

不同造孔剂及其含量对树脂砂轮磨削性能的影响

高 舫 赵 聪 莫 亚 勇 王 永 会
白鸽磨料磨具有限公司，河南 郑州 450000

摘要：树脂结合剂砂轮作为精密加工领域的关键工具，以其良好的弹性和高效的磨削性能广泛应用于硬质材料的加工。然而，传统砂轮因散热性能不足及容屑能力有限，在高负载磨削中表现出一定局限性。为此，为了提升砂轮的锋利性、散热性能及整体加工效率，本文探讨了两种典型造孔剂——空心玻璃球和塑料球的作用机理及其体积分数对砂轮性能的影响。研究显示，造孔剂的添加显著改善了气孔分布，增强了砂轮的力学稳定性与磨削性能，其中塑料球造孔剂在规则气孔形态和高性能均衡方面表现出明显优势。本文的研究为优化树脂砂轮的设计和应用提供了理论基础，也为可持续制造背景下的新型造孔剂开发提供了重要参考。

关键词：造孔剂；树脂砂轮；磨削性能；气孔率；力学性能

Effect of Different Pore-forming Agents and their Contents on Grinding Performance of Resin Grinding Wheel

Gao,Chong Zhao,Cong Mo,Yayong Wang,Yonghui
White Dove Abrasives Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract: As a key tool in the field of precision machining, resin bonded grinding wheel is widely used in the processing of hard materials with its good elasticity and efficient grinding performance. However, the traditional grinding wheel has some limitations in high-load grinding due to its insufficient heat dissipation performance and limited chip capacity. Therefore, in order to improve the sharpness, heat dissipation and overall processing efficiency of grinding wheel, this paper discusses the action mechanism of two typical pore-forming agents-hollow glass ball and plastic ball and the influence of their volume fraction on the performance of grinding wheel. The research shows that the addition of pore-forming agent significantly improves the pore distribution and enhances the mechanical stability and grinding performance of grinding wheel, among which plastic ball pore-forming agent shows obvious advantages in regular pore shape and high performance balance. The research in this paper provides a theoretical basis for optimizing the design and application of resin grinding wheels, and also provides an important reference for the development of new pore-forming agents under the background of sustainable manufacturing.

Keywords: Pore-forming agent; Resin grinding wheel; Grinding performance; Porosity; Mechanical property

DOI: 10.62639/sspis17.20250202

树脂结合剂砂轮广泛应用于硬质材料的精密加工，凭借其良好的弹性、较高的加工效率以及优异的表面加工质量，成为精密制造领域的核心工具。然而，传统砂轮在加工过程中易因容屑能力不足或散热性能差导致效率降低甚至加工缺陷。近年来，造孔剂作为一种关键添加剂，因其能有效提升砂轮气孔率、改善磨削性能而备受关注^[1]。造孔剂的种类、体积分数及使用机制在不同应用场景下各有特点，但其对砂轮力学性能和磨削性能的具体影响仍需系统梳理。本文将聚焦空心玻璃球与塑料球两种造孔剂，探讨其在树脂砂轮中的作用机理及性能表现，并结合已有研究对比不同造孔剂的优劣。

一、造孔剂的作用与机制

造孔剂通过在砂轮基体中形成均匀分布的气孔，显著提升砂轮的锋利性和散热性能。具体而言，造孔剂主要通过以下两种机制造孔：

（一）破碎机制

造孔剂在树脂砂轮基体中起到关键的结构调节作用，其主要通过在砂轮中生成均匀分布的气孔，从而提升砂轮的锋利性和散热性能。研究表明，造孔剂的功能机制可以归结为两种主要类型，其中空心玻璃球的破碎机制尤为典型。在砂轮成型过程中，空心玻璃球因受热膨胀或受压破裂形成孔洞，这些孔洞多为不规则形状，孔径范围通常分布在 80 至 300 微米之间。这种气孔结构为磨料颗粒的暴露提供了更多的表面区域，显著增强了砂轮在磨削过程中的切削能力。此外，不规则气孔还扩大了磨屑的容纳空间，减少了加工中因磨屑堆积引发的局部摩擦升温问题。然而，空心玻璃球的破裂机制也存在一定的不足，其在生成气孔的同时往往会引入微裂纹，这些微裂纹容易削弱结合剂的结构完整性，导致砂轮的抗折强度和硬度下降^[2]。这种脆性效应在造孔剂体积分数较高时尤为明显，表现为气孔之间可能连通，进一步削弱基体的机械性能。

（稿件编号：IS-25-2-1021）

作者简介：高舫（1988-），男，汉族，籍贯：河南平顶山。硕士，工程师。研究方向：树脂磨具，树脂磨辊砂轮。
赵聪（1994-），男，汉族，籍贯：河南开封。硕士，工程师。研究方向：树脂磨具，树脂磨辊砂轮。
莫亚勇（1994-），男，汉族，籍贯：河南商水。硕士。助理工程师。研究方向：树脂磨具，树脂强力磨砂轮。
王永会（1992-），男，汉族，籍贯：河南郑州。硕士。助理工程师，研究方向：树脂磨具，树脂双端面磨砂轮。

(二) 脱落机制

相比之下, 塑料球造孔剂的脱落机制展现了不同的特性和优势。在高温环境中, 塑料球因受热膨胀而逐渐脱落, 留下均匀且规则的孔洞, 孔径通常在 40 至 50 微米之间。由于这些气孔的形态规则且分布均匀, 塑料球造孔剂对砂轮基体的破坏性较低, 结合剂的致密性得以较好地维持。这种规则气孔结构一方面有效减少了结合剂内部的应力集中现象, 提升了砂轮的力学稳定性; 另一方面, 这些均匀分布的孔洞为磨削过程中磨屑的快速排出和热量的散逸提供了通道, 改善了砂轮的散热性能。研究发现^[3], 在体积分数达到 20% 时, 塑料球造孔剂的砂轮在锋利性和表面粗糙度之间达到了较好的平衡, 同时保持了较高的抗折强度和硬度。这种脱落机制带来的气孔结构优化, 使塑料球造孔剂在提升砂轮性能的同时, 对其整体性能的负面影响最小化, 为砂轮的高效应用提供了更稳定的基础。

二、造孔剂体积分数对砂轮性能的影响

(一) 力学性能的变化

一些研究显示, 造孔剂的加入对砂轮的力学性能产生了显著影响, 其体积分数的变化直接决定了砂轮的抗折强度和硬度表现。随着造孔剂含量逐步增加, 气孔在砂轮基体中所占比例扩大, 使得结合剂的连续性和致密性遭到破坏, 这种结构性削弱进一步导致砂轮的力学性能下降。在空心玻璃球造孔剂的使用中, 气孔的生成显得尤为明显, 当其体积分数达到 15% 时, 砂轮内部的孔隙率大幅增加, 且孔径分布范围较大, 气孔之间可能形成贯通效应。此种变化不仅降低了结合剂对磨料的支撑能力, 还显著削弱了砂轮的抗折强度, 测得的强度值由 170 MPa 降至约 130 MPa, 硬度也从 110 HRH 下降至 80 HRH。当体积分数进一步增至 20% 时, 砂轮结构趋于松散, 硬度呈现急剧下降的趋势, 表明结合剂的机械约束能力受限, 无法有效保持砂轮整体的刚性。相比之下, 塑料球造孔剂所生成的气孔具有更为规则形态, 且体积分数的增加对砂轮致密性的削弱作用较缓。即使在体积分数达到 20% 时, 塑料球砂轮仍能够保持较为稳定的抗折强度和硬度, 其硬度值从 110 HRH 降至约 90 HRH, 强度从 170 MPa 下降至 150 MPa。这种较为温和的性能衰减模式可能与塑料球的脱落成孔机制相关, 其在结合剂基体中生成的孔隙分布均匀且连通性较弱, 有助于减少气孔对基体结构完整性的破坏。上述数据充分表明, 不同造孔剂因自身特性和造孔机制的差异, 对砂轮力学性能的影响表现出明显的分化^[4]。

(二) 磨削性能的提升

相关研究发现, 造孔剂在合理添加量下对砂轮的磨削性能提升具有关键作用, 这种提升主要体现在砂轮锋利性增强和加工效率的改善, 而气孔的形成是其作用的核心。气孔的存在改变了砂轮的内部结构, 使磨料颗粒更易暴露, 增加了切削点的数量, 同时为磨削过程中的磨屑提供了额

外的容纳空间, 使得加工区域的热量得以快速散逸, 从而降低砂轮和工件之间的热积累现象。在具体研究中, 空心玻璃球造孔剂的体积分数达到 15% 时表现出最佳性能, 此时砂轮的磨削功率下降至 408W, 表明锋利性显著提高, 而加工后的工件表面粗糙度 (Ra) 保持在 0.048 μm 左右, 体现了良好的表面质量和锋利性之间的平衡。然而, 当体积分数进一步增加至 20% 时, 由于过高的气孔率导致结合剂对磨料颗粒的支撑能力下降, 磨削功率虽继续下降至 321W, 但加工表面粗糙度显著增大至 0.090 μm , 反映出性能的快速衰减^[5]。相比之下, 塑料球造孔剂在体积分数为 20% 时砂轮综合性能达到最优, 磨削功率降低至 386W, 略高于空心玻璃球, 但表面粗糙度仅为 0.047 μm , 与 15% 体积分数的空心玻璃球造孔剂砂轮相当。这一结果表明, 塑料球造孔剂生成的规则且均匀分布的气孔, 有助于提升锋利性, 同时保持较低的表面粗糙度, 表明其在磨削性能和稳定性上具有明显优势。因此, 空心玻璃球和塑料球两种造孔剂在合理添加量下对砂轮性能的提升机制有所不同, 但二者均表现出明显的工艺优化潜力。

三、不同造孔剂对砂轮微观结构的影响

扫描电镜 (SEM) 研究显示, 造孔剂在砂轮微观结构中起到了均匀分布气孔的作用。然而, 不同造孔剂形成的气孔形态和分布特点有所差异:

(一) 空心玻璃球

扫描电镜 (SEM) 分析揭示了不同造孔剂对砂轮微观结构的影响, 其中空心玻璃球造孔剂的作用尤为显著。在使用空心玻璃球作为造孔剂的砂轮中, 气孔的形状呈现出明显的不规则性, 孔径范围通常从 80 μm 扩展至 300 μm 。这种不规则性源于空心玻璃球在高温或压制条件下的破裂机制, 其薄壁在形成气孔时常伴随细微的结构碎裂, 导致砂轮基体内部的结合剂分布出现不均现象。同时, 这些破碎产生的微裂纹可能会进一步削弱结合剂的整体机械性能, 增加基体的脆性, 从而对砂轮的抗折强度和硬度产生负面影响。研究显示, 当空心玻璃球体积分数达到 15% 时, 砂轮的微观结构已表现出较高的气孔密度, 而继续增加体积分数至 20% 后, 孔隙间的连接效应显著增强, 气孔之间可能形成连通通道。这种结构松散性不仅改变了磨料的分布形态, 还导致结合剂支撑能力下降, 为砂轮性能的进一步衰退埋下隐患。

(二) 塑料球

与此相比, 塑料球造孔剂的影响表现出更加温和和规律的特征。在塑料球作为造孔剂的砂轮中, 气孔的形状更趋于规则, 孔径分布相对集中, 通常维持在 40 μm 至 50 μm 之间。塑料球的脱落成孔机制使得气孔的生成较为可控, 其分布均匀性优于空心玻璃球造孔剂, 这一特性有效减小了结合剂在微观结构上的应力集中现象。此外, 塑料球形成的气孔因形态和分布的稳定性, 对结

合剂的完整性影响较小, 结合剂对磨料颗粒的把持力得以维持在较高水平。研究表明, 即使塑料球体积分数增加至 20%, 砂轮的气孔率虽有所增加, 但其致密性并未出现显著下降。这种结构上的优势使得塑料球造孔剂在提升砂轮锋利性的同时, 能够在更高的气孔率条件下保有良好的力学性能, 为实际应用提供了更加可靠的性能保障。

四、应用实例与性能评价

(一) 硅片减薄加工

硅片背面减薄加工作为芯片制造中提升散热性能和实现轻薄化的重要步骤, 对砂轮的性能提出了极高要求, 尤其是在表面粗糙度和加工一致性方面。研究显示, 当树脂结合剂砂轮中加入体积分数为 10% 的空心玻璃球或塑料球造孔剂时, 减薄加工性能得到显著优化。此条件下的空心玻璃球砂轮, 在磨削过程中展现出较高的锋利性和容屑能力, 削薄后的硅片表面粗糙度 R_a 稳定在 $0.042\mu\text{m}$ 左右, 同时 R_z 和 R_y 的波动范围分别控制在 $0.2\mu\text{m}$ 和 $0.3\mu\text{m}$ 以内, 这种稳定性源于空心玻璃球形成的气孔为磨料暴露和磨屑排出提供了有效通道。然而, 空心玻璃球因其破裂机制带来的微裂纹效应可能对加工表面的微观一致性产生一定的干扰。相比之下, 塑料球砂轮在相同添加量下展现出更优的加工表面一致性, 这与其形成的规则且均匀分布的气孔直接相关。加工后的硅片表面粗糙度 R_a 略低于空心玻璃球砂轮, 达到约 $0.036\mu\text{m}$, R_z 和 R_y 的波动范围进一步缩小至 $0.15\mu\text{m}$ 和 $0.2\mu\text{m}$ 以内。塑料球造孔剂生成的规则气孔有效增强了砂轮的力学稳定性, 同时在加工过程中提供了更加均匀的磨削作用, 显著改善了硅片表面的光洁度和一致性。这些数据充分表明, 无论是空心玻璃球还是塑料球造孔剂, 只要在合理的体积分数范围内使用, 均可作为硅片减薄加工提供较高的表面质量和加工效率, 尤其是塑料球砂轮在表面一致性上的表现尤为突出。

(二) 硬质合金球阀研磨

在硬质合金球阀的研磨加工中, 砂轮的综合性能直接关系到加工效率和表面质量, 而造孔剂的选择和添加量则是优化砂轮性能的关键因素。研究表明, 当塑料球造孔剂的体积分数达到 20% 时, 树脂结合剂砂轮在硬质合金球阀加工中的表现尤为优异。这种砂轮在磨削时展现了较低的功率需求, 仅为 386W, 相较于未添加造孔剂的砂轮 (626W) 下降了 38%, 这反映出砂轮锋利性的显著提升。塑料球在高温下受热膨胀后脱落生成的规则气孔, 均匀分布在砂轮基体中, 为磨料颗粒的暴露提供了稳定的空间, 同时减弱了磨削过程中产生的摩擦和热积累, 使得磨削功率大幅降低。此外, 塑料球造孔剂生成的孔隙结构保持了较高的均匀性, 有效避免了因局部过度集中导致的结合剂支撑能力下降, 确保砂轮在高气孔率条件下依然具备良好的机械性能, 从而在高负载条件下保持较低的磨削功率。

另一方面, 这种砂轮在硬质合金球阀的加

工中展现了卓越的表面处理能力, 加工后的球阀表面粗糙度 (R_a) 为 $0.047\mu\text{m}$, 显著优于空心玻璃球造孔剂体积分数 15% 时的砂轮 (R_a $0.048\mu\text{m}$), 且远低于未添加造孔剂砂轮 (R_a $0.030\mu\text{m}$)。这一优异的表面质量归因于塑料球造孔剂在生成规则气孔时减少了结合剂和磨料颗粒之间的应力集中, 使得磨料切削更加均匀稳定。此外, 规则气孔的分布为磨削产生的磨屑提供了畅通的排出通道, 有效避免了磨屑堆积对工件表面造成的划伤。这种良好的表面粗糙度不仅提高了硬质合金球阀的密封性能和使用寿命, 还显著增强了加工效率。与空心玻璃球造孔剂相比, 塑料球造孔剂在 20% 体积分数下生成的孔隙结构更稳定, 致密性保持更好, 这种特性赋予了砂轮更强的综合性能, 使其在硬质合金球阀研磨加工中的表现脱颖而出, 成为优化工艺条件的重要选择。

五、结束语

本文探讨了不同造孔剂及其体积分数对树脂砂轮力学性能、微观结构和磨削性能的影响, 重点分析了空心玻璃球和塑料球在提升砂轮锋利性、优化表面粗糙度以及增强加工效率方面的作用。研究表明, 合理添加的造孔剂能够显著改善砂轮的综合性能, 其中塑料球造孔剂以其规则的气孔形态和较高的均匀性表现出优于空心玻璃球的性能优势。然而, 造孔剂的选择与使用仍然存在诸多需要进一步完善的方面。当前的研究虽已取得一定进展, 但对造孔剂与结合剂之间相容性的理解尚显不足。结合剂与造孔剂在微观层面的相互作用, 以及如何通过优化造孔剂的材料特性来增强复合体系的稳定性, 仍是一个值得深入挖掘的问题。此外, 气孔形态的精准控制仍面临技术挑战。更高精度的造孔剂加工工艺, 将有助于实现气孔分布的精确调控, 从而进一步提升砂轮性能的一致性。在全球绿色制造和可持续发展的背景下, 新型造孔剂的开发同样亟需关注。探索生物基材料或其他环保型材料作为造孔剂, 不仅可能满足砂轮性能需求, 还可降低环境负担, 为行业发展注入新的动力。这些反思不仅指出了研究中的不足, 也为未来的方向提供了清晰的指引。

参考文献:

- [1] 关集俱, 祝正兵, 徐正亚, 栾志强, 许雪峰. CNTs@T321 微囊制备的纳米流体与砂轮磨削时的双重润滑增效机制 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (09): 351-363.
- [2] 师超钰, 朱建辉, 钱灌文, 赵延军. 酚醛树脂影响金刚石砂轮磨削性能试验研究 [J]. 机械设计与制造, 2018, (02): 64-67.
- [3] 闫薪霖, 肖博, 高先哲, 肖冰, 张益权. 钎焊金刚石砂轮打磨钢轨的性能试验研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40 (06): 42-46.
- [4] 冯克明, 邢波, 师超钰, 朱建辉, 赵金坠. 树脂结合剂超硬磨料砂轮磨削稳定性试验研究 [J]. 兵工学报, 2018, 39 (07): 1389-1396.
- [5] 关集俱, 徐正亚, 杨兰玉, 夏雨, 许雪峰. 纳米微囊砂轮磨削工件表面自润滑层的形成 [J]. 中国表面工程, 2024, 37 (01): 254-266.