

核电水室封头高效切削加工及刀具失效分析

程耀楠, 钱俊, 卢真真, 刘利, 巩亚楠

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 水室封头是 AP1000 核岛核电站中蒸汽发生器的重要零部件, 是典型的核电大型异型零部件. 水室封头的整个加工过程复杂, 工艺要求严格, 刀具破损情况严重, 生产效率极低, 因此严重影响我国核电工业的发展. 从水室封头加工工艺、水室封头材料 SA508 III 钢的加工特性、水室封头加工刀具的主要破损形式及原因等方面进行分析和探讨, 并对水室封头加工过程进行虚拟加工分析, 针对水室封头加工的特点提出几种延长刀具寿命措施, 并设计了专用层切车刀和仿形铣刀片, 从而为提高水室封头切削加工效率和刀具寿命提供支持.

关键词: 刀具失效; 高效切削; 水室封头; SA508 III 钢

中图分类号: TG501 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)05-0050-06

Analysis of High Productivity Machining and Cutting Tool Failure for Nuclear Power Water Chamber Head

CHENG Yao-nan, QIAN Jun, LU Zhen-zhen, LIU Li, GONG Ya-nan

(School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Water chamber head is the important part, which is used for the steam generator of AP1000 nuclear island nuclear power plant. It is a typical nuclear power parts that is large-scale and deformed; the complex entire process of water chamber head, demanding process, serious tool breakage condition and low productivity seriously affect the development of China's nuclear power industry. Water chamber head processing, processing characteristics of the water chamber head material SA508 III steel and the main damage form and the reason of chamber head machining tools are mainly discussed in this paper. And it makes virtual simulation for water chamber head processing. It also puts forward several projects to extend tool life and improve cutting efficiency aiming at the characteristics of water chamber head machining. What's more, special layer cutting tool and Profiling milling cutter are designed to greatly improve the cutting efficiency of water chamber head.

Key words: tool failure; high productivity cutting; water chamber head; SA508 III steel

0 前 言

随着工业的发展和人们生活水平的提高,人们

对能源消耗日益增加. 核能发电将逐渐发展成为最主要的发电方式^[1-2]. 目前我国核电站使用最广泛的是 AP1000 核电机组, 它使得核能利用的安全性、经济性有了显著提高^[3]. 蒸汽发生器是该核电

收稿日期: 2014-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51205095); 黑龙江省教育厅科学技术研究重点项目(12541z006).

作者简介: 程耀楠(1977—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: yaonancheng@163.com;

钱俊(1987—), 男, 硕士研究生;

卢真真(1989—), 女, 硕士研究生.

机组的关键设备,是核岛中进行热能交换和传递的主要场所,在正常工作时会受到高温、高压、强放射作用。蒸汽发生器由椭球封头、椭球封头环、上筒体、锥形筒体、下筒体、管板、水室封头等几部分组成。

其中水室封头(如图1)是蒸汽发生器组件中典型的难加工大型异型件,目前国际上要求水室封头必须在整体锻造成型的基础上,进行切削加工,整个过程中材料去除率高,导致零件的加工效率极低。并且由于零件结构复杂,传统机床数控编程加工困难,在实际加工中需要多次变换装夹,从而进一步影响加工效率。此外,由于零件采用高强度 508 III 钢,加工过程中切削力大、切削温度高,刀具的破损严重,换刀频率高。因此研究水室封头加工工艺和加工刀具的破损,对实现水室封头高效切削,降低生产成本有着重要意义。



图1 水室封头

1 水室封头加工工艺及刀具应用

水室封头是 SA508 III 钢经整体锻造,然后切削加工而成,从毛坯到完全加工成型,整个生产周期为 4 个月左右。水室封头包括冷却剂进水管嘴、冷却剂出水管嘴、两个入孔、一个凸台以及很多相连部分的重要相贯线,正是由于水室封头的独特结构,造成水室封头的加工困难。

1.1 水室封头加工工艺分析

水室封头作为核电站蒸汽发生器的重要零部件,设计寿命为 60 年,对其生产加工要求非常高。为了生产出合格的产品,对锻造的毛坯质量控制严格,在检测毛坯件没有裂纹、热裂或其他有害缺陷之后,才能对锻件进行切削加工^[4]。根据现场调研分析,切削加工主要分为粗加工、探伤、取样、半精加工、表面探伤、精加工、探伤、交检等几步。

根据水室封头的特点,水室封头的加工主要是在立式车床、6.3 m 数控立式车床、 $\Phi 200$ 落地镗铣床三种机床上加工。水室封头首先在立式车床上进

行拉荒,然后在数控车床和镗铣床上进行切削加工。加工的过程中将水室封头分为上半部分和下半部分,如图2所示,上半部分和内球面通过数控立式车床加工,而下半部分铣削区域可分为 3 个铣削区域。



图2 水室封车削及铣削部分

图3为笔者根据加工工艺对水室封头三维模型按照顺时针方向划分为 3 个区域,根据划分的区域,依次对两直管嘴、大斜管嘴周围部分区域进行编号,图4为实际水室封头铣削加工中待加工区域。在切削加工完成之后的表面会出现切削刀痕,这不能满足使用要求,所以需要在切削完后对零件进行手工打磨。

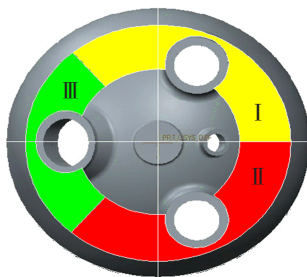


图3 铣削部分区域划分

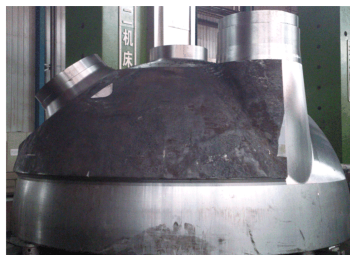


图4 水室封头待边工区域

采用上述工艺加工水室封头,切削时材料去除效率较高,但是在加工的过程中需要多次定位、找正,而对于大型异型件的定位、找正需要耗费大量时间,根据仔细分析水室封头的结构特点,对于水室封头外球面的加工可以利用数控龙门铣床,在龙门铣床上对水室封头毛坯件进行切削加工,可以避免复杂的调整工件的工作。为了验证这种方法,笔者将原

始模型按 1:25 比例进行缩小,利用 Pro/E 数控加工模块对模型进行数控加工,经过后处理,获得水室封头加工数控程序,然后利用虚拟机床对数控程序进行验证(这里的虚拟机床相当于数控龙门铣床),由图 5~7 所示仿真结果可见,利用三轴铣床加工球面效果比较好,但是对于两个直管嘴、斜管嘴、相贯线附近部位加工质量较差,由此可建议,利用数控龙门铣床对水室封头进行粗加工,然后对加工质量较差的部位进行局部加工,使其达到使用要求.综合对比分析,利用这种方法,可以大大缩短水室封头加工周期.

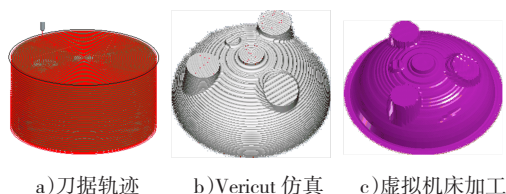


图5 水室封头粗加工仿真

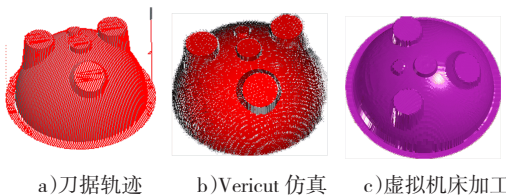


图6 水室封头半精加工仿真

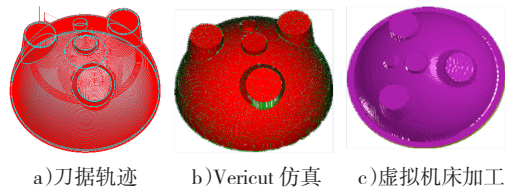


图7 水室封头精加工仿真

1.2 水室封头加工刀具应用

水室封头的加工过程中用到的刀具种类繁多,其中在拉荒过程中主要用到的刀具为国产 YT5 材质的重型焊接车刀,该车刀刀头是由硬质合金 YT5 刀片与 45 钢刀体焊接而成,然后通过螺钉固定在刀杆上,如图 8 a) 所示.在粗车时采用由笔者所在团队所研制的如图 8 b) 所示的重型车刀片.在铣削加工过程主要使用的刀片为 WIDIA 刀具公司生产的圆形铣刀片,如图 8 c) 所示,由于圆形刀片刀具有连续可变的主偏角,范围从 0° 到 90° ,切削作用非常平稳.与方形铣刀片相比,圆形铣刀片具有较高的金属去除率,且刀片的强度大,对于曲面的仿形加工效果较好,另外该刀片还采用 TN6540 硬质合金的基体,并通过 PVD 法对硬质合金基体进行 TiAlN 涂

层,该涂层具有硬度高、氧化温度高、热硬性好,附着力强、摩擦系数小等优势^[9],经过涂层后的刀片寿命大大提高.经过工厂调研实验,与其他十几种国内外刀片实际切削加工对比,对于 SA508 III 钢的切削加工,该刀片具有更好的切削性能和使用寿命.

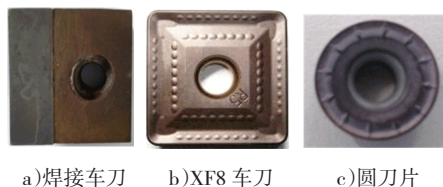


图8 水室封头重型切削刀具

2 水室封头材料特性及高效切削加工难点分析

2.1 水室封头材料 508 III 钢材料属性分析

水室封头与其它蒸汽发生器零部件之间是通过焊接连接在一起的,所以要求材料具有优越的可焊性.蒸汽发生器在工作过程中,承受着复杂的应力、热力、水力或地震载荷,在任何工况下都必须保持结构的完整性,以包容放射性物质,这就要求水室封头材料具有较好的抗中子辐照脆化性能和非常好的低温冲击韧性以及较低的无延性和转变温度韧性^[9].根据美国机械工程协会规定采用 SA508 III 钢作为水室封头加工材料,如表 1 所示为 SA508 III 钢元素质量分数,文献报道 SA508 III 钢通过减少 C、Cr、Mo、V 等元素的质量分数和堆焊不锈钢耐腐蚀层来降低裂纹发生率,研究表明 SA508 III 的强度、断裂韧性都很高,如表 2 所示为 SA508 III 钢主要机械性能^[9],虽然 SA508 III 钢具有良好的使用性能和安全性能,但是 SA508 III 钢加工性较差,在其进行切削加工过程中刀具破损严重.

表1 SA508 III 元素质量分数(%)

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	V	Cu
≤0.25	0.15~0.4	1.20~1.50	≤0.015	≤0.25	0.45~0.60	0.40~1.00	≤0.05	≤0.15

表2 SA508 III 机械性能

抗拉强度 σ_s /MPa	屈服强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	端面收缩率 ψ /%
620~795	450	≥18	≥50

2.2 水室封头高效切削加工难点分析

对于水室封头的高效加工难点,可以从 3 个方面分析.首先,水室封头材料 SA508 III 钢的切削加工性差. SA508 III 钢虽然硬度不高,但是强度和韧性较高^[9].材料强度高时会导致变形困难,使切削力增大,刀刃承受负荷增大,切削热也会升高,刀具失效

加快; 而材料韧性高时, 则导致切削时消耗的能量增多, 切削力和切削温度也都较高, 并且不易断屑^[8]。另外, 由于水室封头毛坯制造工艺, 也使水室封头加工困难。水室封头是整体锻造而成, 所以在毛坯件表面存在很多锻造缺陷, 这些缺陷使水室封头毛坯件车削加工时切深变化不定, 形成随机变化的机械冲击; 刀具切入切出, 冲击力强; 切深变化频率快, 振动大; 切削过程刀具受到摩擦力大, 切削温度高; 这些综合作用导致刀具破损严重^[10]。此外, 水室封头自身结构特点也给切削加工带来困难。例如, 在对水室封头内外球面、两个直管嘴及斜面加工时, 需要对工件进行多次装夹、找正。为了便于加工, 生产现场采用旋转工作台如图9所示对水室封头进行加工, 它大大节省了加工过程中的找正时间, 但是对于水室封头两直管嘴加工仍是水室封头加工的难点, 这是由于水室封头的直管嘴长度为1.5 m左右, 在镗铣床上加工时, 刀轴悬伸量大, 振动强烈, 从而造成切削刀具破损极为严重。



图9 旋转工作台

3 水室封头加工过程中刀具失效形式及原因探究

3.1 重型焊接车刀失效形式分析

根据现场调研, 水室封头从毛坯件到完成加工, 整个过程中的材料去除率达到70%以上, 在拉荒中采用的是焊接式重型车刀, 在切削过程中切削速度为70~90 m/min, 切深为15~30 mm, 进给量为0.70~0.80 mm/r, 切削力可达到十几吨, 刀具失效情况严重, 如图10所示为水室封头加工过程中重型焊接车刀常见的失效形式。

后刀面的磨损主要是由于摩擦引起的, 在水室封头毛坯件加工过程中, 毛坯件表面会经常出现一些硬度极高的硬质点, 常见硬质点有碳化物(如 Fe_3C 、VC等)、氧化物(如 SiO_2)、氮化物, 它们会在刀具表面刻划出沟纹, 在切削过程中车刀后刀面与工件的硬质点反复摩擦作用, 最终形成后刀面磨损^[11]。



图10 重型焊接车刀主要失效形式

刀尖的冲击破损是水室封头加工过程中最为主要的破损方式, 不同于普通车削, 在重型毛坯件切削加工过程中由于随机出现的锻造缺陷(如锻造凸条、锻造褶皱、锻造铲沟、锻造鼓包、锻造凹坑以及氧化皮^[12]), 刀具的运动应看成随机的断续切削过程, 这导致冲击载荷无规律, 且大小变化范围很大。刀具之所以会产生冲击破损, 主要原因有两种: 一是由于刀具制造工艺技术的限制, 使得本身存在微裂纹或缺陷, 当其受到冲击载荷作用时, 裂纹会进一步延伸, 最终导致破损。二是由于冲击载荷^[13]强度超过刀具材料的抗弯强度时, 刀具会发生剪切脆断。

切削刃的撕裂是由于在切削时工件与前刀面存在很大的压力和强烈的摩擦, 从而导致发生冷焊作用, 在前刀面上形成冷焊结, 继续切削时, 由于交变应力、接触疲劳、热应力以及刀具表层结构缺陷^[14]等原因, 刀具上的冷焊结破裂, 刀具材料被切屑或工件带走, 从而造成切削刃撕裂。

刀刃的脱落在焊接车刀切削加工中也比较常见。硬质合金的出现就改变了整个切削加工行业^[15], 但是硬质合金的价格昂贵, 为了节省成本, 适应重型切削, 于是产生了焊接式重型车刀, 它是由硬质合金刀头与45钢刀体通过钎料在800℃左右进行焊接, 由于硬质合金与45钢材质不同, 它们的弹性模量、导热系数、热膨胀系数、温度系数都有所不同^[16], 两者共同作用, 导致加热和冷却时出现温度梯度, 从而产生焊接残余应力。焊接残余应力对焊接刀具的破坏性很大, 它是导致硬质合金刀块焊接不牢固, 刀块与刀体脱落的主要原因, 另外焊接残余应力还可能会导致车刀产生焊接裂纹^[17]。

3.2 圆形铣刀片的失效原因分析

在水室封头铣削过程中广泛用到圆形铣刀片, 而加工部位的不同会导致刀片破损的形态不同, 通

过对图8 c) 圆刀片进行现场切削实验,并在 Keyence 超景深显微镜下检测发现,当镗杆伸长加工直管嘴部分时,刀具的破损如图11所示;而当加工外球面其它部位时,刀具破损如图12所示,对比分析两图可知加工直管嘴时的刀片破损明显比加工外球面时的严重,这主要是由于刀片在加工直管嘴过程中剧烈振动所引起的。

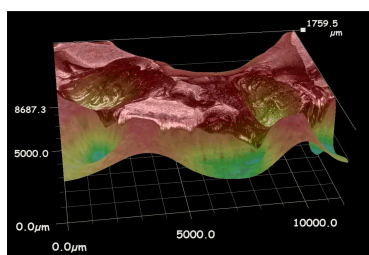


图11 加工直管嘴刀片破损

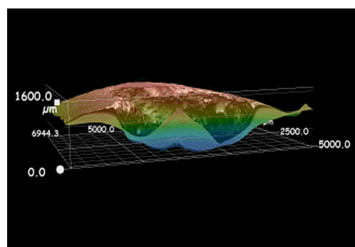


图12 加工外球面刀片破损



a) 月牙洼磨损 b) 裂纹 c) 崩碎

图13 圆形刀片破损形式

如图13所示为采集到的破损刀片样本,其中图13a) 中月牙洼磨损^[13]主要是由于切屑从前刀面上流过时产生很大的力和切削热,而在高温条件下刀具组织变得不稳定,从而使很多刀具材料被切屑带走形成月牙洼磨损.图13b) 中可观察到热裂纹^[14],这是因为在SA508 III 钢在铣削时切削温度很高,而刀片铣削过程是断续切削,每个刀片在进行切削时受到强烈的撞击和摩擦作用,温度急剧上升,而切削结束后刀片在空气中冷却,刀片在切削过程中反复受到交变的机械载荷与热载荷作用,切削部分反复热胀冷缩,会产生交变的热应力,从而使刀片产生热裂纹.图13c) 中切削刃的崩碎^[20],主要是有以下4方面原因造成:经锻造的材料组织硬度不均匀;刀片前角偏大导致切削刃强度偏低;切削加工工艺系统刚

性不足,产生振动;刀片反复的受到交变载荷作用.

4 提高刀具寿命的措施和建议

经研究发现,在水室封头的拉荒过程中焊接车刀破损严重影响生产效率和增大生产成本,经分析刀具由焊接产生的焊接残余应力是刀具过早失效的重要原因.因此,为了提高焊接刀具的使用寿命,可以设法去除焊接残余应力.通常去除残余应力有以下措施^[21].

1) 退火处理法.退火在热处理工艺中主要作用就是去除残余应力,但是在退火的过程中会导致焊接刀具的尺寸或形状出现偏差,故不能用于去除焊接刀具残余应力.

2) 锤击去除法.在焊接时用手锤迅速敲击焊接金属.由于敲击会使焊接金属产生横向塑性伸展,如果这种塑性伸展使该部位的拉伸残余应力的弹性应变松弛,就使此处的拉伸残余应力被去除,通过这种方法可以消除残余应力,还可预防变形和开裂,但实验表面锤击法也可能使焊缝内产生局部缺陷,并且可能会破坏硬质合金刀头.

3) 振动去除法.将工件放在振动发生装置上,进行几分钟振动,便可去除残余应力.通过振动法不仅可以消除残余应力,而且不会改变工件的尺寸. Innovex 公司开发出一种振动消除刀具残余应力装置,它利用磁致伸缩效应引起振动,消除应力,有效的延长了刀具寿命(通过实验表明,振动消除刀具残余应力效果非常好,经过振动处理的刀具寿命能提高30~60%),因此可以采用振动方法消除刀具焊接残余应力.

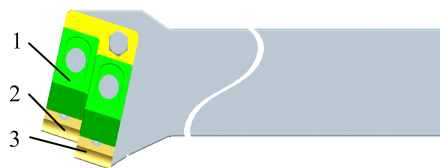


图14 重型层切车刀

综上所述,在对重型刀片焊接处理后,采用专业振动装置对焊接刀具进行处理可以有效的提高刀具的使用寿命.此外,为了避免车刀焊接残余应力影响刀具使用寿命,可采用专用层切车刀,如图14所示.图中1为刀具夹紧断屑装置,2为重型车刀片一,3为重型车刀片二.该车刀采用相错位两个刀片,用夹紧装置夹紧,在大切深切削过程中两个刀片同时参与切削,设第一把车刀的切削深度为 a_{p1} ,第二把

车刀的切削深度为 a_{p2} , 其最大切削深度为各车刀切削深度之和, 即 $a_p = a_{p1} + a_{p2}$. 当切削深度小于 a_{p1} 最大切深时, 第二把车刀刃悬空, 只有第一把车刀工作, 那么 $a_p = a_{p1}$. 同时夹紧断屑装置还具有控制切削流向的作用. 该层切车刀能很好的解决曲率变化的重型零件毛坯件在拉荒过程中刀具失效严重的问题, 并且能有效的提高生产效率.

对于在水室封头加工过程中铣刀片的选择, 应该根据铣削部位的不同而选择不同的槽型、不同的刀具几何参数、不同的涂层, 特别是针对刀具破损严重的水室封头的直管嘴加工, 可以采用新型减振刀杆, 该刀杆的内部偏心处安装一个减振器, 通过采用减振刀杆可以降低因伸长量大引起的振动, 从而提高刀具寿命. 针对水室封头外球面的加工可以采用不等齿距铣刀盘, 它能有效的避免传统等齿距铣刀盘铣削时周期性冲击而产生的受迫振动. 而为了保证铣刀片的使用寿命及工作稳定性, 可装配新型铣刀片(如图15所示), 图中1为散热结构, 2为消振棱, 3为减摩结构, 4为定位槽. 该铣刀片采用较小的前角(前角 5°), 为了减小振动, 刀片采用小后角(后角 7°)和消振棱, 在刀片底部设计有定位槽, 避免在重载切削情况下刀片发生旋转, 并且在断屑槽中增加减小摩擦结构和散热结构, 从而有效的降低切削过程中的切削温度和切削力, 提高刀具的寿命.

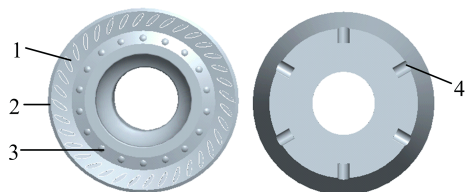


图15 专用铣刀片

5 结 语

本文首先对水室封头加工过程和加工难点进行分析, 并对其进行加工区域划分和仿真分析; 其次, 针对刀具失效原因进行探讨, 并提出几种提高刀具寿命的措施. 为了更好实现水室封头的高效切削, 建议从以下3方面进行进一步研究: ①提高锻造毛坯件生产水平, 尽量减少因锻造不合格报废工件而造成生产成本增加和生产周期延长的情况. ②对水室封头加工工艺进一步分析研究, 在数值模拟以及计算机仿真的基础上, 优化刀具走刀路径, 提高切削加工效率. ③水室封头加工厂家应与刀具公司建立紧密联系, 根据机床的参数选择合适的刀片, 并根据刀

片的推荐参数选择合理的切削用量. 应该针对加工零件不同部位时刀片破损形式, 设计合理几何参数的新型刀具, 提高刀具使用寿命和加工效率.

参 考 文 献:

- [1] 景继强, 栾洪卫. 世界核电发展历程与中国核电发展之路[J]. 中国核电, 2007, 349(5): 1-10.
- [2] 徐大懋. 加速发展核电——中国能源结构调整的必由之路[J]. 中国能源, 2005, 27(8): 6-9.
- [3] 西屋电气公司. 西屋公司的 AP1000 先进非能动型核电站[J]. 现代电力, 2006, 23(5): 55-65.
- [4] 刘利钊. AP1000 核岛主设备用 SA508-3 钢锻件的监造[J]. 中国核电, 2011, 4(3): 242-249.
- [5] 刘建华, 邓建新, 张庆余. TiAlN 涂层的发展与应用[J]. 工具技术, 2006, 40(4): 9-13.
- [6] 张文广, 焦殿辉, 郭德明, 等. AP1000 蒸汽发生器水室封头锻件制造工艺[J]. 金属加工, 2013, 17: 65-68.
- [7] 王英杰, 赵宇强. AP1000 蒸汽发生器锻件制造的难点[J]. 中国核电, 2012, 5(3): 239-246.
- [8] 傅晓锦, 于忠海, 刘锦时, 等. 水室封头加工参数优化[J]. 上海电机学院学报, 2012, 15(6): 351-355.
- [9] HE G H, LIU X L, YAN F G. Research on the Dynamic Mechanical Characteristics and Turning Tool Life under the Conditions of Excessively Heavy-Duty Turning[J]. Fron. Mech. Eng. A, 2012, 7(3): 329-334.
- [10] 程耀楠, 刘献礼, 李振加, 等. 极端重载切削条件下的刀具粘结失效研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 169-176.
- [11] 程耀楠, 刘利, 钱俊, 等. 大型锻件高效切削加工技术[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(1): 14-21.
- [12] YAN F G, LIU X L, HE G H, et al. Research on the Tools Strength in the Condition of Uncommonly Dynamic Heavy-Duty Loads[J]. Advanced Materials Research, 2012, 500: 563-568.
- [13] 吴起, 于彦波, 王志勇, 等. 断续切削时刀具切出破损原因的探讨[J]. 哈尔滨科技大学学报, 1992, 16(4): 9-13.
- [14] 周泽华, 于启勋. 金属切削原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 126.
- [15] 陶国林, 蒋显全, 黄靖. 硬质合金材料发展现状与趋势[J]. 金属功能材料, 2011, 18(3): 79-83.
- [16] 路汉钢. 硬质合金与钢钎接头的残余应力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 1-10.
- [17] 刘权, 康春梅, 张秀珍, 等. 硬质合金焊接刀具裂纹的产生及控制措施[J]. 中国新技术新产品, 2012, 20: 64.
- [18] 张中民, 刘效伟, 刘献礼. 刀具月牙洼磨损规律的实验研究[J]. 哈尔滨科学技术大学学报, 1995, 19(6): 1-5.
- [19] 陶福春, 云志新, 梁庭柱, 等. 硬质合金刀具断续切削出破损原因的探讨[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1999, 4(2): 5-7.
- [20] 程耀楠, 高军, 敖晓春, 等. 基于应力场分析的铣刀片冲击破损目标函数研究[J]. 工具技术, 2010, 44(6): 19-22.
- [21] 张书奎, 罗植廷, 浅析焊接残余应力及其消除方法[J]. 冶金动力, 1996, 6(1): 38-41.

(编辑: 温泽宇)