

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2017.05.010

适用于 120 ~ 160 km/h 的 地铁工程盾构隧道限界分析

唐 云

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘 要: 随着地铁运营速度的提高,乘客舒适度要求提高,目前国内传统地铁盾构隧道断面不再适合。通过对国内既有工程盾构隧道尺寸的调研,结合北京新机场线的最新研究成果,通过速度对设备限界的影响、隧道阻塞比对盾构隧道断面尺寸的影响以及供电制式对盾构隧道断面尺寸的影响等分析,提出了制定盾构隧道断面限界的方式,并在相关工程中进行应用。

关键词: 轨道交通; 盾构隧道限界; 120 ~ 160 km/h; 设备限界; 隧道阻塞比; 供电制式

中图分类号: U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2017)05-0056-04

Shield Tunnel Boundary for 120 ~ 160 km/h Subway Engineering

TANG Yun

(Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: With the improvement of the operation speed of subways and the passenger comfort requirement, the cross section of the traditional metro shield tunnel is no longer suitable. Through the research on the size of the existing shield tunnels in China, combined with the latest research results of Beijing new airport line, the influence of speeds on equipment gauge, the influence of tunnel blocking ratio and power supply system on the cross section dimensions of shield tunnels are analyzed. The paper puts forward a way of making shield tunnel section boundary, and applies it in relevant engineering projects.

Keywords: urban rail transit; shield tunnel boundary; 120 ~ 160 km/h; equipment gauge; tunnel blocking ratio; power supply standard

速度不大于 100 km/h 的地铁盾构隧道限界^[1],主要由设备限界、轨道结构高度和设备安装等共同确定。目前国内地铁单洞单线盾构隧道采用的建筑限界主要是直径 5 200 mm 和 5 300 mm 两种^[2-3],对应的隧道断面内径也以 5 400 mm 和 5 500 mm 两种为主。

随着列车运行速度的提高,车辆限界和设备限界均有所增大,设备限界是决定断面限界的最基本因素,需要有相应的分析;同时,由于运行速度的提高,列车在隧道内高速运行,空气流动受隧道及车体的限制以及空气的可压缩性,导致隧道内空气压力剧烈变化,由此引发一系列工程问题:初始压缩波诱发的出口微压波造成噪声及周边建筑物破坏,压力波动传入车厢引

起乘客耳膜压痛,压力波动引起列车侧壁、车窗玻璃以及隧道内设施破坏等。因此,需要研究确定合适的断面限界来克服以上压力变化产生的影响;随着行车速度的提高,车辆的供电制式会有相应的调整,供电制式的变化对单洞单线盾构隧道限界也有较大的影响。

1 国内既有工程调研

广州地铁 3 号线设计之初虽然非常重视空气动力学效应,并进行了模拟计算,但由于当时国内这样的系统是第一个,具有大阻塞比、全地下的快线系统特征,按国外的压力变化指标控制的切身感受没有感性认识。随着 3 号线的开通运营,快线的空气动力学效应感受反映出来。当列车在长度 6.2 km、内径 5.4 m 的盾构隧道——番禺广场站至市桥站区间运行,列车最高运行速度接近 120 km/h 时,乘客和司机会出现胸闷、耳鸣和耳痛等身体不适情况^[4]。广州地铁 3 号线

收稿日期: 2016-10-20 修回日期: 2016-11-21

作者简介: 唐云,男,硕士,工程师,从事城市轨道交通限界研究工作, tangyun@bjucd.com

采用 5.4 m 直径隧道断面时的阻塞比约为 0.5,车辆供电制式为 DC1 500 V 接触网供电。

深圳地铁 11 号线列车以 120 km/h 的速度运行,盾构隧道采用 6.0 m 的直径,在考虑泄压措施后,最不利洞口处的压力变化值都可以满足建议的 1 500 Pa/3 s 的压力舒适度要求。隧道阻塞比约为 0.4,车辆为 DC 1 500 V 接触网供电。

对上海地铁 16 号线列车 120 km/h 高速运行的隧道空气动力学效应进行计算与分析研究后认为,常规隧道不适宜运行 120 km/h 的列车,需要加大隧道有效面积,减少阻塞比。该工程通过隧道形式和规模的多方案比选,对 120 km/h 的地铁线可采用既有隧道内径 10.36 m 的隧道,并按单洞双线加中间隔墙方案作为隧道的实施方案(车隧阻塞比约为 0.33),也可按照内径 6.8 m 的隧道方案(车隧阻塞比为 0.31),按照单洞单线实施两条隧道。目前,上海 16 号线通过了上海市建委专家评审,结论是上海首次采用 10.36 m 的大直径地铁隧道。车辆供电制式为接触轨受电,预留受电弓条件。

青岛蓝色硅谷工程列车区间最高运行速度为 120 km/h,DC1 500 V 接触轨供电,隧道区间全线大于 10 km,隧道断面为矿山法隧道,断面设计时也考虑了隧道空气动力学效应,隧道断面的隧道阻塞比都小于 0.4,目前隧道基本贯通。

由以上既有工程调研分析得出,随着运行速度的提高,为了满足乘客舒适性要求和车辆运行能耗要求,适当增大隧道断面是有必要的。

对于最高速度 > 100 km/h 的地铁盾构隧道限界的分析,需要从设备限界、供电制式、轨道结构高度要求和空气动力学等多方面进行研究。

2 车辆限界和设备限界

广州地铁 3 号线:列车运行速度从 80 km/h 提高到 120 km/h 后车辆需要改变一些构造参数,主要是将车体与转向架之间的横向位移适当放大。横向自由间隙为 15 mm,横向挡块的可压缩量为 20 mm,另一方面,限界计算中的横向加速度由 0.250 m/s^2 提高到 0.375 m/s^2 。120 km/h 速度下的车辆限界,其横坐标值增大了 21 mm(车辆最大半宽 1 400 mm,车辆限界横向最大值 1 524 mm)。

青岛—海阳城际(蓝色硅谷段)轨道交通工程,区间最高速度为 120 km/h,限界计算时车辆最高速度允许瞬间超速 10%,即最高速度为 132 km/h,计算结果为:车辆最大半宽为 1 445 mm,车辆限界最大值为

1 586 mm,设备限界最大值为 1 616 mm。

上海地铁 16 号线选用上海市建设规范《城市轨道交通设计规范》(DGJ08—109—2004)附录中的大型车辆轮廓线作为设计依据,经调研分析得出,120 km/h 的设备限界较 80 km/h 的设备限界侧向加大 20 ~ 30 mm。

在编的市域快速轨道交通技术规范对 120 ~ 160 km/h 的车辆限界和设备限界也做了相关规定,限界的计算方法参照《地铁限界标准》的相关规定,该规范中给出的标准 A 型车的最大半宽为 1 550 mm,车辆限界最大值为 1 691 mm,设备限界最大值为 1 770 mm。

结合广州地铁 3 号线的经验,目前既有的盾构隧道能满足最高速度 120 km/h 的行车安全限界要求,但无法满足乘客舒适度的要求。通过以上实际工程或规范中对速度大于 100 km/h 的车辆限界和设备限界的统计分析,结合《地铁限界标准》计算公式中速度影响相关项的分析得出,随着速度的增加,车辆限界和设备限界均有所增大,但增量有限,故速度大于 100 km/h 的车辆限界和设备限界不是确定盾构隧道断面尺寸的控制因素。

3 隧道阻塞比与盾构隧道断面的关系

对于速度低于 100 km/h 的地铁,隧道断面往往根据地铁限界,满足最低要求即可,几乎不用考虑空气动力学的影响,目前既有地铁工程中的隧道阻塞比一般在 0.45 ~ 0.50 之间,远大于国铁隧道的车隧阻塞比^[5]。

隧道的车隧阻塞比即为车辆横断面面积与隧道轨面以上净空横断面面积的比值。关于隧道车隧阻塞比的要求,我国地铁行业现行的相关标准、规范尚无明确规定。铁路部门有相关规定:

1)《铁路隧道设计规范》(TB10003—2005)^[6]第 1.0.6 条规定,“…对于旅客列车最高行车速度 160 km/h 新建铁路隧道内轮廓尚应考虑机车类型、车辆密封性、旅客舒适度等因素确定,隧道轨面以上净空横断面面积,单线隧道不应小于 42 m^2 ……”。

2)《京沪高速铁路设计暂行规定》^[7]第 7.1.1 条规定,“隧道工程设计必须考虑列车进入隧道诱发的空气动力学效应对行车、旅客乘坐舒适度、车辆结构强度和环境等方面的不利影响。缓解空气动力学效应可采用放大隧道断面有效面积减少阻塞比 β ……”。

参考《北京新机场快线压力舒适度标准及隧道阻塞比研究》的结论,最高运行速度 120 km/h,隧道断面阻塞比小于 0.4^[8];最高运行速度 140 km/h,使用非密闭车辆,隧道断面阻塞比小于 0.27,使用密闭车辆,隧

道断面阻塞比小于 0.35;最高运行速度 160 km/h,使用密闭车辆,隧道断面阻塞比小于 0.289^[9]。隧道断面面积满足以上隧道阻塞比要求时,乘客舒适度能满足压力舒适度标准。

A 型车车辆断面面积暂按 10.319 m² 考虑,轨道结构高度按 840 mm 考虑,在满足以上隧道阻塞比的前提下,确定的最小隧道断面如表 1 所示。

表 1 隧道阻塞比 β 与隧道断面关系

Tab. 1 The relationship between tunt inhibition Ratio β and the tunnel section

速度/(km/h)	120	140	140	160
密闭性车体	—	—	小于 0.35	小于 0.289
非密闭性车体	小于 0.4	小于 0.27	—	—
盾构隧道限界内径/mm	6 000	7 400	6 600	7 200

4 供电制式与盾构隧道断面的关系

随着区间最高速度的提高,车辆的供电制式也有相应的调整,最高速度大于 100 km/h 时,供电制式可以采用 DC1 500 V 刚性接触网,也可采用 AC25 kV 柔性接触网。

车辆高度为 3 800 mm 时,接触网采用垂直刚性悬挂时,在 DC1 500 V 电压制式下接触导线距轨面的最低悬挂高度一般为 4 040 mm,AC25 kV 接触导线距轨面的最低悬挂高度为 4 190 mm^[10]。

采用 DC1 500 V 刚性接触网供电时,接触网导线安装高度一般为 4 040 ~ 4 400 mm,接触网支架安装高度不小于 400 mm;采用 AC25 kV 柔性接触网供电时,接触网导线安装高度一般为 4 400 ~ 5 300 mm,接触网支架安装高度一般不小于 1 400 mm;轨道结构高度按 840 mm 考虑,故由供电制式确定的隧道断面如表 2 所示。

表 2 供电制式与盾构隧道断面关系

Tab. 2 The relationship between supply standard and the tunnel section

供电制式	接触网导线安装高度	接触网支架安装要求	轨道结构高度	隧道断面内径
DC1 500 V	4 040 ~ 4 400	400	840	5 300 ~ 5 700
AC25 kV	4 400 ~ 5 300	1 400	840	6 700 ~ 7 600

由以上供电制式的分析得出,因供电制式的不同,接触网导线安装高度和接触网支架安装要求都各不相同,由供电制式确定的盾构隧道内径也有较大的差异。

5 确定隧道断面尺寸

隧道阻塞比和供电制式对盾构断面限界的分析结

论表明,两者确定的断面限界是不一致的,故需要对以上两种控制因素进行综合分析(见表 3)。

表 3 隧道阻塞比 β 、供电制式与盾构隧道断面关系

Tab. 3 The relationship among tunt inhibition Ratio β , supply standard and the tunnel section

供电制式	阻塞比			
	小于 0.4	小于 0.27	小于 0.35	小于 0.289
DC1 500 V	6 000	7 400	6 600	7 200
AC25 kV	6 700 ~ 7 600	7 400 ~ 7 600	6 700 ~ 7 600	7 200 ~ 7 600

由表 3 分析可知:

1) 采用 DC1 500 V 供电时,当接触网线安装高度不大于 4 400 mm,接触网安装尺寸不大于 400 mm 时,最高速度大于 100 km/h 的盾构隧道断面尺寸主要由隧道阻塞比控制;当接触导线安装高度与接触网支架共同要求大于某一数值时,盾构断面尺寸将由供电制式确定。

2) 当车辆供电制式采用 AC25 kV 时,盾构断面尺寸基本上由供电制式确定。当供电制式需要的净空要求减小时,盾构断面尺寸又由隧道阻塞比确定。

3) 盾构隧道断面限界尺寸的确定,首先必须满足车隧阻塞比的要求,其次需要考虑供电制式的影响。

北京地铁 R1 线车辆按市域 A 车进行考虑,为 DC1 500 V 刚性接触网供电,区间列车最高运行速度为 120 km/h。按以上分析方法,制定 R1 线单线盾构隧道的建筑限界时主要考虑因素为:轨道结构高度 840 mm、接触网导线安装高度 4 400 mm、接触网结构高度 400 mm、隧道阻塞比 β 不大于 0.4;供电制式确定的盾构隧道断面建筑限界直径为 840 + 4 400 + 400 = 5 640 mm,阻塞比确定的建筑限界直径为 6 000 mm。如图 1 所示,最终确定的圆形隧道建筑限界为 6 000 mm,实际为 0.397。

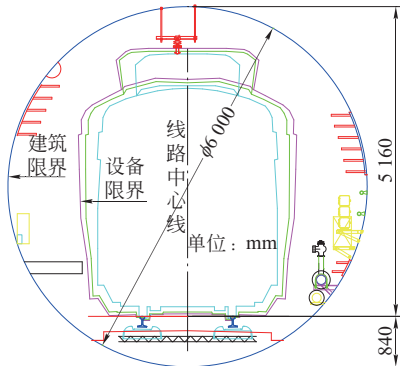


图 1 北京 R1 线圆形隧道限界

Fig. 1 Circular tunnel limit of Beijing Metro R1 Line

北京新机场线车辆采用市域车,为 AC 25 kV 柔性接触网供电,区间列车最高运行速度为160 km/h。按以上分析方法,制定北京新机场线单线盾构隧道的建筑限界时主要考虑因素为:轨道结构高度 900 mm、接触网导线安装高度 5 300 mm、接触网结构高度 1 400 mm、隧道阻塞比 β 不大于 0.289;供电制式确定的盾构隧道断面建筑限界内径为 $900 + 5\,300 + 1\,400 = 7\,600$ mm,阻塞比确定的建筑限界为 7 200 mm。如图 2 所示,最终确定的圆形隧道建筑限界直径为 7 600 mm,实际为 0.27。

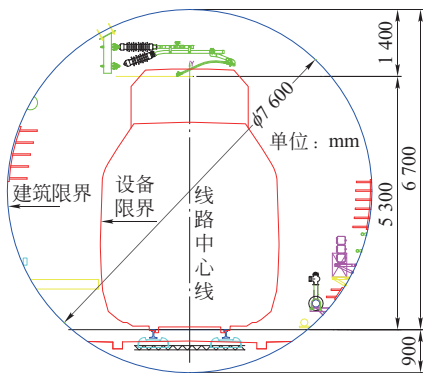


图2 北京地铁机场线圆形隧道限界

Fig. 2 Circular tunnel limit of
Beijing Metro Airport Line

6 结论

通过对盾构隧道限界决定因素(设备限界、隧道阻塞比、供电制式)的逐一分析,可以看出速度 120 ~ 160 km/h 的盾构隧道限界尺寸的控制因素不是唯一的,同样也不是固定不变的。在本文的分析条件下,主要得出以下几点结论:

- 1) 设备限界不是确定速度 120 ~ 160 km/h 的盾构隧道断面尺寸的控制因素;
- 2) 隧道阻塞比和供电制式是确定速度 120 ~ 160 km/h 的盾构隧道限界尺寸的主要因素;
- 3) 隧道阻塞比确定的隧道断面限界应是盾构隧道断面尺寸选型的下限值;
- 4) 当供电制式确定的隧道断面尺寸大于隧道阻塞比确定的隧道断面限界尺寸时,盾构选型应采用供电制式确定的隧道断面限界尺寸。

列车运行速度为 120 ~ 160 km/h 的盾构隧道选型时,应充分考虑各种影响因素,具体情况应具体分析,在满足空气动力学的同时,也需要满足设备安装的需求,确保盾构隧道选型的合理性。

参考文献

- [1] 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [2] 城市轨道交通工程设计规范:DB 11/995—2013[S]. 北京,2013.
Code for design of urban rail transit: DB 11/995—2013[S]. Beijing, 2013.
- [3] 地铁限界标准:CJJ96—2003[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
Standard of metro gauges: CJJ 96—2003[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [4] 丁习富. 地铁快线设计中几个技术问题的探讨和思考[J]. 隧道建设,2015,35(6):554-558.
DING Xifu. Several technical issues in design of express metro lines[J]. Tunnel construction, 2015, 35(6): 554-558.
- [5] 吴炜,高慧翔,彭金龙. 城市快速轨道交通空气动力学相关问题探讨[J]. 都市快轨交通,2011,24(2):63-67.
WU Wei, GAO Huixiang, PENG Jinlong. Discussion on some problems of aerodynamics in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2011, 24(2): 63-67.
- [6] 铁路隧道设计规范:TB10003—2005[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
Code for design of railway tunnel: TB10003—2005[S]. China Railway Publishing House, 2005.
- [7] 铁道第三勘察设计院. 京沪高速铁路设计暂行规定[S]. 北京:中国铁道出版社,2003.
- [8] 祝岚,张东,孙振旭,等. 基于乘客舒适性的快速地铁隧道压力波分析[J]. 都市快轨交通,2015,28(1):87-91.
ZHU Lan, ZHANG Dong, SUN Zhenxu, et al. Analysis of pressure waves of high-speed subway tunnel based on passenger comfort[J]. Urban rapid rail transit, 2015, 28(1): 87-91.
- [9] 北京新机场快线压力舒适度标准及隧道阻塞比研究[R]. 北京,2012.
The research of Beijing new desk field easy to make force shore suitability standard and road obstruction ratio[R]. Beijing, 2012.
- [10] 孙莉. 不同供电制式对轨道交通线路隧道断面的影响[J]. 城市轨道交通研究,2012(12):74-77.
SUN Li. Influence of different power supply voltage modes on rail transit tunnel cross section[J]. Urban mass transit, 2012(12): 74-77.

(编辑:郝京红)