

文章编号:1671-5497(2006)Suppl.2-0006-05

# 压铸铝合金 $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$ 的铁金属间化合物对高速钢刀具钻削磨损特性的影响

杨晓红<sup>1</sup>, 刘勇兵<sup>1</sup>, 张明喆<sup>2</sup>, 周宏<sup>1</sup>, 梁涛<sup>1</sup>, 王军<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 超硬材料国家重点实验室, 长春 130012)

**摘要:**研究了在无润滑条件下,压铸铝合金  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  的铁金属间化合物对高速钢刀具钻削磨损特性的影响。结果表明:当合金中铁的质量分数较低时( $w(\text{Fe}) < 0.6\%$ ),铁金属间化合物以细小的多边形形状铁相为主,刀具后刀面磨损机制主要为塑性变形磨损,磨损量较大;当 $0.6\% < w(\text{Fe}) < 0.8\%$ 时,汉字状 $\alpha$ 铁相出现,刀具磨损形式由塑性变形磨损向粘着磨损和磨粒磨损转变,磨损量减小;当 $w(\text{Fe}) > 0.8\%$ 时,汉字状和多边形状铁相明显增多,呈薄片晶状的 $\beta$ 相 $\text{Al}_5\text{FeSi}$ 出现,磨粒磨损成为主要的磨损机制,磨损量变大。粘着磨损和磨粒磨损共存的磨损机制是钻削压铸铝合金刀具合理的磨损机制。

**关键词:**金属材料;压铸铝合金;机械特性;磨损机理;金属间化合物

中图分类号:TG146.21 文献标识码:A

## The influences of iron-riched phases on the flank wear of HSS tools under the condition of drilling die-cast aluminum alloy

Yang Xiao-hong<sup>1</sup>, Liu Yong-bing<sup>1</sup>, Zhang Ming-zhe<sup>2</sup>, Zhou Hong<sup>1</sup>, Liang Tao<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. National Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The influence of iron-riched phases in die-cast  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  alloy on the flank wear characteristics of high-speed steel (HSS) tools was investigated in the present work under the drilling condition without lubrication. The results show that iron-riched phase mainly existed in the shape of fine polygon, Fe content less than 0.6wt%, flank wear mainly exhibited severe plastic deformation wear. Iron-riched phases were mainly composed of  $\alpha$ -phase and polygonal phase, Fe content within 0.6 to 0.8wt%, the main wear mechanism transformed to adhesive wear and abrasive wear, decreasing in flank wear.  $\alpha$ -phase and polygonal phase were distinctly increased beside  $\beta$ -phase of  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ , Fe content more than 0.8, the main wear mechanism was abrasive wear, increasing in flank wear. The investigation reveals that the co-existence of adhesive wear and abrasive wear is the reasonable wear mechanism for drilling die-cast  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  alloy.

**Key words:** metallic material; die cast aluminum alloys; mechanic properties; wear mechanism; intermetallic compounds

收稿日期:2005-06-12.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2002AA331120).

作者简介:杨晓红(1966-),女,高工,博士研究生.研究方向:复合材料摩擦磨损. E-mail:xhyang@jlu.edu.cn

通讯联系人:张明喆(1964-),男,副教授,博士.研究方向:复合材料摩擦磨损. E-mail:zhangmz@jlu.edu.cn

人们对钻削压铸铝合金的刀具磨损机理研究主要集中在钻头直径、切削速度和进给量等方面<sup>[1-5]</sup>。而压铸铝合金  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  中元素多且含量范围宽, 冷却速度快, 其含量超过极限溶解度时, 出现不能溶入固溶体的第二相; 同时元素之间相互影响, 存在大量的金属间化合物, 对合金的性能及应用产生巨大的影响<sup>[6-10]</sup>。本文主要研究了压铸铝合金材料中铁金属间化合物含量对刀具磨损的影响, 并对刀具磨损的机理进行了分析。

## 1 实验材料和方法

基于德国的 DIN1752. 2-73 ( $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$ ) 标准, 本文试验共采用 6 组压铸铝合金  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$ , 其主要成分为:  $w(\text{Si}) = 9.84\%$ ,  $w(\text{Cu}) = 2.59\%$ ,  $w(\text{Mn}) = 0.33\%$ ,  $w(\text{Mg}) = 0.31\%$ ,  $w(\text{Zn}) = 0.91\%$ , 余量为 Ti, Sn, Pb 等。6 组压铸铝合金中, Fe 的质量分数分别为 0.17%, 0.41%, 0.64%, 0.81%, 1.12% 和 1.3%。试验制备  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  合金的设备有: 3 kg 的石墨坩埚, 电阻炉, 型号为 J1125G 的压铸机, 合型力为 2500 kN 的卧式冷室压铸机。压射力为 280 kN, 压射速度为 1.0—1.2 m/s, 压铸温度为 680°C, 模具温度为 140—150°C。试样尺寸为 245 mm × 40 mm × 21 mm, 采用 0.5% HF 水溶液腐蚀。刀具采用直径为 5.4 mm 的直柄短麻花钻, 材料为  $\text{W}_6\text{Mo}_5\text{Cr}_4\text{V}_2$  高速钢, 硬度为 63—66 HRC, 表面无涂层。在 JCS018A 立式机床上对压铸铝合金  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  进行单点干性钻削, 切削速度为 4000 r/min, 进给量为 150 mm/min, 每个钻头钻 90 个孔。采用 FDIC JX11 型万能工具显微镜测量钻削前后钻头后刀面的磨损宽度  $VB$  值(见图 1)。采用 JXA-840 型电子显微扫描电镜和 Nikon 金相显微镜进行微观分析。利用定量值读光谱分析仪测量合金中各元素的含量。

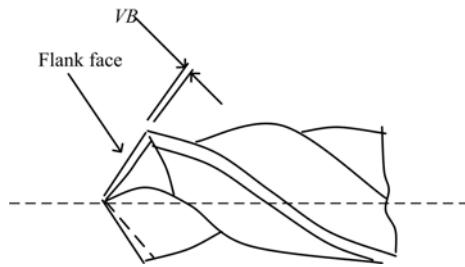


图 1 钻头后刀面磨损示意图

Fig. 1 The sketch map of drilling tools flank wear

## 2 结果与讨论

图 2 为不同铁含量对合金加工性能的影响。由图可见,  $w(\text{Fe}) = 0.5\%—0.8\%$  时刀具后刀面磨损明显减少, 同时轴向力较低; 而在铁含量比较低的区域  $w(\text{Fe}) = 0.2\%—0.4\%$  和  $0.8\%—1.3\%$  内刀具后刀面磨损明显增加, 轴向力也较高。说明铁的质量分数在 0.5%—0.8% 内加工性能得到改善。在压铸铝合金中, 铁的质量分数的变化改变了合金的组织结构和力学性能, 是引起刀具磨损差异的重要原因。

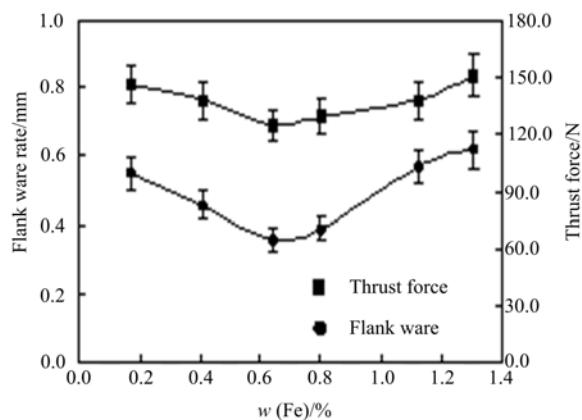


图 2 合金中 Fe 含量对切削过程中刀具后刀面磨损和轴向力的影响

Fig. 2 Effect of Fe content of the alloy on the flank ware and the thrust force

图 3 是压铸铝合金  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  中 Fe 的质量分数分别为 0.41%、0.8%、1.12% 和 1.3% (锰含量均在 0.3% 左右) 的金相照片。金相组织中主要是由  $\alpha$  铝和铜、硅、锰、铝、锌等产生的金属间化合物。从中可以观察到主要的含铁相有多边形状的铁相  $\text{Al}_8\text{Si}_{1.6}(\text{Fe}, \text{Mn})_{1.8}(\text{CuZn})_{0.1}$ 、汉字状的铁相  $\text{Al}_8\text{Si}_{1.5}(\text{Fe}, \text{Mn})_{1.7}(\text{CuZn})_{0.2}$  和薄片状的铁相  $\text{Al}_5\text{Si}_{1.3}(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{CuZn})_{0.1}$ , 利用扫描电镜(见图 4)进一步表征了 3 种金属间化合物的形貌。通过金相组织分析表明, 在压铸铝合金中,  $w(\text{Fe}) = 0.41\%$  时, 铁相呈汉字状;  $w(\text{Fe}) = 0.8\%$  时, 以汉字状和多边形状铁相为主, 在此含量以下的铁相比较细小; 随铁含量的增多, 出现薄片状的  $\beta$  铁相, 尤其当  $w(\text{Fe}) = 1.3\%$  时,  $\beta$  铁相大量出现。多边形状铁相硬度高 (8900 MPa), 但尺寸较小 (小于 500 nm), 出现在晶界处; 汉字状铁相硬度较低 (4800 MPa) 并与基体共格, 可随基体协调变形; 但薄片状的  $\beta$  铁相硬度较高 (5600 MPa), 并且穿晶生长, 加之其薄片晶状的形貌, 使应力易

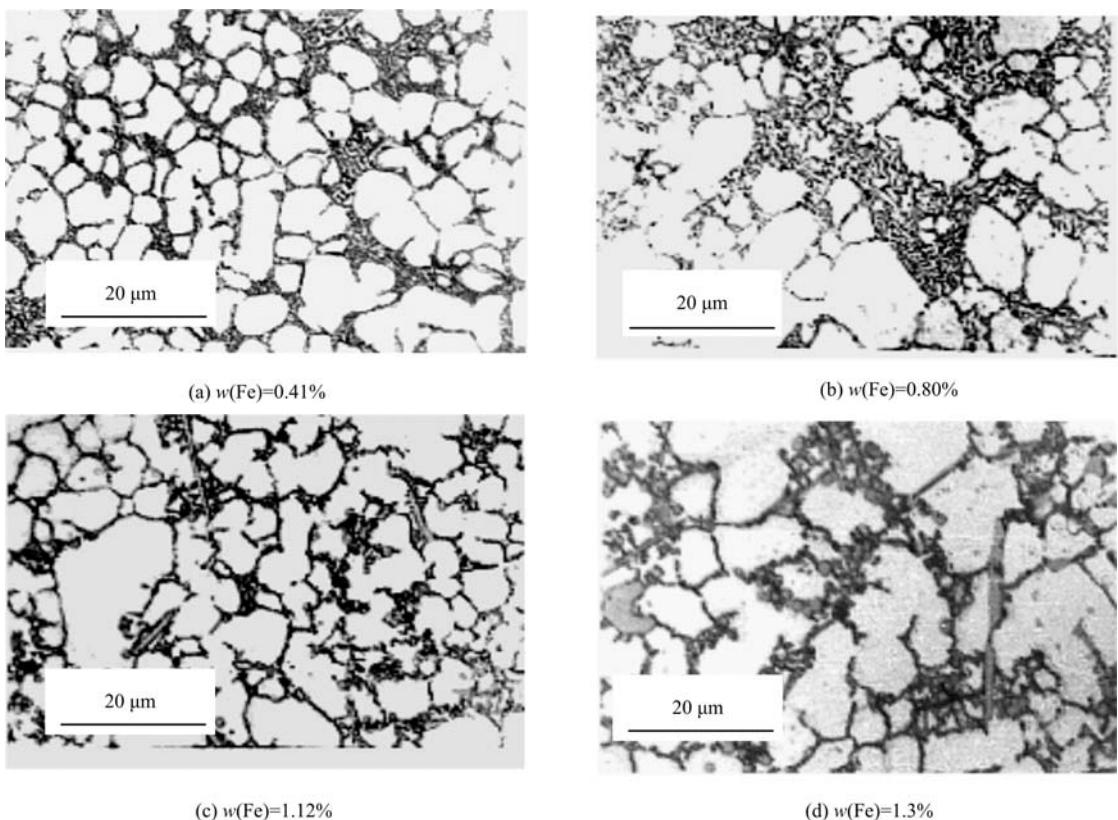
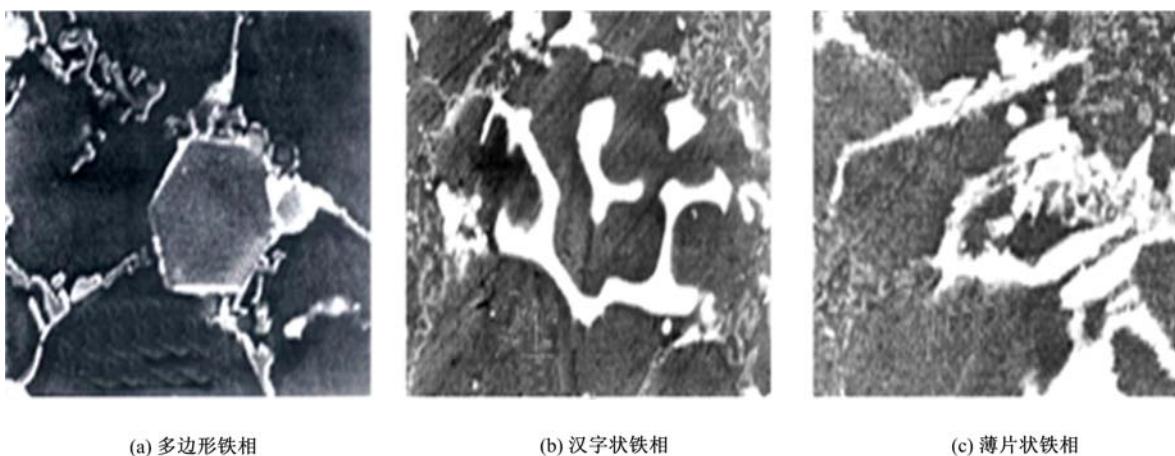
图3 含不同质量分数铁的 $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$ 的金相照片Fig. 3 Microstructure of die-cast  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  with different mass fraction of iron

图4 金属间化合物的扫描电镜形貌

Fig. 4 Microstructure of intermetallic compounds by SEM

于在此集中,对基体产生严重的割裂作用。

图5表明,铁的质量分数从0.17%增加到0.8%时,合金的屈服强度和断裂强度分别增加约7.1%和3.5%,延伸率下降45.7%;而当铁的质量分数从0.8%增加到1.12%时,合金的屈服强度和断裂强度上升约5%,延伸率下降约27%。

当铁含量较低时,压铸铝合金 $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$ 中以 $\alpha$ 铝和细小的多边形状铁相为主,工件材料的塑性大(见图5)。钻削过程中, $\alpha$ 铝和钻头之间存

在着严重的塑性流动和粘刀现象,从而导致积屑瘤产生,出现积屑瘤形成—长大—剥落的循环过程。积屑瘤的形成使切削力增大,产生大量的切削热,刀具表面过热,而形成塑性变形磨损。细小的高硬度多边形铁相随基体变形能力差,不易破碎,但易脱落,形成高硬度磨屑,进一步加剧刀具的磨损。图6(a)是 $w(\text{Fe})=0.41\%$ 时的钻削照片。可以看出,钻削过程中由于温度上升、脱溶作用和再结晶,使金属间化合物有长大趋势,铝基体

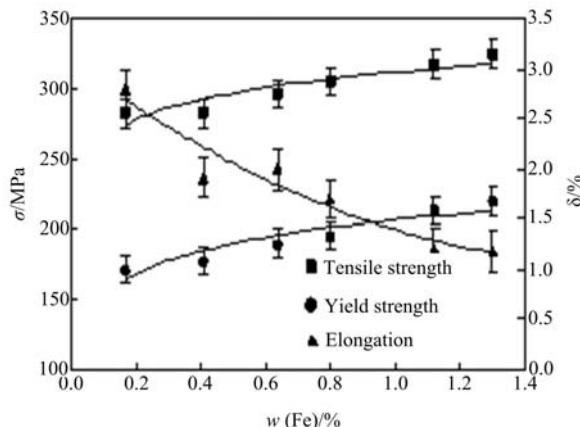


图 5 铁含量对合金力学性能的影响  
Fig. 5 Effect of iron content on the mechanical properties

与金属间化合物存在严重的塑性流动。磨损表面的塑性变形相当严重(图 7(a))。较大的塑性流动形成宽大变形脊, 变形脊出现断裂, 表面发现较多的裂纹。

随着铁含量的增加, 当  $w(\text{Fe}) = 0.8\%$  时, 出现汉字状  $\alpha$  铁相。由于硬度较低的汉字状  $\alpha$  铁相与基体共格, 随基体变形能力强, 在一定程度上改善了粘结现象和积屑瘤的产生, 使加工过程中断屑性能得到提高, 从而使磨损量和切削抗力降低。刀具磨损形式由塑性变形磨损向粘着磨损和磨粒磨损转变(见图 7(b))。在切削刃上的表面较为平滑, 基本相互平行的犁脊上出现多处微小的粘着坑, 而铝的转移主要集中在犁脊, 表明磨损机制主要是粘着磨损。对刀具而言, 这是较合理的磨损形式。

随着铁含量的进一步增加, 当  $w(\text{Fe}) = 1.3\%$  时, 出现了呈薄片晶状的  $\beta$  相  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ (图 6(c))。在切削过程中, 由于强烈的塑性变形, 呈薄片晶状的  $\beta$  相极易破碎和脱落, 形成磨屑。钻头后刀面的磨损表面有明显的颗粒犁切现象(图 7(c)), 颗粒使钻头后刀面表面造成更深的犁切现象和表面裂纹, 磨粒磨损成为该区主要的磨损机制。

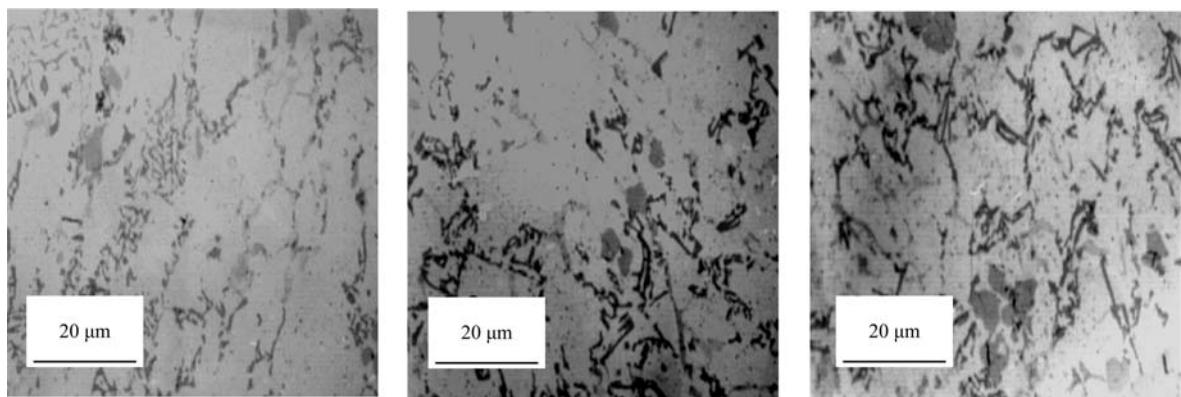


图 6 磨屑金相照片  
Fig. 6 The photos of the chip

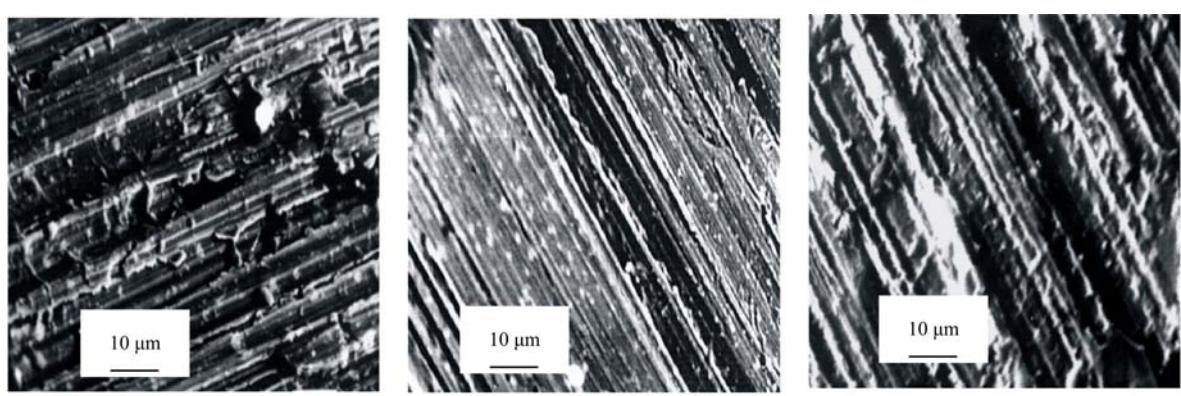


图 7 钻头后刀面扫描电镜照片  
Fig. 7 SEM photos of the flank wear

### 3 结 论

(1) 压铸铝合金中存在多边形状铁相  $\text{Al}_8\text{Si}_{1.6}(\text{Fe}, \text{Mn})_{1.8}(\text{CuZn})_{0.1}$ 、汉字状的铁相  $\text{Al}_8\text{Si}_{1.5}(\text{Fe}, \text{Mn})_{1.7}(\text{CuZn})_{0.2}$  和薄片状的铁相  $\text{Al}_5\text{Si}_{1.3}(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{CuZn})_{0.1}$  三种 FeSiAl 类金属间化合物。当合金中以细小的多边形状铁相为主时, 刀具后刀面磨损机制主要为塑性变形磨损, 磨损量较大; 当汉字状  $\alpha$  铁相出现时, 刀具磨损形式由塑性变形磨损向粘着磨损和磨粒磨损转变, 磨损量减小; 当呈薄片晶状的  $\beta$  相  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  出现时, 磨粒磨损成为主要的磨损机制, 磨损量变大。

(2) 粘着磨损和磨粒磨损共存的磨损机制使刀具磨损量减小, 被加工表面塑性变形低, 是钻削压铸铝合金刀具合理的磨损机制。

(3) 在压铸铝合金  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  中,  $w(\text{Fe}) = 0.6\% - 0.8\%$  时, 刀具的磨损量最小。该研究为压铸铝合金  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  中铁含量的控制和钻削刀具的磨损分析提供了依据。

### 参考文献:

- [1] Nouari M, List G, Girot F, et al. Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys [J]. Wear, 2003, 255: 1359-1368.
- [2] List G, Nouari M, Girot F. On the optimisation of machining parameters for dry drilling of aeronautic aluminium alloy [J]. Journal de Physique, 2003, IV 110: 471-476.
- [3] Zhang M Z, Liu Y B, Zhou H. Wear mechanism maps of uncoated HSS tools drilling die-cast aluminum alloy [J]. Tribology International, 2001, 34: 727-732.
- [4] Hamade R F, Ismail F. A case for aggressive drilling of aluminum [J]. J Mater Process Tech, 2005, 166: 86-91.
- [5] Huang M F, Lin T R. Application of grey-taguchi method to optimise drilling of aluminium alloy 6061 with multiple performance characteristics [J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(4): 528-532.
- [6] Gowri S, Samuel F H. Effect of Mg on the solidification behavior of two Al-Si-Cu-Fe-Mg (380) diecasting alloys [J]. AFS Trans, 1993, 101: 611-618.
- [7] Wohlfahrt H, Ruge J H, Rehbein D. Production of weldable Al diecastings-requirement and casting technology [J]. AFS Trans, 1996, 104: 1195-1201.
- [8] Ripley M G. Aluminum melting for gravity diecasting [J]. The Foundryman, 1990, 83: 166-168.
- [9] 张明喆, 周宏, 梁涛, 等. 压铸铝合金中的金属间化合物 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999, 105(增刊1): 100-104.  
Zhang Ming-zhe, Zhou Hong, Liang Tao, et al. Intermetallic compounds in die casting aluminium alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1999, 105(Suppl. 1): 100-104.
- [10] Ginting A, Nouari M. Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(7/8): 758-768.