

公路隧道试验检测要点探析

宋家旺

新疆兵团水科院（有限公司） 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：公路隧道作为交通基础设施的关键组成部分，其建设质量直接关系到交通运行的安全性与效率。试验检测作为保障隧道工程质量的核心手段，贯穿于材料选择、施工过程监控及后期运营维护的全生命周期。本文系统分析了公路隧道试验检测的技术要点，从材料检测、施工过程监控、结构实体检测及环境监测四大维度展开论述，结合无损检测技术、智能监测系统的前沿方法，探讨如何通过科学检测手段提升隧道工程的安全性、耐久性与经济性。

关键词：公路隧道；试验检测；材料检测；施工监控；结构安全；环境监测

引言

随着我国交通网络的快速扩展，公路隧道建设规模持续增长。截至2025年，我国已建成公路隧道超过2.5万处，总里程突破3万公里。然而，复杂的地质条件、多变的施工环境及长期运营需求，对隧道工程质量提出了严峻挑战。试验检测作为质量控制的核心环节，通过科学评估材料性能、施工工艺及结构状态，能够有效预防质量隐患，降低运营风险。本文结合行业规范与工程实践，系统梳理公路隧道试验检测的关键技术要点，为提升隧道工程全生命周期质量提供理论支持。

1 材料检测

1.1 原材料检测

混凝土作为隧道衬砌的主要材料，其性能对整个隧道结构的稳定性起着决定性作用。混凝土配合比设计并非一成不变，而是需通过大量试验来确定最优参数，以适应不同地质条件和工程需求。例如，在秦岭终南山特长隧道施工中，地质条件复杂，地下水丰富且对混凝土有一定的侵蚀性。为应对这一挑战，采用了C35高性能混凝土，通过精心添加粉煤灰与减水剂，显著提升了混凝土的抗渗性与耐久性。粉煤灰的掺入不仅改善了混凝土的工作性能，减少了用水量，还能有效抑制碱-骨料反应，提高混凝土的长期稳定性；减水剂则降低了混凝土的水灰比，增强了混凝土的密实性，从而提高了其抗渗能力，有效阻止了地下水的渗透，保障了隧道衬砌的质量。在混凝土原材料检测过程中，对水泥的凝结时间把控至关重要。水泥凝结时间过长，会延长施工周期，影响工程进度；凝结时间过短，则可能导致混凝土在浇筑过程中迅速凝固，无法充分振捣密实，影响混凝土强度。砂石的含泥量也是一个关键指标，含泥量过高会降低混凝土的粘结力，影响其强度和耐久性。外加剂的适应性检测同样不容忽视，不同类型的外加剂与水泥、砂

石等原材料之间可能存在相容性问题，若不进行适应性检测，可能导致外加剂无法发挥预期效果，甚至对混凝土性能产生负面影响。因此，必须严格把控这些指标，确保材料性能完全符合设计要求，为隧道工程奠定坚实的基础。锚杆作为支护系统的关键构件，其材质与锚固效果直接影响围岩的稳定性。在隧道施工中，围岩的稳定是保障施工安全和工程质量的前提。一旦锚杆出现问题，如材质不合格或锚固不牢固，就可能导致围岩松动、塌方等严重事故。检测中需采用超声波探伤仪评估锚杆内部缺陷，超声波在锚杆中传播时，遇到内部缺陷会产生反射、折射等现象，通过分析这些信号的特征，可以准确判断锚杆内部是否存在裂纹、气孔等缺陷，以及缺陷的位置和大小。同时，通过拉拔试验验证锚固力，拉拔试验模拟了锚杆在实际工程中承受拉力的情况，能够直观地反映出锚杆与围岩之间的锚固效果。例如，在某山岭隧道施工中，由于对锚杆注浆质量把控不严，导致局部锚杆注浆不饱满。在后续施工过程中，该区域围岩因缺乏有效的支护而发生松动，最终引发局部坍塌。事故发生后，通过地质雷达检测发现空洞，及时进行补注处理，才避免了事故的进一步扩大，这也充分说明了锚杆检测的重要性^[1]。

1.2 防排水材料检测

隧道渗漏是常见病害之一，防排水材料的质量至关重要。高分子合成卷材需检测拉伸强度、断裂延伸率及低温弯折性，确保其在复杂应力环境下保持完整性。排水管材则需通过压力试验验证其抗渗性，避免因管道破裂引发积水。例如，在港珠澳大桥海底隧道工程中，采用HDPE双壁波纹管作为排水通道，通过模拟海水腐蚀试验，验证了其50年使用寿命的可靠性。

2 施工过程监控

2.1 开挖质量检测

隧道开挖是隧道施工的首道工序,其质量直接影响到后续衬砌的厚度和结构安全。严格控制超欠挖是开挖质量检测的关键。超挖会导致衬砌厚度增加,不仅浪费材料,还会增加工程成本,而且可能影响隧道的整体稳定性;欠挖则会使衬砌厚度不足,无法满足设计要求,降低隧道的承载能力,为工程安全埋下隐患。传统检测方法依赖断面仪人工测量,这种方式效率低下,且测量结果受人为因素影响较大,误差较大。近年来,三维激光扫描技术因其非接触、高精度的优势,逐渐成为隧道开挖质量检测的主流方法。三维激光扫描仪能够快速、准确地获取隧道断面的三维坐标信息,生成高精度的断面模型。例如,在某特长隧道施工中,采用Leica ScanStation P50激光扫描仪,每5米生成一个断面模型。通过将扫描得到的断面模型与BIM设计模型进行对比,可以实时定位超挖区域,并精确计算出超挖量。施工人员根据检测结果,及时指导机械进行精准修正,将超挖量控制在5%以内,有效提高了开挖质量,减少了后续施工的难度和成本。

2.2 支护结构检测

锚杆与钢架作为初期支护的重要组成部分,其安装质量直接影响初期支护的效果和围岩的稳定性。锚杆检测需采用“数量-间距-长度-锚固力”四维控制法。通过全站仪测量锚杆的间距,确保锚杆布置符合设计要求,间距过大或过小都会影响支护效果;利用雷达探测锚杆的长度,准确掌握锚杆的实际锚入深度,保证锚杆能够充分发挥支护作用;采用拉拔仪验证锚杆的锚固力,确保锚杆与围岩之间的连接牢固可靠。钢架检测则需关注垂直度与连接强度。钢架的垂直度直接影响其受力性能,若钢架倾斜,会导致应力集中,降低钢架的承载能力,甚至可能引发钢架变形或破坏。采用扭矩扳手检查螺栓紧固力,确保钢架各部件之间的连接紧密,形成整体受力结构^[2]。例如,在某软岩隧道施工中,由于对钢架安装质量把控不严,导致钢架倾斜,局部应力集中。在后续施工过程中,该区域钢架出现明显变形,围岩也出现松动迹象。施工人员及时采取措施,增加锁脚锚杆与横向支撑,有效控制了变形,避免了事故的进一步扩大。这一案例充分说明了支护结构检测的重要性。

2.3 衬砌质量检测

二次衬砌作为隧道的最终承载结构,其厚度、强度及密实度是检测的重点。地质雷达法因其无损、高效的特性,广泛应用于衬砌质量评估。地质雷达通过发射高频电磁波,当电磁波遇到不同介质界面时,会发生反射和折射现象。根据反射信号的特征,如反射波的幅度、

频率、相位等,可以判断衬砌内部是否存在缺陷,如脱空、不密实、裂缝等。例如,在某高速公路隧道检测中,雷达图像显示拱顶存在1.2米×0.8米的脱空区。经钻孔验证后,发现该区域确实存在脱空现象,施工人员及时进行注浆填充,避免了运营期因脱空导致的塌方风险。此外,回弹法与钻芯法结合使用,可准确测定混凝土强度。回弹法是一种无损检测方法,通过测量混凝土表面的回弹值,结合碳化深度,推算混凝土的强度。但回弹法存在一定的局限性,其检测结果受混凝土表面状况、骨料种类等因素影响较大。钻芯法则是通过在混凝土结构中钻取芯样,进行实验室抗压试验,直接测定混凝土的强度。虽然钻芯法会对结构造成一定的损伤,但其检测结果准确可靠。将回弹法与钻芯法结合使用,可以充分发挥两种方法的优点,提高混凝土强度检测的准确性和可靠性,为结构安全评估提供可靠的数据支持。

3 结构实体检测

3.1 裂缝与变形监测

裂缝是隧道结构劣化的直观表现,它不仅会影响隧道的美观,更重要的是会降低结构的承载能力和耐久性。因此,需采用裂缝测宽仪与应变计对裂缝进行动态跟踪监测。裂缝测宽仪可以精确测量裂缝的宽度变化,应变计则可以实时监测裂缝周围的应变状态,通过分析应变数据,可以了解裂缝的发展趋势。例如,在某运营10年的隧道检测中,发现边墙出现0.3毫米横向裂缝。通过安装振弦式应变计,对裂缝扩展速率进行长期监测,并结合数值模拟分析,判定该裂缝为温度收缩裂缝。由于温度收缩裂缝对结构安全性影响较小,无需进行特殊处理,只需定期监测即可。拱顶下沉监测是评估隧道结构稳定性的重要指标之一。拱顶下沉监测依赖精密水准仪与全站仪,通过设置基准点与观测点,定期测量沉降量。基准点应选择在稳定的地段,以确保测量数据的准确性。观测点的布置应根据隧道的结构和地质条件合理确定,一般每隔一定距离设置一个观测点。例如,某城市隧道因周边基坑开挖,导致拱顶年沉降量达8毫米。施工人员及时对地基进行加固处理,通过增加桩基础、注浆加固等措施,提高了地基的承载能力,使拱顶沉降趋于稳定,保障了隧道的安全运营。

3.2 承载能力评估

结构承载能力评估是判断隧道结构是否满足设计要求和使用寿命的重要环节。结构承载能力需通过荷载试验验证。传统方法采用静载试验,通过堆载或反力架施加设计荷载,测量结构变形与应力。静载试验能够直观地反映结构在静力荷载作用下的受力性能和变形情况,

但试验周期较长,对交通影响较大,且试验成本较高。近年来,动载试验因其效率高、干扰小的优势逐渐普及。动载试验采用重载车辆以不同速度通行,通过加速度传感器采集振动信号,结合频谱分析评估结构动力特性。动载试验可以模拟车辆在隧道内行驶时的动态荷载作用,更真实地反映结构在实际运营中的受力状态。例如,在某跨江隧道检测中,采用动载试验方法,通过重载车辆以不同速度在隧道内行驶,采集隧道结构的振动信号,并进行频谱分析。分析结果表明,隧道结构的动力特性满足设计要求,验证了其满足100年设计寿命要求。动载试验的应用,为隧道结构承载能力评估提供了一种更加高效、便捷的方法。

4 环境监测

隧道环境监测包括施工期粉尘与有害气体控制,以及运营期通风、照明与噪声管理等多个方面,是保障人员安全与设备正常运行的关键。良好的隧道环境不仅能够提高驾乘人员的舒适度,还能延长隧道设备的使用寿命,降低运营成本。

4.1 施工环境监测

隧道掘进过程中,会产生大量的粉尘和有害气体,如甲烷、一氧化碳等。这些粉尘和有害气体不仅会对施工人员的身体健康造成严重危害,还可能引发爆炸等安全事故。因此,需实时监控粉尘与有害气体浓度。采用激光粉尘仪与电化学传感器,可实现多参数同步检测。激光粉尘仪能够快速、准确地测量粉尘浓度,电化学传感器则可以实时监测有害气体的浓度。

例如,在某煤系地层隧道施工中,由于煤层中可能存在瓦斯等有害气体,施工安全风险较高。通过布置TSP203地质预报系统,提前300米预测瓦斯突出风险。TSP203地质预报系统利用地震波的反射原理,通过分析反射波的特征,判断前方地质构造和瓦斯赋存情况。结合通风系统动态调整,根据瓦斯浓度监测结果,及时调整通风风量和风速,将瓦斯浓度控制在0.5%以下,有效避免了爆炸事故的发生,保障了施工人员的生命安全和工程的顺利进行^[3]。

4.2 运营环境优化

通风与照明是运营期隧道环境监测的重点。通风检测需测量风速、风压及污染物浓度,确保新鲜空气供应。良好的通风系统能够及时排除隧道内的汽车尾气、粉尘等污染物,保持隧道内空气清新,为驾乘人员提供一个舒适的行驶环境。例如,在某特长隧道中,采用纵向通风与射流风机组合系统,通过CFD模拟优化风机布局。CFD模拟可以准确预测隧道内气流的组织情况,根据模拟结果合理布置射流风机,使隧道内风速分布均匀,将CO浓度控制在20ppm以内,有效改善了隧道内的空气质量。照明检测则依赖车载照度仪,动态调整灯具亮度,避免“黑洞效应”与“白洞效应”。“黑洞效应”是指车辆从亮处驶入暗处时,驾驶员因视线适应问题而无法看清前方道路情况;“白洞效应”则是指车辆从暗处驶入亮处时,驾驶员因光线过强而产生眩光,影响视线。这两种效应都会对行车安全造成严重影响。某山区隧道通过引入智能调光系统,根据车流量与时间自动切换照明模式。在车流量较大的时段,提高灯具亮度,确保行车安全;在车流量较小的时段,降低灯具亮度,节约能源。该智能调光系统的应用,使隧道照明更加科学合理,节能率达40%,同时有效避免了“黑洞效应”与“白洞效应”的发生,提高了行车安全性。

结束语

随着物联网、大数据与人工智能技术的发展,隧道试验检测正向智能化、自动化方向演进。例如,分布式光纤传感技术可实现全断面应变与温度的连续监测;BIM+GIS平台可集成多源检测数据,构建数字孪生模型,为全生命周期管理提供决策支持。未来,需进一步突破无损检测设备的国产化率,完善智能算法模型,推动试验检测从“被动修复”向“主动预防”转型。

参考文献

- [1]郑明.公路桥梁隧道的试验检测研究[J].工程技术研究,2020,5(15):75-76.
- [2]杨俊,刘笑娣,刘新根,等.公路隧道结构快速检测车综述[J].华东交通大学学报,2018,35(4):30-38.
- [3]姚佳蓓.关于如何做好公路桥梁隧道的试验检测的探讨[J].四川建材,2022,48(5):154-155,158.