地下车库金刚砂地坪施工技术及其质量控制研究

卢梦丹 肖 泉 宋效铨

五矿二十三冶建设集团有限公司 湖南 长沙 410000

摘要: 随着城市建设的快速发展,地下车库作为空间高效利用的关键设施,其地面质量直接关系到使用安全与长期性能。本研究聚焦金刚砂与固化剂复合地坪系统,采用技术分析 & 施工工艺改进相结合的方法,深入剖析其施工要点、常见缺陷及解决方案。研究证实,通过改进材料配比、优化分块浇筑技术、加强防水处理和完善养护制度,能够有效增强地坪的抗裂性能、耐磨特性及外观效果,为类似项目提供实践指导。

关键词: 地下车库; 金刚砂地坪; 裂缝控制; 施工工艺; 耐久性

1 引言

地下车库地面系统需要同时具备高强度、耐磨损、防水防渗及视觉美观等多重特性。普通水泥地面普遍存在起砂、龟裂等质量缺陷,而环氧树脂地面虽然外观效果良好但使用寿命有限。采用金刚砂与固化剂复合工艺的地面系统,因其卓越的耐磨特性^[1]、施工效率高^[2]以及经济性优势^[3],正日益成为行业首选方案。但在实际施工中,仍面临裂缝控制、色泽均匀度、防水性能等技术难题,需要开展全面深入的研究。

2 材料特性与设计要

2.1 材料特性

金刚砂地坪主要由水泥基材、耐磨骨料(碳化硅或石英砂)以及特殊添加剂构成。其中,碳化硅颗粒作为核心组分,对地坪的耐磨性能起着决定性作用。这种被称为金刚砂的材料,其化学成分为碳化硅,拥有接近9.5的莫氏硬度值,展现出优异的抗磨损特性。该材料的颗粒形态通常呈现不规则多面体结构,表面具有明显的凹凸纹理,当与水泥基体结合时能够构建出坚固的立体支撑网络。其显著特征包括:

(1) 高耐磨性

金刚砂地坪较高的耐磨性得益于材料性质与界面相结合。金刚砂颗粒由于是多面体结构,且硬度高,相较于普通骨料有较强的耐磨性。由于骨料与水泥基体界面结合强度影响耐磨性,因此需要减水剂界面剂优化,使其强度增高,提升整体耐磨性^[4]。

(2) 抗渗透性

1) 金刚砂地坪的抗渗透性能建立在“骨料骨架-胶凝基体-界面过渡区”三级密实结构之上^[5]:

作者简介: 卢梦丹, 1996年, 五矿二十三冶建设集团有限公司, 女, 汉, 河南省平顶山市, 研究生, 初级工程师, 主要从事工程管理及科技研发。

粗观层级: 主要由 60-70% 体积含量的金刚砂骨料组成刚性的骨架结构, 在粒径分布上采用合理的级配(如间断级配、连续级配等), 使得颗粒之间的空隙率最小化, 从而获得较小的宏观孔隙率。

微观层级: 水泥基胶凝材料中水化产生的 C-S-H 凝胶和钙矾石晶体填满粗、细集料空隙, 使得毛细孔直径小于 50 nm; 加入的纳米级粉煤灰等掺合料又可充填于胶结基材中的微小孔隙内(一般为 2~4 nm), 从而降低总的孔隙率至 15% 左右。

界面层级: 采用界面改性的方法使界面过渡层厚度由传统的 50~100 μm 减少到约 20~30 μm, 并且 Ca(OH)₂ 晶体的有序化成长受到控制, 在骨料和水泥浆体之间形成了紧密的“集料-水硬性胶结剂”的结合面。

2) 关键组分的抗渗作用

组分	抗渗机制	技术参数关联
金刚砂骨料	高硬度惰性颗粒阻断渗透路径, 粗糙表面增强机械咬合, 减少贯通孔隙	莫氏硬度 ≥ 9.0 , 吸水率 $\leq 0.2\%$
水泥基胶凝	低水胶比 (0.3-0.4) 促进水化产物致密堆积, 矿物掺合料(粉煤灰/矿渣)细化孔径	胶凝材料比表面积 $\geq 350 \text{ m}^2/\text{kg}$
功能性添加剂	减水剂降低用水量(减水率 $\geq 20\%$), 防水剂(硬脂酸钙)在孔隙表面形成憎水膜	氯离子扩散系数 $\leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

(3) 环保性: 固化剂无毒无害, 符合绿色建筑标准

金刚砂地坪以其“固化剂无毒无害, 全生命周期低环境负荷”的特性, 在工业与民用建筑中展现出显著的环境效益^[1]。

1) 新一代固化剂的分子结构特征:

当前主流环保型固化剂以水性硅基体系为核心, 主要包括:

a. 纳米硅溶胶

化学组成: $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (纯度 $\geq 99.5\%$), Na^+/K^+

离子含量 $\leq 50\text{ppm}$

反应机制：通过 Si-OH 基团与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应，生成 C-S-H 凝胶，无副产物释放。

b. 水性聚氨酯改性剂

分子结构：端异氰酸酯基 (-NCO) 封端的聚醚多元醇，NCO 残留量 $\leq 0.1\%$ 。

环保优势：采用去离子水为分散介质，VOC 含量 $< 5\text{g/L}$ (GB 18583 标准限值 $\leq 100\text{g/L}$)。

c. 植物基表面活性剂

活性成分：椰油酰胺丙基甜菜碱，生物降解率 $> 90\%$ (OECD 301B 标准)。

功能特性：降低表面张力至 30mN/m 以下，替代传统石油基乳化剂。

2) 固化反应的绿色化学特征

原子经济性固化反应遵循 $\text{Si-OH} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，原子利用率达 100%，无副产物生成。

能量消耗常温固化工艺 ($20\text{-}30^\circ\text{C}$) 能耗仅为传统溶剂型固化剂的 $1/5$ ，单位面积碳排放 $\leq 0.3\text{kg/m}^2$ 。

2.2 设计要求

(1) 强度

金刚砂与混凝土的协同耦合决定金刚砂地坪的强度。基层混凝土强度是基础承载层，抗压强度较低会引起脱层，较高会开裂。金刚砂作为刚性骨架，通过 $0.5\text{-}3\text{mm}$ 粒径级配增强颗粒咬合力，使地坪抗压 $\geq 80\text{MPa}$ 、抗折 $\geq 12\text{MPa}$ 。实验表明，骨料含量升高 10%，耐磨损失将降低 15%，但是含量不能超过 75%，否则会降低强度。

有限元模拟结果显示，基层弹性模量与骨料模量的梯度匹配可减少应力集中，需保证基层强度标准差低于 15%、骨料级配不均匀系数处于 5-8 之间。依据标准，通过测定基层强度和骨料含量，确保两者达到最优强度匹配状态。

(2) 平整度

金刚砂地坪平整度需要施工全流程管控。基层混凝土初始平整度是基础，需要用使用相关仪器去消除缺陷。施工阶段通过机械抹光在结合二次抹光将粗糙度降低至 $3\mu\text{m}$ 以下，并实时找平。按照相关标准要求，每百平米用靠尺测 5 处，超出的采用 80-150 目磨片机械找平。

数值模拟结果显示，平整度每增加 1mm，磨损速率提高 10% 以上，侧面说明精度控制对工程经济的重要性。

3 施工关键技术

3.1 基层处理与标高控制

(1) 凿毛与清洁

在施工过程中，采用凿毛机将旧混凝土表面凿去 2mm 以下的浮浆，形成粗糙界面，增加新旧界面粘结性，密度控制到 25-30 点/ dm^2 。采用高压水枪对粗糙界面进行冲洗，之后吸尘，使含水率和颗粒残留率达到规定标准。通过参数控制凿毛与清洁工艺，可使得拉拔强度提升 150%-200%，空鼓率降至 15% 以下，实现质量标准化。

(2) 标高控制

首先我们采用水准仪布设基准点，形成闭合水准路线，然后采用高强尼龙线构建控制线，在配合激光扫平仪，建立三维网格，跨距 15m 时垂曲误差小于 1.2mm。施工时按照 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 间距设标高桩，采用铝合金刮尺与测距仪实时控制基层标高。依据标准，每百平方米需要 5 处检测，95% 以上区域偏差在 3mm 以内。通过动态调控，实现何在分布均匀以及平整度合格，形成标准化标高控制路径^[6]。

3.2 分仓浇筑与伸缩缝设置

(1) 分仓

研究标明，单仓面积不大于 36 平方米最适合，当超过这个界限，板块会因为温度变形产生拉应力，增加开裂风险。设置 3-6m 的伸缩缝可降低温度应力 60% 左右。沿柱网和车道分仓，使接缝避开弯矩峰值区，符合刚度协调的要求。有限元模拟验证最大主应力小于 1MPa，满足混凝土抗裂标准^[7]。

(2) 跳仓

在金刚砂地坪施工时，间隔浇筑形成仓格，可有效减少混凝土的收缩应力积累。其利用仓格分块独立性，可释放混凝土硬化时因温度变化和干缩产生的内应力，避免裂缝的产生。合理划分尺寸和浇筑顺序，可优化应力分布，降低后浇带设置带来的施工复杂性与渗漏风险，实现地坪整体性与耐久性的双重提升^[8]。

3.3 金刚砂撒播与打磨工艺

(1) 撒播时机

金刚砂地坪施工质量的关键是撒播时机，在混凝土初凝阶段首次撒播耐磨材料，可有效结合，形成锚固；提浆之后二次撒播，可填充空隙提高密实度。分步撒播可有效控制表面平整度及材料渗透深度，避免浮浆和材料下沉现象，可显著提升地坪的耐磨性及抗冲击性能。

(2) 打磨流程

整个打磨工程包括圆盘磨光机提浆、铝合金刮尺找平、边角人工处理、终凝前抛光密封。其中圆盘磨光机提浆可使耐磨材料与混凝土充分融合；铝合金刮尺找平可精确控制标高差 $\leq 2\text{mm/m}$ ；边角人工处理解决设备处理不到的位置；终凝前抛光密封可形成耐磨层，提升表

面硬度与抗渗性能。

3.4 固化剂施工与养护

(1) 固化剂渗透

液态硬化剂在毛细作用下可渗透到混凝土内部，与水泥中的氢氧化钙发生硅化反应，生成凝胶状物质，填充孔隙形成硬化表层。整个过程可提升地坪的耐磨性、抗压强度及抗渗性，提升地坪使用寿命，降低维修成本。

(2) 养护管理

丙烯酸养护剂喷在表面可形成一层薄膜，防止水分快速蒸发，覆膜保湿则可维持混凝土内部湿度，两者都可延缓混凝土干缩进程。为了更好的提升强度，可使养护周期大于7天。此养护做法可减少水分流失造成的表面龟裂，实现地坪长期性能的优化。

4 质量通病及防治措施

4.1 裂缝控制

地下车库金刚砂地坪裂缝的成因复杂，主要涉及材料、施工、环境及结构设计等多方面因素。具体包括：

(1) 温度应力。混凝土内外温差或环境温度骤变导致热胀冷缩，产生表面、深层或贯穿裂缝，尤其在冬季施工或昼夜温差大的环境中更为明显。

(2) 湿度波动。湿度波动（如地下水位变化）和干燥环境加速表面失水，若未及时覆盖保湿或养护周期不足，易引发收缩裂缝。

(3) 荷载集中。地坪受力不均，设计不合理，可加快裂缝的发展。

以上因素相互作用，可通过材料配比、规范施工工艺、加强养护等措施来防控。我们可以选择级配良好的骨料和高标号水泥，掺入减水剂降低水灰比，添加养护剂增强抗裂性，选择粒径均匀、质量达标的金刚砂材料，通过配合比实验优化混凝土强度。采用分仓浇筑减少收缩应力，控制金刚砂撒布时机与压实次数，初凝前再次抹压可减少裂缝，终凝后及时切割缝，覆盖薄膜进行养护，保证无空鼓。

4.2 起尘与色差

(1) 起尘治理：基层处理密实后，优化混凝土水灰比并掺入增强剂；金刚砂撒布均匀压实，终凝前机械抛光至表面致密；固化期喷涂密封剂或渗透型固化剂，封闭毛细孔，提升表层硬度及抗起尘性能。

(2) 色差控制：采用分区跳仓施工（先车位后车道），基层定板取样比对颜色；机械均匀撒布同批次金刚砂，同步控制抹光温度与遍数；养护阶段覆盖保湿膜并保持同步养护条件，终凝后涂刷同色渗透固化剂。

4.3 渗漏处理

(1) 反坎设置。沿施工缝设置1:2.5的水泥砂浆反坎分隔区域，精准的定位分界，结合止水钢板预埋与自防水设计，涂刷界面剂增强粘结性，养护时覆盖薄膜防止冷缝产生，收面时要确保密闭性。

(2) 加强防水。沿墙根设置排水沟，找坡导向集水井，结合止水带预埋和防水涂料，同步提升缝隙密封处理，避免渗透导致地坪和墙体脱粘。

5 结论与展望

金刚砂加固剂地坪施工时加强基层处理，用水灰比低的混凝土分仓跳格浇筑，控制金刚砂撒布时机和压实次数，终凝后抛光和喷固化剂，在监控温湿度，使地坪抗压 $\geq 35\text{MPa}$ 、莫氏硬度 ≥ 8 级，使其具有强度高、成本低的特点。未来研究方向有以下几个方面：

(1) 智能监测。通过分布式光纤传感器与无线温湿度探头，可动态采集相关数据，连入系统分析收缩趋势和风险。可调整参数和养护方案，防护开裂空鼓，保证强度和硬度，实现质量可追溯与性能保障。

(2) 环保材料。研发光催化/生物基低能耗固化剂，生产能耗降40%、固化碳排放减30%；用建筑废渣、钢渣等可再生骨料（替代率 $\geq 40\%$ ）与金刚砂复配，优化级配。经LCA验证，该环保地坪体系抗压 $\geq \text{C30}$ 、耐磨提升15%，减少天然砂石消耗50%，符合绿色建材标准。

(3) 标准化体系。相关科研机构与协会制定全流程施工标准，明确每个流程的验收指标。建立区域链质量追溯系统，数据实时上传，在结合BIM优化节点，实现数字化管控，促进行业规范化。

参考文献

- [1]官杰.特大型地下停车场地坪施工技术[J].工程技术研究,2018,(04):66-67.
- [2]邱旭程,张帅,金伯文.建筑地面金刚砂地坪一体成型施工工艺的分析[J].中国建筑装饰装修,2022,(09):165-167.
- [3]张怡.车库地面材料选型在绿色建筑中的应用[J].中国建筑装饰装修,2021,(05):58-60.
- [4]肖胜亮,陈平,邹阳,等.金刚砂地坪施工技术的应用分析[J].中国建筑装饰装修,2025,(06):108-110.
- [5]唐国鸿.金刚砂耐磨地坪的施工工艺和质量控制要点分析[J].中国建筑装饰装修,2023,(20):170-172..
- [6]何裕钦.大面积地下车库金刚砂地坪施工质量控制管理[J].中国建筑装饰装修,2023,22(11):156-158..
- [7]谈宏堃,徐杰,孙祖根.超大地下车库地坪分段分块跳仓施工技术[J].建筑施工,2023,45(05):877-879+888
- [8]黄凯.地下车库地坪常见问题及处理对策[J].工程技术研究,2017,(03):241-242.