

铝基复合材料的高速切削

High Speed Machining of SiCp/Al Composites

南京航空航天大学机电学院 宦海祥 葛英飞 傅玉灿 徐九华



宦海祥

讲师, 博士研究生, 主要从事难加工材料高性能切削研究。参与国家863计划课题1项, 主持江苏省普通高校研究生科研创新计划项目1项。

金属基复合材料(Metal Matrix Composites, MMC)具有比强度和比模量高、耐高温、耐磨损、热膨胀系数小等优异的综合性能, 采用金属基复合材料代替钢、铝合金或钛合金材料, 可显著起到减重、增速、提高燃油效率、减少废气排放、降低制造维护成本和改善零部件结构工艺性的作用, 近年来在航空发动机涡轮叶片、飞机机翼、起落架、导弹尾翼和壳体、惯导平台、电子封装、汽车零部件等

针对铝基复合材料高速切削方面的研究主要集中在刀具选择、切屑形貌、刀具磨损、表面完整性、切削力和切削温度等方面。众多的研究表明, 用PCD刀具高速切削铝基复合材料时, 能获得较好的表面质量, 较高的刀具寿命和较小的切削力、切削温度。

方面的应用需求十分迫切^[1-2]。

铝基复合材料属于典型的金属基复合材料, 主要分为连续纤维增强铝基复合材料和颗粒增强铝金属基复合材料。近年来, 颗粒增强铝基复合材料解决了连续纤维增强金属基复合材料制备过程复杂、工艺不成熟、成本过高等问题, 生产成本大大降低, 国际上已逐步将注意力转移到颗粒增强铝基复合材料的研究上, 各国对其需求量逐渐增大。

虽然颗粒增强铝基复合材料的综合性能优越, 但其低塑性、在微观上的不均匀性以及超硬陶瓷增强相的加入使其难于切削加工。为了最大限度地减少铝基复合材料切削加工余量, 研究人员试图通过近净成型的方法制造铝基复合材料零件, 但在较多情况下还是无法满足零件要求, 所以有必要对金属基复合材料开展系统的切削加工性研究。自1985年

Burn等^[3]发表第1篇有关铝基复合材料切削加工的论文开始, 至今已有近30年的时间, 期间国内外学者对颗粒增强铝基复合材料的切削开展了大量试验研究。铝基复合材料在切削加工中主要存在刀具耐用度短、表面质量差、生产效率低、加工成本高等问题^[4-5], 如何开展高效率、低成本的高速切削成为关注的研究热点。

刀具材料的选择及其适应性

在颗粒增强铝基复合材料的切削加工中, 由于增强相的硬度通常比高速钢高, 甚至比硬质合金及一些陶瓷涂层刀具高, 所以这些刀具在切削该材料时刀具磨损率极高。国内外学者使用各种材料刀具对颗粒增强铝基复合材料进行了大量的切削试验研究, 结果表明, PCD刀具由于其高的硬度、耐磨性和低化学亲和性等点已经成为切削铝基复合材料首

选的刀具材料^[5-12]。硬质合金刀具在切削铝基复合材料过程中其刀具磨损率较高,如在较高的切削速度($v>350\text{m/min}$)下切削铝基复合材料时,硬质合金刀具在几十秒内即宣告失效^[13-14],一般认为,该类刀具切削铝基复合材料时的切削速度应该限制在 300m/min 以内^[15-22]。Xu等^[23]选用细晶粒硬质合金、陶瓷、CBN和PCD4种切削性能优良的刀具对2种典型的铝基复合材料的切削加工性进行了研究,发现加工混杂增强铝基复合材料时,PCD刀具的磨损阻力最大,是精加工的理想材料,而加工纤维增强铝基复合材料时,细晶粒硬质合金刀具的磨损率低、工件表面完整性好且加工成本最低;同时给出了加工不同金属基复合材料的最佳刀具材料。Tomac等^[14]利用化学气相沉积的方法制备的TiN、TiCN和 Al_2O_3 涂层刀具进行了切削试验研究,研究表明TiN涂层刀具具有最好的刀具寿命。Manna和Bhattacharya^[15]利用切削过程中形成的稳定积屑瘤来保护刀具以提高硬质合金刀具的寿命。化学气相沉积(CVD)金刚石涂层刀具的后刀面磨损率高于PCD刀具^[6],D Errico等发现增加CVD金刚石刀具的涂层厚度能改善其切削性能,涂层厚 $500\mu\text{m}$ 的CVD金刚石刀具可以与PCD相媲美^[6,24]。与高速钢、TiN涂层、硬质合金刀具相比,CBN和PCD刀具切削颗粒增强铝基复合材料时表现出更好的适应性,CBN在某些条件下可作为PCD的替换刀具使用^[25],但Ibrahim Ciftic^[26]研究表明当切削碳化硅颗粒度为 $110\mu\text{m}$ 的SiCp/Al复合材料时,CBN刀具切削刃和刀尖出现严重破损,此条件下不适宜选用CBN刀具进行切削加工。通常条件下,PCD比PCBN具有更好的耐磨性、更高的断裂强度和更低的黏着性,从而比PCBN刀具表现出更好的切削性能^[12]。

为了改善表面粗糙度和减小亚

表面损伤,在高速切削颗粒增强铝基复合材料的各种刀具材料中,PCD具有比较好的适用性,因而成为首选的刀具材料^[9,12,27-28]。

切削力和切削温度

Xu等^[23]的研究结果表明,4种刀具材料切削铝基复合材料时,切削力都随切削速度的增加而增大。Manna等^[15]使用未涂层硬质合金,在切削速度 $v=20\sim 225\text{m/min}$ 范围内对 vol.15\%SiCp/Al 进行干车削试验,结果表明,主切削力随切削速度的增大而减小(从 220N 变化到 135N),随进给量和切深的增大而增大(从 125N 变化到 170N)。El-Gallab^[5]等研究发现,切削力随切削速度和切深增大而减小,研究认为可能是因为工件材料的软化以及积屑瘤的存在改变了刀具几何角度造成的。Lin等^[9]使用PCD刀具在切削速度分别为 $v=300、500、700\text{m/min}$ 下对SiCp/Al进行了车削试验。结果表明,随着刀具磨损量的增加,主切削力和进给抗力分别在 185N 和 90N 以内;相同切削速度条件下,切削力随着进给量的增加而增加;相同进给量条件下,切削力随着切削速度的增加变化很小。Pramanik等^[29]基于麦钱特模型建立了预测切削铝基复合材料的力学模型,认为切削加工中的力来自切屑变形力、耕犁力、颗粒破碎力3个方面。El-Gallab、Skold^[10]建立了一个实用的三维刀具模型,用于预测切削SiCp/Al时刀具所受应力、温度和磨损;结果表明最高切削温度位于切削刃上并且沿前刀面向里温度逐渐降低,随进给速度增加切削温度降低;由于PCD有更高的导热性,PCD刀具的切削温度低于TiN、 Al_2O_3 刀具。Chou、Liu^[30]用CVD金刚石涂层刀具切削SiCp/Al,测量了不同切削条件下的切削温度,得出切削速度是影响切削温度的主要因素,并用ANSYS进行仿真验证,和试验

结果取得了较好的一致性。边卫亮等^[31]在综合考虑铣削速度、每齿进给量、径向切宽和增强相体分比等因素的基础上建立了PCD刀具高速铣削SiCp/2009Al复合材料切削力预测模型,该模型对铣削力的预测精度较高。

卢接驰等^[32]采用嵌埋人工热电偶的方法对SiCp/Al复合材料进行车削试验,研究了各切削参数对前、后刀面的影响,对比了4种冷却条件(干式切削、压缩空气风冷、油液浇注和MQL)下的切削温度。4种条件下刀具温度由高到低依次为:干切、风冷、油冷、MQL,干切条件下前刀面温度低于后刀面。葛英飞等^[33-34]采用PCD刀具高速铣削SiCp/2009Al复合材料开展了切削力和切削温度的研究,图1^[33]为刀具磨损初期时的动态铣削力,径向力 F_y 的峰值已经超过 1300N ,切削振动较剧烈。研究表明,切削力随着切削速度的增加而减小,切削力随着进给速度的增大或切深的减小而增大;高的增强相体分比和小的增强相尺寸具有较大的切削力;T6热处理可显著增加切削力;使用切削液可大大减小切削力。图2^[34]为高速铣削SiCp/Al典型温度热电势信号曲线,曲线中所有波峰的包络线代表切削弧区(或参与切削的切削刃部分)的瞬时温度变化,选用切削弧区温度(即波峰的包络线)的最高值作为铣削温度,图3^[34]为SiCp/Al-康铜热电偶标定曲线。研究表明,铣削温度可达 580℃ 以上,切削参数、刀具材料、工件材料和刀具磨损状态对切削温度有显著的影响,而刀具几何形状的影响较微小。切削参数对切削温度影响程度由大到小依次是:切削速度、增强颗粒体分比、径向切宽、每齿进给量。随着切削参数、增强颗粒体分比/尺寸,PCD晶粒度和刀具磨损的增加,切削温度显著升高。在切削参数相同的条件下,高速铣削T6热处理的铝基复合材料时,切削温度显著下降。

刀具磨损与刀具耐用度

李丹等^[35]使用 K10 硬质合金铣刀在干式条件下对 Al2024/SiCp 复合材料进行中高速 (1000~1800r/min) 铣削, 试验表明, 加工过程中刀具的失效形式主要为后刀面磨损和崩刃 2 种形式, 增强颗粒尺寸对刀具的失

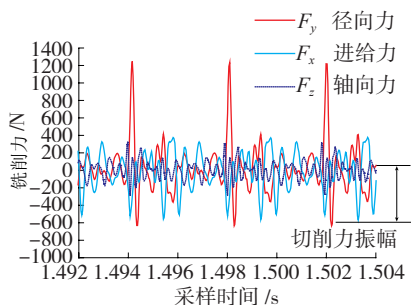
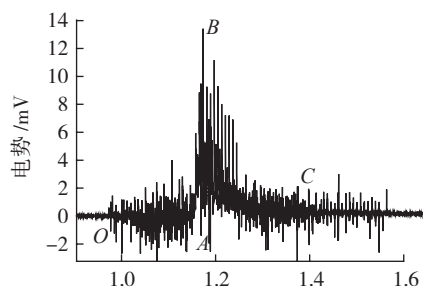
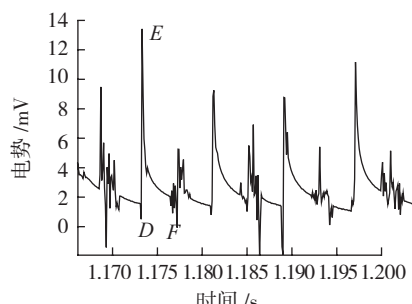


图1 切削力原始信号图



(a) 热电势原始信号



(b) 原始信号局部放大

图2 高速铣削SiCp/Al典型温度信号曲线

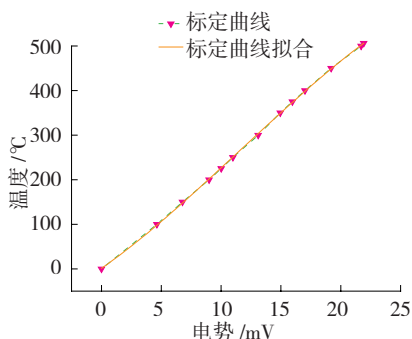


图3 SiCp/Al-康铜热电偶标定曲线及其拟合

效形式有重要影响。

葛英飞等^[36-37]使用 PCD 刀具对 SiCp/Al 复合材料进行了高速铣削, 结果表明增强颗粒碳化硅的高频刻划和冲击是导致磨粒磨损(图 4 (a))、刀具晶粒脱落(图 4 (b))、崩刃(图 4 (c))、剥落(图 4 (d))的主要机制。PCD 刀具基体微裂纹(图 4 (e))的产生是由于切削高体积分数工件材料, 经热处理复合材料或使用很高的切削速度时增强颗粒冲击、切削振动和热冲击的综合作用。干切削时积屑瘤的不断产生和脱落现象使刀具发生粘结磨损(图 4 (f)、4 (g)), 工件材料中的铝元素和铜元素向刀具中有一定程度的扩散, 在铜元素的作用下, 刀具发生了轻微的石墨化磨损(图 4 (h)、4 (i))。增强颗粒体积分数是影响刀具磨损的最显著因素, 增强颗粒尺寸、工件材料热处理状态、刀具材料晶粒尺寸和冷却条件对刀具磨损有显著影响。在切削参数中切削速度对刀具耐用度的影响最显著, 每齿进给量次之。加工表面的粗糙度和质量对刀具磨损有显著的敏感性。

葛英飞等的研究还表明, PCD 刀具高速切削 SiCp/Al 复合材料的刀具耐用度超过 150min (磨钝标准 $VB=0.1\text{mm}$), 而硬质合金刀具在切削 3min 后后刀面磨损量超过 0.35mm (图 5)。

Lin 等^[9]研究发现, PCD 刀具的刀具耐用度随切削速度和进给量的增

加而下降。D'Errico 等^[24]使用 PCD 和 CVD 刀具对 359/SiC/20p 复合材料在切削速度 $v=500\text{m/min}$ 下进行车削对比试验, 发现在进给量较小 (0.1mm/r) 时, 厚膜 CVD ($500\mu\text{m}$)

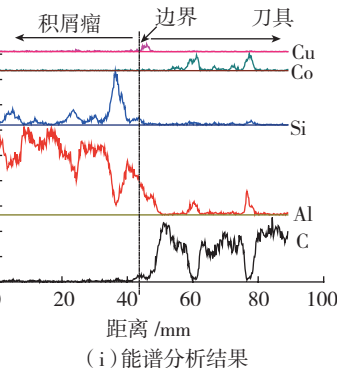
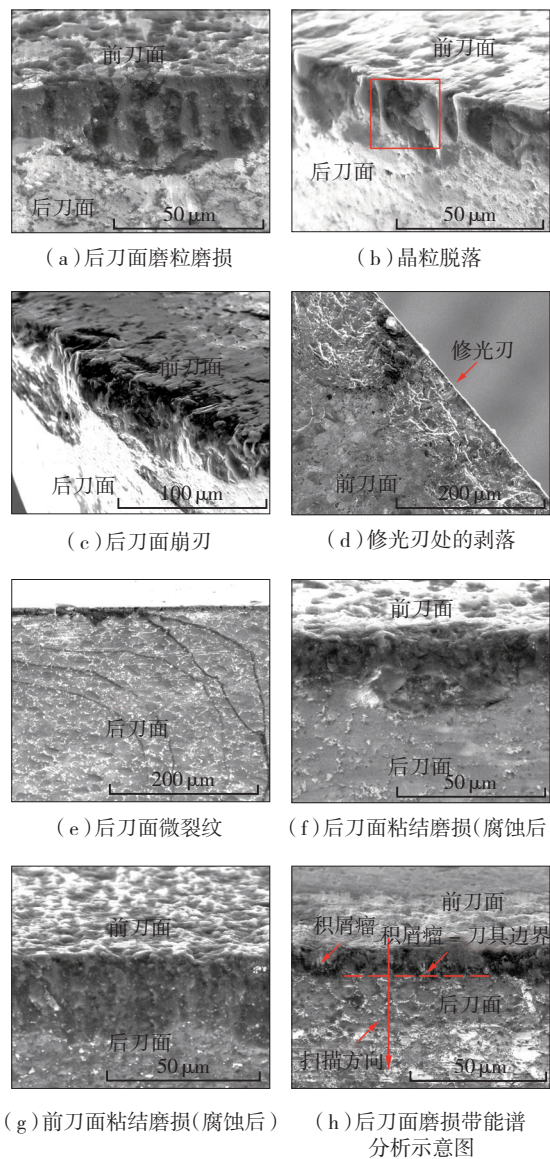


图4 PCD刀具主要磨损形式

刀具与 PCD 刀具的刀具耐用度分别为 600min 和 950min,但在进给量增大到 0.4mm/r 时,厚膜(500 μ m)CVD 刀具与 PCD 刀具的刀具耐用度分别为 32min 和 1080min,结果表明随着进给量的增加,厚膜 CVD 刀具的刀具耐用度急速下降,而 PCD 刀具的刀具耐用度变化不大。

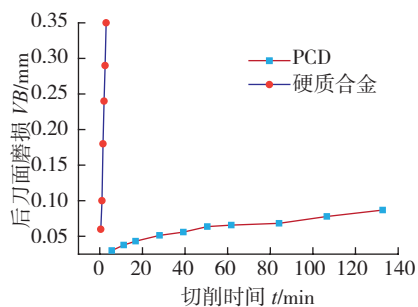


图5 PCD与硬质合金刀具的磨损曲线

高速切削切屑形成机制研究

Pramanik 等^[38]对 SiCp/Al 复合材料在切削速度 $v=400\text{m/min}$ 时的切屑形态开展了研究,发现进给量为 0.025mm/r 时切屑短小呈且不规则形状,随着进给量的增加(0.05~0.1mm/r),切屑变长且呈螺旋状和直线状,进一步加大进给量(0.2~0.4mm/r),切屑变短且呈 C 形。但切削铝合金时,随着进给量或者切削速度的增加切屑形状并未发生明显改变。节状和不连续切屑是切削铝基复合材料最常见的切屑形态^[38-39]。

全燕鸣等^[40]对硬脆颗粒增强金属复合材料的切屑成形机理开展了研究,发现铝基体夹裹颗粒进入剪切变形区后有非定向连续滑移、沿剪切面剪断、基本稳定滑移 3 种变形形式。此外,剪切角无法通用解析法进行预算,只能通过试验取得经验值。

葛英飞等^[41]对 SiCp/Al 复合材料高速铣削时的切屑形成机制开展了研究,结果表明,切屑总体上呈不规则锯齿状的非连续形(图 6(a)),切屑自由表面有非周期性的剪切裂纹延伸至切屑内部(图 6(b)),第一剪切

区(图 6(c))和切屑(图 6(d))中存在大量微孔洞和微裂纹。这些微孔洞和微裂纹大多在增强颗粒周围形成,少数在铝基体中形成,它们的方向基本与材料变形方向一致(图 6(d))。研究表明,微孔洞和微裂纹的形成和扩展对 SiCp/Al 复合材料的切屑形成过程具有重要影响。研究还表明, SiCp/Al 复合材料在切屑的形成过程中剪切角不为定值,从而在形态上有呈锯齿状的趋势。切削 SiCp/Al 复合材料时,剪切变形区基体总是夹裹着破碎的碳化硅颗粒在进行不均匀的协调变形(颗粒发生旋转)、滑移(包含大量晶界、相界之间的滑移)方向经常变化。

由于试验所使用的 SiCp/Al 复合材料基体塑性好、碳化硅颗粒细小并且体积分数不高,故铝基体在剪切变形区的滑移类似于非增强金属,可连续并比较稳定地定向滑移,但颗粒附近的基体仍有局部少量不均匀的变形,从而使得材料的变形流线不清晰(图 6(c))。虽然如此,增强颗粒还是有沿材料剪切变形方向流动的趋势(图 6(e))。研究表明, SiCp/Al 复合材料高速铣削切屑形态为不均匀锯齿状,增强颗粒体积分数、工件材料热处理状态等对切屑形成有显著影响;孔洞与微裂纹的动态形成和扩展是切屑形成的主要机制,切屑形成过程还伴随一定程度的绝热剪切。

表面完整性研究

Pramanik 等^[38]对 SiCp/6061Al 复合材料、6061Al 合金进行切削对比试验,发现低进给速度下 6061Al 的表面粗糙度比 SiCp/6061Al 高,但当进给量大于 0.03mm/r 时情况却发生了转变。

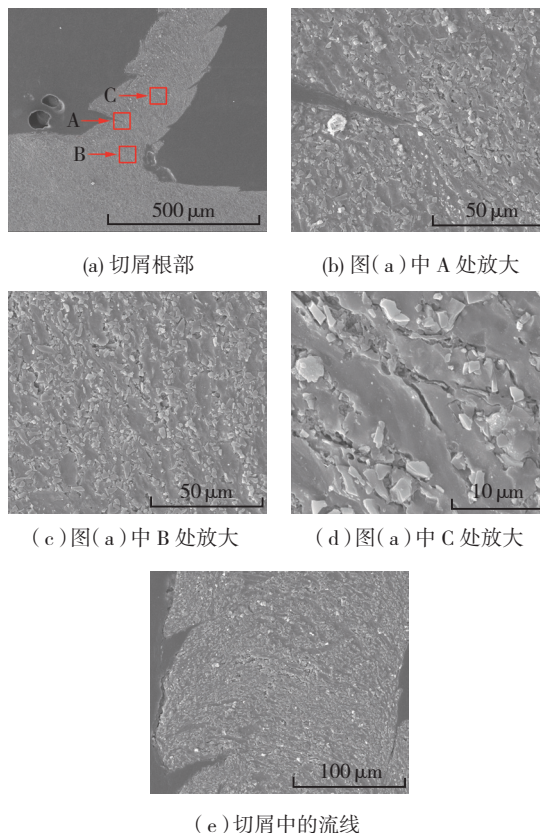


图6 切屑根部形态($v=120\text{m/min}$, $f=0.3\text{mm/r}$, $a_p=3\text{mm}$)

在试验的切削速度范围内,6061Al 比 SiCp/6061Al 的表面粗糙度值高。复合材料的加工表面没有发现进刀痕,切削速度对加工表面粗糙度没有明显的影响。

El-Gallb 等^[42]的研究表明,切削 SiCp/Al 复合材料时,已加工表面在碳化硅颗粒的周围有空洞产生并伴有颗粒的拔出、断裂和破碎,加工中拔出的颗粒在已加工表面拖动对其造成划伤以致形成凹槽,已加工表面粗糙度随进给速度的增大而减小,负的前角导致大的表面粗糙度。

吴震宇等^[43]使用 TiAlN 涂层刀具高速铣削 SiCp/Al 复合材料,结果表明,提高铣削速度使得振动明显增大、加工表面缺陷明显增多、表面粗糙度也显著增大。

Ge 等^[44]使用 PCD 刀具高速铣削 SiCp/Al 复合材料的研究表明,表面粗糙度随后刀面磨损量的增加而显著增大,如图 7 所示。在刀具的初期磨损阶段, SiCp/Al 复合

材料的表面粗糙度较低(R_a 约为 $0.207\mu\text{m}$), 在影响表面粗糙度的因素中, 增强相的体积分数影响最大, 切削速度次之, 进给速度最小。

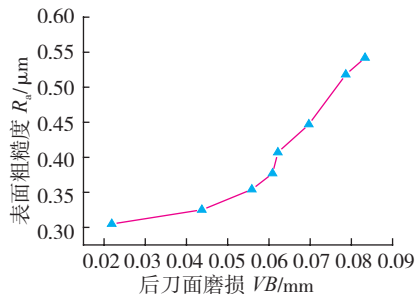


图7 不同磨损阶段已加工表面粗糙度曲线

葛英飞等^[41]研究表明, 铝基复合材料高速铣削已加工表面构成主要包括刀具周期进给所产生的切削波纹, 以及增强颗粒去除过程中所产生的坑洞、微裂纹、基体撕裂、涂覆和突起等非刀具直接切出要素。高速切削时, 由于切削力较大、切削温度较高, 刀尖处的工件材料明显发生塑性膨胀并沿刀尖两侧塑性流动。高速切削时由于材料变形不均匀, 剪切角在一定范围内波动, 从而造成切削不稳定, 在加工表面形成明显振纹(图8)。

研究还表明, 切削用量、增强颗粒体分比/尺寸、刀具材料晶粒大小、冷却方式和工件热处理状态都对加工表面形成有显著影响。切削较高体分比复合材料时, 加工表面包含更多的微坑洞、微裂纹和基体撕裂等构成元素。在较高的切削速度下, 增强颗粒被切断或原位压入的情况明显增加。切削相同体分比复合材料时, 增强颗粒尺寸越大, 加工表面残留的坑洞更大、更深, 且基体撕裂和振动情况更严重。使用冷却液时, 在冲洗作用和巨大的离心力作用下, 切屑及碎屑都被冷却液带走, 从而增强颗粒或碎屑被刀具重新压入已加工表面的机会大大减少。采用较小晶粒的PCD刀具时, 加工表面残留的坑洞数量减少, 这是因为此时刀具刃磨质量更好、刀具寿命更长。

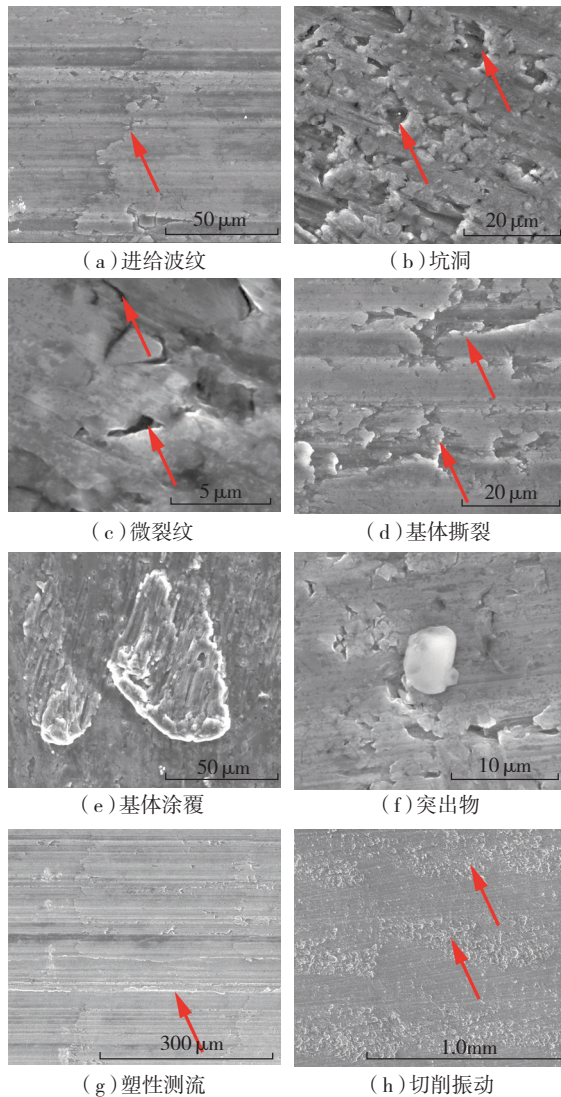


图8 SiCp/Al复合材料高速铣削加工表面构成

葛英飞等^[45]研究发现, 未热处理材料加工表面基体硬化层深度为 $30\sim 35\mu\text{m}$, 而热处理材料加工表面基体硬化层深度为 $15\sim 20\mu\text{m}$ (图9)。由图9还可看出, 加工硬化最高值在距离加工表面 $10\sim 15\mu\text{m}$ 处。

结束语

综上所述, 针对铝基复合材料高速切削方面的研究主要集中在刀具选择、切屑形貌、刀具磨损、表面完整性、切削力和切削温度等方面。众多的研究表明, 用PCD刀具高速切削铝基复合材料时, 能获得较好的表面质量, 较高的刀具寿命和较小的切削力、切削温度。

近年来, 金属基复合材料的高速、高效、精密切削受到普遍关注, 但很多相关研究得出的结论之间存在相互独立甚至矛盾的地方, 工程应用价值有限, 还需要加大在刀具寿命建模, 表面粗糙度预测, 切削参数优化、高速铣削数据库和专家系统等方面的研究力度。PCD刀具高速切削铝基复合材料, 能有效提高加工表面质量、材料去除率和降低加工成本, 但PCD刀具高速切削铝基复合材料时的机理尚不明确, 需进一步深入研究。此外, 目前针对金属基复合材料高速切削的研究仅限于铝基复合材料, 对新近发展的钛基复合材料相关方面的研究还未见报道, 由于该材料将来有望在航空发动机等领域替代钛合金或镍基高温合金, 从而对其高速切削加工性及机理方面的研究也显得尤为重要和迫切。

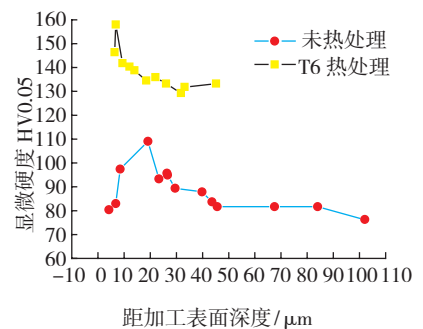


图9 高速铣削加工表面硬化层深度对比(切削10min)

本文共有参考文献45篇, 因篇幅所限未能一一列出, 如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 夏宛)