

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5216

合金化对 Al-18%Si 合金磨削加工性能的影响

唐子扬, 罗 熙, 廖 睿, 李小松

(湖南理工学院 能源与电气工程学院, 湖南 岳阳 414006)

摘 要: 过共晶铝硅合金组织中粗大的硅相恶化了其加工性能, 改善过共晶铝硅合金的加工性能对过共晶铝硅合金的工业化应用具有极其重要的意义。通过精密磨削加工实验, 研究了合金化对 Al-18%Si 合金磨削加工性能的影响。结果表明, 合金化对 Al-18%Si 合金组织具有细化效果。添加 4%Cu 和 1%Mg(质量分数)的合金磨削表面粗糙度值最低, 较原始合金降低了 70%; 添加 4%Cu 和 2%Zn 的合金磨削力、磨削比能最低, 较原始合金分别降低了 50.9%、54.8% 与 46.6%, 而加入 4%Cu 和 2%Bi 与加入 4%Cu 和 2%Zn 的合金呈现出最佳的磨削表面形貌。可见, 合金化可以显著改善 Al-18%Si 合金的磨削加工性能。

关键词: Al-18%Si 合金; 合金化; 磨削力; 粗糙度

中图分类号: TG580; TH140.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)07-0806-08

Effect of Alloying on the Grinding Performance of Al-18 wt.% Si Alloy

TANG Ziyang, LUO Xi, LIAO Rui, LI Xiaosong

(School of Energy and Electrical Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, China)

Abstract: The coarse silicon phase in the microstructure of hypereutectic Al-Si alloys deteriorates their processing performance. Improving the processing performance of hypereutectic Al-Si alloys is highly important for industrial application of hypereutectic Al-Si alloys. The effect of alloying on the grinding performance of the Al-18 wt.% Si alloy was studied via precision grinding tests. Results show that alloying has a refining effect on the microstructure of the Al-18 wt.% Si alloy. Compared with the original alloy, the alloy containing 4 wt.% Cu and 1 wt.% Mg has the smoothest grinding surface, with a roughness reduction of 70%. Compared with the original alloy, the 4 wt.% Cu- and 2 wt.% Zn-containing alloys have significantly lower grinding forces and specific energies, with decreases of 50.9%, 54.8%, and 46.6%, respectively. The alloy with 4 wt.% Cu and 2 wt.% Bi and the alloy with 4 wt.% Cu and 2 wt.% Zn have the best surface morphology. Alloying significantly improves the grinding performance of the Al-18 wt.% Si alloy.

Key words: Al-18 wt.% Si alloy; alloying; grinding force; roughness

过共晶铝硅合金具有密度小、比强度高、耐磨性好、热膨胀系数低等优点, 在汽车、航空航天等领域应用广泛^[1]。然而, 过共晶铝硅合金中尺寸较大的硬脆硅相与铝基体间存在着较大的硬度差, 前者会在加工过程中严重割裂合金基体^[2], 使材料硬度、延展性降低, 极大地限制了合金应用前景; 因此, 提高过共晶铝硅合金加工性能, 对过共晶铝硅合金的工业化应用具有极其重要的意义。

目前, 控制和改善铝硅合金中硅相形态和分布的方法很多, 主要有变质处理、热处理、快速凝固、

半固态铸造、喷射沉积和电磁搅拌等^[3]。细化变质处理是目前经常使用的方法。细化变质处理既能减小初晶硅和共晶硅尺寸, 也能改善铝硅合金流动性, 降低收缩率, 减小热裂倾向, 改善其加工性能^[4]。全燕鸣等^[5]和张传合等^[6]研究表明, 对过共晶铝硅合金进行细化变质处理, 硅相变细小且分布弥散, 切削时容易与 Al 基体相协调, 主要发生塑性变形, 展现出较好的切削性能。除此之外, 在铝硅合金中引入 Cu^[7]、Mn^[8]、Mg^[9]、Fe^[10]、Zn^[11]、Ni^[12]、Bi^[13]等合金元素也能改善铝硅合金组织和加工性能。这些合金元素与 Al 和

收稿日期: 2025-10-01

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ30300)

作者简介: 唐子扬, 2001 年生, 硕士生。研究方向为铝硅合金性能优化与加工。Email: 407813946@qq.com

通信作者: 李小松, 1965 年生, 教授。研究方向为合金性能优化与加工。Email: songxli89@163.com

引用格式: 唐子扬, 罗熙, 廖睿, 李小松. 合金化对 Al-18%Si 合金磨削加工性能的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(7): 806-813.

TANG Z Y, LUO X, LIAO R, LI X S. Effect of alloying on the grinding performance of Al-18 wt.% Si alloy[J]. Foundry Technology, 2026, 47(7): 806-813.

Si 形成化合物,弥散分布在基体中,起到沉淀强化作用,以此提高基体强度,减少在加工过程中的撕裂现象,提高铝硅合金的加工性能。

过共晶铝硅合金加工较为困难,为了提高加工产品的可靠性,扩展其应用前景,需要采用合理的加工工艺,为此,国内外学者对过共晶铝硅合金的加工工艺开展了大量研究^[14]。刘东等^[15]采用金刚石刀具切削硅铝合金,发现工件进给量增加,切削力和切削温度同步增加,切削时应减小进给量,避免温度过高而缩短刀具使用寿命,降低切削加工性能。在各类加工工艺中,磨削加工技术可以得到最好的加工表面质量,且加工精度高,得到了各领域的广泛关注^[16]。然而,对于铝硅合金磨削加工性能的研究主要集中于磨料的选择^[17]与磨损机制的研究等方面^[18],为了进一步改善铝硅合金磨削加工性能,必须从磨削材料本身出发,系统性研究不同合金化对铝硅合金磨削加工性能的影响机理。因此本文通过添加多种合金元素处理 Al-18%Si 合金,观察其组织形貌的变化,测试其磨削加工性能,并探索 Al-18%Si(质量分数,下同)合金较为合理的加工参数,为其工业化应用提供理论支撑和数据依据。

1 实验材料与方法

1.1 合金化

实验用 Al-18%Si 合金采用质量比 99.9% 的纯铝和质量比 99.9% 的结晶硅熔炼而成。细化变质元素 Cu、Ni、Mg、Bi、Zn 以纯 Mg、Al-50Cu、Al-10Ni、Al-10Bi、Al-20Zn 中间合金的形式加入。合金成分如表 1 所示。

合金化处理:首先清理电阻炉及所用石墨坩埚,将 5 kW 电阻炉预热至 200 ℃,以防止炉中水汽残留。同时清理铸造钢模具等,并将实验用材料进行切割备用。然后在石墨坩埚中放入一半纯铝,以 5 ℃/min 的升温速率将电阻炉加热至 880 ℃,待其完全熔融后加入全部结晶硅及剩余一半纯铝,保

表1 合金化Al-18%Si合金成分

Tab.1 Composition of the alloyed Al-18 wt.% Si alloy (mass fraction/%)

No.	Si	Cu	Ni	Mg	Bi	Zn	Al
1	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Bal.
2	18.0	4.0	2.0	0.0	0.0	0.0	Bal.
3	18.0	4.0	0.0	1.0	0.0	0.0	Bal.
4	18.0	4.0	0.0	0.0	2.0	0.0	Bal.
5	18.0	4.0	0.0	1.0	2.0	0.0	Bal.
6	18.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.6	Bal.

温 60 min,再匀速搅拌使熔融铝硅合金充分混合,以 10 ℃/min 的降温速率实电阻炉降温,待温度降至 800 ℃,分别加入纯 Mg、Al-50Cu、Al-10Ni、Al-10Bi、Al-20Zn 中间合金对其进行合金化处理;搅拌 1 次,静置保温 30 min,将电阻炉冷却至 740 ℃,在合金熔液中压入六氯乙烷(加入量为熔融合金质量的 0.5%)进行精炼除气,静置 8~10 min 后,扒渣,待降温至 720 ℃时,缓慢浇铸到已预热至 200 ℃左右的金属模具中,自然冷却后取出。试样尺寸为 $\phi 20$ mm $\times$ 100 mm,每种合金成分试样浇注 3 根,如图 1 所示。

1.2 磨削加工实验

采用 MGK7120X6/F 型高精度数控平面磨床进行磨削试验,铝硅合金加工试样为 20 mm $\times$ 12 mm $\times$ 0.8 mm 的长方体。磨削加工试验及磨削力数据采集示意图如图 2 所示。

磨削加工试验采用单因素法,磨削用树脂金刚石砂轮尺寸为 200 mm $\times$ 32 mm $\times$ 20 mm $\times$ 4 mm,粒度为 400#,主轴转速为 3 000 r/min 恒定不变,其它磨削加工参数如下:①磨削深度 $A_p=8$ μ m,工件移动速度 V_w 分别为 5、10、15、20 m/min。②工件移动速度 $V_w=10$ m/min,磨削深度 A_p 分别为 5、8、11 μ m。③采用单向逆磨+湿磨的磨削方式。

采用 Kistler 测力仪测试磨削力。采用 JB-5C 型精密粗糙度轮廓仪测量磨削加工表面粗糙度,测量取样长度为 4 mm,沿磨削表面垂直和平行磨削方向测量,测量点均匀分布在工件磨削平面,取 5 个测量

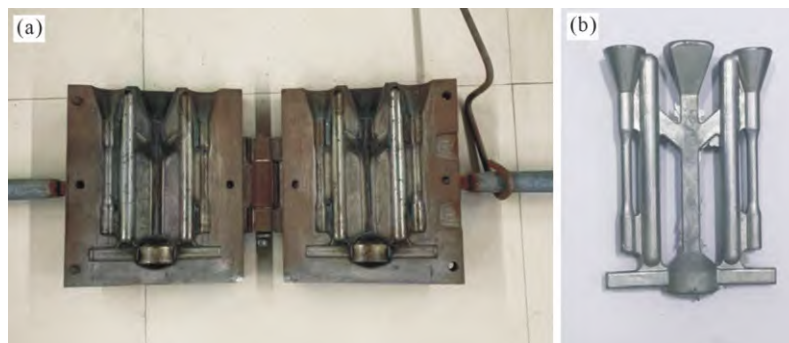


图1 模具与浇注试样:(a) 模具;(b) 试样

Fig.1 Mold and casting sample: (a) mold; (b) sample

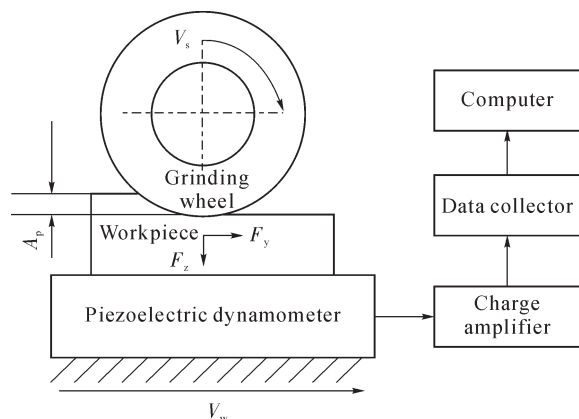


图2 磨削力测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of the grinding force test

点,其平均值为粗糙度测量结果。将磨削加工试样用酒精进行清洗,并在 60 ℃ 的恒温水浴锅中超声波清洗,采用超景深显微镜 VHX5000 观察磨削加工表面形貌。采用激光共聚焦显微镜观察合金的显微组织,同时采用 Nano Measurer 软件测定晶粒平均尺寸。此外,借助 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)及能谱仪(EDS)对合金物相组成进行观察和分析。

2 实验结果及讨论

2.1 合金显微组织

图3为 Al-18%Si 合金经合金化前后的合金显微组织。由图3a可见,在未经合金化的 Al-18%Si 合金中, $\alpha(\text{Al})$ 相呈现出柱状晶粗大,二次枝晶呈树枝状的形态。而初晶硅多为块状,共晶硅则呈长针叶

状,且不规则地分布在基体中。

由图3b~f可见,合金化能加剧 $\alpha(\text{Al})$ 相的生长,尺寸呈现增大的趋势,但树枝状枝晶和二次枝晶数量增多;这是由于 Cu 在基体中扩大了合金的结晶温度范围,促使合金以体积凝固的方式凝固,抑制了枝晶在原方向上的生长趋势,促使枝晶向其他方向生长,从而形成发达的二次树枝晶。而加入足量的其他合金元素,则使固溶体的生长方式逐渐向自由的树枝晶形貌发展,从而形成发达的树枝晶^[10]。初晶硅呈现为块状,尺寸形貌变化较为明显。图3b和f合金中初晶硅尺寸有减小的趋势,其中,加入 4%Cu+2%Zn 的合金中粗大块状初晶硅解体,变成了碎片状,与原始试样相比,尺寸减小了 28.5%,如表2所示,且棱角钝化。而在图3c~e中,由于 1%Mg 和 2%Bi 的加入使初晶硅的尺寸有增大趋势。共晶硅的尺寸形貌变化显著,呈现为短杆状,将 $\alpha(\text{Al})$ 和初晶硅包围起来。图3b~e中部分共晶硅已细化。图3d和f中共晶硅的变化最为显著,均转变为短杆状,由于 2%Zn 与 2%Bi 的加入,共晶硅呈现为更细小的短杆和颗粒状,并以网格状分布合金中。这是因为在结晶过程中,当温度降低时,液相中的 Zn 或 Bi 会逐渐聚集并吸附于共晶硅界面前沿,限制共晶硅在晶面上的生长,迫使共晶硅改变堆积顺序,从而阻碍了共晶硅的长大^[11,19]。

2.2 磨削力

图4和5为 Al-18%Si 合金在合金化前后,在不改变其他磨削参数的条件下, V_w 与 A_p 对 Al-18%Si

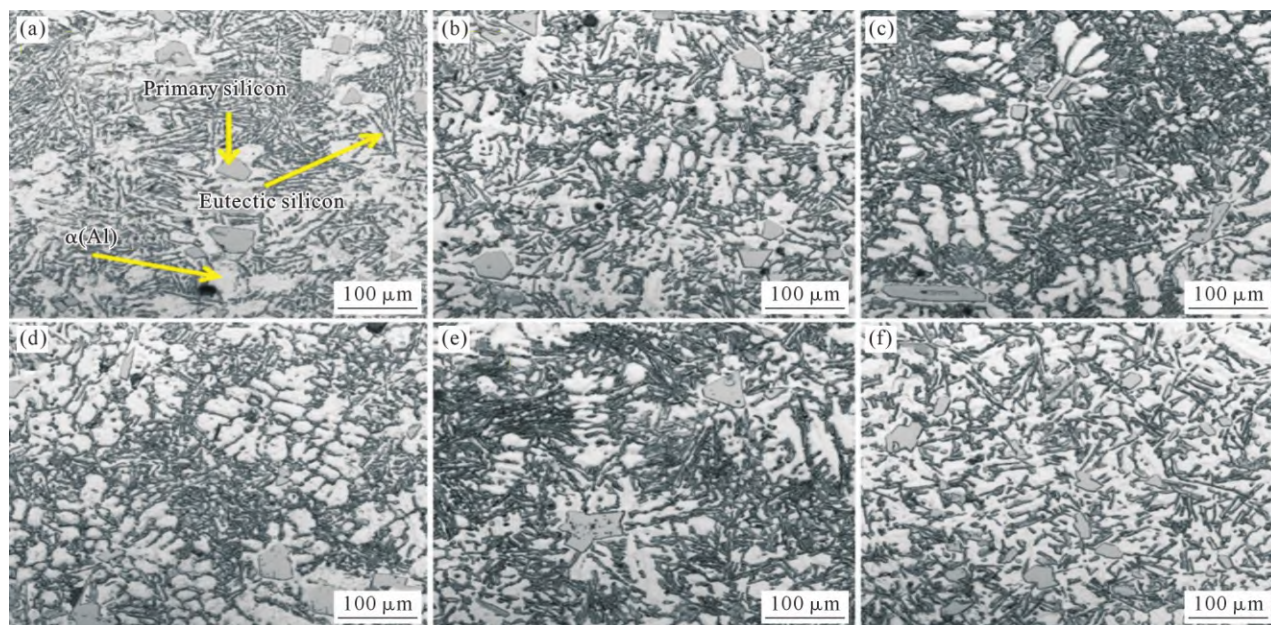


图3 合金化对 Al-18%Si 合金显微组织的影响:(a) 0%; (b) 4%Cu, 2%Ni; (c) 4%Cu, 1%Mg; (d) 4%Cu, 2%Bi; (e) 4%Cu, 1%Mg, 2%Bi; (f) 4%Cu, 2%Zn

Fig.3 Effects of alloying on the microstructure of the Al-18 wt.% Si alloy: (a) 0 wt.%; (b) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Ni; (c) 4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg; (d) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Bi; (e) 4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg, 2 wt.% Bi; (f) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Zn

表 2 合金化 Al-18%Si 初晶硅尺寸
Tab.2 Average size of the primary silicon in the alloyed Al-18 wt.% Si alloy

Sample	Al-18 wt.% Si	4 wt.% Cu, 2 wt.% Ni	4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg	4 wt.% Cu, 2 wt.% Bi	4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg, 2 wt.% Bi	4 wt.% Cu, 2 wt.% Zn
Average size/ μm	33.68	30.88	43.12	54.68	49.82	24.10

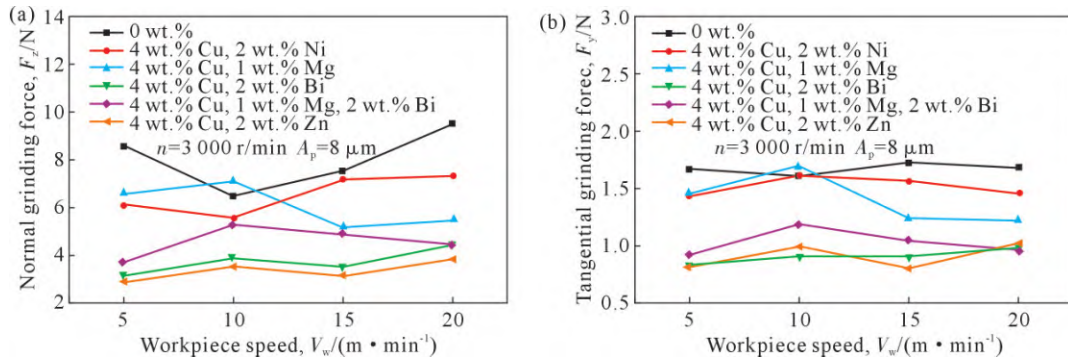


图 4 不同工件移动速度 V_w 下合金化 Al-18%Si 合金磨削力:(a) 法向磨削力 F_z ; (b) 切向磨削力 F_y
Fig.4 Grinding forces of the alloyed Al-18 wt.% Si alloy at different workpiece moving speeds V_w : (a) normal grinding force F_z ; (b) tangential grinding force F_y

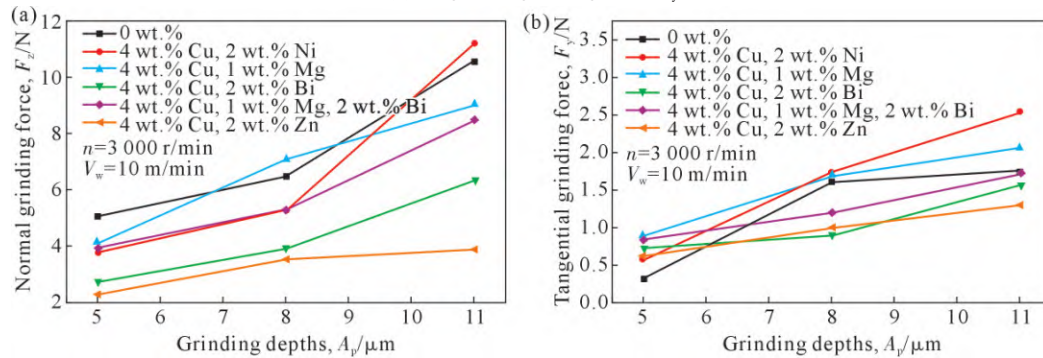


图 5 不同磨削深度 A_p 下合金化 Al-18%Si 合金磨削力:(a) 法向磨削力 F_z ; (b) 切向磨削力 F_y
Fig.5 Grinding forces of the alloyed Al-18 wt.% Si alloy at different grinding depth A_p : (a) normal grinding force F_z ; (b) tangential grinding force F_y

合金的法向磨削力(F_z)和切向磨削力(F_y)的影响规律。如图 4 所示,当其它磨削参数相同时,合金化 Al-18%Si 合金法向磨削力和切向磨削力均随工件移动速度的增加变化不大,且呈现波动性无规律变化。这是因为工件移动速度的变化并不会改变磨粒与工件的接触面积,而磨削力近似等于磨削弧区内参与切削的磨粒载荷的总和,故当工件移动速度改变时并不会引起磨削力的变化。而合金化 Al-18%Si 合金磨削力受磨削深度的影响较大,均随着磨削深度的增加而增大,如图 5 所示。这是由于增大磨削深度不仅会使排屑困难,加剧砂轮的磨损,还会使磨粒与工件的接触面积随之增大,导致磨削弧区内的有效磨粒数增多,磨削力增加。因此,磨削力受磨削深度的影响较大^[17]。同时还发现,合金化能有效降低合金法向磨削力和切向磨削力。在保持砂轮转速不变的情况下,不管工件移动速度 V_w 和磨削深度 A_p 如何变化,总体上,不同合金元素合金化铝硅合金的磨削力的变化趋势为:4%Cu+2%Zn<4%Cu+2%Bi<4%Cu+1%Mg+2%Bi<4%Cu+1%Mg<4%Cu+2%

Ni<未合金化合金。当 A_p 不变时,如图 3a 所示,与未合金化处理的合金相比,加入 4%Cu+2%Zn 的合金法向磨削力降低了 54.8%,切向磨削力下降了 50.9%(图 4b)。当 V_w 不变时,与未合金化处理的合金相比,加入 4%Cu+2%Zn 的合金法向磨削力降低了 50%(图 5a),切向磨削力下降了 50%(图 5b)。这是因为和其他合金组合相比,4%Cu+2%Zn 对硅相组织细化效果更显著。Zn 元素的添加使合金中初晶硅和共晶硅形态发生转变^[11],减少了合金中的硬质点,减轻了合金和砂轮之间的碰撞,因而减小了和合金与砂轮之间的摩擦力,故其磨削力减小明显。如图 4 所示,与未合金化处理的合金相比,加入 4%Cu+2%Bi 的合金,切向磨削力下降了 50.3%,加入 4%Cu+1%Mg+2%Bi,下降了 44.9%,可见,合金中的 Bi 元素在磨削过程中起到了积极作用,减小了合金受到的磨削力。这主要是由于 Bi 元素具有熔点低、硬度小的物理特性,在合金中以单质的形式游离分布在集体中。如图 6 所示,磨削过程中受热易融化,形成油膜,降低工件表面的摩擦系数,提高了抗咬合负载,补偿合金的

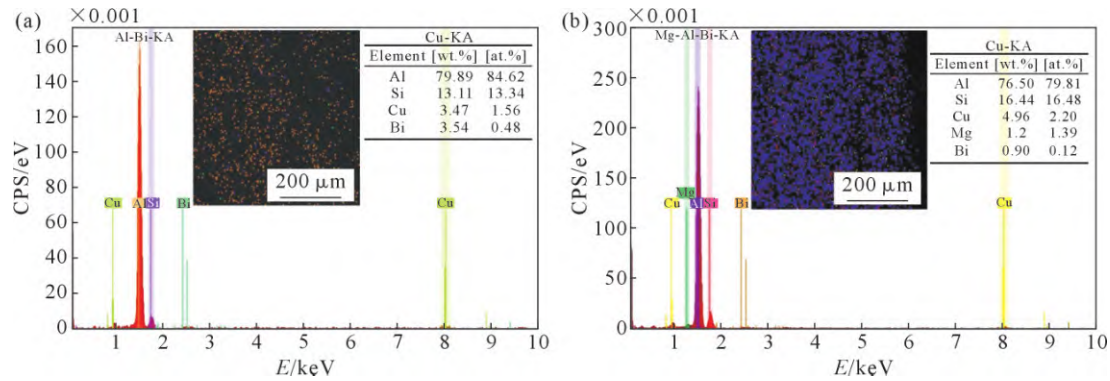


图 6 EDS 分析结果:(a) 4%Cu, 2%Bi; (b) 4%Cu, 1%Mg, 2%Bi

Fig.6 EDS analysis results: (a) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Bi; (b) 4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg, 2 wt.% Bi

收缩,因而减小了磨削力^[17]。而添加 4%Cu+2%Ni 与 4%Cu+1%Mg 的合金则在大部分情况下呈现出较大的磨削力。这与两种合金中初晶硅增大,共晶硅仅部分细化有关,而更主要是由加入合金化元素后所生成的金属间化合物所导致。加入 4%Cu+1%Mg 时,合金组织由 $\alpha(\text{Al})$ 、共晶 Si 、 Mg_2Si 与 Al_2Cu 组成,如图 7a 所示,新的化合物相成为了合金硬度的增强相^[10]。而加入 4%Cu+2%Ni 时,如图 7b 所示,合金中生成了 $\text{Al}_7\text{Cu}_{23}\text{Ni}$ 、 Al_9Si 、 Al_3Ni 金属化合物相,富 Ni 相会经历从 $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ 相到 Al_3CuNi 相再到 Al_3Ni 相的变化,使生成的 Al_3Ni 相含量增加,导致硬度大幅提升^[12]。

2.3 磨削比能

磨削比能是评价磨削加工效率的重要指标。其计算公式为:

$$p = \frac{F_y \times V_s}{V_w \times A_p \times b} \quad (1)$$

式中, p 为磨削比能, J/mm^3 ; F_y 为切向磨削力, N ; V_s 为砂轮线速度, m/s ; V_w 为工件移动速度, m/min ; A_p 为磨削深度, μm ; b 为工件宽度, mm 。其中, $V_s = 30 \text{ m/s}$, $b = 20 \text{ mm}$ 。

图 8 为 Al-18%Si 合金在合金化前后,在其他磨削参数相同的条件下,工件移动速度与磨削深度对 Al-18%Si 合金的磨削比能的影响规律。

合金化 Al-18%Si 合金的磨削比能受工件移动速度的影响更大,且随着工件移动速度的增大而降低;这是因为在较大工件移动速度时,材料是以大量级的形式被去除的,去除单位体积材料所需的能量下降,所以磨削比能降低;而磨削深度的变化并不会

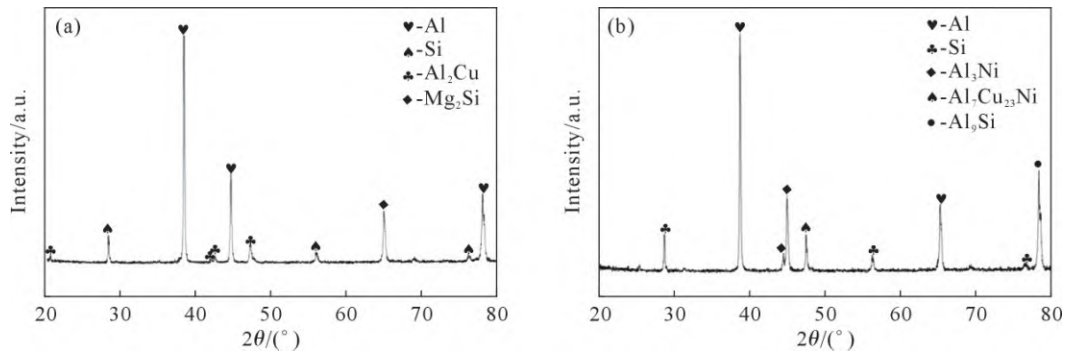


图 7 XRD 图谱:(a) 4%Cu, 1%Mg; (b) 4%Cu, 2%Ni

Fig.7 XRD patterns: (a) 4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg; (b) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Ni

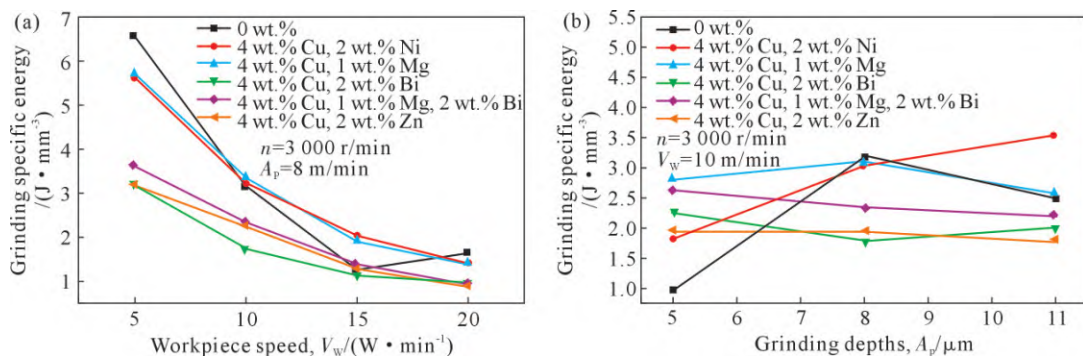


图 8 不同磨削参数下合金化 Al-18%Si 合金磨削比能:(a) 工件移动速度;(b) 磨削深度

Fig.8 Grinding specific energy of the alloyed Al-18 wt.% Si alloy under different grinding parameters: (a) workpiece moving speed; (b) grinding depth

改变材料的去除形式,因此,磨削比能受工件移动速度的影响更大^[20]。其中,添加 4%Cu+2%Zn 的合金呈现出最小的磨削比能,与未处理的合金相比,磨削比能降低了 46.6%,而添加 4%Cu+2%Bi 的合金则在大部分情况下也呈现出较小的磨削比能。这是由于合金元素在铝硅合金中冷却时沉淀析出并形成强化相弥散地分布在基体中,提高铝硅合金耐磨性能^[21],降低了磨削深度对磨削比能的影响。而添加 4%Cu+2%Bi 的合金组织中游离态的 Bi 单质会在摩擦时熔化,并在表面形成润滑膜,这层液体薄膜会在对磨面之间滑动时,促使对磨面间距增加,减少对磨面间的磨损,降低磨削过程中的能量消耗^[17]。

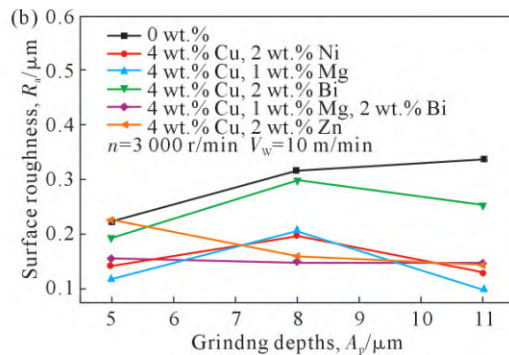
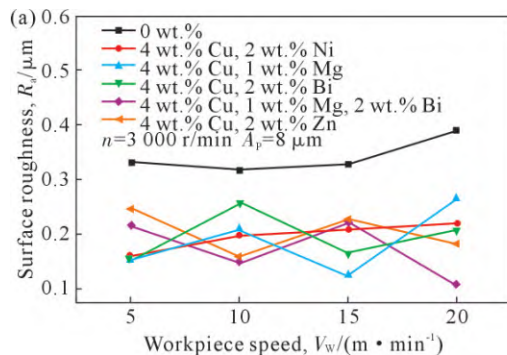


图 9 不同磨削参数下合金化 Al-18%Si 合金磨削表面粗糙度:(a) 工件移动速度;(b) 磨削深度

Fig.9 Surface roughness of the alloyed Al-18 wt.% Si alloy under different grinding parameters: (a) workpiece moving speed; (b) grinding depth

合金的磨削表面粗糙度受磨削深度的影响更大^[22]。其中,添加 4%Cu+1%Mg 的合金呈现出最小的磨削表面粗糙度,其值为 0.098 μm ,与未处理合金磨削表面粗糙度 0.337 μm 相比,降低了 70%。这是 Cu 比 Mg 更容易固溶到 $\alpha(\text{Al})$ 中^[10],而部分无法固溶到 $\alpha(\text{Al})$ 中的 Mg 与晶体中的 Si 反应,形成 Mg_2Si 相,这有利于提高合金基体的硬度和强度,同时,形成的强化相可以起到耐磨承载的作用^[23],从而使得合金的磨削表面粗糙度降低。

2.5 磨削加工表面形貌

图 10 和 11 为 Al-18%Si 合金经合金化前后的磨削加工表面形貌。由图 10 可见,未经合金化处理的 Al-18%Si 合金的表面存在犁沟、孔洞、微裂纹等缺陷。对比图 11a~e 可见,经合金化处理后,Al-18%Si 合金表面缺陷减少,磨削表面的质量得到了改善。其中,添加 4%Cu+2%Bi 与 4%Cu+2%Zn 的合金磨削表面形貌最佳(图 11c 和 e),磨削表面缺陷最少,仅有磨粒与表面接触时留下的磨痕。

由于铝基体相对较软,在磨削过程中,硅相会受到冲击挤压并发生解离、脱落或位移,使磨削表面质量下降;而经过合金化后,硅相尺寸减小,形成的强化相则弥散地分布在基体中,使合金基体的强度和

2.4 磨削表面粗糙度

图 9 展示了 Al-18%Si 合金在合金化前后的表面粗糙度的变化,通过控制单一变量,研究了 V_w 和 A_p 对合金化合金磨削表面粗糙度的影响。 A_p 对合金化 Al-18%Si 合金的磨削表面粗糙度受的影响更大,且随着磨削深度的增大而增大;这是由于磨削深度越大,工件与砂轮间的压力就越大,而铝基体较软,受到砂轮挤压后,部分硬度较大的初晶硅颗粒会脱落断裂,导致工件表面缺陷增多粗糙度变大。而工件移动速度的增大不仅对工件与砂轮间的压力影响较小,还会使发生塑性变形的铝基体在材料表面发生涂抹现象,使表面形貌呈现出一定完好性,因此

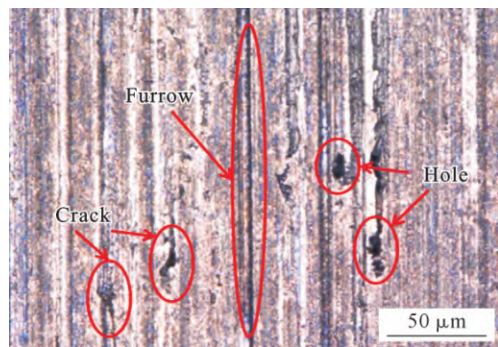


图 10 Al-18%Si 合金磨削表面形貌

Fig.10 Surface morphology of the Al-18% Si alloy during grinding

硬度增加,这就使得硅相与基体间的硬度差下降,硅相难以从基体上剥离。此外,工件与砂轮间的摩擦会使磨削表面温度升高,使磨削表面质量恶化,而合金化不仅能在合金中形成高温下较稳定的金属间化合物来提高合金的强度与高温性能,同时还可以使合金在高温下形成尺寸较小且在晶界处弥散分布的析出相,以此阻碍位错攀移和钉扎晶界滑动,进一步提高合金的高温性能^[24]。此外,Bi 会在磨削过程中熔化成液态,于工件和砂轮之间形成液态膜,减少二者之间的磨损;液态的 Bi 还能填补表面孔洞,增加磨削面的支撑面积,减小单位面积上的压力,使合金表面

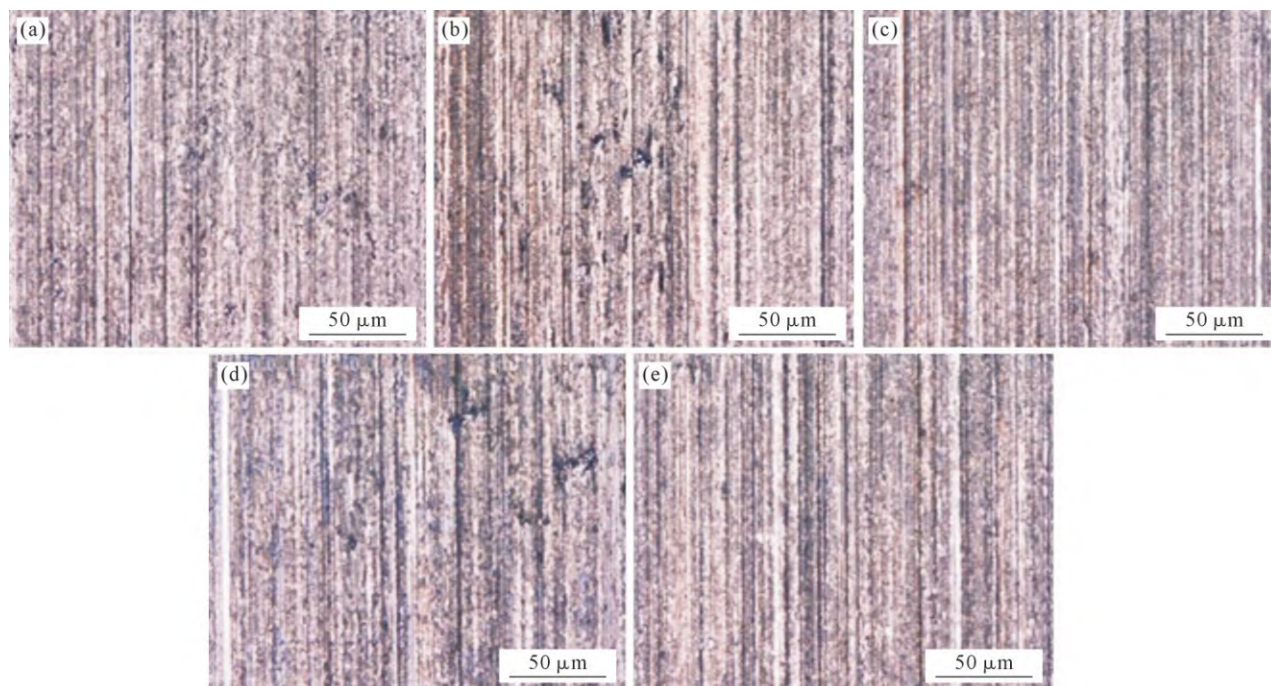


图 11 合金化 Al-18%Si 合金磨削表面形貌:(a) 4%Cu, 2%Ni; (b) 4%Cu, 1%Mg; (c) 4%Cu, 2%Bi; (d) 4%Cu, 1%Mg, 2%Bi; (e) 4%Cu, 2%Zn

Fig.11 Surface morphology of the alloyed Al-18 wt.% Si alloy during grinding: (a) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Ni; (b) 4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg; (c) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Bi; (d) 4 wt.% Cu, 1 wt.% Mg, 2 wt.% Bi; (e) 4 wt.% Cu, 2 wt.% Zn

的磨损量减小^[13],因而使合金具有好的表面形貌。

3 结论

(1)合金化能加剧 α (Al)相的生长,树枝状枝晶和二次枝晶数量增多;初晶硅的形貌变化较小,维持块状形态;共晶硅的形态变化较大,转变为较短的针状组织。其中加入了 4%Cu+2%Zn 与 4%Cu+2%Bi 合金的共晶硅形态呈现为更细小的短杆和颗粒状。

(2)相同磨削参数条件下,合金化 Al-18%Si 合金的磨削比能受工件移动速度的影响更大,且随着工件移动速度的增大而降低;而磨削力与表面粗糙度则受磨削深度的影响更大,且随着磨削深度的增大而增大;其中添加 4%Cu+1%Mg 的合金磨削表面粗糙度值最低,较原始合金降低了 70%,添加 4%Cu+2%Zn 的合金磨削力、磨削比能最低,较原始合金分别降低了 50.9%、54.8%与 46.6%。

(3)相同磨削参数条件下,加入 4%Cu+2%Bi 与加入 4%Cu+2%Zn 的合金磨削表面形貌最佳,其基体挖除、孔洞、微裂纹现象减少,具有较好的表面形貌。因此,合金化可以显著改善 Al-18%Si 合金的磨削加工性能。

参考文献:

- [1] 孙晓东,郭建,黄小婷,刘英. 过共晶铝硅合金的研究进展[J]. 铸造技术,2017, 38(4): 758-761.
SUN X D, GUO J, HUANG X T, LIU Y. Research progress of

hypereutectic aluminum-silicon alloys [J]. Foundry Technology, 2017, 38(4): 758-761.

- [2] ZHANG L B, MAO F, LIU S H, WANG X F, TIAN C, CHEN C, HUANG Z H, FU W S, DING Y J, YU H, WEI S Z. Modification of primary silicon in hypereutectic Al-Si alloys by chemical modifiers: A comprehensive review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1044: 184367.
- [3] FANG X G, ZHANG T Y, DONG B K, YUAN Z Y, HUANG Z Y, YAN F, ZU F Q. Simultaneous refinement of α -Al and modification of Si in Al-Si alloy achieved via the addition of Y and Zr[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 1822-1833.
- [4] LIU N C, KANG G S, LIU Z X. Effect of compound modification on microstructure and properties of high silicon aluminum alloy[J]. Advanced Materials Research, 2012, 476-478: 114-117.
- [5] 全燕鸣,周泽华,张发英. 过共晶铝硅合金组织对切削加工性能的影响[J]. 机械工程学报, 1998, 34(1): 1-6.
QUAN Y M, ZHOU Z H, ZHANG F Y. Effect of structure of hypereutectic Al-Si alloy on machinability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, 34(1): 1-6.
- [6] 张传合,丁紫阳,任书卿,李怀武,赵红亮. 变质处理对 Al-20%Si 合金显微组织及切削性能的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(5): 1019-1021.
ZHANG C H, DING Z Y, REN S Q, LI H W, ZHAO H L. Effect of modification on microstructure and machinability of Al-20%Si alloy[J]. Foundry Technology, 2014, 35(5): 1019-1021.
- [7] ZEREN M, KARAKULAK E. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(8): 1698-1702.

- [8] 陈显均,李林鑫,梅静. Mn 含量及冷却速度对过共晶铝硅合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(3): 562-564.
CHEN X J, LI L X, MEI J. Effect of Mn content and cooling speed on microstructure and properties of hypereutectic Al-Si alloy[J]. Foundry Technology, 2018, 39(3): 562-564.
- [9] ZHU Z, WANG Y F, SHI D M, WANG J H, LIU Y, WU C J, SU X P. Optimizing the microstructure and enhancing the mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys by Mg addition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32: 457-469.
- [10] YANG Y T, HUANG S Y, ZHENG J, NAGAUMI H, YANG L, CHENG X N, HAN W J. The role of Cu, Mg and Fe in microstructure and deformation heterogeneity of high-pressure die-casting Al-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1046: 184919.
- [11] 赵浩峰,王玲,刘旭东. 锌对铝硅合金组织和性能的影响研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1994(2): 5-7.
ZHAO H F, WANG L, LIU X D. The effects of Zn on microstructure and properties of Al-Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1994(2): 5-7.
- [12] 陈今龙,叶兵,蒋海燕,王其贵,杨文英,王渠东,丁文江. Ni 对 Al-Si-Cu-Ni-Mg 过共晶活塞合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(4): 32-37.
CHEN J L, YE B, JIANG H Y, WANG Q G, YANG W Y, WANG Q D, DING W J. Effects of Ni on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Ni-Mg hypereutectic piston alloy [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(4): 32-37.
- [13] PEREIRA C L, GOMES L F, GARCIA A, SPINELLI J E. Comparing the roles of Sb and Bi on microstructures and application properties of the Al-15% Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 878: 160343.
- [14] 宋长远. 高进给铣削铝硅合金切削特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2024.
SONG C Y. Study on cutting characteristics of high feed milling Al-Si alloy[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2024.
- [15] 刘东,陈五一. 硅铝合金车削中切削力和切削温度的研究[J]. 有色金属, 2006, 58(1): 39-41.
LIU D, CHEN W Y. Cutting force and cutting temperature of turning Al-Si alloy[J]. Nonferrous Metals, 2006, 58(1): 39-41.
- [16] WEI C X, HE C L, CHEN G, SUN Y Q, REN C Z. Material removal mechanism and corresponding models in the grinding process: A critical review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 103: 354-392.
- [17] 陈世隐. 大直径细粒度钎焊金刚石砂轮的制备及其磨削性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2017.
CHEN S Y. Research on the preparation and grinding performance of large diameter fine-grained brazed diamond wheel[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.
- [18] FU B, GU Y, LIN J Q, ZHOU X Q, GAO T Y, WANG J L, HAN L L, ZHANG Y L. Pulsed laser remelting non-resonant vibration assisted grinding Al-Si alloy[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 293: 110226.
- [19] 刘童. 复合变质及合金化对 Al-13%Si 组织及磨削性能的影响[D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2021.
LIU T. Effect of combination modification and alloying on microstructure and grinding properties of Al-13% Si [D]. Yueyang: Hunan University of Science and Technology, 2021.
- [20] 赵恒华,孙顺利,高兴军,蔡光起. 超高速磨削的比磨削能研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(5): 453-456.
ZHAO H H, SUN S L, GAO X J, CAI G Q. Study on specific grinding energy of ultra high speed grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(5): 453-456.
- [21] QIN Y S, YAN Z X, WU Q H, JIANG A L, LI Y J, MA S X, LÜ S L, LI J Y. Development of a novel high strength Al-Si-Cu-Ni alloy by combining micro-alloying and squeeze casting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 967: 171780.
- [22] WANG Q Z, KANG N, MANSORI M E, YU T Y, HADROUZ M E, HUANG X H, LIN X. Effect of Ti on the microstructure and wear behavior of a selective laser melted Al-Cu-Mg-Si alloy[J]. Wear, 2023, 523: 204790.
- [23] XUE L W, JIA H L, MA P K, SONG J W, ZHA M, WANG H Y. Influence of Mg and Cu on precipitation behaviors and mechanical properties of Al-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 908: 146775.
- [24] 余剑武,肖清,罗红,刘智康,尹韶辉. 单颗 CBN 磨粒磨削 20Cr-Mo 的微观成屑过程研究[J]. 材料导报, 2017, 31(10): 146-150.
YU J W, XIAO Q, LUO H, LIU Z K, YIN S H. Research on micro chip formation process of 20CrMo by single CBN grain grinding [J]. Materials Reports, 2017, 31(10): 146-150.

(责任编辑:杨浩雪)