

PCBN 复合片合成与切削离心铸铁性能研究

陈超,莫培程,陈家荣,贾光,林峰,谢志刚

中国有色桂林矿产地质研究院有限公司;广西超硬材料重点实验室;

国家特种矿物材料工程技术研究中心

摘要: 为了提高 PCBN 刀具加工离心铸铁的耐磨性和韧性,在 PCBN 合成过程中添加了具有增韧效果的 ZrO_2 及具有较高耐磨性能的 Al_2O_3 进行试验,合成了 20wt% ~ 80wt% 的 PCBN 复合片。试验采用共沉淀法制备了 ZrO_2 - Al_2O_3 复合粉体,再将复合粉体与 CBN 微粉混合均匀后,在六面顶压机上进行高温高压烧结成块,研究了合成温度、CBN 含量、氧化铝含量对 PCBN 复合片切削离心铸铁性能的影响。试验结果显示:添加 ZrO_2 - Al_2O_3 复合粉体合成的低含量 PCBN 复合片具有较高的韧性和耐磨性能,能有效地对离心铸铁进行加工,刀具具有较长的使用寿命。

关键词: 低含量 PCBN 复合片;切削;离心铸铁

中图分类号: TG704;TH140.7;TB333

文献标志码: A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.12.003

Study on Synthesis and Cutting Properties of PCBN Composites

Chen Chao, Mo Peicheng, Chen Jiarong, Jia Guang, Lin Feng, Xie Zhigang

Abstract: In order to improve the wear resistance and high toughness of PCBN tools for machining centrifugal cast iron, ZrO_2 with toughening effect and Al_2O_3 with high wear resistance are designed and tested. PCBN composite sheets with 20% ~ 80% mass content are synthesized. ZrO_2 and Al_2O_3 powders are prepared by coprecipitation method. The effects of synthesis temperature, CBN content and alumina content on the properties of PCBN composite in cutting centrifugal cast iron are analyzed. The experimental results show that the low content PCBN composite sheet synthesized by adding ZrO_2 and Al_2O_3 powder has higher toughness and wear resistance, can effectively process centrifugal cast iron, and the tool has longer service life.

Keywords: low content PCBN composite sheet; cutting; centrifugal cast iron

1 引言

立方氮化硼(CBN)是氮化硼的高压相,硬度仅次于金刚石,但是与金刚石相比,其与铁族元素反应活性较低,同时具有比金刚石更优的耐热性和化学惰性,由其烧结体—聚晶立方氮化硼(PCBN)做成的刀具特别适用于切削淬硬钢、铸铁、粉末冶金材料和耐热合金等铁基材料。

近年来,为了减轻发动机质量,铸铁汽缸体逐渐由铝合金汽缸体所替代,但是在汽缸模块中离心铸铁汽缸套的使用依然在增加。相比砂模成型的普通铸铁,离心铸铁的可加工性较差,用来加工离心铸铁的刀具寿命较短。在离心铸造工艺中,通过将熔融铸铁浇注到旋转圆柱形模具中,可以得到薄的套筒。然而,由于与模具接触被快速冷却,所以此类铸铁表面显微组织被细化,进而产生异常结构,例如树枝状结构和花环结构。这些异常结构具有非常差的加工性。在切削加工时,刀具除了受到热反应和磨损加剧的影响,还由于材料内部的花环结构和枝晶结

构对刀尖的冲击作用,使刀具崩刃,因此,刀具除了具有较强的耐磨性外,还要具有较好的韧性。

氧化铝(Al_2O_3)具有优良的耐磨性、抗氧化性和化学稳定性,常被用来当作 PCBN 烧结体的添加剂。然而,切削离心铸铁时,添加 Al_2O_3 的 PCBN 烧结体耐磨性增加,但是韧性和烧结性较差,材料内部的枝晶结构比较容易导致刀具崩刃。为了克服该问题,通过同时添加氧化锆(ZrO_2)及 Al_2O_3 进行 PCBN 烧结。 ZrO_2 颗粒弥散分布在 Al_2O_3 陶瓷基体中,由于两者具有不同的热膨胀系数,烧结完成后在降温过程中, ZrO_2 颗粒周围有不同的受力情况,并受到基体的抑制, ZrO_2 的相转变也将受到抑制。此外,经氧化钇(Y_2O_3)稳定或部分稳定的 ZrO_2 的相变温度随着颗粒尺寸的减小而下降,可一直降至室温,室温时 ZrO_2 仍可以保持四方相,具有高强度和高韧性。在实际使用过程中,当基体对 ZrO_2 有足够的压应力时, ZrO_2 颗粒即发生四方相到单斜相的转变,并在基体中产生分裂纹,吸收了主裂纹扩展的能量,达到增加断裂韧性的目的^[1-3],由此获得的 PCBN 在切削离心铸铁时表现出抑制崩刃的效果。

ZrO_2 的加入有助于获得高韧性的 PCBN 烧结

体,但当 ZrO_2 加入量过高时,耐磨性急剧下降,对刀具来讲很不利。因此,本文通过添加 $ZrO_2-Al_2O_3$ 复合粉体作为结合剂,在高温高压下合成了具有高韧性和优异耐磨性的 PCBN 烧结体,研究合成温度、CBN 含量、氧化铝含量对 PCBN 复合刀具切削离心铸铁性能的影响。

2 试样制备与试验方法

试验原材料及其质量含量、粒度分别为:CBN 微粉,质量百分比为 20% ~ 80% (平均粒径 $2\mu m$); ZrO_2 ,质量百分比为 0 ~ 45% (平均粒径 $0.1\mu m$); Al_2O_3 ,质量百分比为 0 ~ 35% (平均粒径 $0.5\mu m$),铝粉 7% (平均粒径 $2\mu m$) 进行球磨混合。

采用共沉淀法制备先驱体^[4]:在水中加入氯氧化锆 ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$)、氯化铝 ($AlCl_3$) 和氯化钇 (YCl_3) 制备混合水溶液,例如:按照 ZrO_2 与 Y_2O_3 物质的量比为 98.5 : 1.5, ZrO_2 与 Al_2O_3 物质的量比为 75 : 25 称量配料。混合均匀后,添加过量氨水,充分搅拌沉淀,过滤,清洗干净,烘干。完成无定形水合氧化锆 (物质的量分数 75% (98.5% 摩尔的 $ZrO_2 - 1.5\%$ 摩尔的 Y_2O_3) - 25% Al_2O_3) 固溶体粉末。将得到的固溶粉末在空气中以 $700^\circ C$ 温度煅烧 9h,再进一步在 $900^\circ C$ 煅烧 1h,从而获得混合粉末 (ZrO_2, Al_2O_3 和 Y_2O_3)。

采用溶胶凝胶法制备先驱体^[5]:首先将异丙醇锆、异丙醇铝和异丙醇钇在 2-丙醇中处理 2h,添加过量氨水,在 $78^\circ C$ 进行回流 24h,获得水解产物,离心,热水清洗, $120^\circ C$ 真空干燥,从而得到中间体。按照比例混合:将得到的固溶粉末在空气中以 $700^\circ C$ 温度煅烧 9h,再进一步在 $900^\circ C$ 煅烧 1h,从而获得混合粉末 (Al_2O_3 和 Y_2O_3)。

将上述制备的原料粉分别与 CBN 微粉及烧结助剂在球磨罐中混合均匀,再将原料装入坩杯中,在冷压成型机上预压 ($10 \sim 20 MPa$) 成型,经高温真空 ($1000^\circ C, 1h, 10^{-3} Pa$) 和氢气还原处理 ($450^\circ C, 1h$) 后放入叶腊石模具中,进行高温高压烧结。烧结压力为 $5.5 GPa$,烧结温度为 $1300^\circ C \sim 1700^\circ C$,合成时间为 15min。研究合成温度、CBN 含量、氧化铝含量对 PCBN 复合刀具切削离心铸铁性能的影响。

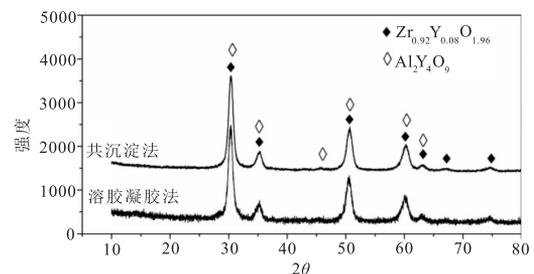
在 CAK4085Anj 型机床上进行切削试验。经电火花线切割、高频焊接、刃磨等工序,制成 SNGN120408 刀具,刀具后角 -20° ,圆角半径 $0.3 mm$,切削速度 $900 m/min$,切削深度 $0.3 mm$,进给量 $0.2 mm/r$;加工工件材料为离心铸铁,直径

$95 mm$ 。用工具显微镜观察测量切削 $10 km$ 后 PCBN 刀具后刀面磨损量,及切削 $12 km$ 时后刀面的磨损形式及失效形式。利用 Xpert PRO 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对 PCBN 烧结块进行物相分析。

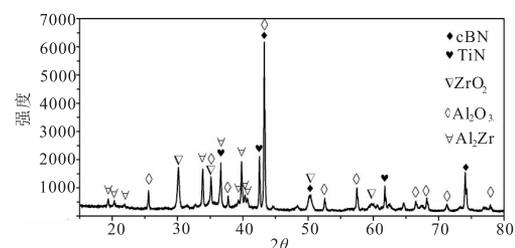
3 试验结果与分析

3.1 物相组成

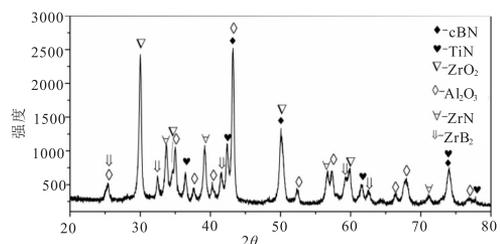
共沉淀法及溶胶凝胶法得到的复合粉体的粉末 XRD 谱表明 (见图 1a),两种方法获得的复合粉体主要成分相同,均为 $Zr_{0.92}Y_{0.08}O_{1.96}$ 、以及少量的 $Al_2Y_4O_9$,复合粉末已形成多种物相的固溶体。所得谱线衍射峰较宽,峰强度较低,经计算得知,复合粉体平均粒径约为 $90 nm$ 。将复合粉体与 CBN、Al 粉混合球磨,并经高温、还原处理后,出现了新物相 Al_2O_3 、合金相 Al_2Zr 及 ZrO_2 (见图 1b)。再经压力 $5.5 GPa$ 、温度 $1500^\circ C$ 、时间 15min 合成,复合层含有立方氮化硼 (CBN)、TiN、 ZrO_2 、 Al_2O_3 、ZrN 和 ZrB_2 (见图 1c), ZrO_2 的衍射明显变强。ZrN、 ZrB_2 均为在 CBN 颗粒表面反应形成的硬质材料,有效提高了对 CBN 颗粒的把持力。



(a) 共沉淀法、溶胶凝胶法获得的复合粉体的 XRD 谱



(b) 经高温、还原处理后混合粉末的 XRD 谱



(c) 高温高压合成后复合层的 XRD 谱

图 1 复合原料、高温、还原处理及烧结体的 XRD 谱

3.2 烧结温度对合成刀片切削性能的影响

获得的共沉淀原料与 CBN 及助烧剂按照比例 ($ZrO_2 - 23\%$, $Al_2O_3 - 15\%$, $Al - 7\%$, $TiN - 5\%$, $CBN - 50\%$) 混合并进行高温高压烧结, 压力 5.5 GPa, 温度 $1350^\circ C \sim 1700^\circ C$, 时间 15min, 得到样品 1-1 至 1-5, 测试样品的切削性能。

如表 1 所示, 在 $1350^\circ C \sim 1700^\circ C$ 条件下均能合成出切削性能良好的样品。随着烧结温度的升高, 刀具磨损呈增大趋势, 但是当烧结温度超过 $1500^\circ C$, 样品 1-4、1-5 在切削 12km 后产生崩刃。在较高温度下合成的样品内部晶粒长大或过烧, 可能是造成磨损较大及长距离切削崩刃的原因。

表 1 烧结温度对切削磨损的影响

编号	烧结温度($^\circ C$)	10km 磨损量(μm)	12km 磨损情况
1-1	1350	152	正常磨损
1-2	1400	155	正常磨损
1-3	1500	158	正常磨损
1-4	1600	160	崩刃
1-5	1700	162	崩刃

3.3 氧化锆、氧化铝及铝含量对合成刀片切削性能的影响

固定 CBN 质量含量为 50%, 烧结压力 5.5 GPa, 温度 $1500^\circ C$, 时间 15min 进行合成。如表 2 所示, 在切削对比测试中, 2-1 至 2-4 为采用共沉淀方式制备氧化锆及氧化铝复合粉体, 然后再将其与 CBN 及烧结助剂混合后烧结所得样品(称为间接法); 2-5 至 2-7 为直接将商用的氧化锆及氧化铝与 CBN 及烧结助剂通过机械混合方式烧结合成的样品(称为直接法)。切削参数: 切削速度 $V = 900m/min$, 切削深度 $a_p = 0.3mm$, 进给量 $f = 0.2mm/r$ 。

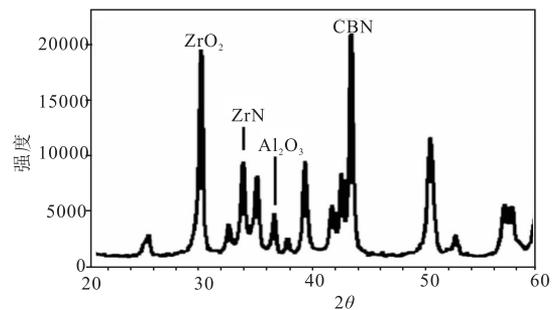
由表 2 可以看出, 通过共沉淀方式制备的氧化锆及氧化铝粉料与 CBN 在高温高压下合成的样品 2-1 至 2-4 进行切削测试均表现出良好的耐磨性和韧性, 刀具基本正常磨损。2-1 至 2-2 样品磨损较小, 也未崩刃, 表现出良好的耐磨性和较好的韧性。样品 2-3 添加氧化铝含量过高, 或者样品 2-4 未添加氧化铝时切削 10km 后出现崩刃。当氧化锆含量低于 10% 时, 切削里程较少, 最终失效形式为崩刃, 说明氧化锆含量过低时刀片的韧性较差; 未添加氧化铝合成的样品 2-4 进行切削测试时, 耐磨性明显下降, 最后也表现为崩刃。直接添加商用的氧化锆及氧化铝粉末进行合成试验样品 2-5 至 2-7, 提高氧化锆的含量也有助于提升刀片的使用寿命,

但总体切削效果较差, 多表现为切削长度短, 易出现崩刃现象。

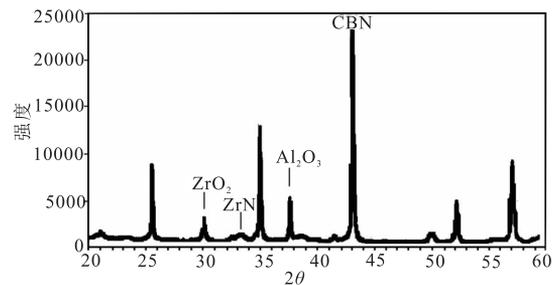
表 2 不同氧化锆、氧化铝及铝对切削磨损的影响

编号	ZrO_2 含量	Al_2O_3 含量	Al 含量	10km 磨损量(μm)	12km 磨损情况
2-1	23	15	7	158	正常磨损
2-2	10	28	7	150	正常磨损
2-3	7	31	7	149	10.2km 崩刃
2-4	38	0	7	189	11.2km 崩刃
2-5	3	35	7	-	5.1km 崩刃
2-6	45	0	0	-	4.9km 崩刃
2-7	32	13	0	-	9.3km 崩刃

对样品分别进行 XRD 衍射分析, 如图 2 所示。图 2a 是采用间接法制料方式合成的 PCBN 烧结样品(2-1), 含有 CBN、TiN、 ZrO_2 、 Al_2O_3 、ZrN、ZrB₂; 图 2b 是采用直接法制料方式合成的 PCBN 烧结样品(2-5)。与图 2a 相比, ZrO_2 (111)、ZrN (111) 的峰的强度极弱, 烧结体中形成的 ZrO_2 和 ZrN 含量可能是影响烧结体使用性能的重要因素。



(a) 间接法制料合成 PCBN 样品 XRD 谱



(b) 直接法制料合成 PCBN 样品 XRD 谱

图 2 间接及直接制料方式合成的 PCBN 样品 X-RAY 射线分析

3.4 CBN 含量对合成刀片切削性能的影响

在烧结压力 5.5 GPa、温度 $1500^\circ C$ 、时间 15min 的条件下进行试验。如表 3 所示, 在切削对比测试中, 3-1 至 3-8 样品均采用共沉淀方式制备氧化锆及氧化铝粉料合成, 其中 ZrO_2 与 Al_2O_3 含量的比例(质量比 23:15)固定, Al 质量含量为 7%。切削参数: 切削速度 $V = 900m/min$, 切削深度 $a_p = 0.3mm$, 进给量 $f = 0.2mm/r$ 。

表3 不同 CBN 含量变化对 PCBN 刀具切削磨损的影响

编号	CBN 含量	10km 磨损量(μm)	12km 磨损情况
3-1	10	133	崩刃
3-2	20	135	崩刃
3-3	30	148	正常磨损
3-4	40	151	正常磨损
3-5	55	158	正常磨损
3-6	70	163	正常磨损
3-7	80	170	崩刃
3-8	90	180	崩刃

由表3可知,CBN含量从10%~90%变化时,均能获得耐磨性好、韧性高的样品。CBN含量较低时,由于 ZrO_2 及 Al_2O_3 含量较高,刀具磨损较小,易出现崩刃;在CBN含量为30%~70%时,耐磨性和韧性较好。当CBN含量较高时,由于 ZrO_2 含量降低, Al_2O_3 含量减少,导致刀具切削寿命缩短,磨损加快,最终崩刃,韧性不足。

3.5 共沉淀初始材料中 Al_2O_3 含量对刀具寿命的影响

固定CBN质量含量为55%,Al质量含量为7%,烧结压力5.5GPa,温度1500℃,时间15min,改变共沉淀初始材料中 Al_2O_3 含量进行试验。切削参数:切削速度 $V=900\text{m}/\text{min}$,切削深度 $a_p=0.3\text{mm}$,进给量 $f=0.2\text{mm}/\text{r}$ 。

如表4所示,当共沉淀初始材料中全部为 Al_2O_3 而不含 ZrO_2 时,刀具寿命较短,切削长度不到10km即崩刃失效,韧性差,而只要含有少量 ZrO_2 时,样品性能即得到明显改善,说明 ZrO_2 对刀具增韧的效果明显。当 Al_2O_3 含量从5%~90%变化时,均能获得高耐磨性和高韧性的样品;当 Al_2O_3 含量在5%~30%时刀片表现最好。与表3结果相似,随着 Al_2O_3 含量的增加,样品的耐磨性增加,磨损减少,但是伴随 ZrO_2 含量的减少又使样品的韧性降低,容易崩刃。在共沉淀初始材料中 Al_2O_3 含量超过30%时,相应的刀片在切削10km后会出现微崩刃。

表4 共沉淀初始材料中 Al_2O_3 含量变化对切削磨损的影响

编号	Al_2O_3 占共沉淀初始比例	磨损量(μm)	12km 磨损情况
3-10	5	161	正常磨损
3-11	15	158	正常磨损
3-12	30	152	正常磨损
3-13	50	146	崩刃
3-14	55	130	崩刃
3-15	70	124	崩刃
3-16	90	117	崩刃
3-17	100	崩刃	崩刃

3.6 溶胶凝胶法与共沉淀法制备初始材料对刀具寿命的影响

固定CBN质量含量为55%,在烧结压力5.5GPa、温度1500℃、时间15min条件下进行试验。如表5所示,在对比试验中,4-1至4-4样品采用溶胶凝胶方式制备氧化锆及氧化铝粉料,粉料的质量比例与共沉淀法获得的粉料相同,并以此作对比。切削参数:切削速度 $V=900\text{m}/\text{min}$,切削深度 $a_p=0.3\text{mm}$,进给量 $f=0.2\text{mm}/\text{r}$ 。溶胶凝胶初始材料中 Al_2O_3 含量的变化对切削磨损的影响见表5。

表5 溶胶凝胶初始材料中 Al_2O_3 含量变化对切削磨损的影响

编号	ZrO_2 含量	Al_2O_3 含量	Al 含量	磨损量(μm)	12km 磨损情况
4-1	23	15	7	170	正常磨损
4-2	10	28	7	157	正常磨损
4-3	7	31	7	160	9.9km 崩刃
4-4	38	0	7	175	10.8km 崩刃

与共沉淀法制备前驱体相比,溶胶凝胶法制备的前驱体经过与CBN粉及烧结助剂Al烧结的样品切削离心铸铁也具有较长的切削寿命和耐磨性。由合成前后样品的XRD衍射分析表明:烧结体也含有CBN、TiN、 ZrO_2 、 Al_2O_3 、ZrN、 ZrB_2 。试验表明,溶胶—凝胶法制备前驱体与共沉淀法制备前驱体相同,是制备两相粒子均匀分布复相粉体的有效手段。

4 结语

(1)采用共沉淀法或溶胶凝胶法制得的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 复相前驱体相较直接添加试剂烧结的PCBN切削离心铸铁时具有较长的切削寿命。

(2)添加适量的 ZrO_2 有助于提高PCBN刀片的韧性,减少崩刃,适量的 Al_2O_3 有助于提高PCBN刀片的耐磨性,各物质质量含量:CBN-50%, ZrO_2 -23%, Al_2O_3 -15%,Al-7%,TiN-5%。试验表明,在5.5GPa、1500℃、时间15min合成的样品具有较长的切削寿命。

参考文献

- [1]周玉.陶瓷材料学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1995:1173.
- [2]李世普.特种陶瓷工艺学[M].武汉:武汉理工大学出版社,2009:96-97.

钻削高强度钢的切削振动特性研究

金成哲, 吴鹏, 付鑫

沈阳理工大学

摘要: 由于高强度合金钢 34CrNi3MoV 硬度高、屈服强度大, 在钻削加工过程中易产生振动失稳。利用 ANSYS 软件分析了钻削系统在工作状态下的振型模态, 得到相关模态参数。建立了钻削系统在工作过程中钻头四个自由度方向的动力学模型, 并根据再生颤振机理分析了颤振对切削厚度的影响, 据此计算出钻削过程中的动态切削力, 由传递函数建立钻削稳定性模型。利用 MATLAB 数值分析软件进行稳定性计算, 得到钻削系统稳定性叶瓣图。通过对切削振动特性的分析, 为提高钻削加工效率、改进钻削高强度钢工艺提供了理论基础。

关键词: 钻削; 高强度钢; 模态分析; 切削稳定性

中图分类号: TG501; TG52; TH161 + .6

文献标志码: A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.12.004

Study on Cutting Vibration Characteristics of Drilling High Strength Steel

Jin Chengzhe, Wu Peng, Fu Xin

Abstract: Due to the high hardness and yield strength of the high-strength materials, vibration instability occurs easily during drilling. Therefore, by using ANSYS software, the mode shapes under working conditions are analyzed and the relevant modal parameters are extracted. A four-degree-of-freedom dynamic model of the drill bit of the drilling system during drilling process is established. Then, based on the regenerative chatter theory, the influence of chatter on cutting thickness is analyzed and the dynamic cutting force is calculated according to the dynamic cutting thickness. After that, the drilling stability model is established based on the transfer function and the stability lobes diagram of the drilling system is obtained by using MATLAB numerical analysis software. Through the analysis of cutting vibration characteristics, the theoretical basis is provided for improving the drilling efficiency and drilling technology of high-strength steels.

Keywords: drilling; high-strength steel; modal analysis; stability of cutting

1 引言

长久以来, 高强度钢在国防、航空航天和船舶等工业中得到广泛应用。由于其高强度和高硬度的特性, 高强度钢一直是金属切削加工中的难题^[1]。在钻削高强度钢时, 受钻头、工件、夹具和机床等因素的影响, 钻削过程会产生切削振动。而颤振的发生会对加工质量和切削效率带来影响, 引起刀具耐用度降低、机床使用寿命缩短, 并产生噪音污染等严重问题^[2]。因此, 为提高钻削加工表面质量和加工效

率, 有必要研究钻削颤振的产生机理及控制措施。文献[3, 4]系统地研究了钻削加工系统在时域和频域的切削稳定性。杨长勇等^[5]通过超高强度合金钢 CSS-42L 的磨削试验, 研究了砂轮线速度、工件进给速度、磨削深度等磨削参数对磨削力、力比和磨削比能的影响规律。结果表明, 切深、工件进给速度与磨削力呈正线性关系, 砂轮线速度于切削力呈负线性关系。Biermann D. 等^[6]研究了在最小润滑条件下深孔钻削镍基合金 718 和 20MnCrMo7 合金钢的切屑形成过程。研究显示, 镍基合金 718 切屑更长且卷曲, 20MnCrMo7 切屑较短且曲率较小。Shyha I. 等^[7]分析了双唇麻花钻钻削铁镍钴合金的机械加

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20170540778)

收稿日期: 2019年5月

[3] 武志红, 薛群虎, 曹怡, 等. ZrO₂/Al₂O₃ 复相陶瓷的复合机理、制备、应用及展望[J]. 材料科学与工艺, 2009(1): 137-140.

[3] 王晶, 高宏, 邱竹贤. 氧化锆增韧的氧化铝纳米粉体制备及性能研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2001(5): 38-42.

[4] 张大海, 杨辉, 余瑞莲, 等. 无机盐先驱体溶胶凝胶法制备 50% Al₂O₃ - 50% ZrO₂ 细晶复相陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 1997(5): 594-597.

第一作者: 陈超, 硕士, 高级工程师, 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西超硬材料重点实验室, 国家特种矿物材料工程技术研究中心, 541004 广西省桂林市

First Author: Chen Chao, Master, Senior Engineer, China Non Ferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guangxi Key Laboratory of Superhard Material, National Engineering Research Center for Special Mineral Material, Guilin, Guangxi 541004, China