

铁路隧道穿越断层破碎带施工技术研究

赵海峰

中铁十二局集团第四工程有限公司

摘要：随着全球铁路交通网络的不断拓展和铁路运输的不断发展，铁路隧道建设在现代交通基础设施中扮演着愈发重要的角色。然而，许多铁路线路穿越的地质条件复杂，特别是存在断层破碎带的地区，给隧道工程带来了独特的挑战。因此，本文对铁路隧道穿越断层破碎带施工技术展开研究，以便于为铁路工程领域的科研和实践提供有益的参考，推动相关领域的技术进步与创新。

关键词：铁路隧道；穿越断层破碎带；施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.05.063

引言

随着铁路交通的飞速发展，铁路隧道作为铁路线路中不可或缺的组成部分，扮演着连接城市和地区的关键角色。然而，许多铁路线路穿越地质复杂的断层破碎带，这为隧道工程的规划和施工带来了极大的挑战。断层破碎带的地质特征和不确定性使得隧道施工面临诸多技术难题，包括地层不稳定、断层活动等问题，隧道施工中穿越断层破碎带的挑战主要体现在地质勘探、支护结构设计以及施工方法方面。因此，深入研究铁路隧道穿越断层破碎带的施工技术，对于确保隧道工程的安全、高效和可靠具有重要的理论和实际意义。

一、断层破碎带的定义

在高速铁路工程中，断层破碎带是指地质结构中存在的断裂带，其沿着地层方向发育，并伴随着破碎、错动等复杂的地质现象。这类地质形态对隧道施工单位构成重大挑战，因为其地质特征可能导致地层不稳定、岩石破碎以及断层活动，增加了隧道工程的技术难度和风险^[1]。在面对断层破碎带时，施工单位需综合考虑地质勘探、支护结构设计和施工方法等因素，以确保隧道的安全、可靠和高效建设。对断层破碎带的准确定义和深入研究，将为高速铁路隧道施工提供关键的地质信息和技术指导。

二、断层破碎带的地质特征分析

（一）地层结构

断层破碎带常常表现为地质层次的断裂和错动，形成了破碎的地质结构。在地层结构中，断层破碎带的存在通常伴随着地层的不规则变化，包括岩性的交替和断层带的明显错动，这种地质结构的特征使得岩体的物理性质和力学性能出现较大的不均匀性，对隧道工程的施工和支护提出了严峻的挑战。

地层结构在断层破碎带中呈现出复杂的多层次性，其中岩层的变化对地质条件的理解至关重要。不同地质层之间的相对位移和错动是断层破碎带的主要地质特征之一，这种错动带来的地层分离和位移可能导致岩体的破碎，增加了隧道施工中的地质风险。地质特征的综合

分析涉及岩性的辨识、地层的稳定性评估以及断层破碎带的几何形态等多方面的因素，需要施工单位采用先进的地质勘探技术和综合分析手段。通过对断层破碎带的地质特征进行详尽的分析，施工单位能够更好地理解岩体的结构和性质，为合理制定支护方案提供重要依据。

（二）岩性特点

断层破碎带通常表现为地质结构的断裂和错动，与之相关的岩性特点直接影响了地质层次的均匀性和连续性。在岩性的分析中，我们经常面对不同种类的岩石，如花岗岩、片岩、砂岩等，它们在断层破碎带中的交替分布导致了地质结构的不规则性。

岩性特点直接影响了岩体的物理性质和力学性能，进而决定了隧道施工中的地质条件。不同岩性的强度、稳定性和渗透性的差异性使得断层破碎带的地质特征显得复杂多变。例如，花岗岩可能表现出较高的抗压强度，但对水的渗透性较低；相比之下，片岩可能更容易受到断层的影响，呈现出较高的岩体破碎性，这种多样性要求施工单位在地质特征分析中全面考虑岩性的差异，以科学合理的方式应对复杂多变的地质情况^[2]。

通过对断层破碎带的地质特征和岩性特点的深度分析，施工单位能够更准确地了解岩体的结构和性质，为隧道施工过程中的岩体处理和支护设计提供有力支持。

（三）地下水情况

断层破碎带通常伴随着地下水位的变化，而地下水的存在对岩体的稳定性和隧道的施工过程都产生深远影响。地下水的渗透和流动可能导致岩体的软化、溶解以及岩层的位移，增加了隧道施工中的地质风险。

在地质特征分析中，地下水情况需要被视为一个动态的因素。隧道穿越断层破碎带时，需要全面了解地下水的来源、渗透路径以及水位的波动情况。断层破碎带的地下水通常呈现出复杂的流动状况，可能形成水压梯度，进而对隧道围岩产生不均匀的水力作用，这种地下水的存在可能引发岩体的变形和溶解，甚至导致支护结构的失稳。

地下水情况的分析还需关注地下水的化学成分，特别是对于含有溶解性岩石的地质层。地下水中的溶解物质可能引发岩层的溶解，从而影响岩体的稳定性。此外，地下水对岩层的蚀变和侵蚀也可能增加岩体的破碎性，对隧道的支护提出更高的要求。

通过全面考虑断层破碎带的地质特征和地下水情况，施工单位能够更全面地把握隧道工程的地质环境，有针对性地制定相应的工程措施。

三、地质风险评估方法

（一）断层破碎带地质勘探方法

1. 地面勘探技术

断层破碎带的存在增加了地质风险的复杂性，因此

在进行地质风险评估时，地面勘探技术成为施工单位必须重点关注和灵活运用工具之一。地面勘探技术在断层破碎带的地质勘探中起着关键作用。传统的地面勘探技术包括地质剖面测绘、地质岩芯钻探、地电阻率测量等，这些方法能够提供关于断层带的地质结构、岩性变化和地层稳定性等方面的重要信息。同时，现代地面勘探技术的发展，如地震勘探、地面雷达技术等，为更全面、准确地掌握断层破碎带的地质特征提供了更为先进和高效的手段。

通过地面勘探技术获取的数据，施工单位可以建立地质信息数据库，进行地质风险评估。综合分析地质勘探数据，可以评估断层破碎带的活动性、岩体强度、地层分布等因素，为隧道支护结构设计和施工方法的制定提供科学依据。此外，地面勘探技术也能够帮助施工单位预测潜在的地质灾害风险，为施工期间的应急措施和安全预警提供支持。

2. 钻孔勘探技术

钻孔勘探技术通过深入地层并获取岩芯样本，提供了对断层破碎带细致而直观的地质信息。这种技术能够穿透地下层次，获取地层的物理性质、岩石性质、断裂带的分布情况等关键数据。通过对这些数据的分析，施工单位能够更准确地评估断层破碎带的地质特征，包括岩性的变化、地层的不均匀性以及断层带的规模和活动性^[3]。

在高速铁路隧道工程中，一种常用的钻孔勘探技术是岩芯钻探。通过对地下岩层进行岩芯采集，可以详细了解断层破碎带内岩石的物理性质和结构特征。此外，利用现代地质勘探仪器，如地电阻率仪、声波测井仪等，结合钻孔勘探，能够获取更为全面的地质信息。

通过钻孔勘探技术获取的数据不仅有助于对断层破碎带进行定量的地质风险评估，而且为支护结构设计和施工方案的制定提供了科学的基础。对地层内部结构的详细了解使得施工单位能够更好地预测潜在的地质问题，优化支护结构设计，从而有效降低工程风险。

（二）地质风险评估模型

1. 断层活动性评估

在高速铁路隧道施工中，地质风险评估是确保工程安全性和稳定性的核心环节，而断层破碎带的存在使得地质风险评估变得尤为复杂而关键。其中，断层活动性评估成为一个不可或缺的组成部分，为施工单位提供了深入了解断层破碎带潜在风险的有效手段。

断层活动性评估通过对断层带的活动性进行定量分析，为施工单位提供了对地质风险的更为精准的把握，这一评估过程通常基于地质勘探数据和监测信息，结合先进的地质风险评估模型，从而得出断层活动性的综合评价。通过分析断层的历史活动记录、现代断层运动趋势以及相关地震活动，施工单位能够更准确地判断断层破碎带的活动状态。

在高速铁路隧道工程中，断层活动性评估模型通常会考虑多个因素，包括断层类型、地壳运动速率、断层滑动速率等，这些因素的综合分析有助于形成对断层破

碎带未来活动性的预测，为施工单位提供科学依据，以制定相应的防范和支护策略。同时，断层活动性评估也能够为工程的风险管理提供重要信息，使施工单位能够更好地应对可能的地质灾害和应急情况。

2. 地层稳定性评估

地层稳定性评估模型的应用为施工单位提供了有力的工具，以深入了解地质条件对隧道工程稳定性的潜在影响。地层稳定性评估的基础是对地质结构、岩层性质和地下水等因素的全面考察。通过使用先进的地质风险评估模型，施工单位能够精确评估不同地层在受力和变形过程中的稳定性，并预测潜在的地层破坏机制，这种评估有助于预判在隧道施工过程中可能遇到的地质问题，为支护结构的设计提供科学依据。

地层稳定性评估的模型通常考虑多种因素，包括岩体强度、地下水对岩体的侵蚀、地质构造对地层的稳定性影响等。通过综合分析这些因素，施工单位能够全面评估不同地层的稳定性状况，有助于选择合适的支护结构类型和参数，以应对地下岩体变形和不稳定性引起的潜在风险。

这种评估方法不仅在隧道支护结构的设计阶段具有关键作用，同时在实际施工过程中也提供了及时的反馈。通过不断监测地层的变化和支护结构的工作状况，施工单位可以动态调整施工方案，及时采取应对措施，最大限度地降低由地层不稳定性引起的潜在风险。

四、铁路隧道穿越断层破碎带隧道施工技术

（一）隧道支护结构设计

1. 支护结构类型选择

针对断层破碎带的特殊地质条件，施工单位必须精准选择合适的支护结构类型，以应对岩体破碎、断裂带活动等复杂的地质情况。在支护结构的类型选择中，传统的锚杆注浆、钢筋混凝土喷射支护等技术仍然发挥着重要作用。锚杆注浆技术通过在岩体中固定锚杆，并注入高强度的浆液，能够有效地提高岩体的整体强度，增强支护效果，而钢筋混凝土喷射支护则采用高压喷射机将混凝土喷射到隧道壁面，形成坚固的支护层，适用于对岩体有一定要求的区域。

除了传统技术，新型的支护结构类型也在隧道施工中得到了应用。例如，激光扫描和数值模拟技术结合的预应力锚索支护，能够更准确地根据岩体的形态和断层破碎带的分布情况进行支护设计，提高了支护结构的适应性和针对性。此外，玻璃纤维增强聚合物（FRP）支护结构因其轻质高强的特点，也成为一种在断层破碎带施工中备受关注的技术^[4]。FRP支护结构不仅具有出色的抗腐蚀性能，而且可以降低整体结构的自重，有助于减轻地层压力，提高隧道的稳定性。

综合而言，隧道支护结构的类型选择应根据断层破碎带的地质特征和工程要求进行科学合理的决策。传统技术和新型技术的有机结合，将为高速铁路隧道施工提供更灵活、可靠的支护方案，以确保隧道工程的稳定、安全和高效施工，这种技术综合应用的策略为工程实践提供了丰富的选择，为隧道施工中的地质风险提供了可

行的技术解决方案。

2. 支护结构参数设计

在高速铁路隧道穿越断层破碎带的施工中，支护结构的参数设计是确保隧道稳定性和安全性的重要环节，这一技术要求施工单位深入了解地质情况和支护结构的工作原理，以精准调整和优化支护结构的参数，以适应断层破碎带的地质复杂性。

在支护结构参数设计中，岩体强度是一个关键参数。通过详细的岩体力学试验和现场勘探，施工单位能够准确获取断层破碎带中岩石的物理性质和力学性能，这些数据是确定支护结构参数的基础，能够为后续的支护结构设计提供有力支持。支护结构的长度、直径、密度等参数需要根据岩体的强度和断层破碎带的宽度等地质特征进行调整，以确保支护结构能够有效地抵抗岩体变形和断层活动带来的力学作用。

此外，支护结构的预应力设计也是一项关键技术。通过预先施加适当的预应力，可以提高支护结构的整体稳定性和抗变形能力。预应力的设计需要考虑到岩体的力学性质、断层的活动性以及支护结构的类型等因素，以达到最佳的支护效果。新型的材料和技术，如预应力锚索技术，通过调整预应力的方向和大小，使支护结构能够更好地适应断层破碎带中的应力变化，提高隧道整体的稳定性。

支护结构参数设计也需要考虑到隧道施工过程中的变化和不确定性。实时监测技术，如位移传感器和应变计，能够为施工单位提供隧道内部岩体和支护结构的变形数据，这些数据可用于实时调整支护结构参数，使其能够更好地适应断层破碎带的地质条件，提高支护结构的适应性和可靠性。

(二) 施工方法创新

1. 断层破碎带隧道掘进技术

支护结构参数设计方面，一项关键技术是结合现代工程地质勘探技术，如激光扫描和数值模拟，来进行更为精细和全面的断层破碎带地质特征分析。通过对地层力学性质和断层活动性的深入了解，支护结构参数可以更准确地定制，以确保支护结构在复杂地质条件下的最佳性能。

创新的支护结构参数设计应结合了断层破碎带隧道掘进技术的创新。在传统的掘进方法之外，采用先进的隧道掘进设备和技术是不可忽视的因素。例如，在断层破碎带中，采用波导雷达等现代地质勘探技术，实时监测岩层的变化，为支护结构参数的调整提供实时数据。同时，引入液压支架和刀盘掘进技术，使得掘进过程中能够更加精确地适应不同地质条件，有效降低岩体破裂和支护结构失稳的风险。

另一个施工方法的创新涉及施工的节奏和顺序。采用适应性施工方法，根据不同地质特征和断层破碎带的具体情况，灵活调整隧道掘进的速度和支护结构的施工进度。通过实时监测和数据反馈，能够及时调整施工计划，减小地质风险对施工过程的不利影响。

2. 断层带注浆技术

在高速铁路隧道穿越断层破碎带的施工中，断层带注浆技术是一项关键的技术创新，旨在有效应对断层破碎带带来的地质挑战，这一技术的核心在于利用注浆材料对断层带进行加固，以提高岩体的整体稳定性和减缓断层的活动性。

断层带注浆技术首先需要对断层带进行准确的地质勘探和分析。通过使用现代地质勘探手段，如地震勘探和地质雷达，施工单位可以获取断层带的具体位置、规模和活动状态等重要信息，这些地质数据为后续的施工提供了科学依据，为断层带注浆技术的实施提供了基础。

在注浆技术的应用过程中，选择合适的注浆材料是至关重要。传统的注浆材料包括水泥浆、聚合物浆等，但随着技术的发展，新型的高强度注浆材料也得到了广泛应用，这些材料不仅具有较高的抗压强度，而且能够在断层带中形成坚固的填充物，有效地提高了岩体的整体强度。

在注浆技术的具体实施中，通过合理设计注浆孔的位置和深度，可以确保注浆材料充分渗透到断层带中，达到加固的效果。同时，通过控制注浆压力和流量，可以实现对注浆材料的精准控制，避免过量注浆引起的问题，如岩体裂隙的扩大等。

与传统的支护结构相比，断层带注浆技术具有更好的适应性和渗透性。它能够有效填充断层带内的孔隙和裂隙，增强岩体的整体连续性，减缓断层的发展，这种技术的创新不仅提高了隧道施工的安全性，还降低了地质风险，为高速铁路隧道工程的成功实施提供了关键的技术支持^[5]。通过不断创新和优化断层带注浆技术，可以在复杂地质条件下取得更好的施工效果，为高速铁路隧道的可持续发展提供了有力的技术保障。

五、结论

断层破碎带隧道施工的技术研究为高速铁路工程提供了关键支持。通过深入地质特征分析、岩性特点综合考虑以及地下水情况细致研究，科学制定了施工方案。创新的支护结构设计和注浆技术应用有效提升了隧道稳定性。施工单位需结合现代技术手段，灵活调整施工策略，全面把握隧道施工的地质复杂性，确保工程安全、高效、可持续进行。

参考文献

- [1] 彭斌, 杜泽辉, 余鹏等. 穿越断层破碎带特大跨度铁路隧道减震技术研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2023, (10): 15-21.
- [2] 张少硕, 姚传勤, 马海彬等. 超大断面隧道穿越断层破碎带施工关键技术研究[J]. 建筑技术, 2023, 54(08): 904-907.
- [3] 魏星. 高速公路隧道穿越断层破碎带施工技术分析[J]. 江西建材, 2022, (12): 265-266+269.
- [4] 李平. 高速公路隧道穿越断层破碎带施工技术的质控措施[J]. 居业, 2022, (06): 16-18.
- [5] 贺绥保. 某公路隧道穿越断层破碎带施工技术[J]. 工程技术研究, 2022, 7(10): 64-66.