

# Qtech-413 粘弹阻尼材料在盾构隧道中减振性能研究

黄 舰<sup>1</sup> 黄微波<sup>2</sup> 冯 超<sup>2</sup> 杨 林<sup>1</sup> 梁龙强<sup>2</sup>

(1 青岛地铁集团有限公司, 山东 青岛 266000)

(2 青岛理工大学功能材料研究所, 山东 青岛 266033)

**摘 要** 根据盾构隧道的结构特点,用 Qtech-413 粘弹阻尼材料对盾构管片标准块进行约束阻尼处理,通过单点锤击振动实验,得到处理前后结构的时域波形、固有频率、复合损耗因子等振动特性。实验结果显示:经过约束阻尼处理后,盾构管片振动加速度幅值降低了 26.7%,振动时长降低了 50%;各阶固有频率均有所降低,且随着频率的增加,降幅逐渐增加;各阶复合损耗因子均有所升高,高频增幅比低频增幅更大;振动总级值降低了 10 dB 左右。因此,Qtech-413 粘弹阻尼材料应用于盾构隧道能降低振动加速度幅值、振动时间、固有频率和振动总级值,增加复合损耗因子,对高阶固有频率和复合损耗因子影响较大,低频影响较小。

**关键词** 盾构;地铁隧道;粘弹阻尼材料;约束阻尼;固有频率;复合损耗因子

粘弹阻尼材料由于其自身具有较宽的温域、频域和高阻尼特性,一直以来被广泛应用于机械工程和航空航天工程等领域的减振降噪研究之中<sup>[1]</sup>。孙亚飞等<sup>[2]</sup>用沥青粘弹阻尼材料对飞机座舱模型进行自由阻尼被动控制,并利用动力学分析系统对该控制系统的效果进行测试。杜华军等<sup>[3]</sup>研究了粘弹性材料对航天机械振动控制效果的影响,通过改变相关参数,利用有限元方法对阻尼处理中的约束层厚度、敷设位置和粘弹层处理位置等参量进行了优化设计。而后文献<sup>[4]</sup>还得到了一种航天结构的约束阻尼处理配置的新型优化方案,即在保持约束层面积不变的情况下将粘弹层离散化,此方案可实现减重增效的效果。近年来,粘弹阻尼材料及其约束阻尼结构在轨道交通振动噪声控制中的应用也备受关注。吕平及其研究团队<sup>[5-8]</sup>对粘弹性阻尼材料在青岛地铁减振降噪中的应用进行了大量前期实验及理论探索。黄舰等<sup>[9]</sup>针对矿山开挖隧道提出了一种采用粘弹阻尼材料对整体道床振动控制的方法。

随着盾构法在青岛地铁隧道开挖工程中的引

入,通过对地铁隧道部分结构构件的阻尼处理,实现对整个地铁隧道的减振降噪处理给研究人员带来了新的思路。为此,本文模拟盾构隧道结构,选取单个盾构管片标准块为对象,对该管片进行约束阻尼处理,形成约束阻尼结构,通过锤击振动实验研究 Qtech-413 阻尼材料在对此约束阻尼结构中的减振效果,旨在为 Qtech-413 阻尼材料对盾构隧道整体的减振效果提供一定的实验依据和数据支持。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

**阻尼材料:**Qtech-413 粘弹阻尼材料,原料由青岛沙木国际贸易有限公司提供,现场喷涂制备,选取美国 PMC 公司生产的 PHX-40 型聚脲喷涂设备。

**基材:**盾构管片标准块,由青岛市政集团砼业有限公司提供,混凝土强度等级为 C50,密度为 2600 N/m<sup>3</sup>,弹性模量为 37.5 GPa。

**约束层材料:**混凝土,强度等级为 C40,由青岛建一混凝土有限公司配制,标准养护条件下 28 d 抗

压强度为 46.7 MPa,弹性模量为 35.5 GPa。

## 1.2 试件制备及尺寸

取两块管片标准块,在其中一块管片上均匀喷涂地一层粘弹阻尼材料,厚度为 2.5 mm,其他尺寸见表 1。养护 24 h 后进行支模,然后浇筑混凝土,保

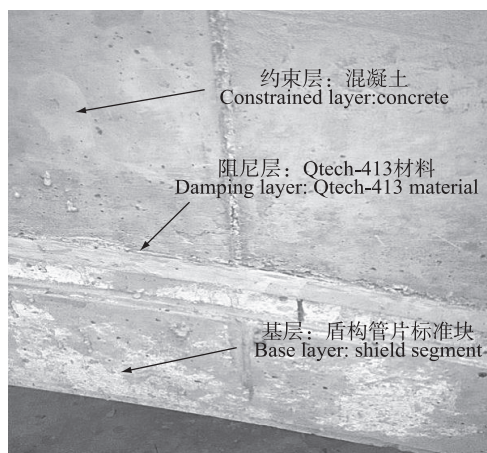
湿养护 28 d。管片、粘弹材料和浇筑混凝土三者共同组成约束阻尼结构,将此结构命名为结构 A;在另一块管片上直接浇筑混凝土,保湿养护 28 d,将此结构命名为结构 B。结构 A 和结构 B 实物图如图 1 所示。

表 1 结构 A 和结构 B 尺寸  
Table 1 The sizes of structure A and B

结构编号 Structure number	结构层 Structure layer	尺寸(内径×外径×宽度×跨度或厚度)(mm) Size(inner diameter×outside diameter×width×span or thickness)(mm)
结构 A Structure A	基层 Base layer	2700×3000×1500×3100
	阻尼层 Damping layer	2.5
	约束层 Constrained layer	3000×3300×1500×3500
结构 B Structure B	基层 Base layer	2700×3000×1500×3100
	阻尼层 Damping layer	—
	约束层 Constrained layer	3000×3300×1500×3500



(a) 结构 A、B 对比图  
(a) Contrast diagrams of structure A and B



(b) 结构 A 详图  
(b) Detail of structure A

图 1 结构 A 和结构 B 实物图

Fig. 1 Physical pictures for structure A and B

## 1.3 实验方案

本实验采用单点锤击振动实验的方法,其示意图如图 2 所示。在 1#, 2#, 3# 三个测点处获得三组实验数据,选取实验结果中最具代表性的 1# 测点进行分析。通过型号为 INV3018 的信号采集仪采集结构振动信号,由分析软件 DASP 系列中时域分析、自谱分析、倍频程谱分析等分析模块分别得到结构 A 和结构 B 的时域波形、损耗因子、振动总级值及振动加速度级等振动特性,通过对二者振动特性的对比分析来研究 Qtech-413 阻尼材料对盾构管片的减振效果。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 时域波形

结构 A 和结构 B 的时域波形如图 3 所示。由图 3 可以看到,结构 A 在 0.01 s 处开始产生振动,此时振动加速度最大,为  $11 \text{ m s}^{-2}$ ,随后振动加速度迅速衰减,于 0.06 s 处衰减为 0。可见结构 A 振动加速度幅值为  $11 \text{ m s}^{-2}$ ,振动时长为 0.05 s。结构 B 的振动加速度幅值为  $15 \text{ m s}^{-2}$ ,振动于 0.01 s 开始,0.11 s 处结束,振动时长为 0.10 s 左右。与结构 B 相比,结构 A 的振动加速度幅值降低了 26.7%,振动时长降低了 50%。由此可见,粘弹阻尼材料能明显降低盾构管片的振动加速度和振动时间,提高弧型结构阻尼性能。

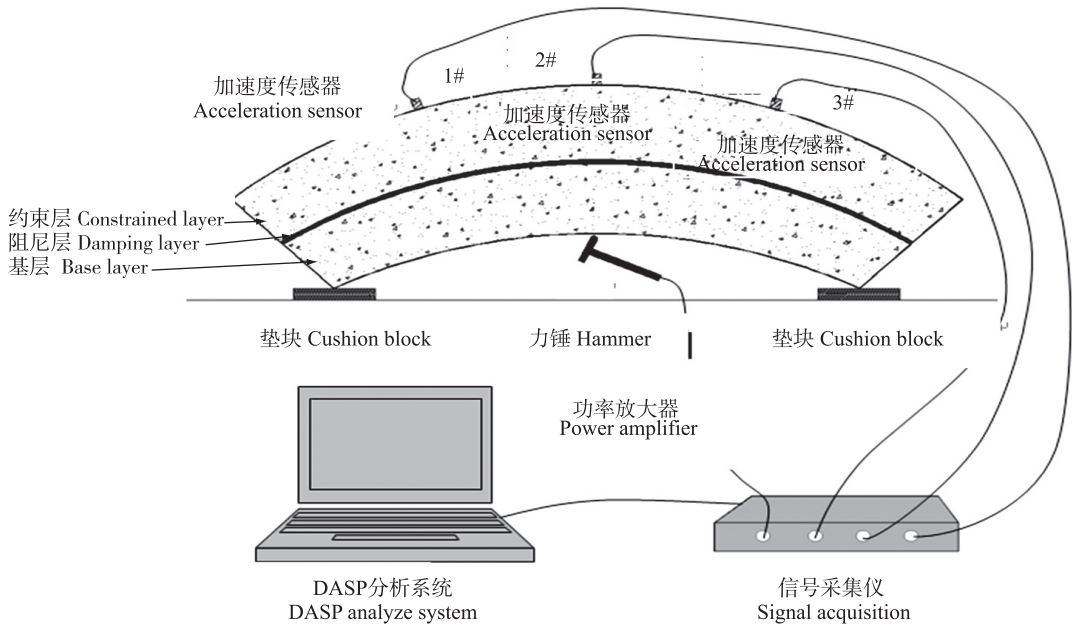


图2 单点锤击实验示意图

Fig. 2 Sketch for single point hammering experiment

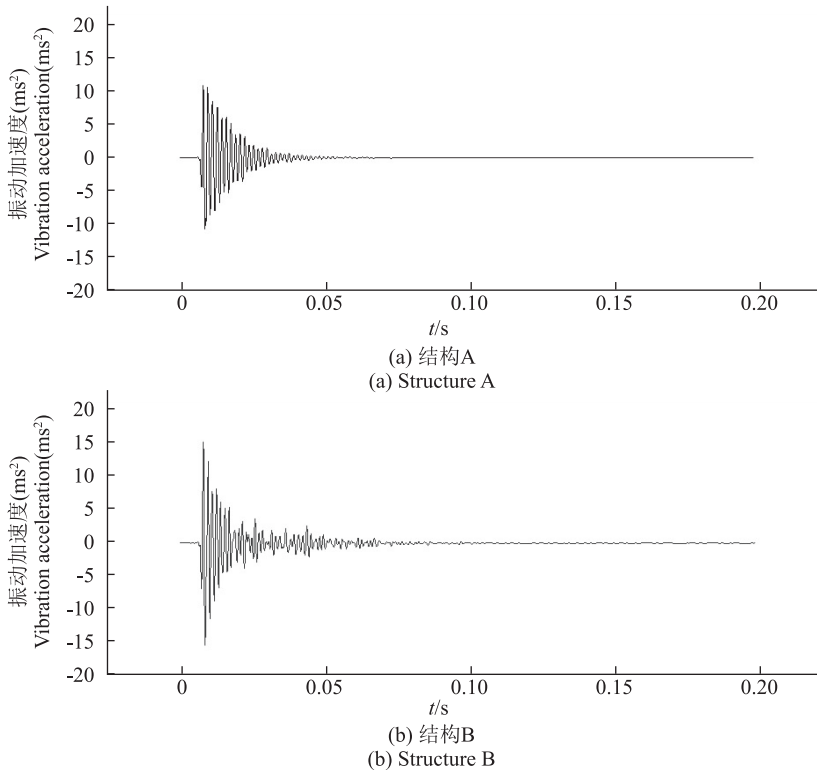


图3 结构 A,B 的时域波形对比图

Fig. 3 Time domain waveforms of structure A and B

## 2.2 固有频率及复合损耗因子

结构 A 和结构 B 前 5 阶固有频率和复合损耗因子测试结果如表 2 所示。由表 2 可以看到, 结构 A, B 前 5 阶固有频率中最低分别为 47 Hz 和 53 Hz,

最高为 860 Hz 和 912 Hz。结构 A, B 的复合损耗因子均在 5 阶时最大, 分别为 0.177 和 0.119, 前者比后者增加了 48.7%。

表2 结构 A 和结构 B 前 5 阶固有频率和复合损耗因子  
Table 2 The top 5 natural frequency and loss factor of structure A and B

阶数 Order	结构 A Structure A		结构 B Structure B	
	固有频率 Natural frequency (Hz)	损耗因子 Loss factor	固有频率 Natural frequency (Hz)	损耗因子 Loss factor
1	47	0.112	53	0.107
2	160	0.114	173	0.084
3	299	0.073	322	0.036
4	572	0.067	623	0.032
5	860	0.177	912	0.119

为了更清楚的反映结构 A 和结构 B 各阶固有频率和复合损耗因子的关系,现以固有频率和复合损耗因子为纵坐标,阶数为横坐标,作曲线如图 4 所示。结合表 2 和图 4 可以看到,结构 A 的各阶固有频率均小于结构 B,各阶复合损耗因子均大于结构 B,1~5 阶的固有频率相比结构 B 分别降低了 6 Hz, 13 Hz, 23 Hz, 51 Hz, 52 Hz,复合损耗因子分别增加了 0.005, 0.030, 0.037, 0.035, 0.058。由此可见,用粘弹阻尼材料对弧型结构进行处理时,粘弹材

料对结构的低阶固有频率和损耗因子影响较小,对高阶固有频率和损耗因子影响较大。粘弹阻尼材料使各阶固有频率降低的原因是,结构质量和阻尼的增加均会使其固有频率降低,在结构中加入粘弹阻尼材料后,结构阻尼增加,附加在原结构的质量也有一定程度的增加,导致结构固有频率降低。结构 A 和结构 B 固有频率和复合损耗因子呈现的规律均可说明粘弹阻尼材料能降低盾构管片的振动,增加结构的阻尼性能。

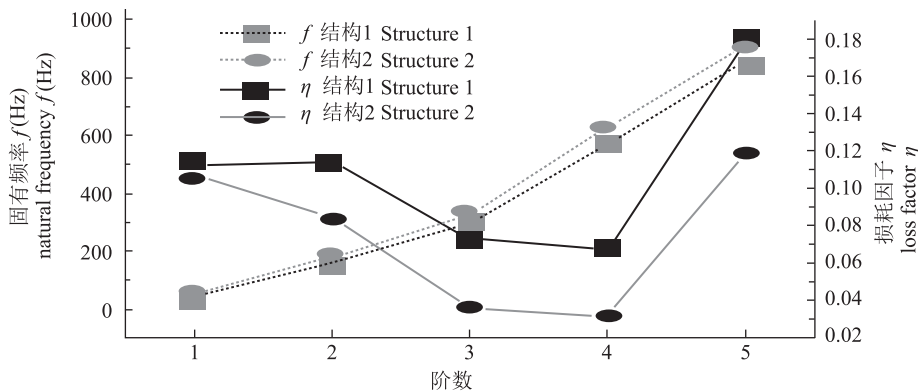


图4 结构 A 和结构 B 各阶固有频率和复合损耗因子关系曲线

Fig. 4 Relationship between the natural frequencies and the loss factors of structure A and B

### 2.3 振动总级值

结构振动总级值是表征结构振动强弱的重要参量,也是评价阻尼结构减振效果的重要指标,振动总级值越大,表明结构阻尼效果越差;振动总级值越小,表明结构阻尼效果越好<sup>[10]</sup>。结构 A 和 B 振动总级值测试结果如图 5 所示,可以看到,结构 A,B 的振动总级值分别为 123.63 dB, 134.05 dB,前者比后者降低了 10.42 dB。此实验结果表明 Qtech-413 粘弹阻尼材料在管片约束阻尼处理中具有较好的减振性能。

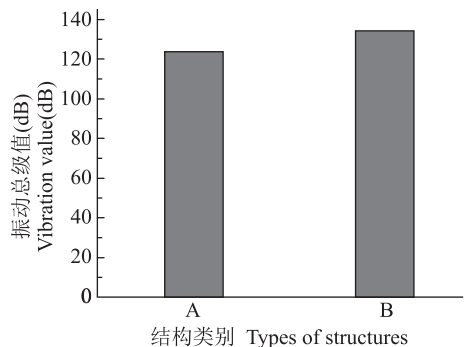


图5 结构 A,B 振动总级值对比图

Fig. 5 Vibration value comparison between structure A and B

### 3 结论

本文通过单点锤击振动实验,对 Qtech-413 粘弹阻尼材料在盾构管片基约束阻尼结构振动效果的影响进行了研究,实验结论如下:

(1) 通过使用 Qtech-413 粘弹阻尼材料对盾构管片进行约束阻尼处理后,后者的振动加速度幅值降低了 26.7%,振动时长降低了 50%。

(2) 约束阻尼处理后结构的各阶固有频率均有所降低,且随着频率的增加,降幅逐渐增加;各阶复合损耗因子均有所升高,高频增幅比低频增幅大。

(3) 约束阻尼处理后结构的振动总级值能降低 10 dB 左右。

### 参考文献

- [1] 周云. 粘弹性阻尼减震结构设计. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006. Zhou Y. Viscoelastic damping suspension structure design. Wuhan: Wuhan University of Technology Publishing House, 2006
- [2] 孙亚飞, 陈仁文, 徐志伟, 等. 应用粘弹阻尼材料的飞机座舱振动噪声控制实验研究. 机械科学与技术, 2003, 22(3): 480-483. Sun Y F, Chen R W, Xu Z W, et al. Experimental research on vibration and noise control of the fighter cockpit using viscoelastic damping materials. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(3): 480-483
- [3] 杜华军, 于百胜, 郑钢铁, 等. 蜂窝锥壳卫星适配器约束阻尼层振动抑制分析. 应用力学学报, 2003, 20(3): 5-9. Du H S, Yu B S, Zheng G T, et al. Vibration suppression of a conical-honeycomb satellite adapter subjected to constrained layer damping. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(3): 5-9

- [4] 杜华军, 陈恩鹏. 航天结构的约束阻尼振动抑制优选方案研究. 航天控制, 2004, 22(5): 8-11. Du H J, Chen E P. An optimized scheme for aerospace structure vibration suppression with constrained layer damping. Aerospace Control, 2004, 22(5): 8-11
- [5] 史世凡. 青岛地铁粘弹阻尼材料的防水性能及其影响因素的研究. 青岛: 青岛理工大学, 2013. Shi S F. Study on waterproof performance and its influencing factors of viscoelastic damping material of Qingdao subway. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013
- [6] 高金岗. 青岛地铁用 Qtech503 阻尼材料性能及其约束阻尼结构研究. 青岛: 青岛理工大学, 2014. Gao J G. Study on performance of damping materials Qtech503 and constrained damping structure in Qingdao subway. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014
- [7] 吕平, 盖盼盼, 伯忠维, 等. 阻尼层厚度对结构阻尼性能的影响. 噪声与振动控制, 2013, 33(2): 101-104. Lv P, Gai P P, Bo Z W, et al. Influence of damping layer's thickness on vibration damping performance of structures. Noise and Vibration Control, 2013, 33(2): 101-104
- [8] 吕平, 高金岗, 李晶, 等. 影响约束阻尼结构阻尼性能的因素. 噪声与振动控制, 2014, 34(5): 234-238. Lv P, Gao J G, Li J, et al. Impacting factors of damping performance of constraint damping structures. Noise and Vibration Control, 2014, 34(5): 234-238
- [9] 黄舰, 黄微波, 吕平, 等. 约束阻尼结构的减振降噪整体道床; ZL201220019831. X. 2012-10-31. Huang J, Huang W B, Lv P, et al. Vibration and noise reduction ballast bed with constraint damping structure; ZL201220019831. X. 2012-10-31
- [10] 《振动与冲击手册》编辑委员会. 振动与冲击手册 3. 北京: 国防工业出版社, 1992. 《Vibration and Shock Handbook》editorial board. Vibration and shock handbook 3. National Defence Industry Press, 1992

## RESEARCH ON VIBRATION REDUCTION EFFECT OF QTECH-413 VISCOELASTIC DAMPING MATERIAL IN SHIELD TUNNEL

Huang Jian<sup>1</sup> Huang Weibo<sup>2</sup> Feng Chao<sup>2</sup> Yang Lin<sup>1</sup> Liang Longqiang<sup>2</sup>

(1 Qingdao Metro Co., Ltd, Qingdao, Shandong 266000, China)

(2 Functionnal Materials Research Institute, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China)

**Abstract** According to the structure features of shield tunnel, the constrained damping treatment of the standard sample was performed by using Qtech-413 viscoelastic damping material. The vibration properties of structure including time domain waveform, natural frequency, and composite loss factor etc. were obtained through a single point hammer vibration experiment. The results showed that after the constrained damping treatment, the vibration acceleration amplitude of shield segment lining was reduced by 26.7%, and



the vibration time was reduced by 50% ; natural frequency on each order decreased, and with the increasing of frequency, the decreasing amplitude increased gradually; each order of the composite loss factor was also increased, and high-frequency amplitude was bigger than low-frequency one; the vibration level total value decreased about 10 dB. Thus, Qtech-413 viscoelastic damping material used in shield tunnel could reduce the vibration acceleration, natural frequency, and vibration time total value, and increase the composite loss factor. It is notable that this material has a great effect on the high orders natural frequency and composite loss factor, rather the low ones.

**Key words** Shield; Subway tunnel; Viscoelastic damping material; Constrained damping; Natural frequency; Composite loss factor