

硅铝合金研磨与抛光加工有限元仿真分析

马富军^{1*}, 李欢²

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²河南工程学院外语学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

随着精密加工技术的不断发展, 硅铝合金在航空航天、汽车制造等领域的应用日益广泛。文章基于ABAQUS有限元分析软件, 采用ABAQUS/Explicit模块对硅铝合金的研磨抛光加工过程进行了仿真分析, 重点研究了不同摩擦系数对硅铝合金表面形貌、材料去除量和剩余应力的影响。通过建立硅铝合金部件、弹性基体和磨粒的有限元模型, 模拟了不同摩擦系数下的研抛加工过程。研究表明, 摩擦系数对硅铝合金的变形程度和最大残余应力具有显著影响; 摩擦系数的增加使得材料的塑性变形加剧, 且最大残余应力逐渐增大。同时, 摩擦系数对表面形貌的影响在较高摩擦系数下趋于饱和, 表明摩擦系数对表面质量的影响逐渐减弱。等效塑性应变的分析结果显示, 摩擦系数的增大增强了磨粒与工件之间的接触作用力, 从而提高了材料的去除量, 但在摩擦系数进一步增大的情况下, 其增效作用逐渐减弱。本研究为优化硅铝合金研抛加工中的工艺参数提供了理论依据, 有助于提高加工效率和表面质量。

关键词

硅铝合金, 研抛加工, 摩擦系数, 有限元仿真, 表面形貌, 材料去除

Finite Element Simulation Analysis of Grinding and Polishing Process of Silicon-Aluminum Alloy

Fujun Ma^{1*}, Huan Li²

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Foreign Languages, Henan University of Engineering, Zhengzhou Henan

Received: Apr. 30th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 31st, 2025

*第一作者。

Abstract

With the continuous development of precision machining technology, the application of silicon-aluminum alloy has become increasingly widespread in fields such as aerospace and automotive manufacturing. Based on ABAQUS finite element analysis software, this paper uses the ABAQUS/Explicit module to perform simulation analysis of the grinding and polishing process of silicon-aluminum alloy, focusing on the influence of different friction coefficients on the surface morphology, material removal rate, and residual stress of silicon-aluminum alloy. By establishing finite element models of the silicon-aluminum alloy component, elastic matrix, and abrasive particles, the grinding and polishing process under different friction coefficients was simulated. The results show that the friction coefficient has a significant impact on the degree of deformation and maximum residual stress of the silicon-aluminum alloy; increasing the friction coefficient intensifies the plastic deformation of the material and gradually increases the maximum residual stress. Additionally, the effect of the friction coefficient on the surface morphology tends to saturate at higher friction coefficients, indicating that the influence of the friction coefficient on surface quality gradually diminishes. The analysis of equivalent plastic strain shows that an increase in the friction coefficient enhances the contact force between the abrasive particles and the workpiece, thereby increasing the material removal rate. However, as the friction coefficient continues to increase, its effect on material removal gradually weakens. This study provides a theoretical basis for optimizing the process parameters in the grinding and polishing of silicon-aluminum alloy, contributing to improvements in machining efficiency and surface quality.

Keywords

Silicon-Aluminum Alloy, Grinding and Polishing, Friction Coefficient, Finite Element Simulation, Surface Morphology, Material Removal

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着精密元器件加工质量要求的提高,在蓝宝石、碳化硅、玻璃、氮化镓、铁氧体磁铁、单晶硅、硅铝合金(硅含量超过 11.7%)等硬脆材料的高精度加工领域,要求表面粗糙度和应力损伤深度达到纳米级别,因此超精密的研磨抛光已成为当前研究的热点[1]-[3]。硅铝合金作为一种高性能复合材料,因其优异的力学性能、耐腐蚀性和加工性能,在航空航天、汽车制造等领域得到了广泛应用。

ABAQUS 是一套拥有非常强大功能的有限元工程模拟软件,是目前最先进的大型通用有限元分析软件之一。ABAQUS 不仅可以解决相对简单的线性分析问题,还可以解决许多复杂的非线性问题[4][5]。ABAQUS 只需要知道被分析零部件的几何形状、材料性质、边界条件、载荷等数据就可以进行有限元仿真计算。对于分析非线性问题,ABAQUS 软件可以根据所提供的参数自动选择合适的载荷增量和收敛准则,软件自身在仿真分析过程中自动地对这些参数进行调整,这样可以保证最后的计算结果准确。

本文使用 ABAQUS 的 ABAQUS/Explicit 模块来对硅铝合金研磨抛光加工中多颗磨粒的材料去除过程进行有限元仿真分析。

2. 硅铝合金研抛加工仿真方案设计

本章旨在探讨硅铝合金研抛加工过程中各种工序参数对于实验结束后其外层形态、物质移除率和剩余压力的影响模式, 选取磨料与硅铝合金间的摩擦因子参数为主要研究因素。

在 ABAQUS 软件中, 磨粒和硅铝合金之间摩擦系数的区间通常是 0 到 1, 它反映了两者之间的润滑状态。在此模拟实验中, 我们选定了四个不同的摩擦系数, 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8, 以探究它们对于硅铝合金研抛过程中的影响, 同时保持其它工艺条件的恒定不变。

3. 硅铝合金研抛加工有限元仿真实施步骤

一个完整的 ABAQUS 仿真分析通常包括以下八个主要步骤。

3.1. 定义问题与创建部件模型

为了模拟硅铝合金研磨加工过程中的多粒磨料去除, 我们构建了硅铝合金部件、弹性基底垫和磨料部件的模型。如图 1 所示, 硅铝合金部件模型尺寸为直径 58 μm , 厚度 5.5 μm , 磨粒直径大小为 6 μm 。

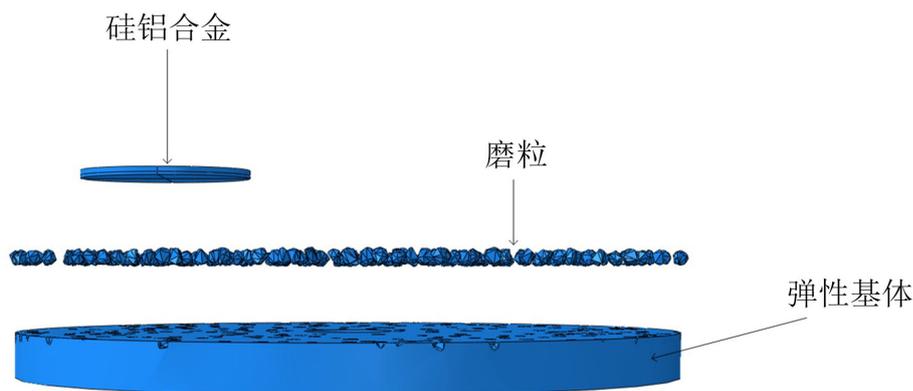


Figure 1. Component models of silicon-aluminum alloy, elastic matrix, and abrasive particles
图 1. 硅铝合金、弹性基体及磨粒的部件模型

3.2. 选择材料属性

在模拟分析过程中, 我们选择了公式(1)来描述硅铝合金的指数非线性材料模型作为其本构模型[6]-[8]。

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_y \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_y} \right)^n & \text{if } E\epsilon \leq \sigma_y \\ E\epsilon & \text{if } E\epsilon > \sigma_y \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ 为材料屈服应力, n 为材料应变硬化指数, E 为材料的弹性模量, ϵ 为材料的应变。

本文中所用硅铝合金的材料参数列于表 1, 将这些参数代入公式(1), 即可得到硅铝合金的应力 - 应变曲线, 该曲线在图 2 中呈现。研抛垫基体依旧选择 Mooney-Rivlin 模型来描述弹性磨具基体的超弹性特征, 其中参数 $C10 = 0.2897$ 、 $C01 = 0.0599$ 、 $D1 = 0$ [9]。在进行仿真分析时, 将硅铝合金试件规定为材料参数, 而由于磨粒比硅铝合金硬度更高, 在仿真分析中将磨粒定为刚体, 避免形变, 可提高计算效率。

Table 1. Relevant parameters of silicon-aluminum alloy materials

表 1. 硅铝合金材料相关参数

| 材料名称 | 弹性模量(GPa) | 屈服应力(MPa) | 密度(Kg/m ³) | 泊松比 | 应变硬化指数 |
|------|-----------|-----------|------------------------|-----|--------|
| 硅铝合金 | 130 | 150 | 2400 | 0.3 | 0.1 |

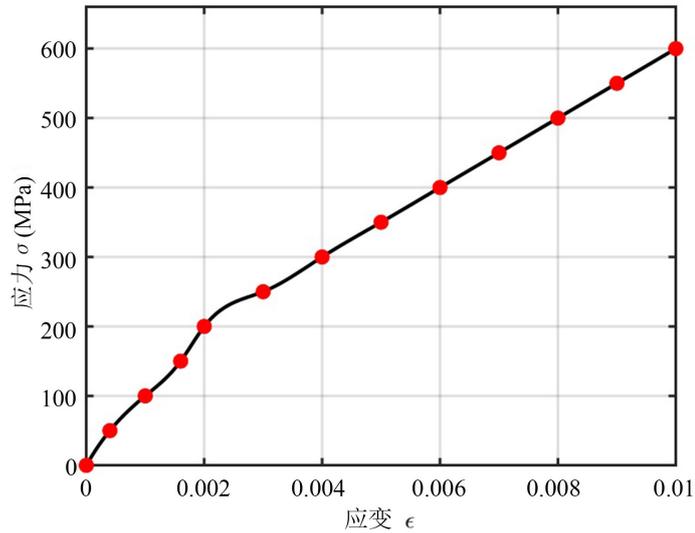


Figure 2. Stress-strain curve of silicon-aluminum alloy

图 2. 硅铝合金应力 - 应变曲线

3.3. 装配部件

把事先建立好的硅铝合金部件、弹性基体部件和磨粒部件的模型引入到仿真环境里，并进行初次位置的设定和调整，确保它们之间的位置和接触符合实际工艺条件和设计要求。如图 3 所示，硅铝合金部件被放置在研抛环中间位置，弹性基体部件位于硅铝合金部件的下方，而磨粒部件则均匀分布在弹性基体的上方区域，用以模拟实际加工过程中半固结磨粒的分布和作用情况。这一步的目的是提供准确的初始条件，保证结果的可靠性。

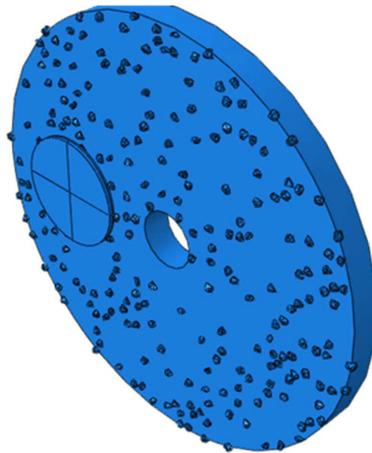


Figure 3. Schematic diagram of multi-abrasive particles polishing assembly

图 3. 多颗磨粒研抛装配示意图

3.4. 创建分析步骤

仿真分析分为三个主要步骤：磨粒压入硅铝合金、磨粒加工以及磨粒移出硅铝合金。为了防止高速冲击造成的损害，在压入和移除硅铝合金的过程中，磨粒的速度逐渐增加。在磨粒加工阶段，磨粒随弹性基体转动且工件也有自转，其中弹性基体和磨粒的结合体转动速度设定为 140 r/min，工件自转速度为 140 r/min。

3.5. 定义载荷和边界条件

如图 4 所示，该仿真中，硅铝合金工件和研磨盘均具有绕 z 轴转动的自由度，其中研磨盘绕其中心以设定的转速进行自转，同时硅铝合金工件向下压入，控制研抛深度以模拟加工过程。在仿真过程中，工件水平面的自由度和研磨盘垂直于水平面的自由度被固定，以确保仿真过程符合实际加工的运作条件。模型中研磨盘上随机分布的半固结磨粒在加工过程中与硅铝合金工件表面发生相互作用，模拟研抛过程中工件和研抛工具的物理接触和磨削行为。

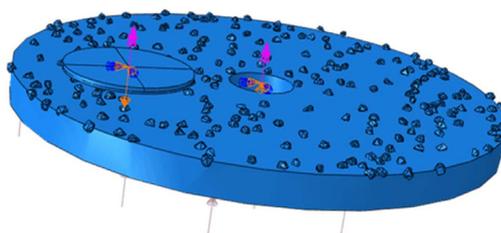


Figure 4. Polishing load and boundary conditions in abrasive machining
图 4. 研抛加工载荷和边界条件

3.6. 网格的划分

在仿真分析过程中，网格划分中硅铝合金采用了缩减积分的八结点线性六面体单元(C3D8R)，以保证计算的稳定性和收敛性。如图 5 所示，直径为 58 mm、厚度为 3 mm 的硅铝合金部件被划分了 1,003,728 个网格。为了确保计算精度和收敛性更高，弹性基体使用了三角形网格进行划分，总共有 1,222,744 个网格。通过精细化的网格划分，能够更准确地捕捉硅铝合金与弹性基体之间的接触和应力分布特性，从而模拟研抛过程中复杂的物理行为。

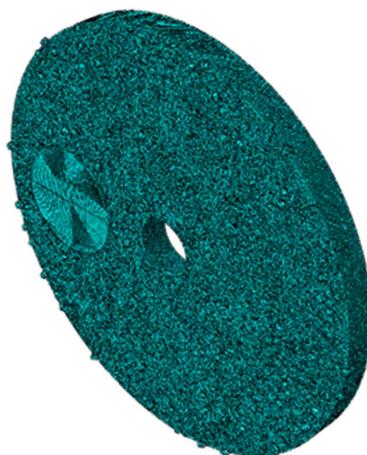


Figure 5. Mesh division schematic diagram
图 5. 网格划分示意图

3.7. 后处理

在完成计算后, 提取出仿真后的数据。我们可以在模拟完成后的后置阶段看到应力的分布情况。在这个过程中, 我们将硅铝合金零部件表面的部分与平行于 X 轴的部分视为我们的研究目标。为了获取所需的数据, 我们在后处理环节会记录以下信息: 切片位置的坐标数值、X 轴及 Y 轴上的有效塑性应变 (PEEQ) 以及 Y 轴上剩余应力 S22。在这里, PEEQ 代表了整场模拟期间塑性应变的总积累效果, 它能体现出硅铝合金研磨抛光加工时材料的消耗程度; 而 S22 则描述了 Y 轴方向上的剩余应力状况, 其正向表示拉伸压力, 反之则是压缩压力。需要注意的是, 由于残留拉应力可能会对硅铝合金零部件的功能产生负面影响, 因此我们应该尽可能地防止这种现象的发生。根据提取的数据, 分析不同工艺参数对硅铝合金工件研抛加工过程中表面形貌、材料去除量和残余应力分布的影响规律, 为后续实验的工艺参数提供参考依据。

4. 仿真分析结果与关键参数影响

依据预先设定的模拟评估策略, 我们探索了硅铝合金研光过程中各种技术因素如何影响其表面的外观特征、被移除物质的数量以及剩余压力。我们将磨粒与硅铝合金之间的摩擦因子设定为主要的研究变量来执行我们的模拟分析, 以下是所获得的结果。

4.1. 磨粒与硅铝合金间摩擦系数的应力分析

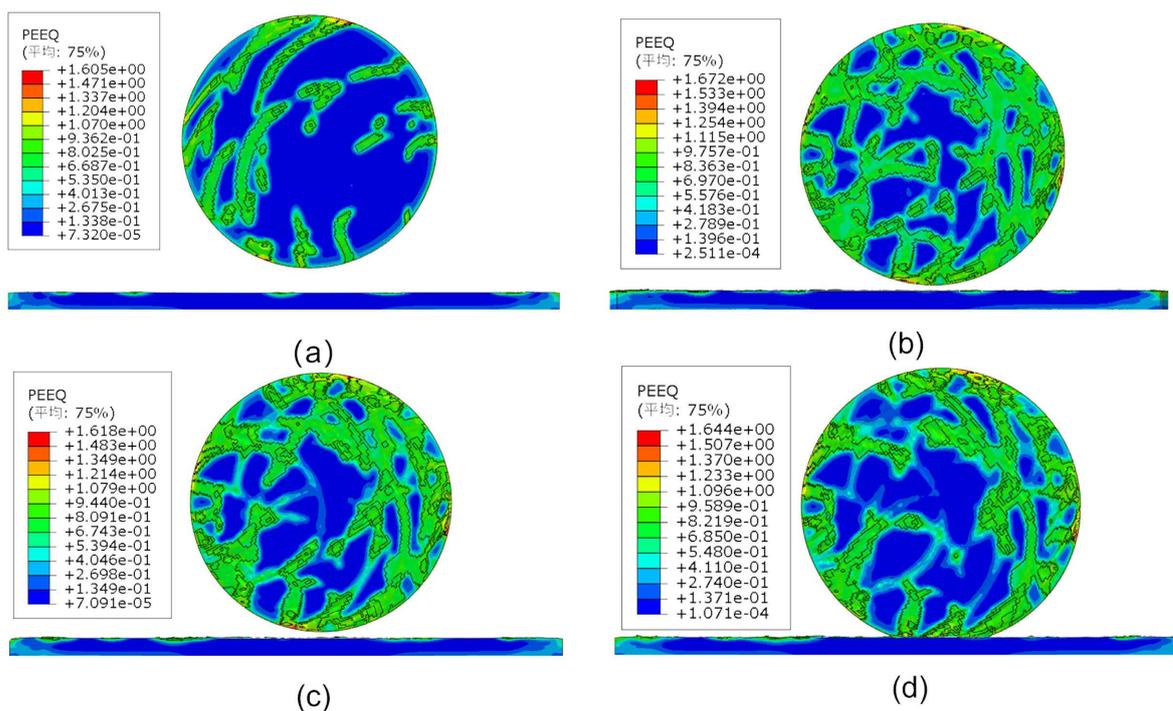


Figure 6. Polishing load and boundary conditions: (a) $u = 0.2$; (b) $u = 0.4$; (c) $u = 0.6$; (d) $u = 0.8$

图 6. 研抛加工载荷和边界条件: (a) $u = 0.2$; (b) $u = 0.4$; (c) $u = 0.6$; (d) $u = 0.8$

图 6 展示了当硅铝合金面对不同的摩擦系数情况下的 X 轴与 Z 轴切片及侧视图, 从图形上看, 随着摩擦系数的增加, 硅铝合金的变形程度也在增大。通过对图 7 的研究, 我们发现, 随着摩擦系数的提升, 硅铝合金所产生的最大剩余压力 σ_{\max} 也会随之增强。深入研究后我们可以得出结论: 当摩擦系数提高时,

硅铝合金在研磨过程中的受力会更大, 这会导致它的塑性变形更为严重。同时, 由图中可以看出, 随着摩擦系数 μ 的增大, 硅铝合金的最大残余应力 σ_{\max} 也随之增大。这表明摩擦系数对硅铝合金的变形行为和残余应力分布具有显著影响, 是影响研抛质量的重要因素之一。

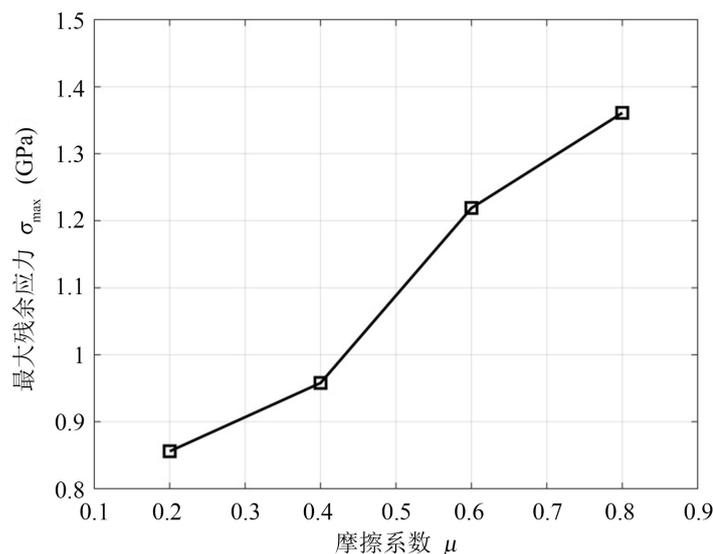


Figure 7. Maximum residual stress of silicon-aluminum alloy at different friction coefficients
图 7. 不同摩擦系数时硅铝合金的最大残余应力

4.2. 不同摩擦系数时硅铝合金的剖面表面形貌分析

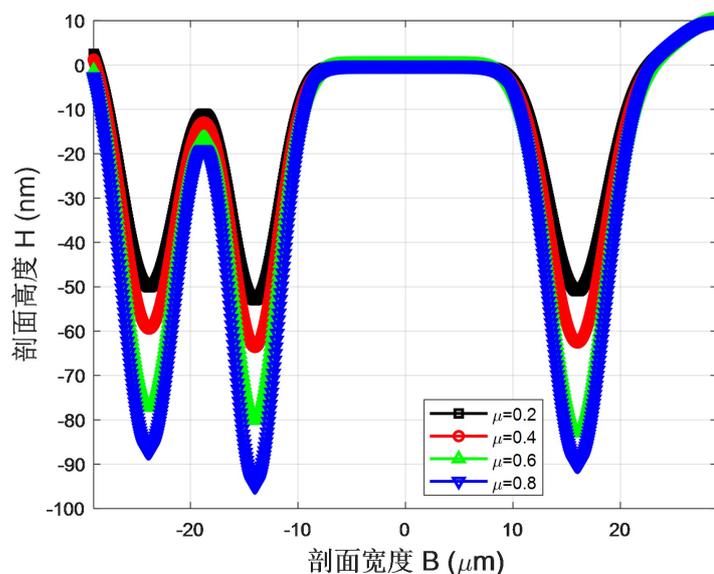


Figure 8. Surface morphology of planed silicon-aluminum alloy at different friction coefficients
图 8. 不同摩擦系数时硅铝合金的剖面表面形貌图

图 8 显示了不同摩擦系数条件下硅铝合金剖面表面形貌的变化情况。观察表明, 虽然摩擦系数的提高会导致剖面深度的增加, 但总体上来说, 这种影响相对较小。更具体地说, 随着摩擦系数的提升, 剖面深度的波动逐步减少, 展现出了趋于稳定的态势。当摩擦系数为 $\mu = 0.2$ 时, 最大剖面深度达到

53 nm, 而当摩擦系数增大至 $\mu = 0.8$ 时, 最大剖面深度也仅为 97 nm, 两者之间的差异并不显著。此外, 从图中可以看出, 5 条剖面曲线的整体趋势非常接近, 尤其是当摩擦系数为 $\mu = 0.6$ 和 $\mu = 0.8$ 时, 两条曲线几乎完全重合。这表明, 摩擦系数在一定范围内对剖面深度的影响逐渐减弱, 在较高摩擦系数条件下, 剖面深度趋于饱和状态。这样的结果为实际实验的工艺参数提供了重要的参考依据。

4.3. 不同摩擦系数时硅铝合金的剖面等效塑性应变分析

如图 9 所示, 当不同的摩擦系数作用于硅铝合金时, 其横向截面的有效塑性应力分布会发生变化。观察该图像可知, 随着摩擦系数的提高, 整个有效的塑性应力区域的总面积也在不断扩大, 意味着被移除的部分也随之增多。同时, 在 $x=0$ 的位置上, 由于硅铝合金和磨粒间的摩擦系数的提升, 使得此处的有效塑性应力数值有所上升, 然而需要强调的是, 这种增长速度并非一直保持稳定, 而是随着摩擦系数的继续升高而逐步降低, 展现出了一定程度上的非线性特征。这样的结果表明, 当摩擦系数达到一定值后, 其对等效塑性应变的提升作用趋于减弱。从整体上看, 摩擦系数的增大在一定程度上增强了磨粒与硅铝合金间的接触与作用力, 从而导致材料表层产生更大的塑性变形, 进而加剧材料的去除。然而, 随着摩擦系数的进一步增大, 由于界面接触条件的变化, 其增效作用逐渐减弱, 表现为等效塑性应变增长趋于饱和。这一现象为优化磨粒与工件间摩擦系数提供了指导性依据, 即在实际加工中, 可以通过适当选择不同摩擦系数的磨具来实现材料去除量和加工效率之间的平衡。

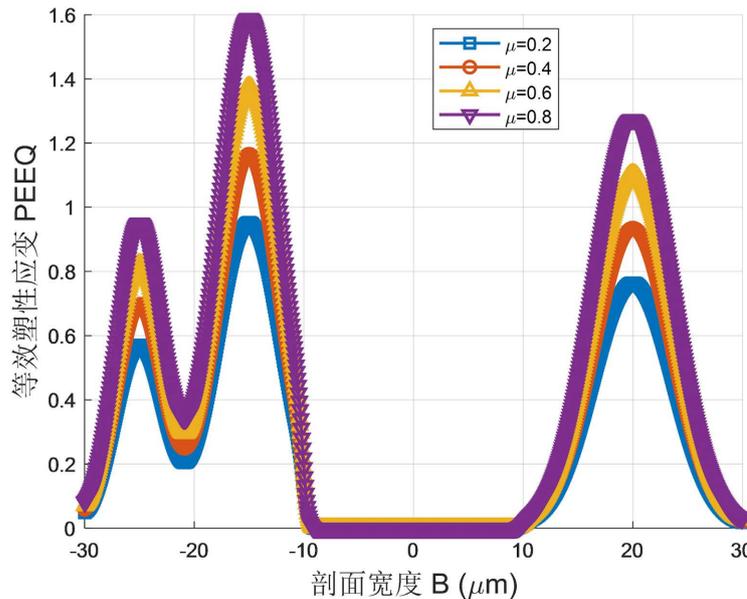


Figure 9. Equivalent plastic strain distribution along the X-axis direction of silicon-aluminum alloy cross-section at different friction coefficients

图 9. 不同摩擦系数时硅铝合金剖面沿 X 轴方向的等效塑性应变图

5. 结论

本研究通过使用 ABAQUS/Explicit 模块, 对硅铝合金在研抛加工过程中多颗磨粒材料去除过程进行了有限元仿真分析。研究重点探讨了摩擦系数对硅铝合金表面形貌、材料去除量和残余应力分布的影响。通过对不同摩擦系数下的仿真分析, 得出了以下几个重要结论:

首先, 摩擦系数对硅铝合金的变形和残余应力分布具有显著影响。随着摩擦系数的增加, 从 $\mu = 0.2$ 到 $\mu = 0.8$, 硅铝合金的最大残余应力逐渐增大, 具体表现为 $\mu = 0.2$ 时最大残余应力为 180 MPa, 而 $\mu =$

0.8 时最大残余应力达到 350 MPa。这一结果表明, 摩擦系数的增大会显著增加硅铝合金在研抛过程中的塑性变形程度, 同时导致较大的残余应力积累。

其次, 摩擦系数对表面形貌的影响逐渐减弱。尽管摩擦系数的增加会导致硅铝合金表面剖面深度的增加, 但这一影响在较高摩擦系数下趋于饱和。当摩擦系数为 $\mu = 0.2$ 时, 最大剖面深度为 53 nm, 而在 $\mu = 0.8$ 时, 最大剖面深度仅为 97 nm, 两者之间的差异相对较小。具体来说, 摩擦系数为 $\mu = 0.6$ 和 $\mu = 0.8$ 时, 表面剖面深度的波动逐步减小, 并趋于稳定, 表明在实际加工中可以通过适度选择摩擦系数来优化加工效果。

第三, 摩擦系数的变化对等效塑性应变分布也产生了重要影响。随着摩擦系数的增加, 硅铝合金的等效塑性应变区域逐渐扩大, 意味着被去除的材料量增多。然而, 随着摩擦系数的进一步增大, 等效塑性应变的增加趋势逐渐减缓, 并趋于饱和。这种非线性特征表明, 在一定摩擦系数范围内, 摩擦系数的增大会加大磨粒与工件之间的接触力, 从而提高材料的去除量, 但在较高摩擦系数下, 增效作用减弱。因此, 合理选择摩擦系数有助于在保证材料去除量的同时, 避免过度的塑性变形。

最后, 研究表明摩擦系数对材料去除量有着直接影响。在较低摩擦系数(如 $\mu = 0.2$)下, 材料去除量较少, 而在较高摩擦系数(如 $\mu = 0.8$)下, 材料的去除量显著增大。这进一步说明了摩擦系数在研抛加工中的重要作用, 合理选择摩擦系数可以提高加工效率。

综上所述, 摩擦系数在硅铝合金研抛加工过程中起着至关重要的作用。它不仅影响材料的变形程度和表面质量, 还决定了材料的去除效率和残余应力的分布。因此, 在实际加工中, 合理选择摩擦系数将有助于优化表面质量、提高加工效率并减少材料损伤。尽管本研究未进行实验验证, 但通过以下方式保障了仿真结果的可靠性: 一是采用了来源可靠的材料参数和本构模型; 二是模型建立中使用了精细网格划分和合理边界条件; 三是仿真结果与已有文献中的实验趋势相符, 具备较强的物理一致性。因此, 仿真结果在无实验支持下仍具有较高参考价值。

参考文献

- [1] 薛洪明, 金洙吉, 史卓颖. 单晶金刚石机械研磨与化学机械抛光工艺[J]. 纳米技术与精密工程, 2015(2): 102-107.
- [2] 刘帅伟, 关春龙, 鲁云祥, 等. 金刚石半导体衬底研磨抛光技术研究现状及展望[J]. 硬质合金, 2025, 42(1): 64-79.
- [3] Huo, Y., Niu, Y., Sun, Z., Li, Y. and Niu, J. (2024) Surface/Subsurface Damage Mechanisms and Inhibition Strategies in Machining of Hard and Brittle Materials: A Systematic Review. *Surfaces and Interfaces*, **54**, Article ID: 105088. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105088>
- [4] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [5] 马晓峰. ABAQUS 6.11 中文版有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [6] Bibby, T.F.A., Adams, J.A., Holland, K., Krulik, G.A. and Parikh, P. (1997) CMP Coo Reduction: Slurry Reprocessing. *Thin Solid Films*, **308**, 538-542. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(97\)00496-3](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(97)00496-3)
- [7] Du, T., Tamboli, D., Luo, Y. and Desai, V. (2004) Electrochemical Characterization of Copper Chemical Mechanical Planarization in KIO₃ Slurry. *Applied Surface Science*, **229**, 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.062>
- [8] Liu, Y., Zhang, K., Wang, F. and Di, W. (2003) Investigation on the Final Polishing Slurry and Technique of Silicon Substrate in ULSI. *Microelectronic Engineering*, **66**, 438-444. [https://doi.org/10.1016/s0167-9317\(02\)00908-5](https://doi.org/10.1016/s0167-9317(02)00908-5)
- [9] 魏家威, 石霄鹏, 冯振宇. 应变率相关的橡胶本构模型研究[J]. 高压物理学报, 2022, 36(2): 105-115.