

文章编号: 1674—8247(2024)02—0082—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 02. 015

# 复杂城市环境下铁路车站基坑施工引起邻近隧道水平变形的控制技术分析

肖冰峰

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:** 坑内开挖卸载会引发坑底土体向上隆起变形、基坑围护结构变形以及基坑周边土层的移动。在复杂城市环境下进行基坑开挖, 会对基坑相邻的地下管道、建筑物基础、隧道及其他地下设施产生影响。随着铁路车站基坑场地与位移敏感类建筑物的距离持续变小, 变形控制尺度从 cm 级向 mm 级转变, 变形控制的难度逐渐增大。通过对基坑开挖引起相邻地下结构变形控制进行系统性研究, 可以将变形控制分为针对基坑源头的变形控制和针对位移控制目标的变形控制。本文详细阐述了两类控制技术的基本原理和应用局限性, 并围绕基坑开挖前预注浆、囊式注浆装置等方面, 重点提出了注浆主动控制技术的创新研究方向。

**关键词:** 复杂城市环境; 铁路车站基坑; 邻近隧道; 水平变形; 变形控制

中图分类号: U231. 4; TU753

文献标志码: A

## Analysis of Control Techniques for Horizontal Deformation of Adjacent Tunnels Induced by Construction of Railway Station Excavations in Complex Urban Environments

XIAO Bingfeng

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Excavation unloading within a pit triggers upward heave deformation of soil at the pit bottom, deformation of the pit's retaining structure, and displacement of surrounding soil layers. Excavation of foundation pit in complex urban environments can impact adjacent underground pipelines, building foundations, tunnels, and other subterranean facilities. As the distance between railway station excavation sites and displacement-sensitive structures continues to shrink, the control scale shifts from centimeters to millimeters, increasing the difficulty of deformation control. Through systematic research on deformation control induced by excavation on neighboring underground structures, deformation control can be categorized into two types: source-based control targeting the excavation itself and target-based control aimed at displacement-sensitive objectives. This paper reviewed the fundamental principles and application limitations of these two control techniques, and highlighted innovative research directions for active grouting control technology, specifically emphasizing aspects such as pre-excavation grouting and inflatable grouting devices.

**Key words:** complex urban environment; railway station excavation; adjacent tunnel; horizontal deformation; deformation control

收稿日期: 2024-02-26

作者简介: 肖冰峰(1992-), 男, 工程师。

引文格式: 肖冰峰. 复杂城市环境下铁路车站基坑施工引起邻近隧道水平变形的控制技术分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2): 82-86.

XIAO Bingfeng. Analysis of Control Techniques for Horizontal Deformation of Adjacent Tunnels Induced by Construction of Railway Station Excavations in Complex Urban Environments [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 82-86.

进入21世纪,城市土地资源的开发受限成为制约城市发展的重要因素,城市地下空间开发利用成为促进城市发展的关键动能<sup>[1]</sup>。城市建设发展也逐渐从过去的“二维平面”转向“三维立体”,其中超深超大基坑的发展和地下交通枢纽的建设尤为显著。截至2022年底,我国轨道交通运营总里程约10 078 km,首次突破1万km<sup>[2]</sup>。随着城市化进程的不断推进,城市建成区的既有铁路车站对城市发展产生了很大的限制,其中包括站场对城市的分割和交通效率低下等问题。为充分利用铁路站区的大面积土地,实现土地价值的最大化,城市综合体建设得到了持续的支持和投入,推动了既有铁路车站的更新改造项目。

在对既有铁路车站进行上盖开发改造时,需同步建设地下停车场、地下公共交通换乘中心,基坑工程的规模、深度逐渐增大,例如成都站改造的基坑工程达到了近40 m深。然而,既有铁路车站往往处于复杂高密度的城市建成区环境下,紧邻高层商业体、居民楼,与城市地铁、城市道路接驳,周边环境土层中存在大口径的燃气管线、给排水管道以及高等级电力线路。基坑开挖会引起周边地层发生变形,如图1所示。铁路车站改造项目的基坑工程在设计、施工过程中,更应重点考虑对相邻建(构)筑物的位移保护问题,尤其应该研究如何采取有效措施对位移变形敏感的隧道进行位移控制。

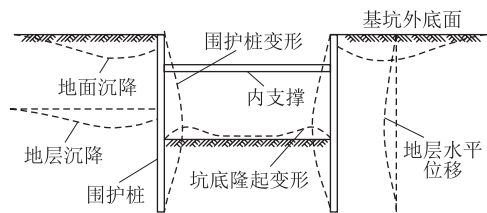


图1 基坑支护结构及周边地层变形示意图

区间隧道是对变形要求极为严格的地下结构。相邻基坑在施工过程中引起的土层变形超过安全值,会对隧道的结构安全以及列车的运营安全产生重大影响,甚至危害到乘客的生命安全。国家以及各地规范及技术标准对隧道变形进行了严格控制。根据相关规定,邻近施工引起的隧道水平位移和竖向位移预警值为10 mm、控制值为20 mm。隧道mm级的变形控制要求极大地提升了基坑开挖及环境保护的设计及施工难度,因此有必要在控制基坑施工引起的土层变形方面采取更加全面、精细、可靠的技术措施。

## 1 现有技术的基本原理

### 1.1 针对基坑源头的变形控制

#### 1.1.1 加强基坑支护结构

相关施工措施有:加大围护结构插入比、增加围护结构的插入深度;增加围护结构厚度及配筋率;采用预应力锚杆<sup>[3]</sup>;采用刚度更大的支撑形式及结构、在深度及平面方向上增加支撑密度、增强单个支撑结构刚度。通过提升基坑支护结构体系整体刚度来降低周边土体的竖向沉降,也能一定程度降低土体的水平变形<sup>[4]</sup>。冯龙飞<sup>[5]</sup>等研究了不同基坑工程结构方案对相邻隧道结构的影响,在广州某基坑工程中采用了实测分析手段,研究采用提高基坑围护结构刚度的措施对相邻隧道结构变形进行了有效控制。

#### 1.1.2 基坑分区开挖

当基坑工程长宽值大、影响范围大时,可进行分块开挖,制定先后顺序,一块开挖结束,完成结构施工后开挖下一块区域,通过分块将大面积开挖卸荷分解为若干小范围开挖卸荷,能有效减小支护结构及周边土体变形。如果基坑周边有位移变形敏感类建(构)筑物时,根据不同区域对变形控制强弱的要求不同,可在分块开挖的基础上,对围护结构进行分区支护,再合理制定顺序进行开挖以及结构施工<sup>[6]</sup>。谢雄耀<sup>[7]</sup>等对上海某基坑工程进行了数值模拟计算,研究基坑采取分区分块开挖对隧道的变形控制影响,证实了该施工措施有效。

#### 1.1.3 坑内堆载及坑内外土体加固

当基坑工程受力被动区分布有软弱土层时,尤其是坑底存在大范围软弱土层时,采取增加水平支撑刚度、围护结构插入比、围护结构刚度等措施难以有效控制围护结构的水平变形。在这种情况下,可以沿围护结构方向,根据变形控制具体要求对被动区域一定范围内的软弱土层采取加固措施。当基坑开挖深度很大,增加围护结构插入坑底以下深度,有时不足以控制坑底土体隆起变形,可在基坑底部设置减少坑底隆起桩、提前打入锚杆,来减小土体隆起变形。此外,采用坑内反压土、坑底堆载的措施,可有效降低坑内土体开挖引起的卸载影响,帮助平衡坑内外土压力,减小支护结构的内力及变形。

#### 1.1.4 设置隔离桩

隔离桩措施经常用于降低基坑施工对周边地面及相邻建筑物沉降的影响,也适用于降低基坑施工对邻近地下结构水平位移的影响,可以有效降低从基坑源头产生的变形通过土体的传递作用,从而减小对周

边地下结构变形的影响。值得注意的是,采用隔离桩在控制相邻隧道结构水平位移时,不仅会产生对隧道变形的“有益”阻隔作用,还会产生对隧道变形的“有害”牵引作用,牵引作用会增大隧道结构变形。在做隔离桩结构设计时,如果埋深及桩长取值不对,隔离桩产生的牵引作用过大,对控制坑外隧道位移会产生负面影响<sup>[8]</sup>。应宏伟<sup>[9]</sup>等对基坑外设置与未设置隔离桩的两种工况进行了研究,证实了正确设置隔离桩对地表土体位移控制的显著效果。

1.2 针对位移控制目标的变形控制

1.2.1 目标变形控制关键区域

从基坑源头采取被动措施实现对邻近隧道的位移控制具有很多局限性,直接针对目标核心区域进行位移控制则具有明显优势。近年来,郑刚<sup>[10]</sup>等开展了基于位移变形保护对象的主动控制技术研究,提出了变形影响区域、变形控制关键区域的概念。基坑内部土体的开挖卸荷引起了坑底土体向上隆起变形,再加上围护结构变形影响,基坑外土体有了向基坑内滑动的趋势。基坑开挖结束后土体位移如图 2 所示,虚线三角形范围内土体位移较为明显,隧道右侧位于位移影响区内,导致隧道产生了位移变形。隧道变形控制关键区域则是从定向控制隧道位移变形的角度出发,仅对位移影响区中一个小范围土体施加体积应变,从而对隧道结构变形进行直接的主动控制,减小甚至抵消基坑开挖引发的隧道变形。

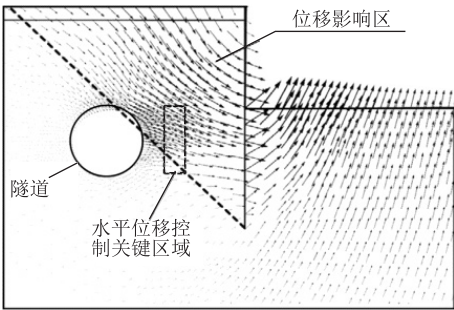


图 2 基坑开挖结束后局部土体位移矢量图

1.2.2 袖阀管注浆变形控制技术

袖阀管注浆技术是在 20 世纪 50 年代由法国公司开发的一种注浆工法,袖阀管结构组成如图 3 所示。该技术通过在地下进行钻孔,然后由袖阀管将注浆材料(通常为水泥、水玻璃双液浆)注入地下,以加固土体或修复地下工程,广泛应用于国内外工程建设领域,在法国、英国、日本、意大利等国家的基坑项目及其他基坑工程中采用了该项技术。在国内,北京、上海、广州、成都等城市在基坑工程施工中应用了袖阀

管注浆技术,取得了良好的变形控制效果。注浆主要流程为:测量布孔→钻设孔位→灌注套壳料→下放袖阀管→洗孔并封口→注浆→施工监测和检测→结束。

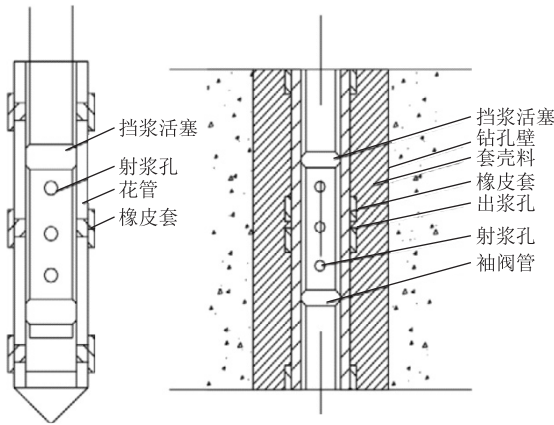


图 3 袖阀管结构组成示意图

在工程实际应用方面,逢铁铮<sup>[11]</sup>为保证隧道穿越过程中地面建筑物的安全,采取了地面注浆和隧道内注浆的方法进行过程控制和地面建筑物抬升。彭正勇<sup>[12]</sup>在隧道下穿建筑物时采用跟踪注浆技术实现抬升作用,成功控制建筑物沉降。郭乐<sup>[13]</sup>等对长三角地区某铁路路基进行注浆试验,治理软土复合路基的沉降,证实了注浆对复合地基的抬升作用。

目前有关注浆抬升建筑物或隧道的研究较多,而有关注浆控制隧道水平变形的研究较少。研究表明,在注浆施工过程中,当浆液进入土体凝固后,不仅会在竖直方向有应力补偿作用,在周边水平方向也存在一定应力补偿作用。郑刚<sup>[14]</sup>等依托天津地区某基坑工程,开展袖阀管注浆原位试验,研究了注浆过程中邻近土体的水平变形模式,总结了注浆总量、注浆距离、注浆顺序等不同因素对邻近土体水平位移的影响规律。在完成注浆原位试验后,通过采用“多孔位、小方量、近距离、从远到近”的注浆方案,提高注浆效率,成功控制邻近隧道的水平变形。

2 现有技术的局限性

2.1 针对基坑源头变形控制技术的局限性

加强基坑支护结构等针对基坑源头变形的被动控制技术的局限性,体现在其是在源头施加影响,经中间土层变形传递后,间接对目标结构的位移进行控制。在日常工程中,工程师以及建设者会首先想到通过加强基坑结构等措施去控制对相邻隧道的影响。但是,经过工程实践,面对隧道位移变形的“病灶”,从基坑源头“用药”存在以下 3 方面问题:



(1)不是“对症下药”。在基坑源头处采取的措施,经过中间土层的“衰减”作用,在目标位移控制的最终收益不仅会大打折扣,更因土层参数及本构模型的不确定性使得结果很难精准预测。

(2)不是“靶向药”。在一定距离外,通过在基坑源头处施加的变形控制,通过中间土体的水平位移传递,能对修正隧道变形起到何种积极作用,具有很强的不确定性,只能阻止变形进一步发展,很难实现对隧道已产生变形的定向修复,不能进行“靶向治疗”。

(3)不是“特效药”。被动措施一般在基坑开挖前就已经确定,不能根据隧道后续的变形进行及时调整,如果施工过程中发生隧道变形“失控”,很难通过强化被动措施立即进行补救,将会迫使基坑开挖停工,影响重点项目工期。

## 2.2 袖阀管注浆技术的局限性

袖阀管注浆技术在控制基坑开挖引起的邻近隧道变形上具有显著作用,并已经在天津、珠海、成都等大城市地下空间建设中成功应用。但是,在不均匀土层注浆引起土体劈裂的情况具有不确定性,在砂土等高渗透性土层中浆液流失损耗较大,可能会导致控制效果不佳。郑刚等通过原位试验发现,由于浆液向上流动,导致土体水平位移最大值不处于注浆的中间位置,而是在注浆范围上边缘处。总结袖阀管注浆技术的应用局限性如下:

(1)不能精准控制土体变形。袖阀管注浆技术缺乏精细化控制能力,存在难以控制注浆体积、位置、形状,对临近土体扰动过大等问题。尤其是在不均匀土层中,比较难以通过确定注浆压力、注浆量来实现预先设定的土层体应变,注浆的效果具有不确定性。

(2)不能实现补充重复注浆。为实现土层的快速膨胀,袖阀管加压注浆使用的是快速凝固的水泥、水玻璃混合双浆液,一般初凝时间为20 s,一旦袖阀管注浆施工完成,注浆液快速凝固后,不能继续对土体中浆体进行补充注浆。

(3)不能很好适应高渗透性土层。当注浆范围内为渗透性较强的砂土时,因土层具有空隙率大、高渗透性的特点,浆液会在砂土中产生渗漏甚至是窜浆,注浆将难以准确控制膨胀压力,很难产生有效、预期的膨胀体积,对相邻的地下结构实现不了有效位移控制。

## 3 技术创新研究方向

### 3.1 基坑开挖前预注浆

在已有的通过注浆控制基坑施工引起的相邻隧道水平变形的工程案例中,都是在基坑引起隧道水平

变形超过规定上限值后,再通过注浆对已有变形进行修正。在基坑开挖前,在靠近隧道一侧,进行预注浆,既可以加固隧道水平位移关键区域的土体,又可以使隧道结构产生一定的负变形。选择距离隧道合适的范围内,布置一排注浆孔,通过控制注浆压力、注浆量,使隧道安全、均匀地产生远离基坑方向的水平位移。一方面,可使隧道产生水平位移缓冲值;另一方面,本次注浆孔为注浆区域最靠近基坑一侧,按照“由远及近”原则,可为后续注浆提供支挡,有利于整体注浆效果。

### 3.2 简易囊式注浆装置

控制土体变形的胶囊注浆技术通过将浆液注入预先埋入土体一定深度的胶囊袋中,使浆液聚集在囊袋内部并推动囊袋向外部膨胀,从而实现在土体预定深度产生预定体积大小、预定形状样式的膨胀,实现对目标区域土体变形的定向、精准调控,进而实现对相邻地下结构的变形精准控制。

从设备端、材料端进行创新,设计并制造一种简易、可靠的注浆胶囊。膨胀后的形状、尺寸根据实际工程需要提前确定,达到不同的土体变形控制效果。简易囊式注浆装置,可以实现注浆囊标准化制造、现场成孔后快速植入、具备不同膨胀形状、工程现场快速注浆等优点。配套新型、智能、便捷、快速的注浆设备,就能进一步开展大面积、多孔位、全天候注浆。此外,相比于长的、大体积注浆囊,小尺寸的注浆囊更容易使注浆囊膨胀为预定的形状,确保注浆效果。

### 3.3 研究可重复注浆的新型浆液

近年来,天津大学郑刚教授团队对囊式注浆主动控制技术的浆液成份进行研究,解决了传统的水泥浆体凝结时间短、流动性差等问题,可使浆体的初凝时间延长至60 h左右。当基坑施工引起的隧道等结构物变形达到预警值时,在胶囊中注入浆液对土体变形进行控制,当隧道变形回归安全范围时停止注浆。此后进行动态监测,当基坑后续施工再次导致隧道变形达到预警值时,在浆液初凝之前,继续重复向胶囊中注入浆液,使得隧道变形始终保持在安全范围内。然而,基坑工程的整体工期很长,在此期间都可能引起相邻隧道的变形。因此,要深入研究浆液组成、材料配比,采用新型注浆液,进一步延长初凝时间,更好地满足工程实际需求。

## 4 结论

在复杂城市环境下,铁路车站基坑开挖引起邻近隧道的位移控制要求进入mm量级,该位移控制要求

逐渐成为基坑整体方案设计的重要考虑因素。围绕基坑开挖引起相邻隧道水平位移控制,针对基坑源头的变形控制技术缺乏精准度和有效性,成本投入大、取得成效小、工程适用性低。针对目标进行的位移控制不仅直接、高效、动态,还能有效减少被动措施,节约工程投资,并且能有效应对隧道变形失控的突发情况,及时介入进行校正,保障交通运行安全。袖阀管注浆技术已被证明能有效应用于软黏土地质情况下的土层水平位移控制,但如何在砂土层以及不均匀土层中应用推广仍需进一步研究。胶囊式注浆作为一种新型的土体水平位移控制技术,具有靶向、精准、可重复注浆的显著优点,具有很高的推广应用价值,但在设备、工艺、体系等方面尚需进一步总结经验及制定标准,健全成熟体系后方可全面推广使用。

# 参考文献:

[1] 郑刚,朱合华,刘新荣,等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 1-24.  
ZHENG Gang, ZHU Hehua, LIU Xinrong, et al. Control of Safety of Deep Excavations and Underground Engineering and Its Impact on Surrounding Environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1-24.

[2] 王福文,冯爱军. 2022年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(3): 521-528.  
WANG Fuwen, FENG Aijun. Statistics and Development Analysis of Urban Rail Transit in China in 2022[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(3): 521-528.

[3] 高显平. 某深基坑施工对临近高速铁路路基影响的研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(3): 31-35.  
GAO Xianping. Study on the Influence of Deep Foundation Pit Construction on nearby High-speed Railway Subgrade [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(3): 31-35.

[4] 张昊然,姚海波,耿宸宸,等. 基坑开挖对既有隧道的影响与支护方案对比研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 43-48.  
ZHANG Haoran, YAO Hai-bo, GENG Yingchen, et al. Comparative Study on Impact of Foundation Pit Excavation and Supporting Schemes on Existing Tunnels [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 43-48.

[5] 冯龙飞,杨小平,刘庭金. 紧邻地铁隧道深基坑支护技术及监测分析[J]. 隧道建设, 2013, 33(6): 515-520.  
FENG Longfei, YANG Xiaoping, LIU Tingjin. Support Technologies for and Monitoring Analysis on Deep Foundation Pit Adjacent to Existing Metro Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2013, 33(6): 515-520.

[6] 王卫东,沈健,翁其平,等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1340-1345.  
WANG Weidong, SHEN Jian, WENG Qiping, et al. Analysis and

Countermeasures of the Influence of Foundation Pit Engineering on Adjacent Subway Tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1340-1345.

[7] 谢雄耀,郁宏杰,王庆国,等. 基坑开挖引起下卧既有电力隧道变形的控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 88-97.  
XIE Xiongyao, YU Hongjie, WANG Qingguo, et al. Deformation Control of Operating Tunnels Induced by Deep Excavation of Overlying Metro [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 88-97.

[8] 郑刚,杜一鸣,刁钰. 隔离桩对基坑外既有隧道变形控制的优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3499-3509.  
ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu. Optimal Analysis of Deformation Control of Existing Tunnel Outside Foundation Pit by Isolation Pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3499-3509.

[9] 应宏伟,李涛,杨永文,等. 深基坑隔断墙保护邻近建筑物的效果与工程应用分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1123-1128.  
YING Hongwei, LI Tao, YANG Yongwen, et al. Effect and Application of Partition Walls in Protecting Adjacent Buildings from Deep Foundation Pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1123-1128.

[10] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36, 201.  
ZHENG Gang. Method and Application of Deformation Control of Excavations in Soft Ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1-36, 201.

[11] 逢铁铮. 全程注浆在隧道穿越既有建筑物中的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3451-3458.  
PANG Tiezheng. Experimental Study of Whole Process Grouting Used in Tunnel Passing through Existing Structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3451-3458.

[12] 彭正勇. 注浆抬升在隧道穿越既有建筑物中的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2963-2969.  
PENG Zhengyong. Research and Application of Grouting Uplift in Tunnel Crossing Existing Buildings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2963-2969.

[13] 郭乐,杨新安,吴东鹏,等. 高速铁路软土复合路基沉降注浆治理现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 1-7.  
GUO Le, YANG Xinan, WU Dongpeng, et al. Field Test on Treating Settlement by Grouting for Soft Soil Composite Subgrade of High Speed Railway [J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 1-7.

[14] 郑刚,王若展,程雪松,等. 注浆对邻近土体水平变形影响的原位试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(9): 959-968.  
ZHENG Gang, WANG Ruozhan, CHENG Xuesong, et al. In Situ Test Study of Influence of Grouting on Horizontal Deformation of Adjacent Soil [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(9): 959-968.