

难加工材料的热强化加工研究进展

何松海

固阳义正诚碳素有限公司

DOI:10.12238/ems.v4i2.5058

[摘要] 热强化加工使用外部热源在切削工具前面局部加热和软化工件。剪切区的温度升高降低了工件的屈服强度和加工硬化,这使得难加工材料在加工过程中更容易发生塑性变形。本文综述了金属以及金属基复合材料热强化加工的最新进展和优点。包括外部热源与切削工具的集成以及借助外部热源改善各种工程材料的可加工性。

[关键词] 热强化加工; 机械加工性; 材料切削温度; 刀具磨损

中图分类号: TF538 **文献标识码:** A

Research Progress of Thermal Reinforcement Processing of Difficult-to-machine Materials

Songhai He

Guyang Yizhengcheng Carbon Co., Ltd

[Abstract] Thermal reinforcement processing uses external heat source to locally heat and soften the workpiece in front of cutting tools. Increasing temperature in the shear zone reduces the yield strength and processing hardening of the workpiece, which makes difficult-to-machine materials more prone to plastic deformation during processing. This paper summarizes the latest progress and advantages of thermal reinforcement processing of metal and metal matrix composites, including the integration of external heat sources and cutting tools and the machinability of various engineering materials with the help of external heat sources.

[Key words] thermal reinforcement processing; machinability; material cutting temperature; tool wear

引言

对更高强度和耐热材料的需求正在增加,尤其是在航空航天应用中。然而,由于这些材料的物理和机械性能,例如高强度和低导热率,使得切削力和切削温度非常高,导致刀具寿命短,因此这些材料通常难以加工。

由于热软化,材料的流动应力和应变硬化率通常会随着温度的升高而降低,因此在加工难加工材料时,热强化加工(TEM)成为可能。

热强化加工是使用外部热源加热和软化工件的过程。结果,工件的屈服强度、硬度和应变硬化降低,并且难加工材料(尤其是陶瓷)的变形行为从脆性变为韧性。这使得难以加工的材料更容易加工并且机器功耗低,从而提高材料去除率和生产率。

1 热源

为了在热强化加工期间有效地应用它,热源应该是局部的、快速加热的并且是可控的。TEM中用来加热工件的外部热源有等离子体、激光束、气炬、感应加热、熔炉预热、电流加热或电弧。热源的不当应用可能会在加工后的工件中引入不希望的微结构变化。

与其他加热方法相比,激光束和等离子弧加热的优点是加

热表面的快速、高且局部的温度升高。激光束或等离子体在切削工具前面局部加热工件,只有要去除的材料被有效加热。因此,由于可控制的光斑尺寸和高功率密度,预热期间激光束的热影响区和热变形很小。由于激光束和等离子体的局部加热,在整个厚度上存在大的热梯度。预热温度对改善可加工性的影响很难描述,因此,需要对材料进入切削区之前的温度分布进行综合分析。大的热梯度使得该工艺能够利用高的表面温度而不影响加工表面下的完整性^[1]。对热强化加工的综述主要集中在激光辅助加工和等离子强化加工。温度影响的一些结果来自其他热源^[1]。

2 激光束与机械加工应用的结合

2.1 车削

对于车削操作,由于切削工具的固定性质,将激光束与车床集成相对简单。激光束变量是其位置、光斑大小、入射角和工具-光束距离。

在大多数报道的激光辅助车削工作中,激光束垂直于工件表面。这种布置的优点是加工容易,并且不会导致加工表面的加热,但是在切削刃处存在贯穿厚度的大温度梯度,并且对于深切削,切削深度处的温度可能不够高。此外,切削工具表面暴露于

加热的工件表面。这对切削与切削工具具有高化学反应性的工件材料是有害的。激光束可以入射并垂直于倒角表面。通过这种配置,可以在三个方向上实现更高且更均匀的切削力降低。通过适当控制倒角表面上的光束位置,在加工表面附近的热量不会改变微结构,并且工具不会与激光加热的工件表面直接接触。要求激光光斑尺寸完全覆盖倒角表面,以实现X、Y和Z方向上切削力的均匀减少,然而,即使激光束靠近加工表面部分覆盖倒角表面也能显著减少工具磨损。

据报道,使用多个分布式激光装置同时加热未加工表面和倒角表面以在工件的切割深度内产生所需的温度分布,可延长刀具寿命。

激光束相对于工具的位置至关重要。刀具-光束距离以及切割速度决定了激光加热和加工操作之间的时间间隔,从而决定了切割区域的温度分布。据发现,当切削淬硬钢、商业纯钛和高铬白口铸铁时,通过将激光点定位在更靠近切削工具的位置,可以实现切削力的更大降低。然而,如果工具-光束距离过短,工具可能会因过热而损坏,切屑可能会飞进激光束中,熔化掉在加工表面上。因此,工具必须与激光束保持最小距离。

2. 2 铣削工艺

当刀具旋转时,激光束与铣床的集成是一项复杂的任务。一般来说,横梁可以与刀具分开布置,也可以与主轴集成在一起。

对于曲面铣削,最简单的方法是沿进给方向将光束设置在刀具前面。在大多数应用中,外部热源有限的光斑尺寸限制了单个光斑覆盖切割宽度的能力。因此,光束只能加热切割宽度的一部分^[2]。

由于在铣削操作过程中,当旋转刀具分别在进入点和退出点间歇地与工件接合和脱离时,对切削刀具的动态冲击会导致显著的振动并最终导致刀具断裂,因此在进入点处的激光束加热对于延长刀具寿命和减少颤振更为重要。如果通过额外的马达来移动光束,可以通过将光束定位成与切割工具的进给方向对齐或者通过扫描光束以覆盖切割区域的宽度来实现灵活性。

不是用与主轴分离的光束来加热工件的顶面,而是提出了两个概念来将光束与机床整合。在铣削操作过程中,激光束与加工工具的集成可以通过以下方式实现:(1)通过径向于工具轴线的界面在主轴前面耦合光束;(2)激光束通过主轴轴向传送,端光束工具可随主轴旋转。使用这种集成设置可以进行激光辅助铣削。

3 难加工材料的热强化加工

经研究证明,热强化加工在降低切削力和比切削能量、更好的表面光洁度和更长的工具寿命方面改善了各种难加工材料的可加工性。工件材料包括金属和金属基复合材料。

3.1 金属

3.1.1 钛合金

近年来,钛及其合金因其优越的性能,如优异的强度重量

比、强耐腐蚀性和在高温下保持高强度的能力,在航空航天工业中的需求不断增加。这种需求导致需要提高加工速度,从而提高材料去除率。

钛合金的可加工性差主要是由于它们的低导热性、对工具材料的高化学反应性和低弹性模量,所有这些都导致切削温度高、工具寿命短和加工过程中的高振动。这些限制了切割速度和生产率。侧面磨损和凹坑磨损是主要的工具失效模式,是溶解-扩散、粘附和磨损机制的结果。钴的扩散导致WC颗粒的拔出和去除,这比钨和碳的扩散对硬度和耐磨性更有害,并主导了凹坑磨损机制。

激光辅助加工提供了一种通过降低切削压力来改善可切削性的替代策略,而不是多年来专注于改善钛合金可切削性的强化冷却策略。在激光束的帮助下,所有三个方向的切削力都显著降低,切削力的降低很大程度上取决于切割速度、切割深度、工具-光束距离、激光光斑尺寸、激光功率和光束入射角。在激光辅助车削工业纯钛的过程中,仅在光束入射方向发现了激光功率对力降低的显著影响。

当激光束以其短轴沿着工件旋转方向入射在倒角表面上时,由于短的光束相互作用时间,进入剪切区的热渗透被最小化。因此,切削工具的发热被最小化,工具寿命被提高,因为用于加工钛合金的硬质合金工具的强度在高温下较低。

在常规加工过程中,切屑分割开始的临界切削速度非常低。这导致工具上的动态循环力,从而导致颤振和切削工具尖端断裂。随着激光束预热,切屑分割开始的临界切割速度增加。在恒定的激光功率下,随着切割速度的增加,切屑形态从尖锐的锯齿形态转变为连续的切屑,然后又回到锯齿形态。在低切削速度和高切削速度下形成的锯齿形切屑具有不同的几何比,这表明了不同的形成机理。连续芯片转换速度随着激光功率的增加而增加^[3]。

3.1.2 淬火钢和其他金属

热强化加工已成功应用于其他金属,如钴基合金、钢、6061-T6铝和铁,可降低切削力,提高刀具寿命和材料去除率。

矩形激光束LAM切割D2工具钢时,推力随切割时间的变化强烈地依赖于光束的方向。当激光点慢轴垂直于进给方向时,推力随着切割时间逐渐减小,因为表面温度更高,一方面由于加热周期的持续时间更长;另一方面,在这种配置中激光功率沿其轴分布。不仅切削力的大小减小了,而且D2工具钢的LAM中的力的振幅变化也减小了。这归因于振动的极大减少。

在一些可硬化钢的LAM中,例如1090钢,获得更高的切削力,因为当工件的激光预热部分进入切割区域时发生相变硬化。获得了表面完整性的改善。与硬化钢LAM期间相比,韧性42CrMo4钢LAM期间激光功率对切削力降低的影响不显著,但随着激光功率的增加,表面质量的改善显著。在相同切削条件下,涂层K10工具和硬化XC42钢之间的摩擦系数在LAM中比在常规加工中更低。这导致LAM期间推力的大幅下降。但是,在奥氏体不锈钢的LAM过程中,在25至450°C的材料去除温度下,摩擦系数保持不变,

这表明剪切角在LAM过程中可能会发生变化。

由于工件的软化,工具钢LAM过程中刀具的刀槽磨损和灾难性故障的发展都有所减少,对于厚度为0.05mm的未切削切屑,这可以在表面温度高于300-400℃的情况下实现。稳定的积屑瘤边缘可以在LAM过程中保护切削刃,这部分有助于减少刀具磨损。切屑形态从传统切割产生的锯齿切屑变为相同切割速度下LAM产生的连续切屑。由于激光预热导致的碎片形态的变化是材料的失效模式从低温下的主要断裂变为高温下的塑性变形的结果。切屑减少系数随着预热温度的升高而降低,从而导致机械加工性的改善。

与钛合金的激光辅助加工不同,当具有矩形光束的二极管激光器的慢轴由于较高的表面温度而垂直于进给方向时,观察到在工具钢的LAM过程中较低的工具磨损和更显著的锯齿碎片形成抑制。加工钢材时,刀具寿命受预热温度的影响最大,这种增强效应可能会随着切割速度的增加而减弱。允许的最大预热温度受工件再结晶温度的限制,以避免加工表面下的任何微结构变化。

3.2 金属基复合材料

复合材料是由两种或两种以上的材料混合或粘合而成,每种材料都保持其完整性。一部分通常作为基体,另一部分作为增强材料,可以是颗粒、晶须或纤维的形式。复合材料的性能是通过这些成分的系统组合来实现的。

在颗粒金属基复合材料中,增强材料通常是陶瓷,为基体金属提供额外的硬度和耐磨性^[2]。然而,由于快速的工具磨损,掺入的陶瓷颗粒使金属基复合材料难以加工,这主要归因于硬质陶瓷颗粒的研磨性质。仅由于陶瓷颗粒的研磨作用,工具磨损加速,并且积屑瘤边缘在某种程度上保护切削工具免于相对于研磨颗粒滑动。

切削力由切屑形成、犁削、颗粒破碎和位移组成。表面粗糙度由低进料时的颗粒断裂和拔出控制^[3]。占大多数金属基复合材料70%至90%的金属基体在机械加工中也起着重要作用。在Al₂O₃p/Al复合材料的LAM过程中,与Z方向上的力减小相比,在切割之前通过激光束软化Al基体导致X和Y方向上的力减小更显著。软化的基体容易被挤出,而更多的Al₂O₃颗粒被切削工具从

加工表面推入,这在加工表面附近产生更高比例的Al₂O₃颗粒,这导致加工表面的耐磨性增加。此外,机加工表面显示出较高的压缩残余应力。在Al₂O₃p/Al复合材料的LAM过程中,也报告了更长的工具寿命。

然而,切削铝/SiC金属基复合材料时,刀具失效的模式是由磨损引起的空磨。随着预热温度的升高,磨损显著增加。这与积屑瘤刀刃的稳定性范围向较低切削速度的转移有关,同时,积屑瘤刀刃的前缘角度的变化降低了其保护平面免受磨损的能力。

4 结论与展望

热增强加工使用外部热源来加热工件、改变微观结构或在切削工具前面局部移除工件,从而由于工件的软化、变形行为的改变和变薄而促进加工过程。一般来说,它能为各种工件材料(如陶瓷、金属和复合材料)提供更低的切削力、更长的刀具寿命、更好的加工表面和更高的材料去除率。

材料进入剪切变形区时的局部温度在热强化加工过程中起着重要作用。该温度必须保持在最佳范围内,这取决于实际的工件材料。入射光束的位置和方向对于从热增强加工中获得最大益处也是至关重要的。

热强化加工是一个复杂的过程。外部局部加热不仅改变了流动应力,而且改变了工件的变形行为和切屑与刀具之间的摩擦。在未来的研究中,科研工作者应致力于切削工具的冷却效果、热强化在韧性工件上的应用问题以及热强化加工工艺的优化等方面的研究。

[参考文献]

- [1]李滋阳,王思佳,邓文举.陶瓷颗粒增强金属基复合材料研究进展[J].轻工科技,2021,37(04):41-44.
- [2]张洋,朱浩,曹雅彬.纳米陶瓷颗粒增强金属基复合材料的制备技术[J].微纳电子技术,2014,51(02):126-130+135.
- [3]A.Pramanik,L.C.Zhang,J.A. Arsecularatne.金属基复合材料的加工:陶瓷颗粒对残余应力、表面粗糙度和切屑形成的影响[J].国际机床与制造杂志,2008,(40)1613-1625.

作者简介:

何松海(1972--),男,汉族,河南新安人,大专,研究方向:机械工程。