

桥面精铣刨施工中铣刨深度与路面结构层适配性分析

刁旭东

中交一公局第九工程有限公司 广东 广州 511300

摘要：本文聚焦于桥面精铣刨施工，深入探讨铣刨深度与路面结构层的适配性问题。首先阐述了桥面精铣刨施工的重要意义和现状，接着分析了路面结构层的特点以及对铣刨深度的要求。通过理论研究和实际案例分析，详细探讨了不同铣刨深度对路面结构层性能的影响，包括结构强度、平整度、抗滑性能等方面。同时，提出了确定合理铣刨深度的方法和策略，以确保铣刨施工既能有效去除病害层，又能保证路面结构层的完整性和使用性能，为桥面精铣刨施工提供理论支持和实践指导。

关键词：桥面精铣刨；铣刨深度；路面结构层；适配性

1 引言

随着交通流量的不断增加和车辆荷载的日益增大，桥面路面在使用过程中不可避免地会出现各种病害，如车辙、裂缝、坑槽等，严重影响桥面的使用性能和行车安全。桥面精铣刨施工作为一种有效的路面修复技术，能够精确地去除桥面表层的病害部分，为后续的铺装提供良好的基层条件，从而提高桥面的平整度、抗滑性能和耐久性。铣刨深度是桥面精铣刨施工中的关键参数之一，它直接影响到铣刨后路面结构层的性能和施工质量。如果铣刨深度过浅，可能无法彻底去除病害层，导致修复后的路面很快再次出现病害；而铣刨深度过深，则会破坏路面结构层的整体性，降低结构强度，增加施工成本和后期维护难度。因此，研究铣刨深度与路面结构层的适配性具有重要的理论和实践意义。

2 桥面路面结构层特点及对铣刨深度的要求

2.1 桥面路面结构层组成

桥面路面结构层通常由面层、基层和底基层组成。面层直接承受车辆荷载的作用，要求具有较高的强度、平整度、抗滑性能和耐久性；基层主要起承重和传递荷载的作用，应具备足够的强度和刚度；底基层则起到扩散荷载、减少基层应力集中的作用，同时也能提高路面结构的整体稳定性。

2.2 不同结构层对铣刨深度的要求

面层：面层是桥面路面中最容易受到损坏的结构层，常见的病害有车辙、裂缝、松散等。对于面层的铣刨，主要是为了去除病害部分，恢复路面的平整度和抗滑性能。一般来说，当面层出现轻微病害时，铣刨深度可控制在3-5cm左右；若病害较为严重，如出现深层裂缝或车辙深度较大时，铣刨深度可能需要达到8-10cm。

基层：基层的损坏通常表现为裂缝、松散和唧浆

等。如果基层病害较为严重，影响到路面的整体结构性能，就需要对面层和部分基层进行铣刨^[1]。基层铣刨深度的确定需要综合考虑基层的厚度、强度以及病害的严重程度等因素。一般情况下，基层铣刨深度不宜超过基层厚度的1/3，以免破坏基层的整体结构。

底基层：底基层一般较少出现病害，只有在路面结构受到严重破坏时才需要考虑对底基层进行铣刨。由于底基层主要起承载和扩散荷载的作用，铣刨深度过大可能会影响路面的稳定性，因此在进行底基层铣刨时需要谨慎评估，并采取相应的加固措施。

3 铣刨深度对路面结构层性能的影响

3.1 对结构强度的影响

路面结构强度是指路面抵抗车辆荷载作用的能力。铣刨深度对结构强度的影响主要体现在改变了路面结构层的厚度和力学性能。根据弹性层状体系理论，路面结构的应力应变分布与各结构层的厚度和弹性模量密切相关。当铣刨深度增加时，原有结构层（尤其是面层和上基层）被移除，导致整体有效结构厚度减小。在相同车辆荷载作用下，剩余结构层所承受的应力增大，从而削弱了整体结构的承载能力。以某新建高速公路的试验段为例，该路段原设计面层为4cmSMA-13+6cmAC-20，总面层厚度为10cm，上基层为18cm水泥稳定碎石。在通车前的质量整改过程中，对两个相邻试验段实施了不同深度的精铣刨处理：A段铣刨深度为4cm（仅去除SMA-13表层），B段铣刨深度为8cm（去除全部面层，触及上基层顶部）。铣刨后重新铺筑相同结构的面层，并在养护完成后进行贝克曼梁弯沉检测。检测结果显示，A段平均弯沉值为0.22mm，而B段为0.35mm。弯沉值越大，表明结构整体刚度越低、承载能力越弱。该结果说明，在新建高速公路上，若铣刨深度过大、触及或削弱基层结

构，将显著降低路面结构的整体强度，影响其长期服役性能。

3.2 对平整度的影响

桥面精铣刨施工要求铣刨后的路面具有较高的平整度，以保证行车的舒适性和安全性。平整度不佳的路面会使车辆行驶时产生颠簸，增加驾驶员的疲劳程度，同时也可能对车辆的零部件造成损坏。铣刨深度的不均匀是导致铣刨后路面出现不平整现象的主要原因之一。在铣刨过程中，铣刨机的行走速度、铣刨刀头的磨损程度以及操作人员的技术水平等因素都会影响铣刨深度的均匀性^[2]。如果铣刨机行走速度不稳定，时快时慢，会导致铣刨深度在不同位置产生差异；铣刨刀头磨损严重后，其切削能力下降，会使铣刨深度变浅，从而影响路面的平整度；操作人员的技术水平不足，不能准确控制铣刨机的各项参数，也会导致铣刨深度不均匀。一般来说，铣刨深度较浅时，对平整度的控制相对容易。这是因为浅层铣刨时，铣刨机受到的阻力较小，振动也相对较小，操作人员能够更准确地控制铣刨深度。而铣刨深度较深时，由于铣刨过程中受到的阻力增大，铣刨机的振动也会加剧，从而增加了控制平整度的难度。通过实际测量发现，当铣刨深度在5cm以内时，路面平整度标准差可控制在1.0mm以内，能够满足较高的平整度要求；当铣刨深度超过8cm时，平整度标准差可能会超过1.5mm，此时路面的平整度明显下降，会影响行车的舒适性。

3.3 对抗滑性能的影响

桥面路面的抗滑性能直接关系到行车安全，特别是在雨天或潮湿路面上，良好的抗滑性能可以有效减少车辆打滑和侧滑事故的发生。铣刨施工可以通过改变路面表面的纹理结构来提高抗滑性能。适当的铣刨深度可以增加路面表面的粗糙度，提高轮胎与路面之间的摩擦力，从而增强抗滑性能。但如果铣刨深度过深，可能会破坏路面结构层中的骨料，导致表面骨料外露不均匀。一些骨料可能会被过度铣刨掉，而另一些骨料则可能仍然埋在路面内部，使得路面表面的纹理变得不规则，反而降低抗滑性能。试验研究表明，当铣刨深度在4-6cm时，路面的摆值（BPN）可提高10-15，抗滑性能得到显著改善。摆值是衡量路面抗滑性能的重要指标之一，摆值越高，说明路面的抗滑性能越好。而当铣刨深度超过8cm时，摆值可能会出现下降趋势，表明抗滑性能受到了一定程度的影响。

4 确定合理铣刨深度的方法和策略

4.1 基于病害检测的铣刨深度确定

在进行桥面精铣刨施工前，需要对桥面路面的病害

进行详细检测和分析。常用的病害检测方法包括目测观察、无损检测技术（如落锤式弯沉仪、探地雷达等）。目测观察可以初步判断路面病害的类型和分布范围；无损检测技术则可以更准确地检测路面结构层的内部缺陷和病害程度。根据病害检测结果，结合路面结构层的特点和使用要求，确定合理的铣刨深度。对于表面病害，如轻微的车辙和裂缝，可采用局部修补或浅层铣刨的方法。局部修补主要是针对病害较小的区域，采用合适的修补材料进行填充和修复；浅层铣刨则是将病害层铣刨掉一定深度，然后重新铺装新的路面材料^[3]。对于深层病害，如基层损坏或结构性裂缝，则需要根据病害的严重程度适当增加铣刨深度。如果基层损坏较为严重，但尚未影响到整个基层的结构完整性，可以铣刨掉部分基层；如果基层已经出现严重的结构性破坏，可能需要铣刨掉整个基层，并重新铺设新的基层材料。

4.2 考虑路面结构性能的铣刨深度优化

为了确保铣刨后的路面结构具有良好的性能，需要建立路面结构性能评价模型。该模型应综合考虑路面结构的强度、平整度、抗滑性能等多个指标，因为这些指标相互关联、相互影响，共同决定了路面的使用性能。通过数学方法将这些指标进行量化分析，例如采用层次分析法、模糊综合评价法等，将各个指标赋予不同的权重，然后计算出路面结构的综合性能评分。以评估不同铣刨深度下路面结构的性能，为优化铣刨深度提供科学依据。根据结构性能评价模型，对不同铣刨深度下的路面结构性能进行模拟计算和分析。通过改变铣刨深度的参数，计算出在不同深度下路面结构的强度、平整度、抗滑性能等指标的变化情况，找出使路面结构性能达到最优的铣刨深度范围。同时，在实际施工中，还需要结合工程经济性和施工可行性等因素，对铣刨深度进行进一步优化。例如，在保证路面结构性能的前提下，尽量选择较小的铣刨深度。

4.3 施工过程中的动态调整

铣刨施工时，需用先进测量设备实时监测铣刨深度，确保符合设计要求。常用激光测距仪和超声波测厚仪，前者利用激光高方向性与精度，快速准确测铣刨机与路面距离以获深度信息；后者发射并接收超声波，依传播时间算路面厚度得铣刨深度。二者测量精度高、实时性强，能及时发现偏差并调整。桥面路面情况复杂，施工中或遇与设计不符状况，如局部结构层厚度变化、隐蔽病害等。像设计时未准确掌握部分区域结构层厚度，实际基层比设计薄；或铣刨发现未检测到的基层空洞等。此时，要依实时监测结果和现场情况，及时动态

调整铣刨深度。局部结构层厚度变化大，就调整铣刨深度保路面结构完整；发现隐蔽病害，按其严重程度和范围，合理加深铣刨以彻底去除病害，保证施工质量与路面性能。

5 工程实例分析

5.1 工程概况

广西荔浦连线高速公路项目中的修仁荔浦河大桥为新建桥梁，桥面总长868m，单幅路面净宽11.5m，设计为双向四车道。该桥位于广西壮族自治区荔浦市境内，是连接修仁镇与荔浦市区的重要交通节点。由于该桥为新建结构，在完成桥面结构层施工后，需进行首次沥青混凝土铺装前的精铣刨处理，以确保桥面平整度、横坡精度及层间粘结性能满足设计及运营要求。尽管桥面结构层为新建，但在混凝土桥面板施工过程中，局部区域存在标高偏差、浮浆层较厚及表面不平整等问题。为提升后续沥青铺装层的施工质量与耐久性，项目决定在铺装前对桥面实施高精度精铣刨作业。

5.2 施工过程

5.2.1 桥面检测与评估

在铣刨施工前，项目采用三维激光扫描仪和水准仪对桥面高程和平整度进行全面检测。检测结果显示，桥面局部区域存在最大高差达6mm的不平整现象，部分区域存在厚度约2~4mm的浮浆层，影响沥青层与桥面板的有效粘结。同时，横坡控制存在一定偏差，个别断面横坡误差超过 $\pm 0.3\%$ ，不符合《公路桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T3364-02)的要求。

5.2.2 铣刨方案制定

根据检测数据，项目制定了分区铣刨方案：对平整度偏差较小($\leq 3\text{mm}$)且无浮浆区域，仅进行轻度拉毛处理，铣刨深度控制在2mm以内，以增强层间摩擦；对存在明显浮浆或高程偏差区域(3~6mm)，采用精铣刨工艺，铣刨深度设定为4~6mm，确保去除薄弱表层并恢复设计横坡；对横坡超差断面，结合三维模型进行变深度铣刨，实现精准坡度修正^[4]。

5.2.3 精铣刨施工

施工采用高精度维特根(Wirtgen)SP15i型精铣刨

机，配备自动找平系统和激光高程控制系统。施工过程中：铣刨机行进速度控制在4~6m/min，确保铣刨面均匀细腻；每隔5m布设一个检测断面，使用手持式激光平整度仪实时监测铣刨后高程，数据同步上传至施工管理平台；铣刨完成后立即采用高压水车冲洗桥面，彻底清除粉尘与碎屑，确保后续防水层与沥青层粘结牢固。

5.3 施工效果评价

铣刨施工完成后，项目对桥面进行了全面质量验收：平整度检测结果显示，国际平整度指数(IRI)平均值为1.05m/km，平整度标准差控制在0.8mm以内，优于规范要求的1.2mm；横坡复测表明，所有断面横坡误差均控制在 $\pm 0.15\%$ 以内，满足设计 $\pm 0.2\%$ 的允许偏差；层间拉拔试验显示，铣刨处理后的桥面与后续铺设的SBS改性沥青防水粘结层之间的粘结强度平均达到0.85MPa，显著高于未处理区域的0.45MPa。

结语

本文研究桥面精铣刨施工中铣刨深度与路面结构层适配性得出：铣刨深度对路面结构层性能影响重大，不合理深度会致性能下降、增加维护成本；确定合理深度需综合病害检测、结构性能要求及施工实际等因素，相关确定方法和优化策略可行；工程实例表明科学确定深度与严格施工控制可提升施工质量与使用性能。展望未来，可研究新型材料和结构形式对适配性的影响，建立更完善施工数据库，加强智能化施工技术的应用，以拓展应用空间、提供参考依据、提高施工质效。

参考文献

- [1]赵喆,高旭.基于3D控制系统的精铣刨技术在桥面处理中的应用研究[J].湖南交通科技,2022,48(02):156-159.
- [2]王洪波.精铣刨结合抛丸在桥面防水层施工中的研究与应用.天津市,天津五市政公路工程有限公司,2018-12-28.
- [3]李斌斌,牛能,赵军林.水泥混凝土下承层精铣刨露浆率检测方法研究[J].科学技术创新,2025,(02):146-149.
- [4]左明.混凝土桥面采用三维激光扫描技术的数字化铣刨应用研究[J].交通节能与环保,2024,20(03):210-212+223.