高技术通讯 2023 年 第33 卷 第8 期:872-882

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2023.08.009

冷风静电微量润滑换热特性及其钛合金铣削加工性能研究①

吴锡转②　刘福财　张若冲　胡晓冬　姚伟强　许雪峰③

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室　杭州 310023)

摘　要　针对钛合金铣削温度高、刀具寿命短的问题,提出并开展了基于冷风静电微量润滑(CAEMQL)技术的钛合金加工新方法研究。在构建冷风静电微量润滑系统的基础上,研究了冷风荷电气雾的换热特性和钛合金铣削性能,通过刀具磨损揭示了刀具延寿机理。结果表明,与微量润滑、静电微量润滑和冷风微量润滑相比,冷风静电微量润滑具有更高的临界热流密度和更好的稳态换热性能;与微量润滑相比,冷风静电微量润滑下的切向铣削力 F_x 下降了 21%,法向铣削力 F_z 下降了 17%,铣削温度下降 33%,工件表面粗糙度 Ra 值减少 26%;冷风静电微量润滑下切屑自由面的褶皱高度降低,切屑背面划痕减少;低温压缩空气和荷电切削液协同作用抑制了刀具的粘着磨损,刀具寿命提高 41%。

关键词　冷风静电微量润滑(CAEMQL); 钛合金; 换热特性; 铣削性能; 切屑形貌; 刀具磨损

0　引　言

钛合金具有比强度高、耐蚀性好、耐热性高等特点,被广泛应用于航空航天、医疗、军工等领域。然而,钛合金导热系数和弹性模量小,加工过程中易出现切削温度高和刀具粘附磨损严重[1]等问题,影响其加工性能。目前,钛合金切削加工大都采用浇注润滑,但大量使用切削液易引起环境污染,危害作业人员健康。研究人员尝试采用微量润滑(minimum quantity lubrication, MQL)技术进行钛合金加工[2]。MQL 技术对易加工材料具有减少切削液用量,降低切削力和延长刀具寿命[3-4]等优点,但加工钛合金等难加工材料时,存在冷却性能不足、润滑失效[5]等问题。针对 MQL 的技术缺点,国内外研究人员提出了一些微量润滑增效技术,如低温微量润滑(cryogenic minimum quantity lubrication, CMQL)、冷风微量润滑(cold air with minimum quantity lubrication, CAMQL)和静电微量润滑(electrostatic minimum quantity lubrication, EMQL)等。

CMQL 技术[6]利用液氮、液态 CO_2 等冷却介质结合 MQL,对切削区进行冷却润滑。苏宇等人[7]使用 CMQL 进行钛合金 TC4(Ti-6Al-4V)铣削,发现 CMQL 提高了润滑液的强迫对流换热能力,降低了铣削温度与铣削力,刀具的热裂破损减弱。然而,液氮使用成本高,液氮 MQL 过低的温度还会导致钛合金的加工硬化,造成切削力增大和刀具过度磨损[8]。CAMQL 技术[9]通过涡流管、半导体等制冷方式冷却压缩空气,增强切削区的降温能力。李吉林[10]利用 CAMQL 技术进行 TC4 钛合金车削,发现冷风增强了润滑膜的承载能力,抑制了积屑瘤和鳞刺的形成,使工件表面质量提高。对比 CMQL, CAMQL 使用成本下降,但设备制冷效率较低,冷却润滑综合能力有待进一步提高。

结合静电喷雾技术和微量润滑技术而提出的 EMQL 技术,通过对润滑液接触荷电,产生的荷电气雾喷向切削加工区,润滑冷却刀/屑接触界面[11]。Xu 等人[12]考察了 EMQL 铣削 304 不锈钢时的加工性能,发现 EMQL 技术促进了吸附膜和氧化层的形

①　国家自然科学基金(51775507),国家重点研发计划(2020YFB2010604,2020YFB2010605)资助项目。
②　男,1997 年生,硕士生;研究方向:精密与特种加工;E-mail: WuXiZhuan163@163.com。
③　通讯作者,E-mail: xuxuefeng@zjut.edu.cn。
(收稿日期:2021-12-17)

成,减少了刀具与工件的摩擦以及工件材料在刀具表面的粘附,改善了工件表面质量和刀具磨损。尽管 EMQL 的冷却换热性能有一定程度的提高[13],课题组的前期研究和实践表明,EMQL 的冷却能力仍不能很好应对钛合金等难加工材料加工过程中产生的高温问题。

基于以上研究现状和存在的问题,本文提出一种冷风静电微量润滑(cold air with electrostatic minimum quantity lubrication, CAEMQL)技术,结合 CAMQL 的冷却增强性能和 EMQL 的润滑增强性能,通过对 CAEMQL 技术的换热特性和加工性能的分析研究,考察这种新工艺对钛合金 TC4 铣削加工的可行性。

1 实验方法

1.1 冷风静电微量润滑系统

冷风静电微量润滑系统原理图如图 1 所示,系统由调压阀、涡流管、储液箱、蠕动泵、静电发生器、荷电座和喷嘴等组成。静电微量润滑装置为自研设备,蠕动泵将储液箱内的润滑液输送进入润滑液管路,静电发生器输出的高压负电使液管中的润滑液接触荷电。涡流管将常温压缩空气通过涡流变换分离成冷、热两股压缩空气,冷压缩空气进入荷电座,并在喷嘴出口将润滑液雾化成低温荷电气雾。涡流管型号为 AH20025(美国埃泰克公司),在室温 20 ℃、入口气压 0.6 MPa 工况下,冷端出口能产生温度为 -5 ℃、气压为 0.2 MPa 的冷风作为冷却介质。

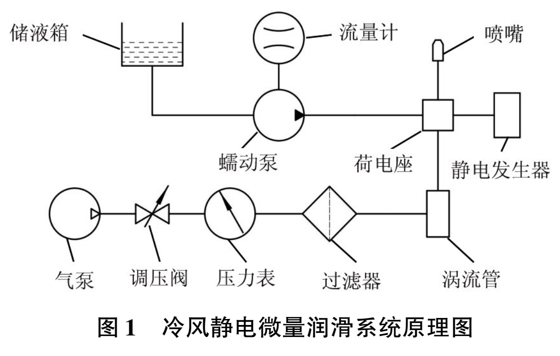


图 1 冷风静电微量润滑系统原理图

1.2 冷风静电微量润滑换热实验

1.2.1 瞬态换热实验

瞬态换热实验可揭示冷风静电微量润滑喷雾冲击高温壁面时的瞬时换热特性,图 2 为瞬态换热实验装置原理图。实验时,启动电炉电源,电炉中设置的 K 型热电偶将采集到的温度反馈至 ST507 系列智能温控仪(温州上通仪表有限公司),温控仪根据输入温度信号向固态继电器输出控制信号,控制电炉电源的通断,实现炉温的恒温控制。启动冷风静电微量润滑系统,调整好各项参数(荷电电压、气压、润滑液流量、喷嘴距离等),待喷雾稳定后,快速抽走覆盖在紫铜试件上的挡板,低温荷电气雾直接喷射到紫铜试件上表面,RX4006D 测温仪(杭州美控自动化技术有限公司)通过焊在紫铜试件上表面的热电偶实时采集温度,即可获得换热表面温度变化曲线。换热表面的临界热流密度可通过一维导热的数值解析方法获得。

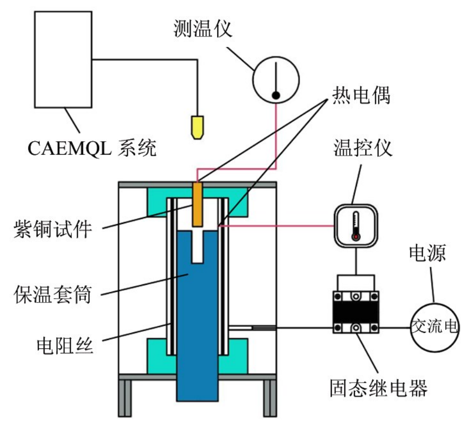


图 2 瞬态换热实验装置原理图

1.2.2 稳态换热实验

稳态换热实验可用来研究冷风静电微量润滑喷雾冲击加工区域时的换热特性。图 3 为稳态换热实验装置原理图。使用低电压、大电流交流电对镍铬合金片试件(10 mm × 3 mm × 0.2 mm)持续加热,模拟铣削加工热源。镍铬合金片试件底部焊有 K 型热电偶,并与 RX4006D 测温仪连接,实时采集温度。实验时,首先启动冷风静电微量润滑系统,待其喷雾稳定后,逐渐增大电加热装置的输入电压,当测温仪测得换热表面温度达到动态平衡时,记录试件表面温度 T_w,并利用数字万用表和电流表记录试件两端电压值 U 和电流值 I。由 $q = UI/A$ 计算获得试件表面热流密度,其中 $A = 0.3\ mm^2$ 为试件表面积。试件表面的换热系数可由 $h = q/(T_w - T_f)$ 计算得到,

其中 T_f 为喷雾温度。瞬态换热实验及稳态换热实验时，冷风静电微量润滑系统的各项参数依据前期实验优化选取，实验条件如表1所示。

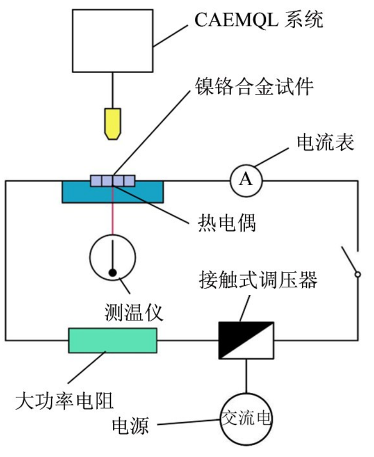


图3 稳态换热实验装置原理图

表1 换热实验喷雾参数

实验变量	参数
压缩空气压强/MPa	0.2
压缩空气温度/℃	-5、20
荷电电压/kV	0、-6
润滑液流量/(mL/h)	20
喷嘴距离/mm	20

1.3 冷风静电微量润滑铣削加工实验

在VDF-850型立式数控铣床上进行铣削加工实验研究，图4所示为铣削加工实验装置实物图。工件材料为钛合金TC4，工件尺寸100 mm × 75 mm × 70 mm。实验前，工件表面预先切除1 mm厚度以保证工件加工表面性能一致。刀具采用APMT1604PDER-H08硬质合金涂层刀片（日本住友

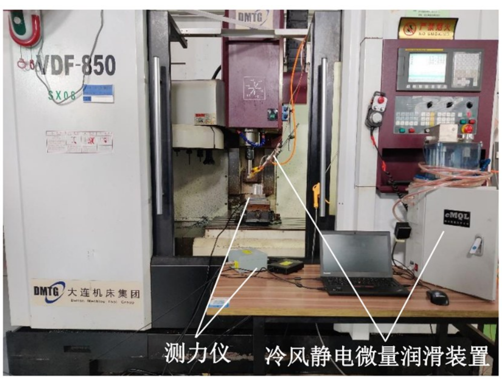


图4 铣削加工实验装置实物图

公司），刀柄为TAP400R-C32-35-200-3T三齿刀柄，直径为35 mm，每组实验均换用新刀片进行测试。润滑液为水基切削液QC-3801（清华大学天津高端装备研究所），以10%体积分数兑水稀释后用于实验。实验条件如表2所示。

表2 铣削加工实验参数

实验内容	条件
铣削参数	铣削速度：100 m/min 进给速度：0.1 mm/z 轴向切深：1 mm 径向切深：5 mm
喷雾参数	压缩空气压强：0.2 MPa 压缩空气温度：-5、20 ℃ 荷电电压：0、-6 kV 润滑液流量：20 mL/h 喷嘴距离：20 mm

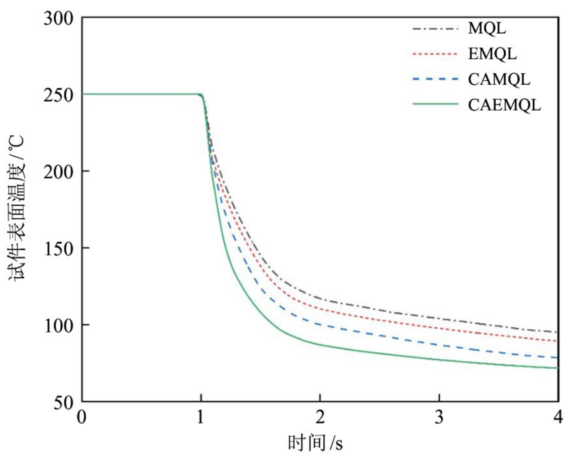
采用FC3D120型三向测力仪（上海耐创测试技术有限公司）测量各冷却润滑条件下的铣削力。采用FOTRIC 226型手持在线热像仪（德国飞础科公司）采集加工过程中铣削区的温度。该方法属于间接测量方法，虽然不能获得铣削区的真实温度，但可用于对比不同工况下的铣削温度。使用SJ-210型便携式粗糙度测量仪（日本三丰公司）测量加工工件表面的 Ra 值，测量过程中沿着铣削方向等距选取10个测量点并计算平均值作为最终数据。采用VW-6000光学显微镜（日本基恩士公司）观测不同工况下的刀具后刀面磨损量，以刀具后刀面磨损量 V_B 值达到300 μm作为磨钝标准。采用VHX-6000超景深三维显微系统（日本基恩士公司）观察切屑表面形貌。利用EVO18扫描电子显微镜（SEM，德国卡尔蔡司公司）分析刀具磨损表面形貌。

2 结果与讨论

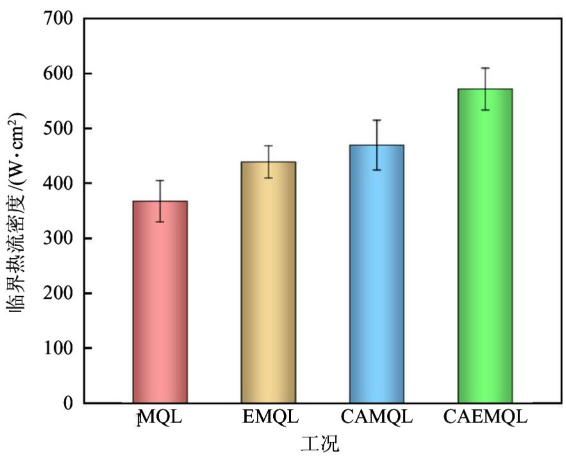
2.1 冷风静电微量润滑的换热特性

图5为不同工况下在气雾喷射到紫铜试件表面时试件表面温度变化曲线及其对应的临界热流密度。可以看到，CAEMQL工况下，试件表面温度下降最快，其临界热流密度相比MQL、EMQL及CAMQL

分别提高了 55.56%、30.23% 及 21.74%。低温冷气增大了紫铜试件表面与空气之间的平均温差,冷风和低温液滴接触到高温表面时,迅速带走大量热量;同时,荷电可减小液滴的粒径与接触角,增加了液滴与试件表面的接触面积,提高了液滴的换热效率,因此冷风静电微量润滑的瞬态换热能力更强。



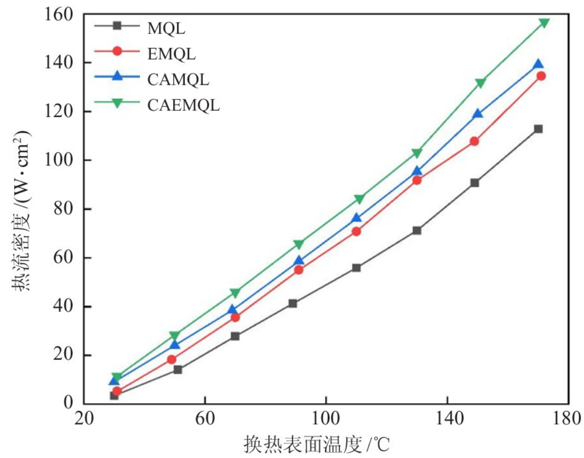
(a) 试件表面温度变化曲线



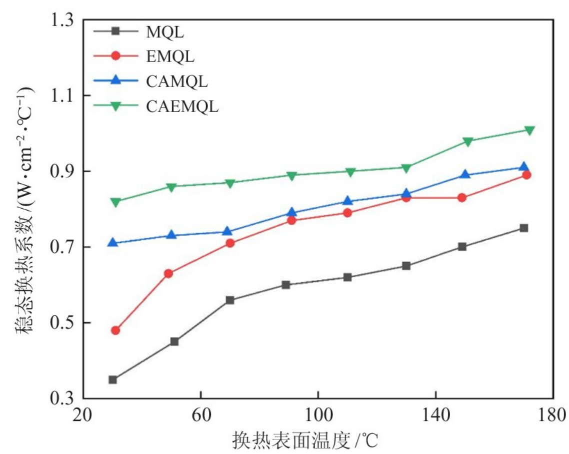
(b) 临界热流密度

图 5　不同工况下气雾的瞬态换热特性

图 6 给出了不同工况下气雾的稳态换热特性。可以看出,CAEMQL 表现出最好的稳态换热能力。在换热表面温度为 170 ℃时,CAEMQL 工况下的表面热流密度分别比 MQL、EMQL 和 CAMQL 提高了 38.82%、16.42% 和 12.50%,稳态换热系数分别提高了 34.67%、13.48% 和 10.99%。当换热表面温度较低时,热量仅能通过液膜传导并从液膜表面蒸发散热;随着试件表面温度上升,液膜产生气泡,换热形式从强迫对流蒸发过渡到核态沸腾,气泡的生成与破裂带走大量热量[14]。EMQL 工况下,液滴荷电后表现出较小的粒径与润湿角,使得液滴更易在试件表面铺展,减少液膜厚度,接触热阻降低,液滴换热效率提高。CAMQL 条件下,冷风冲击换热表面,以及低温液膜蒸发,换热系数显著提高。结合了冷风和荷电双重增效的 CAEMQL,冷风增大了与镍铬合金片的温差,小粒径液滴接触到高温表面时更易汽化,换热能力大幅增强,因此其稳态换热性能更好。



(a) 热流密度



(b) 稳态换热系数

图 6　不同工况下气雾的稳态换热特性

2.2　冷风静电微量润滑的铣削加工性能

图 7(a)和(b)示出了不同冷却润滑工况下的 TC4 钛合金的切向铣削力 F_x 和法向铣削力 F_z 变化情况。可见,荷电及低温冷风均可降低铣削力,效果最好的 CAEMQL 对比 MQL、EMQL 及 CAMQL,其 F_x 分别下降了 20.56%、15.14% 及 6.24%, F_z 分别下

降了16.85%、4.92%及7.16%。在荷电工况下,液滴在刀/屑和刀/工件接触区具有较好的渗透性能,有利于形成承载能力更强的润滑膜,获得良好的减摩抗磨效果,降低铣削力。在冷风工况下,低温冷却效应尽管一定程度上提高了工件材料的硬度,但同时降低了工件材料的塑性和韧性,减少工件材料在刀具表面的粘附,有利于降低刀具与工件、切屑的摩擦力,两者的综合影响在实验工况下表现出铣削力的降低。结合EMQL与CAMQL优点的CAEMQL在冷风的冷却和荷电液滴的润滑下,进一步减轻了刀具与工件之间的摩擦与粘附,表现出更小的铣削力。

图7(c)所示为不同冷却润滑工况下的铣削温度变化情况。可以看出,CAEMQL工况下的铣削温度最低,对比MQL、EMQL及CAMQL分别下降了32.66%、27.04%及4.27%。由换热实验可知,CAEMQL具有较高的热流密度及换热系数,换热性能较好。荷电液滴具有较小的粒径和接触角,在铣削过程中更多的液滴渗透进入切削区参与润滑,改善了刀具与工件之间的摩擦状况,减少了摩擦热的产生;冷风则提高了气雾的对流换热能力,抑制了铣削区的温升,因此CAEMQL工况下的铣削温度最低。

图7(d)所示为不同冷却润滑工况下的工件表面粗糙度 Ra 值变化情况。可以发现,CAEMQL工况下的工件表面光洁程度优于其他工况,Ra 值分别比MQL、EMQL和CAMQL减少了26.47%、17.81%和8.91%。在MQL工况下,较高的铣削温度导致工件材料较强的热软化效应,工件材料的塑性应变及刀具的粘着磨损加剧,较大的铣削力也会使工件表面产生较深的划痕,对工件表面质量产生不利影响。

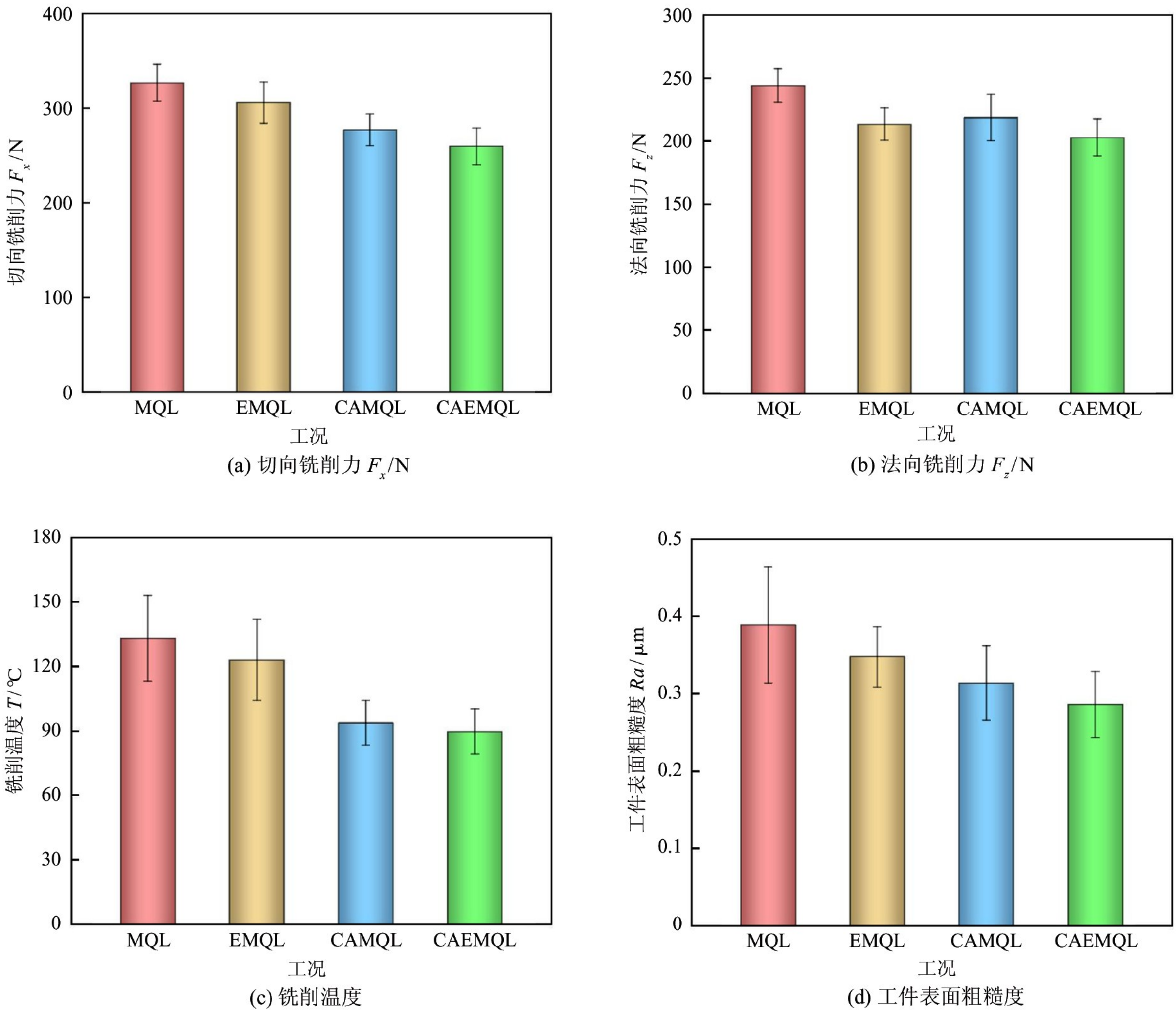


图7 不同工况下的铣削加工性能

EMQL 工况下,荷电液滴的润滑增效能力减少了刀具与工件的划擦,提高了工件表面质量。CAMQL 的低温气体具有良好的冷却效果,使刀具与工件之间的粘附减少,降低了铣削力;同时工件材料的脆性增加,切屑断裂性更好,防止了切屑对已加工工件表面的损伤。CAEMQL 兼具 EMQL 和 CAMQL 的优点,荷电液滴持续渗透进入切/屑界面毛细网络,低温冷气则降低刀具与工件之间的化学反应性,防止切屑粘附,两者协同作用,有效提高了工件表面质量。

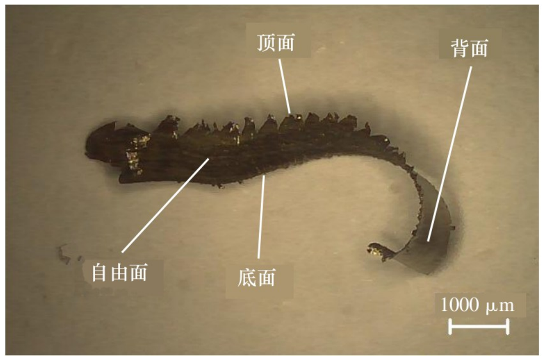
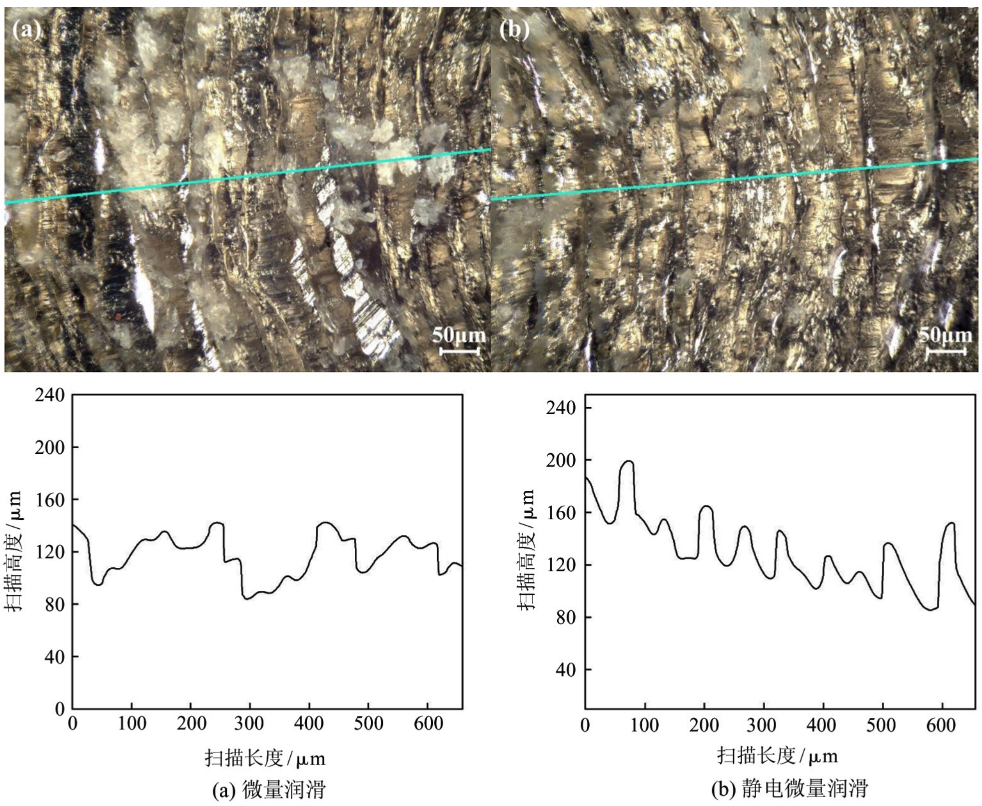


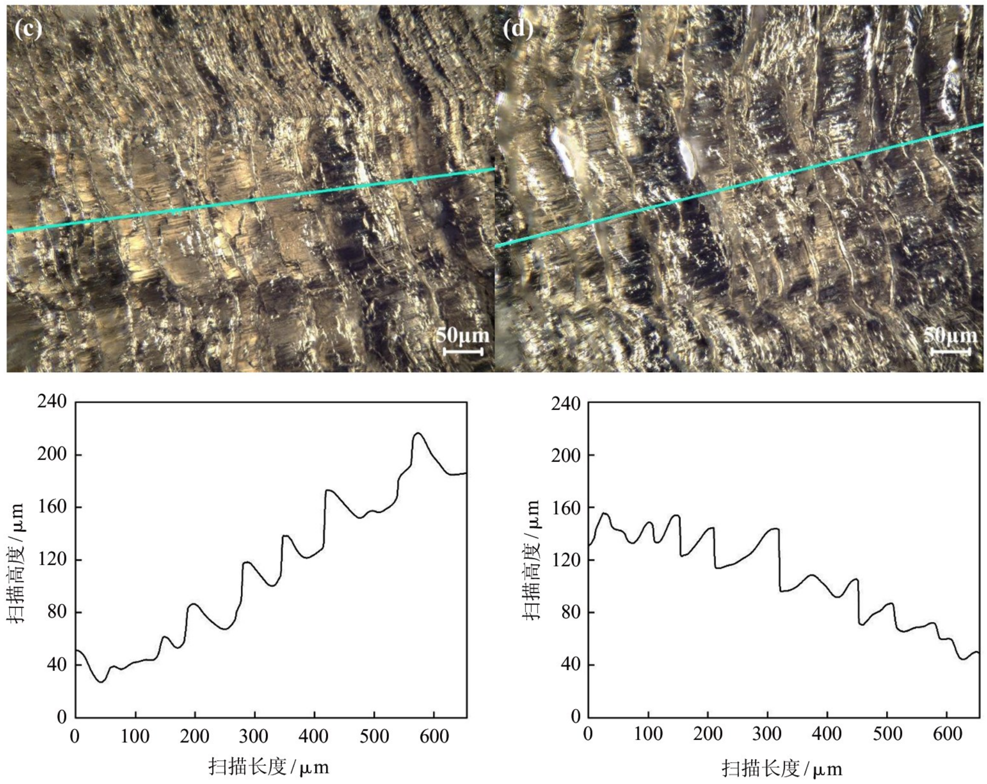
图 8　切屑的实物图

2.3　切屑形貌分析

切屑的形成是在铣削过程中切削载荷、材料断裂与变形共同导致的结果。切屑由自由面、背面(与刀具前刀面接触)、顶面以及底面组成[15]。切屑实物图如图 8 所示,本文主要对切屑自由面及背面形貌特征进行分析。

图 9 所示为不同冷却润滑工况下切屑自由面形貌及其法向表面轮廓线图。可见,各工况下切屑自由面均存在大量连续褶皱结构,以褶皱的顶高减去褶皱的根高作为褶皱的高度,其平均高度如图 10 所示。CAEMQL工况下褶皱的平均高度比MQL、EMQL 和 CAMQL 分别减少了 27.55%、18.03% 和 4.04%。褶皱是铣削过程中刀具与切屑挤压引起的塑性变形导致,MQL 工况下较高铣削温度带来的热软化效应导致材料韧性提高,在较大铣削力作用下,切屑材料周期性塑性堆积,褶皱高且清晰。在 EMQL 和 CAMQL 工况下,褶皱高度有所减少,这是由于荷电液滴良好的润滑性能有助于减少刀具、工件与切屑之间的摩擦,降低了铣削力,切屑形成过程的塑性堆积缓解;低温冷却效应则降低了材料的塑性与韧性,一定程度提高了切屑的硬度,切屑形变减





(c) 冷风微量润滑　　(d) 冷风静电微量润滑

图 9　不同工况下切屑的自由面形貌及其表面轮廓

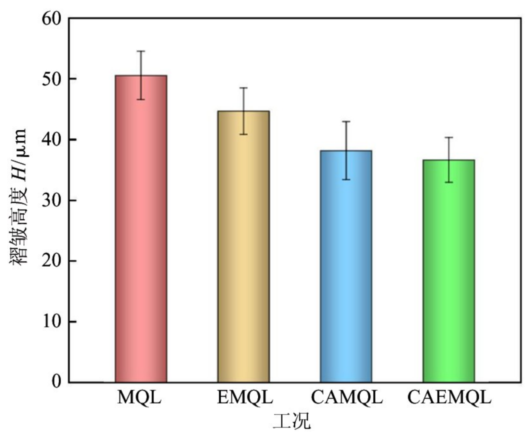


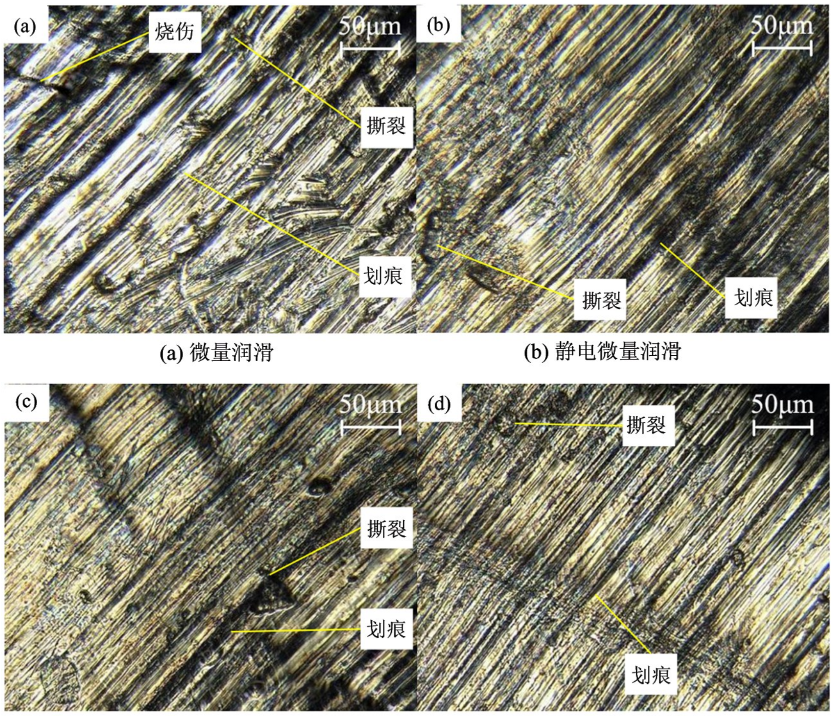
图 10　不同工况下切屑的褶皱高度

小。结合 EMQL 和 CAMQL 技术的 CAEMQL 工况，冷风和荷电润滑液的协同作用有效缓解切屑形成过程的塑性堆积，切屑褶皱起伏小。

图 11 所示为不同冷却润滑工况下的切屑背面形貌。可以看出，各工况下的切屑背面均有明显划痕。背面为切屑与刀具的前刀面接触面，其划痕是摩擦力和接触压力的作用结果[16]。在 MQL 工况下，较大的铣削力导致切屑背面较深的划痕，并呈现刀屑摩擦导致的撕裂痕迹，较高的铣削温度导致蓝紫色的高温烧伤痕迹，反映出其较差的铣削性能。在 EMQL 工况下，得益于荷电液滴较强的渗透润滑能力，刀具与切屑之间的摩擦作用减弱，划痕形变有所缓和。CAMQL 工况下，冷风降低了切削区的温度，切屑硬度提高，与刀具的粘着减少，表现出划痕变浅和撕裂痕迹变小的特点。CAEMQL 在 CAMQL 的基础上对液滴进行了荷电，在冷却和润滑增效作用下，划痕更浅，撕裂痕迹更少，说明冷风和切削液荷电的协同作用有效改善了切削区的摩擦情况，提高了铣削性能。

2.4　刀具磨损机理分析

图 12 为不同工况下刀具后刀面磨损量随铣削长度增加的变化进程，图 13 给出了不同铣削长度及 V_B 值达到 300 μm 时的刀具后刀面磨损面光学显微照片。从图 12 可以看出，CAEMQL 工况的刀具寿命最长，其有效铣削长度分别比 MQL、EMQL 和 CAMQL 增加了 41.18%、14.29% 和 26.32%。冷风静电条件下铣削力、铣削温度最小，对保护刀具起到重要作用。从图13可以看出，在铣削长度1000 mm



(a) 微量润滑　(b) 静电微量润滑

(c) 冷风微量润滑　(d) 冷风静电微量润滑

图 11　不同工况下切屑的背面形貌

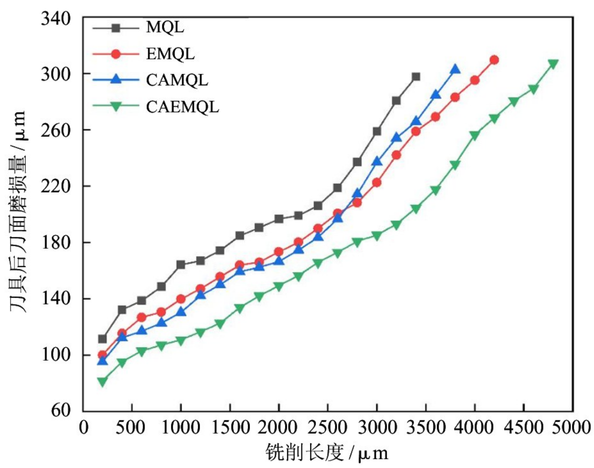


图 12　不同工况下刀具后刀面磨损量随铣削长度的变化进程

时,各工况下的切削刃上均出现不同程度的工件材料粘附,表明刀具的磨损机制以粘着磨损为主。在铣削长度达到 2000 mm 时,MQL 及 EMQL 就已出现切削刃钝化现象,刀具后刀面磨损开始加快,进入快速磨损阶段。此时 CAMQL 刀具后刀面磨损量小于 MQL 和 EMQL,说明冷风降低了铣削温度,能有效保持刀具的强度,明显减少与铣削温度密切相关的粘着磨损。从图 12 中还可看出,在铣削长度达到 2800 mm时,EMQL 的刀具磨损量反而小于 CAMQL,说明刀具进入快速磨损阶段后,EMQL 较强的润滑促进特性缓解了磨损面的扩展,在铣削长度 3000 mm 时, EMQL 工况的刀具磨损量已低于 CAMQL,如图 13 所示。CAEMQL 则充分发挥了 EMQL 润滑效果好与 CAMQL 冷却效果佳的协同作用,刀具的使用寿命有效提高。

不同冷却润滑工况下在铣削长度为 2000 mm 时刀具后刀面的 SEM 图如图 14 所示。从图 14(a)可见,MQL 工况下刀具切削刃出现了微裂纹及微崩刃。这是因为 MQL 工况下铣削力和铣削温度较高,随着刀齿的切入和切出,刀具承受着交替变化的热应力和接触应力,易引起应力疲劳[17],伴随切削刃裂纹产生和扩展,最终导致刀具局部崩刃,影响了刀具寿命。由图 14(b)可见,EMQL 工况下没有观察到裂纹及崩刃,但在后刀面上较早地形成了月牙洼形的磨损形貌。这是因为涂层材料与刀具基体之间的线膨胀系数不同,在加工过程中由温度变化导致的形变量不同,致使涂层表面存在残余应力,易引起涂层剥落。刀具涂层脱落后,刀具基体与工件直接摩擦并粘附,伴随粘附层的剥落刀具材料被带走,导致刀具后刀面上形成凹坑即月牙洼磨损。CAMQL

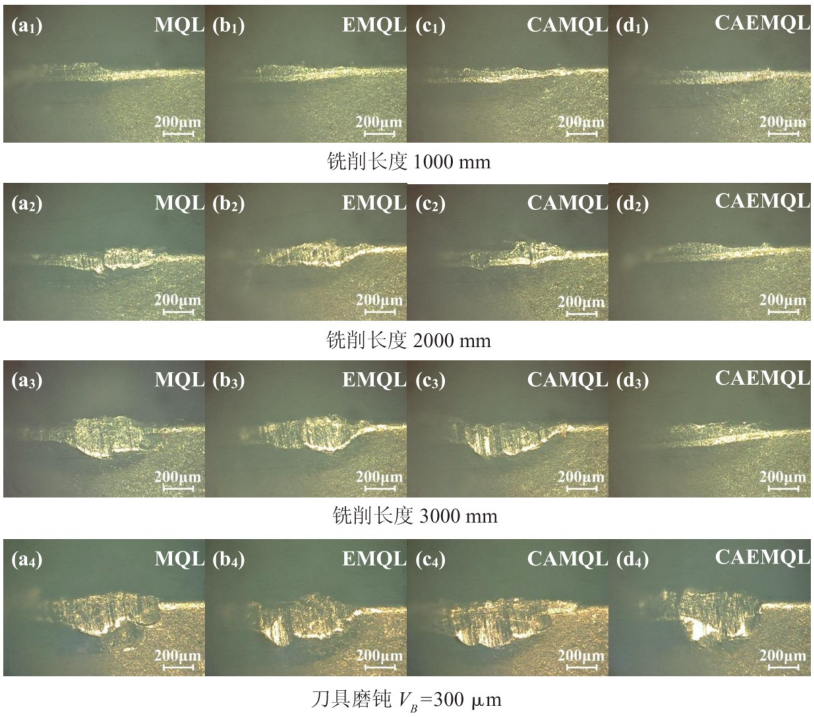


图 13　不同工况下刀具后刀面磨损面变化进程的光学显微照片

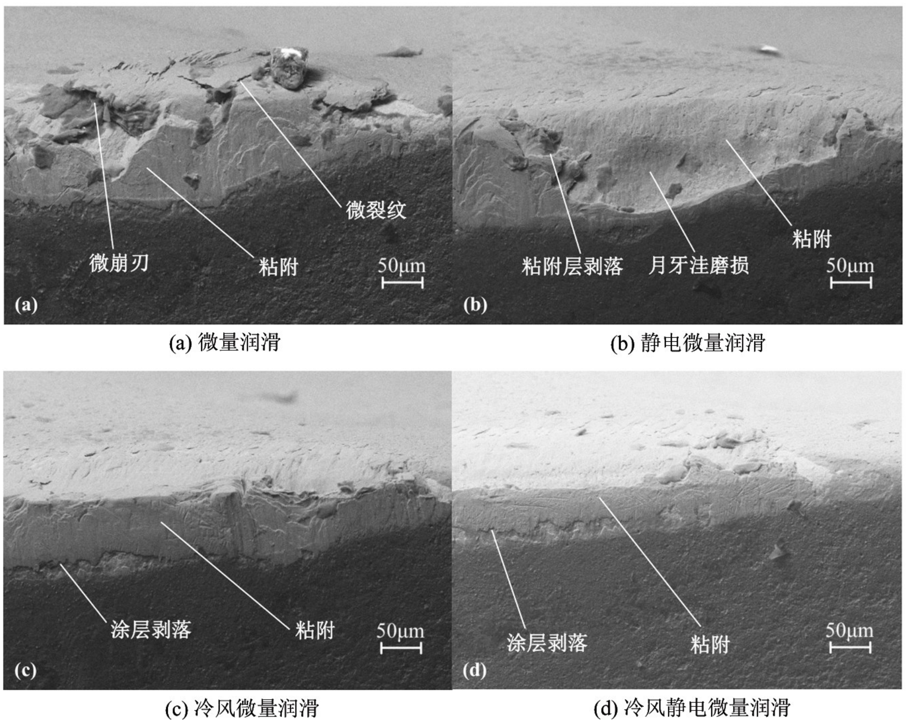


图 14　不同工况下刀具后刀面 SEM 图

工况下的刀具表面形貌如图 14(c)所示,可观察到刀具存在较窄的工件材料粘附层和少量涂层剥落,这是由于冷气降低了铣削温度,减轻了刀具及工件材料的热软化及粘附。图 14(d)为 CAEMQL 工况下的刀具表面磨损形貌,相比 CAMQL,其切削刃表面更为光滑、粘附层更少,说明在荷电液滴的润滑下,刀具与工件之间摩擦力减小,磨损更加均匀;同时,冷风减少了切削区的温度变化,刀具表面热应力

降低,并且冷风增加了润滑液的粘度,增强了润滑膜的承载能力,协同增强效应使 CAEMQL 工况的刀具磨损量最小,寿命更长。

3 结 论

本文采用冷风静电微量润滑技术进行换热实验及钛合金 TC4 铣削实验,得出如下结论。

(1)低温冷风增大了与换热试件间的温差,对流换热能力提高;切削液荷电后液滴粒径和接触角减小,与换热试件的接触面积提高,蒸发换热效率增强,导致冷风荷电气雾的临界热流密度和稳态换热系数提高,换热性能增强。

(2)冷风静电微量润滑铣削钛合金 TC4 时,冷风介质的低温冷却效应有利于材料由塑性向脆性转变,荷电切削液的润滑增强效应降低了刀/屑间的摩擦,两者协同导致切屑自由面的塑性变形减小,周期性褶皱高度降低;切屑背面划痕浅,撕裂减弱。

(3)钛合金 TC4 铣削过程中,冷风静电微量润滑工况下的铣削力、铣削温度和工件表面粗糙度 Ra 值相比微量润滑分别下降了 33.75%、32.66% 和 26.47%;冷风静电微量润滑可有效减轻刀具的粘着磨损,延长刀具寿命。

参考文献

[1] 郭鲤, 何伟霞, 周鹏, 等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. 热加工工艺, 2020,49(22):22-28.

[2] DEIAB I, RAZA S W, PERVAIZ S. Analysis of lubrication strategies for sustainable machining during turning of titanium Ti-6Al-4V alloy [J]. Procedia CIRP, 2014(17):766-771.

[3] NIKETH S, SAMUEL G L. Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018(32):254-268.

[4] HADAD M, SADEGHI B. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012(63):1-15.

[5] RAHIM E A, SASAHARA H. A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys[J]. Tribology International, 2011(44):309-317.

[6] 袁松梅, 韩文亮, 朱光远, 等. 绿色切削微量润滑增效技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019,55(5):175-185.

[7] 苏宇, 何宁, 李亮, 等. 低温氮气射流对钛合金高速铣削加工性能的影响[J]. 中国机械工程, 2006,17(11):1183-1187.

[8] PARK K H, SUHAIMI M A, YANG G D, et al. Milling of titanium alloy with cryogenic cooling and minimum quantity lubrication (MQL) [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017,18(1):5-14.

[9] 卢家峰. 低温冷风微量润滑切削技术发展及应用[J]. 模具制造, 2019(9):70-73.

[10] 李吉林. 低温冷风微量润滑技术在钛合金车削加工中的应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2014:30-44.

[11] 吕涛, 黄水泉, 胡晓冬, 等. 静电微量润滑气雾特性及其切削加工性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1):129-138.

[12] XU X F, HUANG S Q, WANG M H, et al. A study on process parameters in end milling of AISI-304 stainless steel under electrostatic minimum quantity lubrication conditions[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(90):979-989.

[13] 王争. 静电微量润滑喷雾换热特性及其对切削温度的影响[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016:43-52.

[14] 王亚青, 刘明侯, 刘东, 等. 喷雾冷却换热机理和影响换热性能的因素[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(9):2277-2281.

[15] 高延峰, 刘彬彬, 胡翱. BTi-6431S 高温钛合金铣削加工切屑的微观形貌研究[J]. 机械设计与制造, 2016(1):126-129.

[16] 王兵. 高速切削材料变形及断裂行为对切屑形成的影响机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2016:23-33.

[17] 王其琛, 明伟伟, 安庆龙, 等. 铣削高强度钛合金 TC18 的刀具磨损机理[J]. 上海交通大学学报, 2011,45(1):19-24.

Research on heat transfer characteristics of cold air with electrostatic minimum quantity lubrication and its milling performance of titanium alloy

WU Xizhuan, LIU Fucai, ZHANG Ruochong, HU Xiaodong, YAO Weiqiang, XU Xuefeng
(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

In order to solve the problems of high milling temperature and short tool life of titanium alloy, a new machining method of titanium alloy based on cold air with electrostatic minimum quantity lubrication (CAEMQL) technology is proposed and carried out. Based on the development of the cold air with electrostatic minimum quantity lubrication system, the heat transfer characteristics and milling performance of titanium alloy of cold air with charged droplet are studied, and the mechanism of tool life extension is revealed by tool wear. The results show that cold air with electrostatic minimum quantity lubrication has higher critical heat flux and better steady-state heat transfer performance than minimum quantity lubrication, electrostatic minimum quantity lubrication and cold air minimum quantity lubrication. Compared with minimum quantity lubrication, the tangential milling force F_x, normal milling force F_z, milling temperature and Ra value of work piece surface roughness under cold air with electrostatic minimum quantity lubrication are decreased by 21%, 17%, 33% and 26%. When cold air with electrostatic minimum quantity lubrication is applied, the wrinkle height on the free surface and the scratch on the back of the chip could be reduced. The synergistic effect of cryogenic compressed air and charged cutting fluid inhibits the tool adhesion wear, and increases the tool life by 41%.

Key words: cold air with electrostatic minimum quantity lubrication (CAEMQL), titanium alloy, heat transfer characteristics, milling performance, chip morphology, tool wear