

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.013

石英纤维增强复合材料超低温冷却铣削性能研究

邵丹

(沈阳秀展科技有限公司, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:为了改善和抑制干切削下的石英增强聚酰亚胺复合材料的加工缺陷,对该材料进行超低温冷却铣削加工,并针对常规干切削缺陷,对比分析复合材料加工形貌、表面粗糙度值和刀具磨损以及切削区温度等性能。结果表明:相对于干切削且不同切削速度条件下,超低温冷却能够有效抑制低速干切削石英纤维起毛和高速干切削聚酰亚胺黏结剂的烧蚀缺陷,加工表面质量都得到有效改善,加工表面粗糙度随切深的增加呈先降低后增大趋势;刀具耐用度获得明显提高。

关键词:石英纤维增强聚酰亚胺;复合材料;低温冷却;铣削性能;刀具使用寿命

中图分类号:TG54 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0058-05

Research of Cryogenic Milling Properties of Quartz Fiber Reinforced Polyimide Composite

SHAO Dan

(Shenyang Xiuzhan Technology Co., Ltd., Shenyang 110159, China)

Abstract:In order to improve and inhibit the processing defects of quartz reinforced polyimide composite dry machining, cryogenic cooling milling is conducted, and regarding the conventional flaws of dry milling, the cutting properties including surface morphology, roughness and tool wear are compared and analyzed. The results show that the cryogenic cooling milling at different cutting speeds can effectively inhibit the fiber fluff at low speed dry cutting and the ablative defects of adhesives at high speed dry cutting, thus the surface quality being upgraded effectively, the surface roughness decreases first and then increases with the increase of cutting depth, and the tool durability significantly improves.

Keywords:quartz fiber reinforced polyimide; composite; cryogenic cooling; milling properties; tool service life

0 引言

石英纤维增强聚酰亚胺复合材料拥有力学性能良好、物理化学性能稳定、介电常数低、耐高温性能等特点,被广泛地应用于航空航天、国防军工、电子和微电子等领域^[1-2]。但在采用传统切削方法加工时,由于该材料本身物理力学特性,通常存在切削力大、刀具磨损严重、加工效率低等缺点^[3]。同时,由于其特殊的各向异性叠层结构特点,导致材料层间剪切强度和层间拉伸强度很低,切削加工中极易产生飞边、毛刺、分层等加工缺陷。目前,对于复合材料的加工特性,实际加工中多采用优化工艺方法及革新刀具切削结构样式等方法来提高切削质量^[4]。宋宇翔等^[5]在加工石英纤维复合材料时,发现基于刀具参数,在计算出合适进给量基础上,较大的进给速度与主轴转速在提高加工效率、减小刀具磨损、降低成本、提高表面质量上具有较大优势。孙雷^[6]开展了超声辅助磨削石英纤维增强聚酰亚胺试验,研究了

加工过程中切削力、表面粗糙度的变化规律。采用传统特种加工方法也可改善石英纤维复合材料的加工性能,包括高压水射流加工、电火花加工、激光加工等^[7-9],但这些工艺方法都不约而同地破坏基体材料性能,加工效率相对于机械加工也较低。

研究发现,相对于干切削,复合材料普遍在超低温下具有迥异的材料力学性能,导致该类材料的切削性能发生变化。舒磊^[10]研究了碳纤维复合材料低温冲击特性及其演变规律,并结合低温铣削试验,分析了超低温对于复合材料加工中的切削力、加工表面缺陷、加工表面粗糙度的影响,并提出了加工缺陷形成机制。RICE 等^[11]提出当温度降至 -196°C 时,聚酰亚胺的抗拉强度和弹性模量相比于室温 25°C 可分别增加 47% 和 35%。ZHANG 等^[12-13]研究了二氧化硅增强聚酰亚胺复合材料的超低温力学性能,发现相对于室温,在 -196°C 的低温下,该复合材料的弹性模量和抗拉强度获得明显提高。

作者简介:邵丹(1979—),男,黑龙江五常人,工程师,研究方向为数控机床及装备的研发设计,wangfb79@163.com。

本文针对石英增强聚酰亚胺复合材料在干切削加工中切削温度梯度高、毛边严重、不易断屑、加工质量低下等缺陷,结合超低温冷却纤维增强复合材料加工特点,开展该类复合材料的超低温铣削加工试验,并比较了干切削和超低温切削下铣削性能和分析了低温冷却对于复合材料切削性能的影响因素。

1 切削试验

1.1 制备试样

在本研究中,使用含量为 8% 的 QRPC-245 型石英增强聚酰亚胺复合材料作为切削试样,其中石英纤维厚度为 0.12 mm,宽度为 1 mm,然后用锯床切成 100 mm×50 mm×20 mm 方块,之后将其表面用吹风机清理干净备用。

1.2 试验装备组成

如图 1(a)、图 1(b) 中所示,采用 8500 型数控三轴立铣床对材料进行干切削和低温冷却切削试验,主轴最高转速 8 000 r/min,工作台行程 300 mm×300 mm×200 mm;利用北京某公司 DPL-175MP 型自增压液氮罐提供超低温液氮,并可提供 -196 ℃ 的液氮喷口温度(图 1(c))。

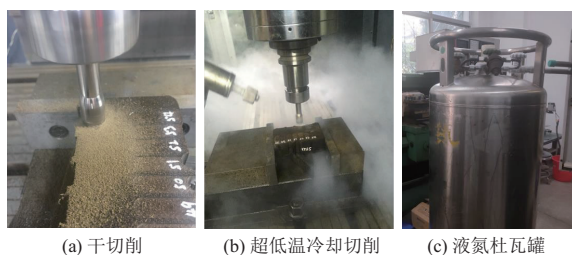


图 1 加工平台

本试验采用单因素法,切削参数如表 1 所示。

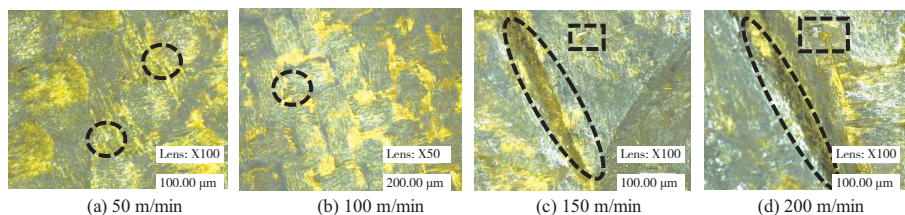


图 2 干切削表面形貌

如图 3(a) 和图 3(b) 所示,在液氮超低温介质介入后,工件加工表面质量被明显改善,石英纤维能够被有效切断,切削面起毛现象得到很好抑制;如图 3(c) 和图 3(d) 所示,在高切削速度条件下,石英纤维也能够被明显切断,并未产生聚酰亚

表 1 切削参数

铣削深度/ mm	进给量/ (mm/r)	铣削宽度/ mm	切削速度 v_c / (m/min)	冷却温度/ ℃
1.0	0.07	6	50	20
1.5			100	
2.0			150	-196
3.0			200	

1.3 分析设备

采用 5 400 万像素分辨率的日本 VHX-600 超深数码显微镜对样品表面形貌进行测量。采用垂直分辨率为 0.1 nm,扫描深度为 2~150 μm ,测量尺寸为 0.001 μm 的三维表面轮廓(ZYGO New view5022, USA)测试表面粗糙度,当刀具磨损失 $V_B=0.3$ mm 时判断刀具磨损失效,并计算刀具寿命。采用 UTi260B 红外线热成像测温仪测量切削区温度,测量范围 -20 ℃~550 ℃。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

复合材料干切削表面形貌如图 2(a) 所示,在低切削速度时,工件切削表面有未被完全切断的纤维残留,如图 2(a) 中圆圈区域所示,主要是干切削时石英纤维不能被切削刃有效切断,属于拉扯断屑方式;如图 2(b) 所示,随着切削速度的提高,残留纤维程度减弱,纤维未有效切断缺陷得到改善,复材的铺层结构仍可看出表面光滑,质量有所提高;当切削速度提高到 150 m/min 时,加工中可感受到聚酰亚胺黏结剂熔化的现象,并伴随有刺激的烧焦气味,切削表面呈现烧蚀状态(图 2(c) 中方框),且部分表面有撕裂现象(图 2(c) 中椭圆),尤其在 200 m/min 时(图 2(d)),烧蚀区域增加,铺层表面撕裂程度更加明显,表面质量进一步下降(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

胺树脂黏结剂被烧焦的刺鼻气味,液氮有效抑制了纤维和树脂的烧蚀缺陷,高速撕裂缺陷也被有效抑制,工件切削加工表面变得更加光滑,表面完整性被提高。

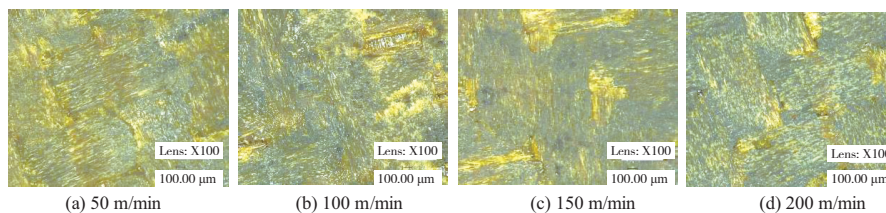


图3 超低温切削表面形貌

2.2 表面粗糙度

如图4所示,干切削时,随着切削速度增大,加工工件表面粗糙度值随之减小,但当更高切削速度时(150 m/min),表面粗糙度值又开始增大。主要原因是在高速切削条件下,切削温度随之相对较高,刀/工切削区更易由于高温出现聚酰亚胺树脂融化和粘刀现象,引起加工表面质量下降。在超低温时,随着切削速度提高,加工表面粗糙度值都下降,工件表面加工质量持续提高,可知高速切削未引起切削区过快温升,表面质量不受温升过快影响。

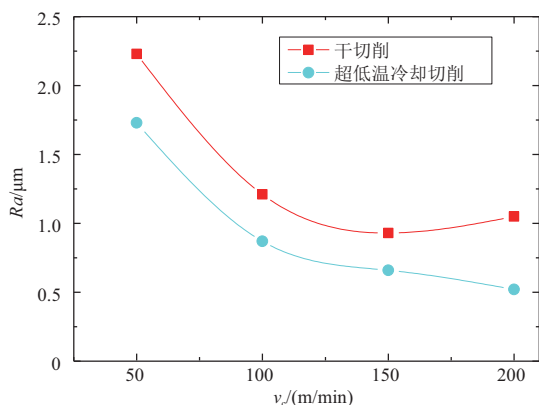


图4 切削速度对表面粗糙度影响

如图5所示,随切深的增加,工件表面粗糙度值呈先减小后增大趋势,主要原因是当较小切深时,切削抗力也很小,不能有效切断石英纤维,导致纤维出现避让现象,出现被拉出的纤维毛边;随增大切削深度,切削抗力会被增大,当刚好达到纤维

编织黏结点的最大拉伸强度时,纤维被拉断,工件表面质量较好;当切深较大($a_p > 2$ mm)时,虽然切削抗力大大增大,超过纤维编织黏结点的最大拉伸强度,但需要被切断的纤维数量也随之增加,总有部分纤维不能被有效拉断而增加了切断残留的毛边。同时,由图5中“*”可看出:两种切削条件下,当切削深度达到1.28 mm和1.34 mm时,可分别获得0.85 μm 和0.50 μm 的表面粗糙度值,故超低温冷却切削形式可利用增大切削深度来提高铣削去除率。

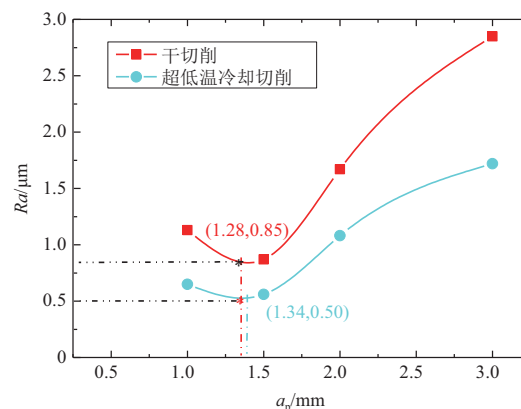
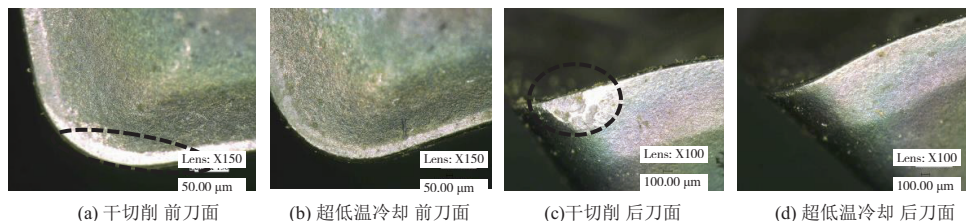


图5 切削深度对表面粗糙度影响 (150 m/min)

2.3 刀具磨损

从图6(a)和图6(b)中可以看出,相同切削速度下,干切削刀具前刀面磨损明显,刀具表面涂层有被磨损的现象,而低温冷却切削下,前刀面磨损不明显,刀具耐用度被提高。同时,干切削后刀面磨损更加严重(图6(c)),而低温冷却下的后刀面依然能够保持正常工作(图6(d))。

图6 刀具磨损形貌 ($v_c = 150$ m/min, $a_p = 1.5$ mm)

如图7所示,在干切削条件下,随着切削速度增加,刀具耐用度被明显降低,刀具的磨损随着切削时间的增加趋势几乎成线性。但在液氮超低温冷却下,刀具切削3个阶段的区分很明显。在切削加工初期,刀具磨损量快速增加,在不到20 min的时间内,刀具的后刀面平均磨损量 V_B 便达到了0.1 mm;在磨损量 V_B 大于0.1 mm时,刀具进入平稳磨损阶段,在30~50 min时间内,刀具的磨损量增加量较小,不超过0.1 mm。相同铣削速度下,刀具寿命可由干切削的25 min增加到低温冷却切削的50 min以上,刀具耐用度被大大提高。

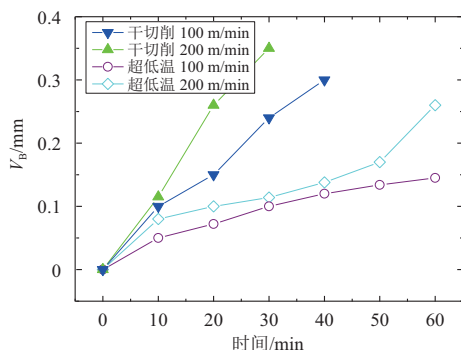


图7 刀具寿命

2.4 切削温度

如图8所示,常规切削中,复合材料切削时切削温度较高,在200 m/min时,切削温度就超过了350℃。随着切削速度增加,刀/工之间摩擦剧烈,会产生大量的摩擦热,复合材料导热性差,所产生的切削热不能很快消散,集聚在切削区域,引起局部温升过高,接近了黏结剂熔化温度(400℃)而引起烧蚀缺陷;但超低温条件下,切削温度较前者低很多,且随切速升高变化缓慢,说明液氮达到了明显冷却效果,尤其在200 m/min时,切削区温度也仅只有100℃,极大地抑制了复合材料烧蚀缺陷。

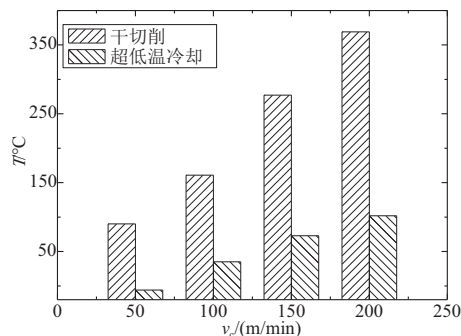


图8 切削速度对切削温度的影响

2.5 机制分析

由前面试验现象可知,经液氮低温冷却铣削后,切削面表面质量明显提高,主要归功于:

1) 复合材料断裂伸长率由常温20℃时的12%降低到-196℃时的8%,纤维本身的伸长性能也由于低温受到明显降低,纤维更容易在小变形下被拉断;又由于低温下树脂基体刚度的增加,降低了纤维弯曲变形的机会,致使部分纤维材料的断裂方式由干切削时的拉伸弯曲断裂转化为低温下的剪切断裂,故在低温下毛边、撕裂缺陷减少,加工表面毛刺缺陷被有效抑制,表面加工质量获得提高;

2) 如图8所示,在干切削下伴随高温升,聚酰亚胺黏结剂会出现熔化现象,导致刀具切削刃及后刀面的钝化及粘黏严重,刀具耐用度较低;在超低温冷却铣削条件下,液氮迅速带走了刀具-工件切削区的大量切削热,使得切削微区温度获得有效降低,聚酰亚胺黏结剂不会出现熔化与刀具粘黏现象,刀具可持续处于锋利切削状态,提高了刀具耐用度。

3 结语

1) 相对于干切削且不同切削速度条件下,超低温冷却能够有效抑制低速干切削石英纤维起毛和高速干切削聚酰亚胺黏结剂的烧蚀缺陷,加工表面质量都得到有效改善。同时加工表面粗糙度随切深的增加都呈先降低后增大趋势,切深分别达到1.28 mm和1.34 mm时可使表面粗糙度分别达到0.85 μm 和0.50 μm 。

2) 相同铣削速度下,刀具寿命可由干切削的25 min增加到低温冷却切削的50 min以上,刀具耐用度被大大提高。

3) 超低温能够有效降低切削区切削温度,在切削速度为200 m/min时,可使切削区温度由超过350℃降低到100℃左右,有效抑制了烧蚀缺陷,提高了加工质量。

参考文献:

- [1] 鹿海军,刘晓丽,李学山,等.石英纤维增强聚酰亚胺透波复合材料的高温热氧老化性能[J].航空材料学报,2022,42(5):127-134.
- [2] ZUROWSKI W, ZEPCHŁO J, KRZYŻAK A, et al. Wear resistance of the glass - fiber reinforced polymer composite with the addition of quartz filler[J]. Materials, 2021, 14(14):3825.
- [3] HANAFIAH N H M, OTHMAN A R. Effect of processing

- parameter on void content of glass fibre composite laminate[J]. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2022, 53(3): 308-315.
- [4] 刘津廷,董志刚,康仁科,等. 石英纤维增强聚酰亚胺材料超声辅助磨削[C]//第16届全国特种加工学术会议论文集(下). 厦门:中国机械工程学会特种加工分会, 2015, 457-461.
- [5] 宋宇翔,袁向东,林雨斌,等. 硬质合金刀具铣削 GFRP 材料加工特性的研究[J]. *林业机械与木工设备*, 2023, 51(2): 43-49.
- [6] 孙雷. 石英纤维增强聚酰亚胺超声辅助磨削技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [7] KAVIMANI V, GOPAL P M, STALIN B, et al. Influence of reduced graphene oxide addition on kerf width in abrasive water jet machining of nanofiller added epoxy-glass fibre composite [J]. *PLoS One*, 2022, 17(8): e0270505.
- [8] 汪长松. 玻璃纤维增强复合材料激光切割工艺研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2021.
- [9] MANNA A, NARANG V. An experimental investigation during micro machining of E-glass-fibre-epoxy composite on developed electrochemical spark machining setup [J]. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 2012, 2(2): 46-60.
- [10] 舒磊. 碳纤维增强复合材料低温铣削基础试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- [11] RICE B, QUINZI J, LUND L, et al. Measurement of Young's modulus and damping of fibers at cryogenic temperatures[J]. *Cryogenics*, 2014, 63: 43-48.
- [12] ZHANG Y H, FU S Y, LI R K Y, et al. Investigation of polyimide-mica hybrid films for cryogenic applications[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(11/12): 1743-1748.
- [13] ZHANG Y H, LI Y, FU S Y, et al. Synthesis and cryogenic properties of polyimide-silica hybrid films by sol-gel process [J]. *Polymer*, 2005, 46(19): 8373-8378.

收稿日期: 2023-05-22

(上接第 46 页)

- [32] GHELICHI R, MACDONALD D, BAGHERIFARD S, et al. Microstructure and fatigue behavior of cold spray coated Al5052 [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(19): 6555-6561.
- [33] 卜嘉利,吕扬,刘博志,等. 不同喷丸强度对 TC17 钛合金抗疲劳性能影响[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(6): 1225-1233.
- [34] 粟志伟,周艳文,郭诚,等. 冷喷涂 Cu(Ag) 涂层对 TB10 钛合金的生物污损防护[J]. *材料保护*, 2022, 55(9): 1-9.
- [35] LIU Y, SUO X K, HUANG J, et al. A review of cold sprayed coatings for biological applications[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(9): 25-31.
- [36] 贾利,崔焱,刘光,等. 冷喷涂制备多孔 Ta 涂层及生物相容性[J]. *表面技术*, 2024, 53(8): 184-190.
- [37] 李矛,段永宏,尹大宇,等. 等离子喷涂钽涂层人工假体生物相容性研究[J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(4): 320-324.
- [38] LI W, CHEN L, YU M, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of cold sprayed iron coating [J]. *China Surface Engineering*, 2010, 5372(10): 60130.
- [39] 宁先进,王全胜,杨晋智,等. 冷喷涂 Ni-cBN 防钛火涂层及其摩擦磨损性能[J]. *新技术新工艺*, 2018(4): 11-14.
- [40] 李文亚, CODDET C. 基于冷喷涂的多孔钛与钛合金的制备与表征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(增刊3): 260-263.
- [41] 冯力,王雄,安国升,等. 退火热处理对低压冷喷涂 Cu-Zn 复合涂层性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(7): 2444-2450.
- [42] 杨理京,李争显,黄春良,等. 激光辅助冷喷涂制备高硬度材料涂层的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(3): 412-417, 426.
- [43] 刘博,邹洪森,田凯,等. 激光辅助低压冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的微观特性及导热/导电性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 206-212.
- [44] 陈正涵,孙晓峰,李占明,等. 激光重熔与冷喷涂复合工艺制备的镍铝青铜基涂层耐腐蚀性能研究[J]. *表面工程与再制造*, 2017, 17(5): 23-27.
- [45] JI G, LIU H, YANG G J, et al. Effect of friction stir spot processing on microstructure and mechanical properties of cold-sprayed Al coating on Ti substrate[J]. *Surface and coatings Technology*, 2021: 127352.
- [46] 刘志浩,王文,韩鹏,等. 搅拌摩擦加工改性冷喷涂 6061 铝合金涂层的断裂行为[J]. *塑性工程学报*, 2023, 30(3): 190-196.
- [47] RALLS A M, MENEZES P L. Revealing the fretting corrosion degradation mechanisms of friction stir processed cold spray additively manufactured stainless steel [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130(5): 2855-2876.

收稿日期: 2024-08-30