

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.025

隧道爆破对临近高压输电铁塔的振动影响分析*

伍岳^{1,2},贾永胜^{1,2},黄小武^{1,2},刘昌邦^{1,2},周祥磊³,徐华建^{1,2},刘芳^{1,2}

(1. 江汉大学 省部共建精细爆破国家重点实验室,武汉 430056;

2. 武汉爆破有限公司,武汉 430056;3. 中钢集团 武汉安全环保研究院有限公司,武汉 430081)

摘要: 针对高压输电铁塔爆破振动安全控制标准不明确,难以指导施工的难题,以某在建高速公路隧道工程为依托,设计单循环200 kg工业炸药量级隧道爆破掘进孔网参数,开展临近高压铁塔塔基质点爆破振动现场监测,对振动信号进行统计分析,研究了隧道爆破施工对临近高压铁塔的振动响应特征及振动信号的衰减规律。结果表明:随着爆心距的减小,塔基质点振动峰值合速度呈增大趋势,振动能量集中频带向低频方向发展,振动频率受隧道围岩裂隙发育程度的影响较明显;竖直方向的振速峰值均大于水平方向的振速峰值,要重点关注塔基竖向振动危害,防止塔基面介质的沉降;采用多段别延期起爆网路,严格控制低段别雷管的最大起爆药量,可有效削弱爆破振动对高压铁塔的危害效应。通过数据拟合,得出了本工程条件下隧道爆破质点振动传播衰减公式。本隧道工程将高压铁塔处的爆破振动速度控制在1.0 cm/s以内,确保铁塔安全运营,因此建议电力主管部门和制法机关适当放宽电力设施周边爆破作业的管控范围。

关键词: 隧道开挖; 高压铁塔; 爆破振动; 振动监测

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)03-0165-07

Influence Analysis of Tunnel Blasting Vibration on Adjacent High Voltage Transmission Tower

WU Yue^{1,2}, JIA Yong-sheng^{1,2}, HUANG Xiao-wu^{1,2}, LIU Chang-bang^{1,2},
ZHOU Xiang-lei³, XU Hua-jian^{1,2}, LIU Fang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China;

2. Wuhan Explosions & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China;

3. SINOSTEEL Wuhan Safety & Environmental Protection Research Institute Co Ltd., Wuhan 430081, China)

Abstract: The safety control standard of blasting vibration of high-voltage transmission tower is still not clear, which makes it difficult to guide the construction. Based on a highway tunnel under construction, this paper designs the blast hole network parameters for a tunnel with 200 kg explosive per round. The blast vibration signals are monitored near the tower foundation and statistically analyzed to study the vibration response characteristics of the high voltage tower and the attenuation law of the vibration signals. The results show that with the decrease of the distance to the blast source, the vector peak particle velocity of the tower foundation increases. The frequency band of vibration energy concentration tends to low frequency and the vibration frequency is obviously affected by the development degree of cracks in surrounding rock. The peak values of vibration velocity in the vertical direction are greater than those in the horizontal direction, so the vertical vibration damage of the foundation should be paid more attention to prevent any settlement of the medium. By adopting multi-delay initiation network and strictly controlling the maximum charge for lower delays, the damage effect of blasting vibration on the high voltage tower can be effectively weakened. Through data fitting, the attenuation formula of blast vibration in for this project is obtained. In this tunnel project, the

blasting vibration velocity at the tower is controlled within 1.0 cm/s to ensure the safe operation of the high voltage transmission tower. Therefore, it is suggested that the competent authority of electric power and the law-making authority appropriately relax the control scope of blasting operations around the power facilities.

Key words: tunnel excavation; high-voltage tower; blasting vibration; vibration monitoring

随着我国高速公路建设的快速发展,山区复杂环境下的隧道工程越来越多,隧道掘进爆破往往会影响民房、滑坡、燃气管道、高压输电铁塔等振动敏感保护性目标。当隧道下穿或邻近高压输电铁塔时,爆破振动会造成地表的高压输电铁塔塔基下沉或倾斜的风险,甚至会导致铁塔结构的失稳倒塌,给安全生产和正常生活带来重大威胁。为此,隧道爆

破掘进作业必须重点考虑爆炸振动对临近高压输电铁塔的影响。《爆破安全规程》(GB6722—2014)^[1]规定了工业和商业建(构)筑物的安全允许质点振速的范围为 3.5~4.5 cm/s,但没有明确指定电力设施。我国《电力设施保护条例》及各省市关于电力设施保护条例,如表 1 所示。

表 1 电力设施保护条例关于爆破作业的规定

Table 1 Provisions on blasting operations in the Regulations on the Protection of Power Facilities

条例级别	条款内容
国家级	任何单位或个人在电力设施周围进行爆破作业,必须按照国家有关规定,确保电力设施的安全。
北京、上海、广东、福建、甘肃、新疆、西藏、山东	在电力设施周围或在依法划定的电力设施保护区内进行爆破作业,需经主管部门批准并采取安全措施。
湖北、重庆、四川、江西、安徽、浙江、广西、云南、贵州、河北、天津、吉林、宁夏、青海、江苏	电力设施周围 500 m 区域内进行爆破作业,必须经县级以上人民政府电力行政主管部门批准,并采取安全防护措施。
辽宁、黑龙江、内蒙古	电力设施周围 300 m 范围内进行爆破作业,必须经电力管理部门批准,按照国家有关规定到相关部门办理手续,并采取确保电力设施的安全措施。
湖南	在下列范围内,不得进行爆破作业:10~35 kV 电力设施周围 300 m; 110~220 kV 电力设施周围 400 m; 500 kV 电力设施周围 500 m; 5 万 kW 以下(含 5 万 kW)水电厂电力设施周围 200 m; 5 万 kW 以上水电厂电力设施周围 300 m; 30 万 kW 以上水电厂电力设施周围 500 m; 火电厂电力设施周围 300 m。在上述范围外进行爆破作业,也应当采取措施,保证电力设施安全。
山西	在架空电力线路保护区,不得有爆破作业。

由此可见,关于高压输电铁塔的爆破振动控制标准,尚没有相关标准规范予以准确描述。我国大多数省份的电力设施保护条例要求电力设施周围 500 m 区域内进行爆破作业,必须经县级以上人民政府电力行政主管部门批准,并采取安全防护措施;个别省份对电力设施周边的爆破作业要求更加严格。这些法规条例很大程度上限制了爆破技术的应用范围,也增加了爆破作业行政审批的难度。

针对工程爆破对周边高压输电铁塔等建(构)筑物的影响问题。一方面,有关学者以铁塔为研究对象,分析了其在爆破振动作用下的动力响应特征,并评估其安全稳定状态。张鹏研究发现在爆心距为 50~60 m 时^[2],隧道的爆破振动已经对铁塔影响很小,建议采用 50 m 作为分界线来调整爆破方案。肖欣欣等利用 FLAC3D 软件对隧道附近高压输电铁塔受到爆破振动影响情况进行数值分析^[3],并与现场实测数据的对比,得出振速与测点距隧道开挖中线的距离呈负相关。樊浩博^[4]、曲颢等采用数值模拟和有限元分析^[5],研究了隧道掘进爆破对临近高压输电铁塔的振动影响,为实际工程安全施工提供了理论依据。另一方面,更多学者从隧道爆破技术出发,通过爆破振动监测优化爆破参数和爆破网路,实现主

收稿日期:2022-06-25

作者简介:伍岳(1995-),男,硕士,主要从事工程爆破研究与实践工作,(E-mail)179191947@qq.com。

通讯作者:贾永胜(1970-),男,教授、工学博士,主要从事工程爆破研究与实践工作,(E-mail)jason03566@163.com。

基金项目:湖北省自然科学基金重点项目(创新群体 2020CFA043);湖北省重点研发计划项目(2020BCA084)

动降振^[6,7]。K Iwano 等研究了电子雷管延期时间对隧道爆破振动波叠加效应的影响^[8],确定最佳的爆破网络延期间隔时间,降低了地表爆破振动效应。Xiaoxu Tian 等对某隧道爆破振动数据进行频谱、小波包分析^[9],研究不同区域振动频率和能量的变化特征,并提出爆破减振方案,将隧道周边建筑物的质点振动速度控制在 1.12 cm/s 以内。

如何实现基于临近高压铁塔安全保护的隧道爆破振动主动控制,以及研究铁塔在爆破振动作用下的动力响应特性,对丰富爆破工程理论和扩大爆破工程应用范围具有重要意义。本文结合某下穿高压铁塔高速公路隧道爆破工程,通过合理的爆破设计,进行现场爆破振动监测及数据分析,探讨了临近高压输电铁塔在隧道钻爆开挖施工中的振动响应规律,并提出了降低爆破振动的措施,确保了高压铁塔的安全运营,可为类似隧道工程提供参考。

1 工程概况

重庆市某高速公路工程,设计行车速度 80 km/h,分离式、小净距隧道段采用单心圆曲边墙结构,拱部采用 $R = 555$ cm 单心圆,边墙采用 $R = 850$ cm 圆弧,仰拱采用 $R = 1500$ cm 圆弧,仰拱与边

墙间采用 $R = 120$ cm 小半径圆弧连接,总高 8.65 m,内轮廓开挖断面宽度 11.84 m,开挖断面面积约 101 m²。该工程二标段中的黄石隧道单线长度 2505 m,隧道纵坡为下坡,纵坡坡度为 -1.07% ,平面呈弧线形展线,最大埋深约 279 m。

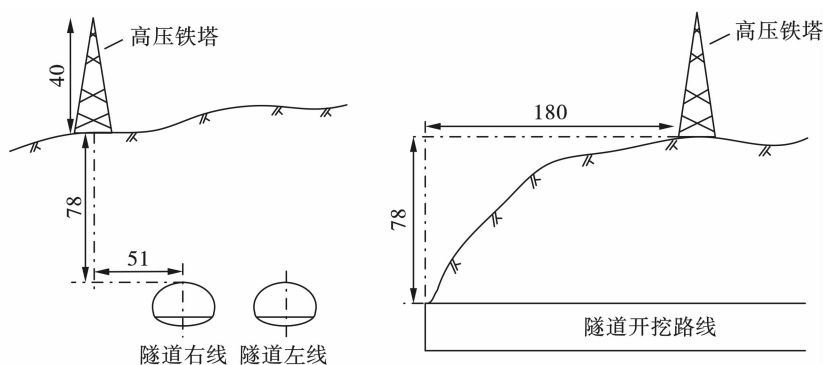
黄石隧道右线出口左侧斜坡面上,距洞口 180 m 左右、距离隧道中线约 51 m 处有一座 220 kV 高压线铁塔,塔高 40 m。铁塔基础为混凝土基础,与隧道拱顶垂直净距为 78 m,隧道开挖边线距塔基最小水平距离约 45 m。铁塔地面高程为 118.8 m,隧道地面高程为 40.8 m,两者直线距离最小值约 90 m。隧道线位与高压线铁塔相对位置关系如图 1 所示。

1.1 地质岩性

黄石隧道沿线区域 IV 级围岩占比约 90%,以粉砂质泥岩为主,节理裂隙较发育,岩体破碎多呈碎石状碎裂结构,完整性系数为 0.63 ~ 0.64;岩体富水性弱,围岩的稳定性相对较好。其余 V 级围岩段以粉质粘土及粉砂质泥岩为主,岩土体富水性弱;泥岩呈碎块状松散结构,受风化作用影响相对较重,裂隙较发育,故稳定性差。隧道出口铁塔下方隧道洞身段主要为 IV 级围岩,岩体较完整。



(a) 实景图
(a) Realistic picture



(b) 示意图
(b) Schematic diagram

图 1 高压铁塔位置示意图(单位:m)

Fig. 1 Diagram of high-voltage tower position(unit:m)

1.2 隧道爆破设计

黄石隧道左右线均从隧道出口同向掘进,先开挖左线隧道,再开挖右线隧道,以减小对铁塔的振动影响。由于隧道洞口上方有乡村水泥公路,对洞口以机械开挖掘进 20 m 范围后,遇坚硬岩石段,辅以三台阶法松动爆破掘进,循环进尺设置为 2.0 m。掘进至 50 m 深度后的 IV 级围岩段,改用上下台阶法爆破掘进,循环进尺设置为 3.0 m。

1.2.1 炮孔布置

隧道掘进爆破炮孔直径为 40 mm,周边眼钻孔垂直深度 3.3 m,上下台阶法炮孔布置如图 2 所示。掏槽孔采用单式楔形掏槽,布置在上台阶掌子面中央及偏下的位置,共设置 12 个掏槽眼,掏槽孔深度 4.8 m。周边孔孔口距离开挖边界线 10 cm,钻孔时略向外倾斜,孔底在同一平面处;辅助孔从掏槽孔向四周均匀布置。

2 爆破振动监测与分析

2.1 测点布置

为了保障地表高压输电铁塔的安全,在每次进行右线隧道上台阶掌子面爆破作业时,对铁塔进行振动监测。在铁塔塔基上表面布置 1 个振动监测点,现场监测示意图如图 3 所示。监测仪器为加拿大 Instantel 公司生产的 Micromate 便携式爆破振动监测仪,采集精度高,可满足本工程监测需求。

2.2 振动数据分析

为了保证采集到的振动信号的有效性和振动波形的完整性,设置的触发电平为 0.5 mm/s,采样频率 4096 sps,监测周期 3 s,延时设置为 -0.5 s。在隧道右洞上台阶爆破开挖掌子面达到离高压铁塔直线距离最近的位置前,总共进行了 25 次振动监测,

去除 2 组误差较大的数据,余下的 23 组振动数据统计结果如表 3 所示。

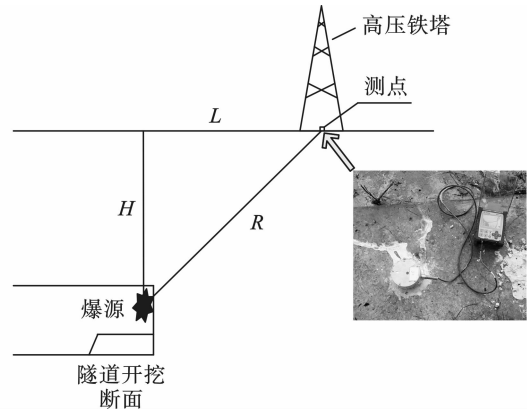


图 3 铁塔基础监测点布置图

Fig. 3 Layout diagram of monitoring points for tower foundation

表 3 上台阶爆破铁塔测点振动速度及主频

Table 3 Vibration velocity and main frequency of tower measuring point during upper bench blasting

最大单响药量 Q/kg	直线距离 R/m	比例药量/ $(\text{kg}^{1/3} \cdot \text{m}^{-1})$	振动速度峰值 $PPV/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$			振动主频 f/Hz			振动合速度 $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
			水平 径向	水平 切向	垂直 方向	水平 径向	水平 切向	垂直 方向	
15.75	182.38	0.0137	0.09	0.12	0.23	25.0	14.3	28.1	0.26
15.75	171.37	0.0146	0.09	0.10	0.32	21.1	30.6	41.0	0.33
15.75	168.65	0.0149	0.14	0.15	0.31	19.1	20.3	25.6	0.32
25.20	160.62	0.0183	0.25	0.21	0.40	18.1	34.1	52.5	0.41
25.20	157.98	0.0186	0.14	0.13	0.36	37.2	20.1	41.8	0.38
25.20	152.76	0.0192	0.35	0.14	0.40	48.8	33.0	66.1	0.41
25.20	137.72	0.0213	0.01	0.17	0.42	19.9	18.5	35.4	0.43
25.20	135.31	0.0217	0.20	0.22	0.46	33.0	50.0	46.5	0.46
25.20	132.94	0.0221	0.28	0.27	0.28	20.5	28.6	32.4	0.48
25.20	128.31	0.0228	0.37	0.37	0.53	32.5	66.1	49.5	0.54
25.20	126.05	0.0233	0.25	0.18	0.50	28.4	30.6	53.9	0.51
25.20	119.53	0.0245	0.40	0.17	0.59	15.3	46.5	51.2	0.60
25.20	117.45	0.0250	0.18	0.20	0.61	47.6	22.5	49.6	0.63
25.20	115.42	0.0254	0.18	0.32	0.51	33.6	51.2	52.5	0.54
25.20	111.53	0.0263	0.16	0.26	0.65	23.3	26.3	33.6	0.65
25.20	109.67	0.0267	0.18	0.31	0.66	22.8	9.5	36.6	0.67
25.20	107.88	0.0272	0.56	0.38	0.68	21.6	16.7	37.2	0.72
25.20	106.15	0.0276	0.28	0.27	0.63	25.3	29.3	73.1	0.64
25.20	104.49	0.0281	0.30	0.37	0.78	25.3	29.3	73.1	0.78
25.20	101.39	0.0289	0.24	0.19	0.63	19.5	70.6	48.8	0.66
25.20	98.62	0.0297	0.39	0.49	0.80	23.5	25.3	51.2	0.85
25.20	97.36	0.0301	0.52	0.31	0.79	28.4	32.5	33.0	0.79
25.20	96.18	0.0305	0.24	0.44	0.78	28.8	53.9	58.5	0.83

采集得到的振动主频 f 共 69 个数据,分布情况见表 4。可见,该隧道右线爆破作业时上部高压铁塔塔基的振动主频 f 主要分布在 10 ~ 50 Hz 范围内;同时,各组数据不同方向的振动主频存在一定的

差异,总体上垂直方向的振动主频大于水平方向的振动主频,竖向振动主频在 26.5 ~ 73.1 Hz 之间;各方向振动主频与爆心距没有明显的线性关系,这主要与不同围岩段岩性、结构面裂隙等因素有关。

表4 振动主频分布情况

Table 4 Vibration frequency distribution

振动主频 f/Hz	数据/个	占比/%
$f \leq 10$	1	1.45
$10 < f \leq 50$	55	79.71
$f > 50$	13	18.84

分析表2中最大单响药量25.2 kg工况下各组振速峰值数据,结合图6,可以得到:随着隧道掌子面的不断掘进,爆源到高压铁塔塔基的直线距离(爆心距)不断减小,塔基处测点竖直方向的振速峰值和振动合速度均呈增大趋势,变化趋势呈非线性,水平方向振速峰值随爆心距变化趋势不明显;同时,竖直方向的振速峰值均大于水平径向和水平切向的振速峰值,表明在隧道爆破作业时,要重点关注高压铁塔塔基竖直方向的振动危害,必要时,可采取相关措施以防止塔基土壤介质的沉降。表2中监测得到振动峰值合速度最大值仅为0.85 cm/s,且在实际爆破过程中,未见高压铁塔产生任何轻微晃动,说明

本工程隧道爆破参数条件下,爆破振动对高压铁塔的影响较小。

2.3 振动波形分析

监测得到的典型爆破振动波形($R = 135.31 \text{ m}$ 工况下)如图4所示,整个衰减持续时间约1.0 s,可明显分辨出各段别的爆破振动波形的衰减时程,且各段别的振速峰值呈现递减趋势;各方向的振速峰值均出现在MS1段,这是由于掏槽孔起爆药量最大,加上MS1~MS5段雷管延期间隔时间短,存在振动波形的叠加。由于采用MS1~MS15多段别延期起爆网路,随着高段位雷管段间间隔时间的增加,振动持续时间逐渐增长,各分段振动波的叠加程度依次减弱,前一段振波波峰与后一段振波波峰相遇的概率降低,从而达到降低峰值振速的效果。因此,采用多段别延期起爆网路,严格控制低段别雷管的最大起爆药量,在一定程度上可有效控制高压铁塔处的爆破振动。

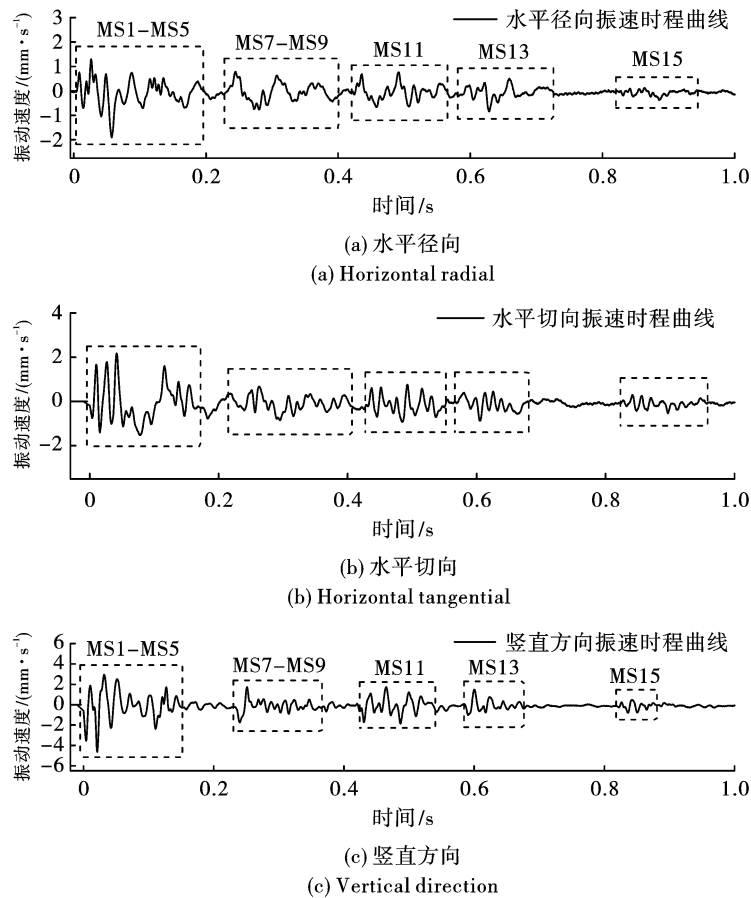


图4 测点爆破振动时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of blasting vibration at measuring points

由前面数据分析可知各组测点竖向振速值最大,鉴于篇幅有限,选取直线距离分别为135.31 m、

117.45 m、96.18 m三组爆破振动信号,对其竖向振动数据进行FFT变换处理,得到的频谱图如图5所

示。由频谱图可看出:各测点的竖向振动频率成分较为复杂,这主要受隧道围岩裂隙较发育这一特点影响;测点主频主要集中在 10~65 Hz 之间,符合隧道爆破主频分布范围;随着爆心距的减小,各测点的

最大振幅值逐渐变大,能量集中带逐渐向低频发展,更容易达到铁塔等构筑物的自振频率范围,因此要加强高压铁塔近距离隧道段爆破时的振动监测。

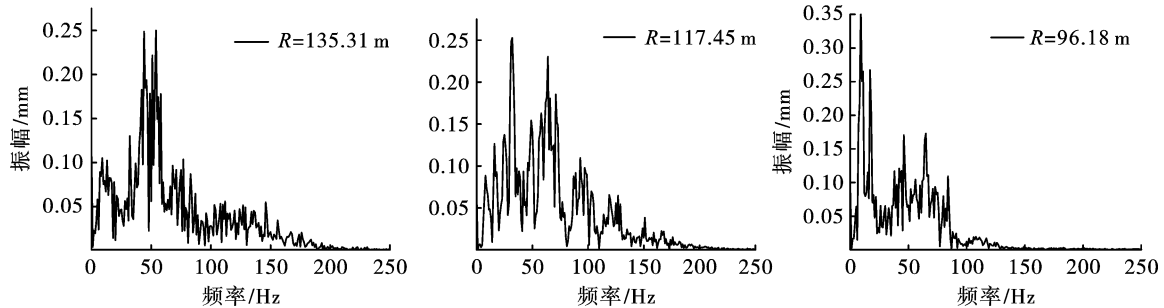


图5 测点竖向振动信号的频谱图

Fig. 5 Spectrum of vertical vibration signals at measuring points

3 振动数据拟合

由于爆破现场地形复杂,影响爆破振动强度的因素多,目前,国内外学者多采用萨道夫斯基经验公式来表述爆破振动强度,对爆破地震安全距离与质点振动速度进行计算分析。因此,基于表2中最大单响药量为 25.2 kg 工况下的 20 组振动数据,采用萨道夫斯基经验公式进行非线性拟合,进行现场爆破特性规律的分析及研究。萨道夫斯基公式为

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: v 为地震波波速, cm/s; Q 为最大单响药量, kg; R 为爆源中心到测点的直线距离, m; k 、 α 为场地相关系数,与介质和爆破条件因素有关。

由于拟合数据的最大单响药量一定,只有直线距离(爆心距)一个变量,对式(1)中进行参数等效替代,简化函数形式^[10],令振动合速度 $y = v$, 比例药量 $x = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$ 。

拟合结果如图6所示,得到的拟合公式为

$$y = 169.9 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.53} \quad (2)$$

数据拟合相关系数 $R^2 = 0.913$, 表明监测数据的拟合效果较好,式(2)可反映出本工程隧道爆破作用下质点振动速度与爆心距、最大单响药量之间的一般规律。

4 结论

经过下穿高压铁塔高速公路隧道百余次爆破实践,以及对爆破振动现场监测,分析爆破作用下高压

铁塔塔基的振动响应数据,可以得出以下结论:

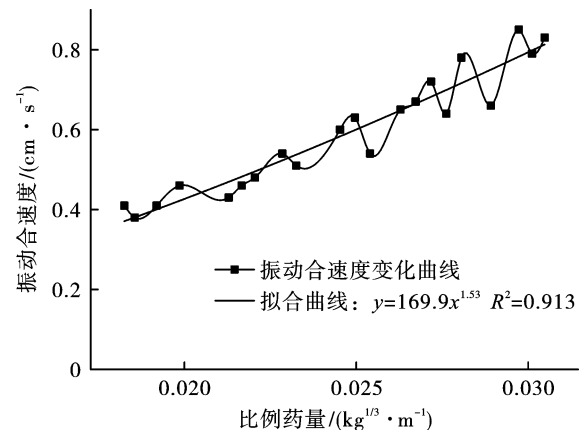


图6 振动峰值合速度拟合曲线

Fig. 6 Vibration peak velocity fitting curve

(1) 测点振动频率成分较为复杂,振动主频主要分布在 $10 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$ 范围内,占比 79.71%;塔基质点竖直方向的振速峰值最大,其随爆心距变化趋势符合爆破地震波传播衰减规律;采取多段延期爆破网路和控制最大单响药量等措施,以降低隧道爆破对高压铁塔的振动危害。

(2) 通过数据拟合,得出本工程条件下隧道爆破质点振动传播规律及萨道夫斯基公式。

(3) 开展单循环 200 kg 工业炸药量级的隧道掘进爆破作业,爆破振动对净距 100 m 处高压输电铁塔的影响甚微;通过爆破振动和位移沉降实时观测,可反馈铁塔的安全运营状态,建议电力主管部门和制法机关适当放宽电力设施周边爆破作业的管控范围。