工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

铁路边坡锚杆框架梁施工风险及其防控

陈宁春
中铁西北科学研究院有限公司　甘肃兰州　730000

DOI：10.32629/ems.v8i10.22560

［摘　要］铁路山区路堑边坡常受风化岩层、节理裂隙及降雨入渗影响，开挖后岩土体原有受力状态改变，坡体稳定性随开挖进度及支护质量变化。锚杆框架梁依靠深部锚固传力与坡面梁格约束共同发挥作用，已用于多种铁路边坡防护工点。然而，坡体分级开挖、锚孔钻进、孔内注浆及框架梁浇筑相互衔接，前道工序偏差容易传递至后续作业。结合铁路施工环境及锚杆框架梁结构特点，需要分析各环节风险的形成条件，提出符合现场作业特点的分工序防控方法。

［关键词］铁路边坡；锚杆框架梁；施工风险；锚固质量；风险防控

山地铁路深路堑常穿越强风化岩体、土岩交界带或顺层斜坡。锚杆通过与稳定地层间的黏结传递拉力，框架梁通过梁格节点协调坡面受力，施工质量受岩性变化、设备站位及工艺偏差共同影响。《铁路路基设计规范》及相应铁路路基施工质量验收标准明确边坡防护与检验要求，但现场揭露地层可能与勘察资料不符，雨季作业条件和工序交叉还会影响各环节衔接。本文以现浇框架梁配合非预应力砂浆锚杆的常用形式为对象，分别分析开挖、成孔、注浆和梁体施工的风险成因，提出相应防控措施。

一、铁路边坡锚杆框架梁施工风险防控的重要性

铁路边坡锚杆框架梁风险防控，首先关系到开挖期的坡体稳定。铁路路堑沿山体展开，强风化夹层、顺层结构面和坡顶汇水条件随里程变化。开挖削弱坡脚原有支撑后，如果坡体在锚杆形成有效锚固前发生滑移或明显变形，后续框架梁难以恢复已受扰动岩土体的稳定状态，坡下作业人员、施工设备及邻近线路可能受到影响。其次，锚杆通过浆体黏结向稳定地层传递拉力，孔位、倾角、锚固长度及注浆密实程度决定实际传力条件。降雨改变岩土体含水条件，还可能降低软弱结构面的抗剪能力，放大施工偏差的不利影响[1]。再次，框架梁负责传递锚头作用力并约束坡面浅层岩土体，梁底贴合、节点连接和混凝土完整性直接影响梁格受力连续性。桥台附近的高陡边坡涉及邻近结构稳定问题，营业线施工还需关注落石、机械侵限及坡体变形对行车的影响。锚孔、梁底等部位在后续工序中被遮蔽，完工后的外观检查难以发现隐蔽缺陷。

二、铁路边坡锚杆框架梁施工风险分析

（一）坡体开挖失稳风险

铁路路堑边坡开挖时易发生局部坍塌，软弱结构面贯通后还可能出现整体滑移。首先，山区岩质边坡表层常覆盖残积土和强风化岩，下部夹有泥化层、顺坡节理或卸荷裂隙。坡脚原有支撑遭到削弱后，岩块容易沿既有裂隙松动，多组节理交切处则容易形成楔形危岩。其次，机械持续削坡使未支护的临空面增高，坡顶道路荷载、材料堆载及设备振动可能加剧局部变形。现场岩层产状与原有勘察资料不一致时，既定坡率难以完全反映临时施工阶段的稳定状况。再次，持续降雨使坡顶径流沿裂缝进入土岩接触带，土层基质吸力降低，裂隙水压力增加，岩土体抗剪强度随之下降[2]。位于隧道洞口、桥台或既有铁路附近的坡段，变形还可能沿贯通裂隙扩展至相邻构筑物。开挖失稳通常伴有坡顶裂缝扩展、坡面鼓胀、掉块增多或坡脚隆起，局部破坏还可能在短时间内迅速发展。

（二）锚杆钻孔偏差风险

锚杆钻孔偏差主要表现为孔口位置、钻进方向或钻孔深度不符合设计要求。首先，铁路高陡路堑坡面起伏较大，框架梁节点位于不同高程。钻机架设在不平整的平台上，底座沉降便可能引起钻杆偏转。坡面修整造成放样点丢失时，相邻锚孔还会连续错位。其次，钻头穿过土岩接触带或软硬互层时，钻具受力不均容易发生方向偏斜。破碎岩体中的孔壁剥落会引起扩孔、塌孔，孔底沉渣堆积则会使有效孔深不足，钻杆接长时偏斜还可能累积。孔深较大时，钻孔底部的偏斜往往难以从孔口直接识别。再次，孔向偏移会改变杆体穿越潜在滑动面的角度，使锚固作用偏离设计受力方向。锚杆间

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

距变化又可能导致梁格节点受力不均，孔口偏移较大时，锚杆外露端难以位于节点中心[3]。

（三）锚孔注浆缺陷风险

锚孔注浆缺陷是非预应力砂浆锚杆施工中的主要隐蔽风险。首先，孔内残留岩粉和碎屑会妨碍浆体贴合孔壁，孔底积水还可能稀释新注入的砂浆。破碎岩体中若存在贯通的张开裂隙，部分浆液还会沿裂隙外逸，造成孔内浆液填充量明显不足。其次，砂浆配料计量不准、搅拌不匀或存放过久，均可能引起离析、泌水和流动性下降。砂粒在注浆管中聚集并堵塞管路时，泵压读数可能异常升高，但压力变化不能直接说明孔内已经填充密实。再次，注浆管口提前离开浆面或孔口返出稀浆即停止注浆，容易在杆体周围留下空隙和不连续的包裹层。含水裂隙中的地下水可能冲淡尚未凝结的浆液，使锚杆与浆体、浆体与孔壁之间的黏结强度降低，并增加杆体锈蚀风险。框架梁成型后，注浆缺陷难以从外观识别，在锚固力试验中可能表现为承载不足，后期也可能出现锚头异常位移。

（四）框架梁浇筑质量风险

框架梁浇筑质量风险涉及梁槽支承、钢筋节点、模板固定及混凝土成型。首先，铁路坡面常有凸起岩块、风化凹槽和松散覆土，梁槽开挖深浅不一致可能造成梁底局部脱空，形成不均匀支承。纵横梁交叉节点的作业空间较小，锚杆端部与主筋集中，钢筋位置偏移可能减小有效截面或保护层厚度。其次，坡面模板需随地形分段拼装，尤其在陡坡施工作业受限时，支撑松动、接缝漏浆或振捣不充分，会造成蜂窝、孔洞及梁体截面尺寸偏差。混凝土沿陡坡下送时若发生离析，梁体局部便可能出现粗骨料堆积和砂浆不足。再次，纵横梁分次浇筑时，接缝处若结合不良，梁格节点可能成为受力薄弱部位。强风、暴晒会加快混凝土早期失水，温差变化则可能产生温度应力，形成裂缝。节点不密实、梁底脱空和钢筋保护层不足等缺陷会改变梁体受力条件，妨碍锚头作用力向周围坡面均匀传递。

三、铁路边坡锚杆框架梁施工风险防控措施

（一）加强分级开挖稳定控制

针对开挖失稳风险，应将坡体稳定作为分级开挖的先决条件。首先，施工技术人员应逐段复核坡顶裂缝、岩层倾向、风化界线和坡脚出露情况，将实际地质与勘察剖面逐段对照。遇到顺层软弱夹层、渗水带或危岩块体，应由技术负责人组织核查，提请设计单位复核支护条件，不能照搬相邻稳定坡段的作业安排。坡顶有村道时，还需核实车辆通行位置及边缘堆载状况。其次，现场应按批准的专项方案分级开挖，控制每级裸露高度和暴露时间，遵循开挖一级、及时支护一级的顺序。靠近隧道明洞或路肩的狭窄地段，可将坡面划为短作业段，机械负责主体开挖，临近设计坡面采用人工配合修整。不得在未完成稳定性确认的下级坡脚集中堆放弃渣，也不得随意掏挖形成上部悬空岩体。再次，坡顶应理顺临时排水去向，截水设施接入安全出水位置，坡面发现裂隙渗水时应记录出水位置、流量变化及对应层位。雨后检查截水沟淤堵、坡脚浸泡及坡面新鲜掉块，出现持续渗水或裂缝扩展时，暂缓进入相应工作面，待查明变化原因并完成处置后恢复施工[4]。最后，测量人员应在坡顶、坡面和坡脚设置相互关联的变形观测点，随开挖进度调整观测频次，雨前雨后核对同一点位的数据，并结合现场巡视判读位移趋势。若监测值达到专项方案设定的预警条件，停止受影响区域作业，撤离人员设备并启动既定报告程序。营业线邻近工点还须依照批准的施工计划落实防落物隔离和行车防护要求。

（二）严格控制锚杆钻孔精度

针对锚杆钻孔偏差风险，应以定位复测、设备校正和终孔核验贯穿成孔作业。首先，测量人员依框架网格建立孔位台账，以全站仪确定节点坐标，再结合坡面实际起伏放出孔口中心。放样完成后复测相邻孔距、边缘节点位置和锚杆轴线方向，坡面松动岩块清除后重新确认标记，避免以未修整的浮土面作为定位依据。转角处节点宜单独复测，不宜仅依据相邻孔位顺推。其次，钻机进场前检查平台承载和支腿固定情况，用角度测量工具校正钻架，使钻杆方向与设计倾角一致。有高铁边坡锚杆施工案例将孔位偏差控制在±50mm[5]，现场可据此编制自检指标，但具体限值仍须符合本工点设计与验收分项要求。首孔钻进后复查孔位及轴线，确认钻机未发生滑移，再展开同排孔位。再次，钻进过程中将每段进尺、钻渣颜色、岩层软硬变化及异常漏风漏水情况写入单孔记录。遇到软硬交替或钻具卡阻，不应强行加压推进，应检查孔向、孔壁完整性及有效孔深。发生塌孔、严重偏斜或孔底进入异常软弱层位时，暂停该孔施工并经技术核查后确定补钻、扫孔或设计处理方式，严禁未经确认擅自缩短锚杆长度。最后，

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

终孔后测量孔口坐标、有效孔深和孔向，将实测结果与设计值逐项核对，采用清孔工具排除沉渣，复查孔道通畅程度。孔位偏差已影响梁格节点连接的，不得通过强行弯折锚杆外露端补偿。隐蔽验收合格后方可转入杆体安装，使成孔信息与后续节点施工能够逐孔对应。

（三）强化锚孔注浆质量控制

针对锚孔注浆缺陷风险，应控制清孔质量、浆液状态及返浆过程。首先，安装前班组采用适宜的清孔方法排除孔底岩粉与积水，核查孔道完整性和实际长度。锚杆按设计设置定位构件，入孔时核对外露长度及注浆管位置，避免杆体贴壁。发现孔壁坍落应重新核实孔道状况。其次，试验人员依据设计强度和配合比试验拌浆，准确计量原料并筛除结块。某高铁锚杆框架工程采用 0.2～0.4MPa 的注浆压力[5]，该数值仅可作为同类工点工艺试验的参考，不应作为统一限值。若裂隙漏浆，应依据试验调整工艺，不宜单纯加压，以免扰动坡体。再次，采用孔底返浆法时，注浆管保持接近孔底并自深部连续注入，随浆面上升缓慢回抽，始终使管口埋于浆液中。操作人员记录开始时间、浆液用量、压力变化和孔口返浆状态，发现突然失压、异常超量或持续返清水时，查明漏浆通道及孔内水情后再行处理。停止注浆应以孔口返出均匀浆体和工艺规定条件为依据，不得仅凭泵机压力达到某一数值判断饱满。最后，按规定留置浆体试件，并检查锚杆锚固质量。普通铁路按 TB 10414—2018 第 11.5 节，高速铁路按 TB 10751—2018 的边坡防护条款验收。前者第 11.5.9～11.5.10 条对锚孔尺寸、倾角、注浆体强度、锚杆锚固和锚头处理作出要求。拉拔检验按适用标准及设计执行，不可套用锚杆挡土墙的抽检比例。发现锚固不合格，应界定受影响孔位，按复核意见补强并重新验收。

（四）规范框架梁混凝土施工

针对框架梁浇筑质量风险，从梁槽贴合、节点配筋、模板约束和养护检查四方面控制。首先，班组按测量放样边线开挖纵横梁槽,遇到局部突出的坚硬岩块采用小型机具修整，避免大范围扰动槽外坡面。清理槽底松散物后检查嵌置深度、截面轮廓及接触状态，对局部超挖区域按批准的技术做法填实，不得用松散回填土形成不稳定支承[5]。位于土岩交界处的梁段应特别核对底面是否连续贴合。其次，钢筋骨架在加工场按翻样单下料，现场逐点检查主筋间距、箍筋位置及保护层垫块。纵横梁交叉位置应根据设计节点详图组织绑扎，不得因操作空间不足随意切断受力钢筋。锚杆外露端与梁节点的连接形式必须按设计实施，对锚头周边密集钢筋区进行专门检查，防止轴线偏离节点中心形成偏心传力。再次，坡面模板按梁段拼装，用可靠的支撑和对拉构件固定，重点封闭槽边、转角及节点接缝。浇筑前核查运输通道、浇筑顺序和振捣设备可达性，混凝土宜按由下向上的顺序入模，节点处采用小型振捣工具分层振实，严禁直接碰撞锚杆或使模板发生明显位移。需设置施工缝时，应使位置和处理方式符合经批准的浇筑方案。最后，浇筑后及时覆盖保湿，结合气温与风力变化调整养护安排。拆模应依据混凝土实际强度及结构条件确定，不可单凭经过的天数决定。质量检查除观察蜂窝、露筋及裂缝外，还应复核梁截面、坡面贴合和锚头封闭情况，对节点缺陷先评估影响范围，再按确认的修补方案处理并存档。

四、结束语

铁路边坡锚杆框架梁施工涉及坡体开挖、孔内锚固及梁体成型，成孔与注浆缺陷具有较强隐蔽性。风险防控应以坡体地质状况和过程检验结果为依据，分别把握开挖时序、成孔精度、注浆连续性和梁体节点质量。岩性突变、漏浆异常或梁底脱空一旦出现，必须查清影响范围并完成技术复核。邻近营业线还须落实行车防护要求，做好施工质量验收。

[参考文献]

[1]叶帅华，唐宁，李京榜.降雨入渗条件下框架锚杆支护边坡稳定性与变形分析[J].地基处理,2024,6(1):77-89.

[2]胡启升.雅万高铁高陡边坡预应力锚索墩+锚索格梁加固技术[J].路基工程，2024（2）：204-209.

[3]黄一雄.运营铁路路堑边坡病害分析与整治[J].山西建筑，2025，51（1）：117-121.

[4]王邓峮，刘东岩，叶帅华.框架预应力锚杆支护边坡稳定性及锚固参数灵敏度分析[J].地基处理，2024，6（5）：444-450.

[5]伏旺记.高铁项目边坡防护锚杆框架与格宾网施工经济性比选[J].产品可靠性报告，2025（12）.

作者简介：陈宁春，出生年月：1987 年 4 月，男，汉族，学历：本科，籍贯：甘肃古浪，职称：工程师，研究专业方向：铁路工程。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.