

基于TRIZ理论的刀具梯度熔覆WC涂层的修复工艺改进

于海峰, 陈翔, 郭海华

辽宁工业大学 辽宁锦州 121001

摘要: 刀具在切削加工过程中磨损严重, 如何实现简单快速的修复, 已经成为亟需解决的问题之一。为解决刀具修复问题, 对原有修复工艺进行全面系统的改进, 提高刀具加工效率、质量和可靠性, 从而满足不断发展的工业需求。

关键词: TRIZ理论; WC涂层; 刀具修复; 梯度熔覆; 机械加工

1 序言

刀具在制造业中扮演着极其重要的角色, 其性能会直接影响加工效率和产品质量。刀具表面涂覆的激光熔覆涂层作为提高刀具性能和延长使用寿命的关键, 在现代制造业中具有重要意义^[1]。然而, 随着刀具在反复使用过程中频繁地受到损伤, 修复涂层的工艺研究变得更加重要。本文利用TRIZ理论对刀具修复及改性工艺进行梳理, 重点针对刀具梯度熔覆WC涂层修复的工艺进行改进, 使修复后的WC涂层既无裂纹和缺陷, 刀具体又无热脆裂现象, 同时还能提高刀具的硬度及热学性能, 大幅度

提升破损刀具的修复效率, 体现激光成形修复技术的应用价值^[2]。

2 问题初始形式分析

在研究此问题的初始形式时, 首先对现有修复方法的优缺点进行分析, 详见表1。

根据TRIZ理论因果分析方法对现有的刀具修复方法进行分析, 详见表2。

根据上述分析, 得出最适合优化改进的修复方法是激光熔覆含WC涂层修复法, 使用此方法所用设备无论在软件还是硬件方面, 均易实现加工预测与在线监控, 对修复过程中的质量监控有着积极

表1 现有修复方法优缺点分析

修复方法	优点	缺点
刀具刃口重新修磨法	可采用人工重磨或机器重磨方式, 操作相对容易	影响刀具尺寸; 不断消耗刀具材料, 属于不可再生的修复方法; 大型刀具重磨较难, 人工重磨时质量一般由经验决定
刀头堆焊修补法	易实现自动化, 可在现场进行修复; 可实现局部改性	热影响区大、稀释率高, 易产生各种缺陷, 甚至是刀具断裂; 金属焊条的形状限制较多, 加工范围也因此受到限制
刀体机械连接法	修复原理相对简单	修复质量控制较难, 在高速钢上加工螺纹比较困难, 不适用于大型刀具的修复
刀具3D打印	能够实现大面积修复; 可根据需要调整成形性能	设备和作业成本相对较高; 修复技术相对不成熟
激光熔覆含WC涂层修复法	自动化程度较好, 可控性强; 可根据需要调整修复性能; 修复工艺的灵活性与适应性好	热量的累积较大; 内部质量、结合区的缺陷较大

表2 因果分析结果

修复方法	热影响	创新性	成本	靶向修复	可控性	绿色性	适应性
刀具刃口重新修磨法	小	较难	低	无	较难	差	差
刀头堆焊修补法	中	较难	中	较强	一般	一般	一般
刀体机械连接法	小	容易	低	无	容易	较好	差
刀具3D打印	大	容易	高	较弱	较难	较好	不确定
激光熔覆含WC涂层修复法	中	容易	中	较强	容易	较好	较好

作用^[3]。此方法较为开放、灵活，相比其他修复方法，随着装备的进步，激光熔覆设备的成本正在逐年降低，在工艺的改进方面仍存在诸多可能。

3 系统分析

3.1 可用资源分析

刀具体的物理性能是保证切削的必要条件之一，修复时，含WC涂层的材料性能需要既能满足刀具的使用性能要求，又能适应修复工艺要求以及确保修复后刀具的实用性。分析后的可用资源见表3。

表3 可用资源分析结果

资源类型	资源1	资源2	资源3
内部资源	刀体材料、性能、尺寸	含WC修复层材料	激光热源能量
外部资源	增材制造工艺	二次加工工艺	/
其他附加资源	操作手法	修复经验	/

3.2 功能分析

(1) 系统的有用功能 修复后的WC涂层性能一般能够满足甚至超过刀具体的使用性能，增材制造工艺能够有效填补刀具的破损区域，需注意若能量选择不当，则容易造成热影响区域过大，导致刀具体损坏，属于功能不足的有用功能。

(2) 系统的有害功能 系统中产生的烟尘、噪声和粉尘等会导致热量累积过大，从而改变刀具体性能，严重的会使刀具体破损。

(3) 有用功能的加强与有害功能的裁剪 通过“采用优化方法对有关参数进行优化”的方式对激光熔覆时的工艺参数选择进行优化，增强对热影响源头的控制；利用“增强系统的可调节性和控制性”建立对熔覆温度的模拟，控制热量累积程度，同时消除有害功能。

综上所述，通过对现行刀具修复工艺进行有用

功能的裁剪，保留其WC/Co增材制造修复时的有用功能，同时应用“采用高进化级别的材料”，拟建立过渡熔覆涂层来改善功能的不足。

4 运用TRIZ工具解决问题

4.1 最终理想解

受热量累积、热影响区大及刀具体断裂等因素影响，导致修复质量差、修复效率不高等情况发生，针对此类情况需要建立一个解决方案，在刀具修复过程中能有效控制能量输出，减少热影响程度，实现绿色、环保及高效的修复^[4]。根据这个需求，可得最终理想解（IFR）见表4。

表4 最终理想解（IFR）

问题	回答
工艺改进的最终目的？	保证修复质量和效率，同时节能环保的？
最理想的结果是什么？	不改变基本修复原理，仅对其中的几个环节进行改进
达到理想结果的障碍是什么？	热影响区大，热量累积严重
出现这种障碍的结果是什么？	修复层质量不佳，刀具体破损，修复受限或无法进行
不出现这种障碍的条件是什么？	建立工艺参数的优化方法，实施对熔覆的温度模拟，添加梯度过渡层
创造这些条件所用资源是什么？	参数拟合理论、模拟软件及过渡涂层材料

4.2 原系统热源的功能模型与物-场模型分析

图1为原激光熔覆刀具修复系统的功能模型，图2为物-场模型。由图1可以看出，在刀具修复问题上，最首要的是解决热源在修复过程中对不修复区域造成的影响，进而改变不修复区域的性能，造成刀具整体的性能差异，刀具的修复质量难以保证。由图2可以看出，热量的累积主要受到热场（温度）的影响，引起有害的热量发散，造成能量的浪费，进而影响修复质量。

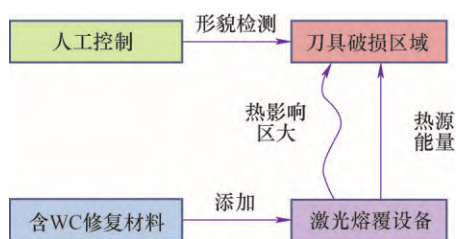


图1 原系统热源的功能模型

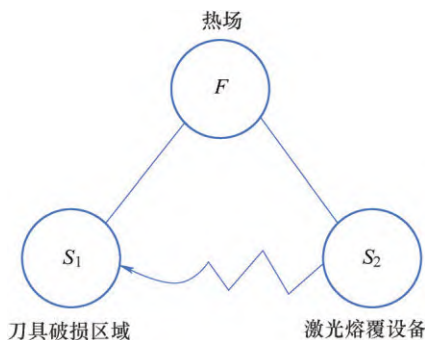


图2 物-场模型

4.3 系统改进的方案设想

在解决方案的实际应用中，根据TRIZ理论，需要对许多具体问题作更为全面的思考。为此在确定设计方案时，其他辅助功能与设计原则如下。

- 1) 尽可能强化设计方案的通用性，一种设计可适用于多种环境。
- 2) 新系统的操作应简单、易行。
- 3) 尽量降低成本与资源消耗。
- 4) 新系统不能违背刀具修复增材制造的基本原理。

根据TRIZ理论中的第2条——抽取原理，原系统中的激光热量可有效保证熔覆涂层具有良好的结合性，但若激光热量控制不当，则会引起涂层质量下降，进而引发刀具破损等问题，属于一把“双刃剑”，为此在分析原有修复工艺的基础上，热量控制的优化方法仍为研究重点。

根据TRIZ理论中的第5条——组合原理，可以建立关于激光系统的多个工艺参数对激光热量密度的影响模型，总结影响规律，以降低热影响程度，提高效率。

根据TRIZ理论中第9条——预先反作用原理，可以建立激光热能的温度场以及热应力场数值模拟模型，研究其热扩散规律，保证热影响在一个很小的范围内。

根据TRIZ理论中第24条——中介物原理，可

以设计某个过渡层来代替熔覆层与刀具体体的直接作用，形成梯度复合涂层，降低熔覆修复涂层时过量的激光能量密度对刀具体的热影响，以保证修复质量。

4.4 系统改进方案拟定

在刀具修复过程中的第一要务是减少热源在修复过程中对不修复区域造成的影响，热量的累积主要受到温度的影响，引起有害的热量发散，造成能量的浪费，进而影响修复质量的可靠性。

根据TRIZ理论中的第3条——局部质量原理，拟定通过改变熔覆涂层与刀具体之间的局部性能的方式，降低热量累积影响的方案。

根据TRIZ理论中的第10条——预先作用原理，拟定采用预先模拟分析熔覆修复时温度、应力场以及涂层内部组织结构变化的方式，减小热量累积带来的有害作用的发散，减少能量的浪费。

根据TRIZ理论中的第26条——复制原理，拟定通过建立关于激光能量与工艺参数的关联模型，替代原有实验成本较高的参数选择过程的方法。

根据TRIZ理论中的第40条——复合材料原理，拟定采用复合材料代替原有熔覆涂层的方式，增强修复质量的稳定性。

4.5 系统改进过程

最终，应用TRIZ理论对刀具破损修复工艺进行改进，建立了新的激光梯度熔覆修复系统。新系统具有以下几处关键优化。

1) 图3所示为新系统的温度传递影响规律，在单层激光熔覆过程进行数值模拟的基础上，得出熔覆过程中每道次熔覆层受到相邻道次熔覆层的温度传递影响规律。

2) 将激光熔覆过程中多个工艺参数综合考量，以激光能量密度为控制指标，将复杂的激光工艺参

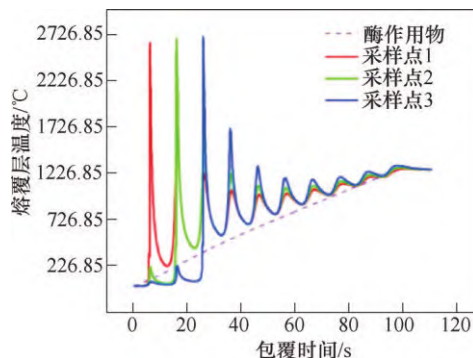


图3 新系统的温度传递影响规律

数拟合为一个综合工艺参数，以便控制。

3) 通过添加Ni60材料过渡层，完成激光梯度熔覆过程，新系统梯度熔覆如图4所示，梯度熔覆后的效果如图5所示。

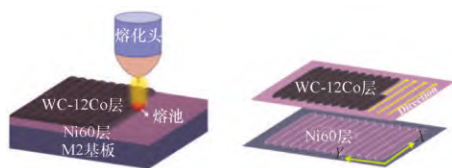


图4 新系统梯度熔覆



图5 梯度熔覆后的效果

5 结束语

刀具梯度熔覆WC涂层修复工艺的改进是优化

现代加工工艺的一次重要尝试，突破了现有工艺所面临的挑战，提高了刀具的性能和寿命，减少了资源的浪费。未来此项技术可以应用在不同形貌的破损刀具上，发展潜力巨大。通过TRIZ创新理论进行分析，能够更好地降低熔覆过程中的热影响程度，降低成本，实现资源的多次利用，最终将效益扩大化。修复工艺的改进与优化为制造业的发展和创新作出了重要贡献。

参考文献：

- [1] 许慧珍，徐洪军，曹习芳. TRIZ理论在创意物化的设计教学改革中的应用[J]. 设计，2024，37（1）：100-103.
- [2] 李散绵，裴晓敏. TRIZ理论在中小企业成本管控中的创新应用[J]. 商业会计，2023（21）：103-106.
- [3] 程圆. 激光熔覆梯度涂层及其组织与性能研究[D]. 福州：福建工程学院，2019.
- [4] 李镭昌，魏昕. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究[J]. 激光技术，2023，47（1）：52-58.

MW 20240622

《金属加工（冷加工）》“刀具”栏目征稿

《金属加工（冷加工）》杂志设有多个常规栏目，现“刀具”栏目面向广大的制造业业内人士征集稿件，欢迎各位踊跃投稿。

“刀具”栏目征稿内容：

1. 国内外数控切削刀具的发展变化，刀具材料、刀具形状及切削技术等革新与升级。
2. 某难加工工件或者材料的切削加工方案设计以及实施过程。

详细征稿内容及投稿规范请扫码查看。

投稿网址：<http://tougao.mw1950.cn>



征稿内容



投稿规范