而减小扩散磨损,提高涂层刀具的切削性能。

参考文献

- [1] Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Modeling of flow stress of 42CrMo steel under hot compression[C]. The fifth international conference on physical and numerical simulation of materials processing, 2007:88-92.
- [2] Li Y, Zhao S, Fan S, et al. Study on the material characteristic and process parameters of the open-die warm extrusion process of spline shaft with 42CrMo steel[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 571(18):12-20.
- [3] Li J, Yang X, Wang S, et al. A rapid DC plasma nitriding technology catalyzed by pre-oxidation for Aisi4140 steel[J]. Materials Letters, 2014, 116(2):199-202.
- [4] 邵芳,刘战强,万熠,等.基于热力学的硬质合金刀具扩散磨损[J].武汉理工大学学报,2008,30(10):113-116.
- [5] 姜超,邓建新,张翔,等.结构化AlCrN涂层刀具车削加工奥氏体沉淀硬化不锈钢的切削性能研究[J].工具技术,2016(12):13-19.
- [6] Aurich J C, Eyrisch T, Zimmermann M. Effect of the coating system on the tool performance when turning heat treated Aisi 4140[J]. Procedia Cirp, 2012, 1(1):214-219.
- [7] Klocke F, Krieg T. Coated tools for metal cutting-features and applications[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1999, 48(2):515-525.
- [8] Molinari A, Nouari M. Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting[J]. Wear, 2002, 252(1-2):135-149.
- [9] Zhang S, Li J F, Deng J X, et al. Investigation on diffusion wear during high speed machining Ti-6Al-4V alloy with straight tungsten carbide tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(1):17-25.
- [10] 李友生. 硬质合金刀具与Ti-6Al-4V钛合金的化学性能匹配研究[D]. 济南:山东大学, 2010.
- [11] 徐恒,刘欣,梁良. WC-10wt. % Ni3Al硬质合金刀具与0Cr18Ni9不锈钢的元素扩散研究[J]. 现代制造工程, 2015(3):11-15.
- [12] 石磊. 钛合金切削加工中刀具与工件性能匹配的研究[D]. 济南:山东大学, 2007.
- [13] Ngai T L, Zhang D T, Li Y Y. A study on diffusion wear of machining tool and simulation by diffusion couple[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353-358:813-816.

第一作者:李刚,硕士研究生,山东大学机械工程学院, 250061 济南市

First Author: Li Gang, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

通信作者:张松,博士,教授,山东大学机械工程学院, 250061 济南市

Corresponding Author: Zhang Song, Professor, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061 China

全球最大X射线激光器在德国汉堡投入使用

全球最大的X射线激光器European XFEL(欧洲X射线自由电子激光)近日在汉堡大都市区正式投入使用。共有11个欧洲国家参与研发了这一造价达12.2亿欧元的激光器,分别为丹麦、德国、法国、意大利、波兰、俄罗斯、瑞典、瑞士、斯洛伐克、西班牙和匈牙利。英国正在申请加入该研究项目。

据介绍,European XFEL是世界上最大的激光设施,每秒可发射多达27000个脉冲,亮度比传统的同步加速器光源亮度高出十亿倍。激光器的成功研发,开辟了全新的研究领域,有助于突破当前的科学知识界限。来自世界各地的研究团队借用激光不仅可以解开病毒和细胞原子结构之谜,而且可在纳米粒子中制作三维图像、记录化学反应并观察粒子内部的反应过程,以上研究结果有助于新药和新材料的研发。

European XFEL研究所(欧洲X射线自由电子激光)是一家非营利性科研机构,与汉堡研究中心DESY和其他国际机构紧密合作。研究所拥有雇员300多人。European XFEL激光器的建造和后期调试花费12.2亿欧元。欧洲X射线自由电子激光长度为3.4公里,穿越汉堡市直达石荷州。