

涂层刀具低温铣削 SiC_p/Al 复合材料表面质量研究

李爽¹ 牛秋林¹ 李常平¹ 余振² Ko TaeJo^{1,2}

(1 湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

(2 岭南大学机械工程学院, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 韩国)

摘 要 在加工过程中,相反的两相特性增加了 SiC_p/Al 复合材料加工难度,难以获得良好的表面质量。为了提高其切削性能,本文开展 20vol%SiC_p/Al 复合材料铣削加工试验研究,比较常温和低温条件下 TiAlN 涂层和 TiAlSiN 涂层两种铣刀的切削性能。结果表明,在低温条件下,两种刀具的切削力增加,铣削后表面铝基体的开裂及剥落等缺陷均显著改善,加工表面损伤减小且粗糙度降低,低温铣削能获得更好的表面质量。此外,在常温与低温条件下 TiAlSiN 涂层比 TiAlN 涂层铣刀的切削力小,低温条件下 TiAlSiN 涂层铣刀表面完整性和切屑形貌优于 TiAlN 涂层铣刀。

关键词 SiC_p/Al 复合材料,低温切削,涂层刀具,表面质量

中图分类号: TG506.3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.02.011

Surface Quality of SiC_p/Al Composites Milled by Coated Tools at Low Temperature

LI Shuang¹ NIU Qiulin¹ LI Changping¹ YU Zhen² KO TaeJo^{1,2}

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, South Korea)

Abstract In the machining process, the opposite two-phase characteristics increase the machining difficulty of SiC_p/Al composites, and it is difficult to obtain good surface quality. In order to improve its cutting performance, the milling experiments of 20 vol% SiC_p/Al composites were carried out to compare the cutting performance of TiAlN coated and TiAlSiN coated milling cutters at room temperature and low temperature. The results show that when milling at low temperature, the cutting force of the two tools increases, and the surface defects such as aluminum matrix cracking and spalling are significantly improved, and the machined surface damage and roughness are reduced. Low temperature milling can obtain better surface quality. In addition, the cutting force of TiAlSiN coated milling cutters is lower than that of TiAlN coated milling cutters under normal temperature and low temperature. The surface integrity and chip morphology of TiAlSiN coated milling cutters are better than those of TiAlN coated milling cutters under low temperature conditions.

Key words SiC_p/Al composite, Low temperature cutting, Coated tool, Surface quality

0 引言

SiC_p/Al 具有优良的力学强度、韧性、耐磨性等,受到了航空航天、汽车制造业等高新技术领域的广泛关注^[1-2]。在加工过程中,铝基体发生塑性变形,硬脆 SiC 颗粒则发生弹性变形、脆性破坏,相反的两相特性增加了 SiC_p/Al 复合材料加工难度,难以获得良好的表面质量^[3-4]。研究表明,表面质量取决

于增强体的形状、尺寸、含量以及切削过程中 SiC 颗粒的断裂和去除方式^[5-9]。此外,由于基体材料的塑性变形,在颗粒周围产生的空隙和裂纹也会影响表面质量。这些缺点将对 SiC_p/Al 复合材料的许多关键部件的最终性能产生不利影响,阻碍其在实际中的广泛应用。

SiC_p/Al 复合材料的加工一般采用干切削,切削

收稿日期:2020-08-26

基金项目:国家自然科学基金(51605161、52075168);湖南科技大学科学研究基金(KJ-2042)

第一作者简介:李爽,1995年出生,硕士研究生,主要从事颗粒增强型金属基复合材料表面质量的研究。E-mail: hnustshuangli@163.com

通信作者:牛秋林,博士,硕士生导师,主要从事难加工材料高速切削与超声振动辅助加工方面的研究。E-mail: qniu2009@163.com

热成为影响加工质量的关键因素。以液氮作为冷却介质的低温加工是一种清洁切削技术,在提高难加工材料的表面质量与加工效率等方面具备独特优势^[10-12],已用于提高难加工材料(如钛^[13]、石英纤维复合材料^[14]和芳纶纤维复合材料^[15])的加工质量和表面完整性。部分学者选择液氮作为冷却材料,对SiC_p/Al复合材料低温磨削加工进行了研究^[16-17]。目前仍缺少低温铣削试验研究,有许多问题亟待解决。

涂层刀具是将刀具基体与硬质薄膜表层接合,可有效减少刀具切削力、切削热、表面粗糙度及加工振动^[18]。本文在常温和低温条件下,采用两种涂层铣刀开展20vol%的SiC_p/Al复合材料铣削加工试验研究,比较常温铣削和低温铣削下两种涂层刀具的铣削性能,为工业上加工体积分数为20%的SiC_p/Al复合材料的刀具选择及表面质量优化提供参考。

1 试验

在立式精密加工中心(ACE-V45, DAEWOO)上

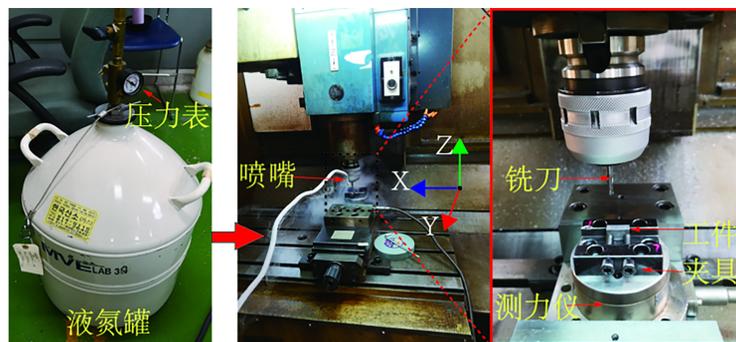


图1 液氮喷淋铣削装置

Fig. 1 Liquid nitrogen spray milling device

2 结果与讨论

2.1 铣削力

如表1所示,在TiAlN和TiAlSiN两种涂层铣刀铣削过程中,可以观察到低温冷却下的铣削合力比常温下提高25.6%和23.7%。由于工件材料的强度随温度的降低而提高,使低温加工中刀具克服材料对弹性及塑性变形的抗力增加,从而导致切削力增加。因为铝合金基体的线胀系数远高于SiC颗粒,所以低温冷却引起SiC颗粒的压应力和铝合金基体的拉应力,增强了SiC_p/Al复合材料两相之间的界面结合状态^[17],从而导致切削力的增加。

此外,TiAlSiN涂层的摩擦因数较低^[19],可以减

表1 铣削力
Tab. 1 Milling force

涂层种类	常温铣削力 F/N	低温铣削力 F/N	提高率 /%
TiAlN涂层	77.3	97.1	25.6
TiAlSiN涂层	59.5	73.6	23.7

进行铣削试验,使用的铣刀为TiAlN与TiAlSiN涂层球头铣刀,其牌号分别是AMB2060TTT5515和HSB2060S090170TT5505,除了涂层材料不同外,两把刀具的几何结构参数一致。铣削过程中产生的铣削力由安装在机床上的Kistler dynamometer 9256C2测力仪测量。

本试验采用搅拌铸造工艺制备的20vol%SiC_p/Al复合材料,SiC的平均粒径约为15 μm,铝合金基体材料为Al-Zn-Mg-Cu系列超高强度铝合金。工件尺寸8 mm×20 mm×10 mm,将工件从两端夹紧(图1)。试验在常温和低温下进行,低温辅助加工使用液氮作为冷却剂,在液氮储罐上安装了外部射流管,使用内径为2 mm的喷射管,将喷嘴对准加工区。液氮的喷射压力为32 kPa,液氮的储存温度为-196℃。本文铣削参数的选取来源于刀具供应商的建议,主轴转速 $n=2\ 000\ \text{r/min}$,每齿进给量 $f_z=0.02\ \text{mm/z}$,径向切削深度 $a_e=3\ \text{mm}$,轴向切削深度 $a_p=0.5\ \text{mm}$ 。

少切屑与刀具之间的摩擦力,所以不论常温和低温下,TiAlSiN涂层刀具的铣削力均小于TiAlN涂层刀具。

2.2 铣削表面损伤及表面粗糙度

在SiC_p/Al复合材料加工过程中,不仅有基体和增强颗粒的弹塑性变形,还有颗粒的断裂破坏及其对基体的挤压及耕犁。在扫描电镜下对SiC_p/Al复合材料的典型表面形貌进行观察(图2),分析其表面完整性。损伤类型可分为颗粒拔出留下的孔洞、颗粒破碎形成的粉末以及基体开裂和剥落。在加工过程中,基体材料的塑性变形使颗粒周围产生空隙和裂纹。常温与低温条件下均可见到颗粒的拔出及破碎,但低温下铣削后表面铝基体的开裂及剥落等缺陷均显著改善。因为基体表面的裂纹产生,扩展到开裂,再到基体剥落,这一损伤演化过程受温度影响较为明显。李矿等^[20]通过试验测定了铝合金材料在不同温度下的裂纹扩展性能,发现低温条件有利于减缓裂纹扩展速率,增强铝合金基体承受载荷后抵

抗发生断裂的能力。此外,低温条件下较好的颗粒与基体的界面结合状态也会降低基体开裂的可能性,有助于提高SiC_p/Al复合材料加工表面质量。

常温条件下TiAlN涂层刀具与TiAlSiN涂层刀具引起的表面损伤程度相似,都能观察到深的裂纹、基

体开裂及较大的基体剥落,表面质量相差不大。但低温下TiAlSiN涂层刀具引起的表面损伤明显减少,能观察到孔洞、裂纹及基体开裂明显改善,这对切削加工的表面质量的控制非常有利。

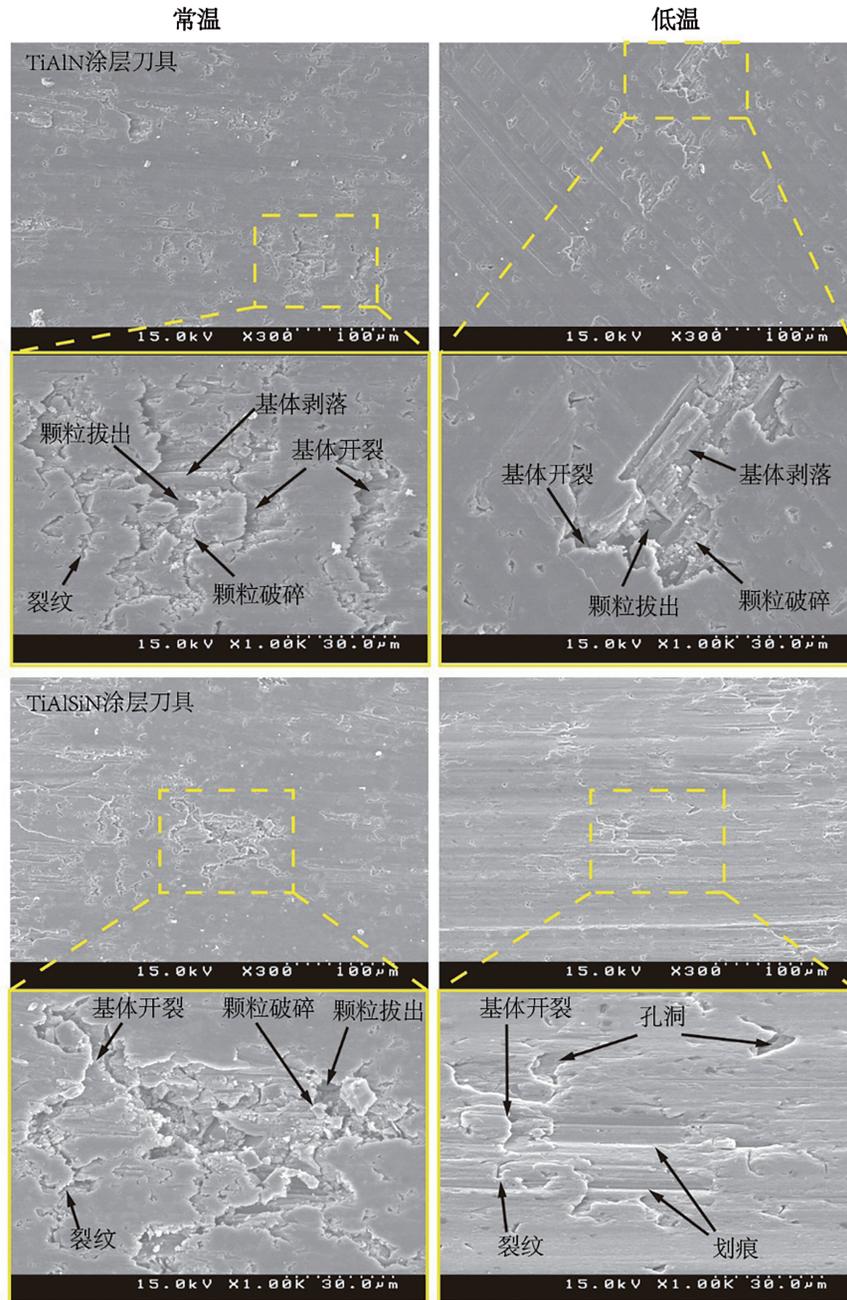


图2 扫描电子显微镜下铣削表面损伤
Fig. 2 Milling surface damage under SEM

图3为加工表面的三维形貌轮廓仪结果,显示了TiAlN涂层铣刀加工表面轮廓与TiAlSiN涂层铣刀加工表面轮廓。在铣削表面上,沿刀具进给方向均匀选取5个固定位置测量表面粗糙度,取平均值作为最终表面粗糙度值。在常温和低温条件下TiAlN涂层、TiAlSiN涂层铣刀加工表面粗糙度分别为 $Ra=0.91\ \mu\text{m}$ 和 $Ra=0.69\ \mu\text{m}$ 、 $Ra=0.76\ \mu\text{m}$ 和 $Ra=0.46\ \mu\text{m}$ 。

经过对两种刀具加工表面轮廓的对比后,发现低温条件下表面损伤明显减少,获得的平均表面粗糙度明显优于常温条件下获得的平均表面粗糙度。低温条件下使用TiAlSiN涂层铣刀加工的表面粗糙度值最低,质量最优。加工表面的扫描电镜特征(图2)也证实了这一现象。

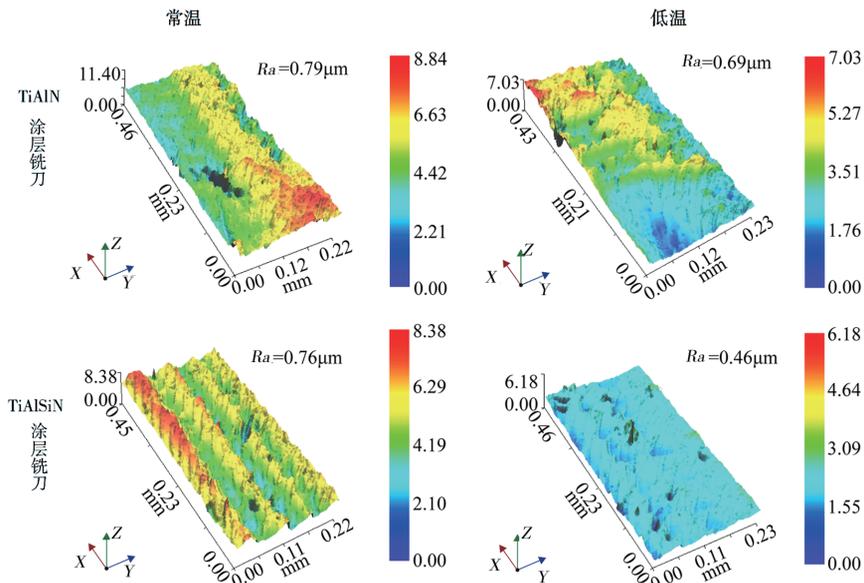


图3 铣削表面三维轮廓

Fig. 3 Three-dimensional profile of milling surface

2.3 切屑形貌

为了研究低温对切屑形貌的影响,使用扫描电子显微镜对常温及低温条件下的切屑进行了观察。如图4所示,常温条件相对低温条件下的切屑更为卷

曲,因为低温降低铝基体的韧性,韧性降低会使切屑更易折断。

通过观察图4中切屑内表面的微观形貌,可发现液氮条件下的切屑内表面质量更优。常温条件下的切屑内表面较为粗糙,存在孔洞、微裂纹、基体粘结及颗粒破碎。液氮条件下的切屑内表面较为光滑,孔洞、微裂纹及基体粘结现象较少。其中,粘结的基体一部分来自于切屑分离时从已加工表面剥落的基体。由于低温增强了基体的强度,使其不易剥落(图2低温条件下基体剥落损伤减小),基体粘结减少。此外,切屑形成过程中伴随着切屑与刀具之间的挤压与摩擦产生的基体材料粘结。液氮迅速汽化带走大量热量,有效降低了切削区的温度,同时形成的氮气缓冲层降低了切屑和刀具之间的摩擦因数^[21]。从切屑内表面的SEM照片可以推测出,温度及摩擦的降低使得切屑内表面的基体粘结减少。特别是TiAlSiN涂层刀具加工后的切屑内表面干净光洁。

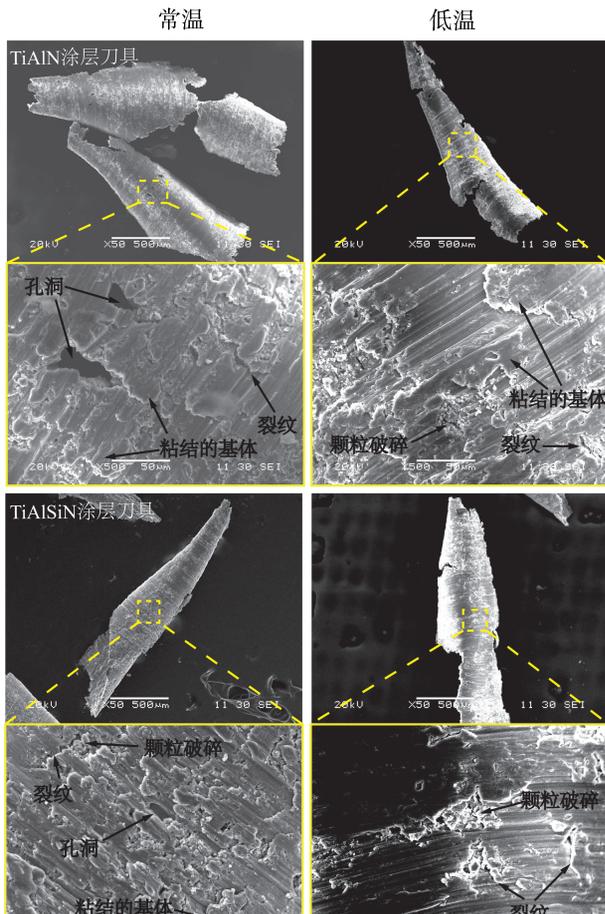


图4 切屑形态及其内表面微观形貌

Fig. 4 Macro morphology of chip and the micro morphology of its non-free surface

3 结论

(1)在低温条件下TiAlN和TiAlSiN两种涂层铣刀获得的铣削力要高于常温条件下的铣削力,分别提高了25.6%和23.7%。无论常温还是低温条件下,TiAlSiN涂层刀具的铣削力均小于TiAlN涂层刀具的铣削力。

(2)与常温条件相比,低温条件铣削后表面铝基体的开裂及剥落等缺陷均显著改善,表面损伤较小。常温条件下,TiAlN涂层刀具与TiAlSiN涂层刀具引起的表面损伤程度相似,但在低温条件下TiAlSiN涂层刀具引起的表面损伤明显减小。低温条件下的铣削表面粗糙度降低,使粗糙度达到0.69和0.46 μm,

特别是TiAlSiN涂层刀具加工表面粗糙度最小。液氮低温铣削有助于提高SiC_p/Al复合材料加工表面质量,且低温条件下使用TiAlSiN涂层刀具可大幅改善加工表面质量。

(3) 低温条件下相对常温条件下较易断屑。此外,低温条件下的切屑内表面明显优于常温条件下的切屑内表面。TiAlSiN涂层刀具加工后的切屑内表面干净光洁。

参考文献

- [1] BATHUL S, SARAVANEN M, DHAR A. Nanoindentation and wear characteristics of Al₅₀Si₃₀/SiC_p nanocomposites synthesized by high energy ball milling and spark plasma sintering [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2012, 64(011): 969-975.
- [2] XAVIOR M A, KUMAR J P A. Machinability of hybrid metal matrix composite—A Review [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 174: 1110-1118.
- [3] JIAO K R, HUANG S T, XU L F. Experimental study on surface quality at different milling speed of high volume fraction SiC_p/Al thin walled test-piece [J]. *Materials Science Forum*, 2014, 800-801: 15-19.
- [4] JIAO K, HUANG S, XU L, et al. Feature classification of high-volume SiC_p/Al composites under the condition of two-dimensional cutting based on cluster analysis theory [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(5-8): 677-686.
- [5] WANG T, XIE L J, WANG X B, et al. Surface integrity of high speed milling of Al/SiC/65_p aluminum matrix composites [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 8: 475-480.
- [6] BALAZINSKI M, KANNAN S, KISHAWY H A. Flank wear progression during machining metal matrix composites [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 128(3): 787.
- [7] DABADE U A, JOSHI S S, BALASUBRAMANIAM R, et al. Surface finish and integrity of machined surfaces on Al/SiC_p composites [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192: 166-174.
- [8] MUTHUKRISHNAN N, MURUGAN M, RAO K P. An investigation on the machinability of Al-SiC metal matrix composites using PCD inserts [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 38(5-6): 447-454.
- [9] RAJMOHAN T, PALANIKUMAR K. Optimization of machining parameters for surface roughness and burr height in drilling hybrid composites [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27(3): 320-328.
- [10] HONG S Y, DING Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(10): 1417-1437.
- [11] JAWAHIR I S, ATTIA H, BIERMANN D, et al. Cryogenic manufacturing processes [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2016, 65(2): 713-736.
- [12] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 57(2): 83-101.
- [13] LIYAKHATH S A, GOVINDARAJU N, PRADEEP K M. Experimental investigations on cryogenic cooling in the drilling of titanium alloy [J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2016, 31(5): 603-607.
- [14] 侯博, 谢浔, 崔超, 等. 石英纤维增强聚酰亚胺复合材料超低温铣削实验 [J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(03): 56-61.
- [15] HOU B, XIE X, CUI C, et al. Ultra low temperature milling experiment of quartz fiber reinforced polyimide composites [J]. *Aerospace Materials Technology*, 2020, 50(03): 56-61.
- [16] 侯博, 李兰柱, 郭鸿俊, 等. 芳纶纤维材料低温冷却车削加工性能 [J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(02): 63-68.
- [17] HOU B, LI L Z, GUO H J, et al. Low temperature cooling turning performance of aramid fiber material [J]. *Aerospace Materials Technology*, 2020, 50(02): 63-68.
- [18] ZHOU L, HUANG S, YU X. Machining characteristics in cryogenic grinding of SiC_p/Al composites [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 27(5): 869-874.
- [19] HUANG S, YU X. A study of grinding forces of SiC_p/Al composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9-12): 3633-3639.
- [20] 陈强, 张而耕, 张锁怀. TiAlN, TiAlSiN涂层的制备及其切削性能 [J]. *表面技术*, 2017, 46(01): 118-124.
- [21] CHEN Q, ZHANG E G, ZHANG S H. Preparation and cutting properties of TiAlN and TiAlSiN coatings [J]. *Surface Technology*, 2017, 46(01): 118-124.
- [22] PARK I W, CHOI S R, SUH J H, et al. Deposition and mechanical evaluation of superhard TiAlSiN nanocomposite films by a hybrid coating system [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 447(Jan): 443-448.
- [23] 李矿, 熊峻江, 马少俊, 等. 航空铝合金系列材料裂纹扩展性能的温度效应 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(04): 761-768.
- [24] LI K, XIONG J J, MA S J, et al. Temperature effect on crack propagation properties of aerospace aluminum alloy series materials [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(04): 761-768.
- [25] KUMAR K V B S K, CHOUDHURY S K. Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 203(1-3): 95-101.