

文章编号: 1000-4750(2016)04-0205-05

聚脲包覆混凝土的压缩和吸能特性研究

张青艳^{1,2}, 靳晓庆^{1,3}, 郑宇轩¹, 周风华¹

(1. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江, 宁波 315211

2. 嘉兴南洋职业技术学院, 浙江, 嘉兴 314000; 3. 河北建筑工程学院, 河北, 张家口 075000)

摘 要: 混凝土结构在受到远超其极限强度的准静态或者冲击载荷作用时, 常常发生粉碎性的破坏, 导致结构坍塌。采用高弹性材料包覆混凝土有可能减缓结构的灾难性坍塌。该文研究了聚脲涂层包覆的圆柱形混凝土试件在准静态和动态落锤压缩下的破坏过程和吸能特性。实验结果表明混凝土试样的抗压强度存在明显的应变率硬化效应, 观察到聚脲包覆混凝土和无聚脲包覆混凝土破坏后期残余承压特性的明显差异。分析了有无聚脲包覆混凝土的破坏形态, 结果表明聚脲包覆混凝土的压缩吸能效果远远优于无包覆混凝土, 有可能承压吸能构件应用于工程实际。

关键词: 聚脲; 混凝土; 抗压性能; 破坏过程; 能量吸收

中图分类号: TU528 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.12.1023

COMPRESSIVE AND ENERGY ABSORPTION PROPERTIES OF POLYUREA-COATED CONCRETE UNDER QUASISTATIC OR DYNAMIC LOADINGS

ZHANG Qing-yan^{1,2}, JIN Xiao-qing^{1,3}, ZHENG Yu-xuan¹, ZHOU Feng-hua¹

(1. MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Jiaxing Nanyang Polytechnic Institute, Jiaxing, Zhejiang 314000, China; 3. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: When subjected to a quasistatic or dynamic loading that far exceeds the strength limit, a concrete structure may crush or collapse catastrophically. An elastic polymeric material such as polyurea, having high elongation and low modulus, can be sprayed on the concrete structure surface to prevent the structure from collapsing. In this study, we conducted quasi-static compression tests and drop hammer impact tests to study the mechanical behavior of the polyurea-coated and uncoated cylindrical concrete specimens. We compared the differences of the compressive strength, the failure process, and the energy absorption properties of the polyurea-coated and uncoated specimens. The experimental results confirmed that the concrete has an apparent strain rate effect, with the dynamic failure strength higher than the quasistatic failure strength. Although failure strength is hardly affected by the coating, the sustainable compression deformation of the polyurea-coated concrete was significantly greater than that of the uncoated concretes. The polyurea coating increased the energy absorption ability of the concrete subjected to drop hammer impacts.

Key words: polyurea; concrete; compressive strength; failure process; energy absorption

收稿日期: 2014-12-05; 修改日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272163, 11390361); 浙江省重中之重“近海冲击与安全”学科开放基金项目(zj1220)

通讯作者: 郑宇轩(1986—), 男, 江西樟树人, 讲师, 博士, 从事冲击动力学和断裂力学研究(E-mail: zhengyuxuan@nbu.edu.cn).

作者简介: 张青艳(1981—), 女, 吉林长春人, 博士生, 从事冲击动力学和断裂力学研究(E-mail: 16175973@qq.com);

靳晓庆(1990—), 女, 河北张家口人, 助教, 硕士, 从事脆性材料压缩破坏研究(E-mail: xiaoqing_74111@126.com);

周风华(1964—), 男, 浙江慈溪人, 教授, 博士, 博导, 从事冲击动力学和断裂力学研究(E-mail: zhoufenghua@nbu.edu.cn).

混凝土作为主要的建筑材料,广泛应用于房屋以及地下防护工程中。当混凝土结构受到冲击载荷(地震、海啸以及爆炸载荷)作用时,其失效为典型的脆性破坏形式,建筑物在强动载的作用下局部粉碎性破坏,整体可能发生坍塌,通常都会造成极大的人员伤亡;部分房屋甚至在缓慢的疲劳损伤积累到一定程度时,承重柱/墙中的微小裂纹也会扩展最终导致房屋坍塌,造成不可挽回的损失。因此,提高混凝土结构抗冲击能力,防止混凝土结构在破坏过程中的灾难式坍塌显得尤为重要。钢筋混凝土的出现极大的改善了素混凝土的力学性能,但是仍有大量 20 世纪建造的砖混结构房屋需要加固。特别的,当混凝土建筑遭受破坏后,如何避免混凝土结构粉碎性的垮塌,为建筑内来不及逃离的人群提供一定的生存空间,显得尤为的必要和迫切。

近年以来,有学者致力于研究在混凝土外部包覆有机聚合物,以此来提升混凝土结构的力学性能。Johnson^[1]和 Irshidat 等^[2]通过实验以及有限元模拟对比了有无聚脲喷涂墙体在爆炸载荷作用下的响应,发现聚脲喷涂墙体的挠曲阻力明显大于未涂聚脲墙体,载荷作用下聚脲喷涂墙体保持了较好的完整性,而未喷涂聚脲的墙体发生了大面积的破坏。Davidson、Fisher 等^[3-4]通过实验对比了不同厚度聚脲涂层以及不同尺寸墙体在爆炸载荷作用下的响应,实验发现聚脲涂层可有效防止无筋砌体的坍塌,文中给出了砌体在载荷作用下砂浆破坏演化过程。Toutanji 等^[5]对处于空气、淡水与海水三种环境中有无聚脲包覆的混凝土试件进行了准静态压缩实验。结果表明,在空气中,聚脲对混凝土的抗压强度影响不大;而在水中(包括淡海水),聚脲可以提高混凝土的抗压强度。这表明:聚脲涂层的保护效果更多体现在避免材料在腐蚀环境的侵蚀和劣化。Grujicic、Pandurangan 等^[6]通过对聚脲材料板和内覆聚脲涂层头盔在爆炸载荷作用下的冲击响应研究,分析了聚脲材料在抵御冲击载荷作用时内部能量耗散机制,通过数值方法与实验的比较,修正聚脲材料模型参数,较好的再现了材料抗震减灾性能。甘云丹等^[7]采用 LS-DYNA 模拟弹性体涂层钢板在水下爆炸载荷作用下的抗爆性能,在安全爆距下,弹性体涂层可提升钢板抗爆能力约 20%。现有的研究大多针对喷涂聚脲结构板、砌体墙等在冲击载荷作用下的响应,以及聚脲材料的本身理化性能和喷涂聚脲混凝土构件的防腐防冻以及保水

防漏性能^[8-13],对于聚脲包覆混凝土的基础力学性能的研究还不够充分。

本文选取混凝土圆柱作为研究对象,在有与无聚脲包覆涂层的情况下,进行了圆柱试件的准静态和动态落锤压缩实验,获得了不同加载条件下试件的压缩强度,研究了聚脲包覆层对混凝土试件力学特性的影响,并对有或无聚脲包覆混凝土的抗冲击吸能特性进行了分析。

1 试样制备

混凝土配合比设计为水泥:水:砂:石=1:0.43:1.2:2.4,其中水泥型号为P·C 32.5复合硅酸盐水泥,强度等级为32.5;水为自来水;砂为中砂;石子为碎石,最大粒径不超过6 mm。按上述配合比对试件原材料进行搅拌,在振动台上进行振捣至表面翻浆后在室温下存放24 h后脱模,试模尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。标准养护28 d后取出,选择质量较好部分进行断面切割打磨,制备成圆柱形,以保证试件两端面平行,试件尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。

高弹性聚脲材料为JK-1102型涂料,使用美国固瑞克GRACO公司专用喷涂设备对混凝土进行喷涂,喷涂聚脲层厚度为3 mm。该聚脲为SPUA-102弹性防水材料,厂家提供的产品检验报告显示,材料的拉伸强度为21 MPa,断裂伸长率为510%,粘结强度为4.8 MPa,撕裂强度为78 N/mm,为高弹性不抗剪材料。喷涂之前对混凝土试件进行清洁、打磨,用腻子填补表面孔洞,并涂刷底漆。圆柱形混凝土喷涂过程如图1所示。



喷涂前 打磨、填充、刷漆 喷涂后

图1 混凝土喷涂聚脲过程

Fig.1 The process of spraying polyurea on the concrete specimen

2 压缩实验

2.1 准静态压缩实验

准静态压缩实验在百诺液压伺服试验机上进行,压缩前混凝土试件上下表面均涂抹凡士林润滑油,尽量减小试件的端面摩擦效应;以相当于

10^{-4} s^{-1} 等效应变率的恒定速度对混凝土试件加载直至试件完全破坏。通过实验机的压缩载荷与压头位移的记录数据可得到试件的名义应力-应变曲线,如图 2 所示。在混凝土压缩同时,通过高清摄像机记录混凝土试样受压下的变形破坏过程。对于有无聚脲包覆混凝土实验结果分别取三组有效实验数据进行分析。

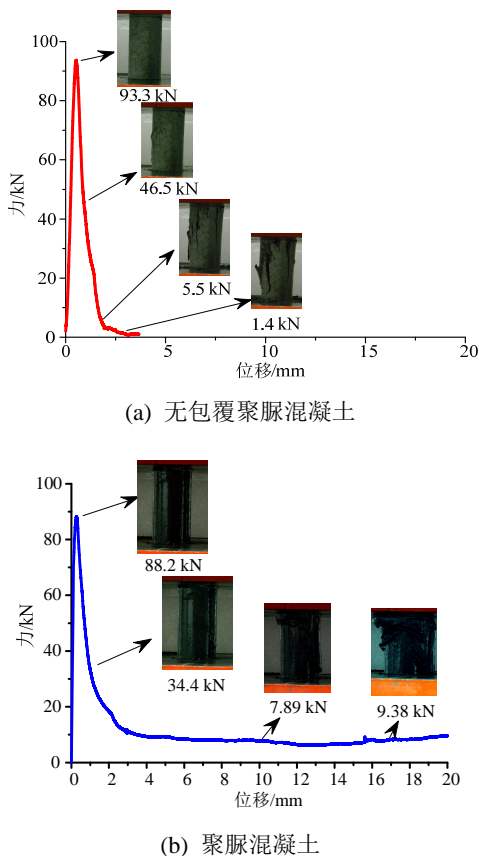


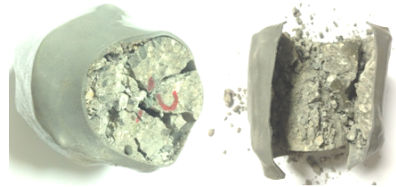
图 2 准静态实验力位移曲线

Fig.2 Force-displacement curves in the quasistatic compression test

图 2(a)表明典型的无聚脲包覆混凝土试件受单轴压缩主要为两阶段:线性加载阶段和非线性破坏卸载阶段。在前期加载阶段,无聚脲包覆混凝土试件属于弹性变形;当载荷到达混凝土试件的压缩破坏强度时,混凝土试件内部裂纹开始急剧发展直至破坏,承载力也逐渐减小为零。图 2(b)显示相对无聚脲包覆情况,在试件破坏后期,典型的聚脲包覆混凝土试件仍然可以承受一定的载荷。实验最终结果表明聚脲包覆混凝土在变形达到 20% 以上时仍能持续承受 10 kN 左右的荷载,并且有理由相信只要聚脲不发生撕裂,聚脲包覆混凝土仍能在相当大的压缩应变范围内继续承压。



(a) 无聚脲包覆混凝土残留物



(b) 聚脲包覆混凝土残留物

图 3 准静态试验后试件残留物

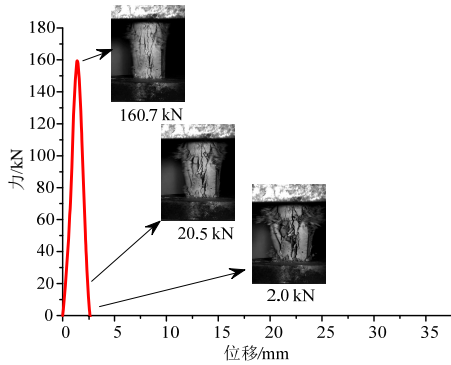
Fig.3 The residue material of the specimen after quasistatic compression test

从无聚脲包覆混凝土试件的破坏过程亦可以发现,在轴向压缩载荷超过了混凝土试件的压缩强度时,试件表面出现宏观可见微小裂纹,并且裂纹沿试件开始纵向贯穿,伴随着承载力也开始下降,随后混凝土表面产生大块剥落,试件最终沿 45° 方向剪切破坏,失去承载力。而聚脲包覆混凝土在试样受载产生纵向贯穿裂纹之后,由于聚脲包覆效果,试件表面不会产生大块混凝土剥落,混凝土在聚脲包覆中被压碎,并能承受一定的压缩载荷,而载荷平台大小取决于聚脲材料的力学性能。无聚脲包覆混凝土破坏后形貌如图 3(a),试件表面产生长度约 30 mm 的片状物,沿着约 45° 方向产生半锥形残留物;图 3(b)显示聚脲包覆混凝土呈不规则外形,剖开聚脲涂层发现混凝土试件基本碎成砂砾,但底部仍保留类半锥形,说明有无聚脲包覆混凝土试样内部破坏机理相近,但是聚脲涂层的包覆增强了混凝土的后期承载力。

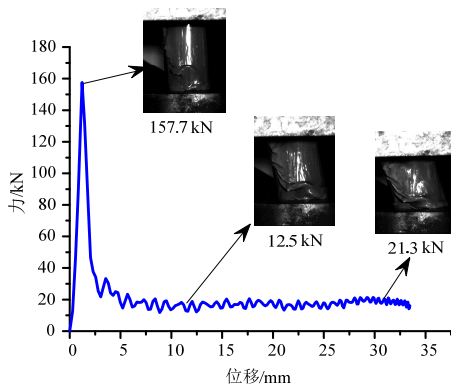
2.2 动态落锤实验

在宁波大学自制的大型动态落锤实验机上进行混凝土试件的动态压缩实验。实验设定锤头提升高度为 $H=1.6 \text{ m}$,锤头质量 $M=50 \text{ kg}$,为得到冲击过程中试件上表面受到的冲击力随时间的变化关系,在锤头上安装加速度传感器,得到实时加速度曲线 $a=a(t)$,由牛顿定律可以得到试件上表面受到的压缩载荷 $F(t)=Ma(t)$;对加速度曲线进行积分,可以得到试件的压缩变形速度: $v(t)=v_0 - \int_0^t a(s)ds$ (其中 v_0 为落锤初始速度)和压缩位移曲线: $\delta(t)=\int_0^t v(s)ds$,从而获得实验的冲击力-位移

曲线,如图4所示。实验中采用 Photron Fastcam 高速摄影仪记录混凝土试件压缩直至破坏过程。



(a) 无包裹聚脲混凝土



(b) 聚脲混凝土

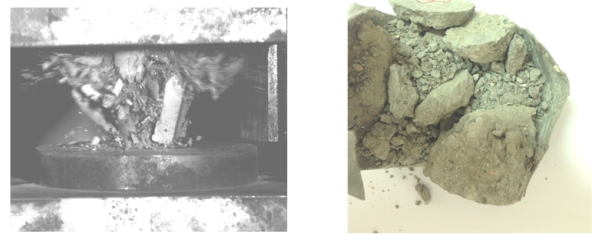
图4 动态试验力位移曲线

Fig.4 Force-displacement curves in drop hammer impact tests

动态落锤实验得到的混凝土试件的力位移曲线和准静态下类似走势,但是动态压缩下无论有无聚脲包裹,混凝土试件均表现出明显的冲击强化效应,压缩破坏强度显著提高。值得注意的是,聚脲包裹的混凝土最后的承载平台,在动态压缩下也相对于准静态有明显提高。说明聚脲材料在动载下也表现出明显的应变率效应。

图5(a)为无聚脲包裹混凝土动态压缩破坏后形态,结合图4(a)可以发现,在高应变率压缩下,混凝土中裂纹从打击端开始出现,并且伴随着多裂纹的同时发展,直至最后混凝土试件整体发生碎裂。相比准静态压缩而言,无聚脲包裹混凝土在动态压缩下发生完全碎裂,没有留下如图3(a)所示的圆锥形残留物。聚脲包裹混凝土动态压缩破坏后仍保持完整形态,图5(b)为沿试件轴向剖开的破坏形态图,混凝土试件受打击端部分由于动载荷作用,多裂纹发展使得试样上端部发生局部碎裂,而试件的下端部和准静态压缩类似,剩有圆锥形残留物未破坏。

在聚脲材料的包裹下碎块以一定形态作为承载体继续承载。



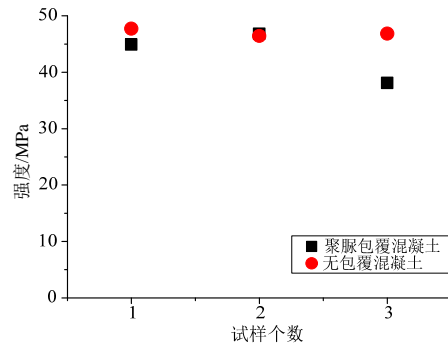
(a) 无聚脲包裹混凝土残留物 (b) 聚脲包裹混凝土残留物

图5 动态试验后试件残留物

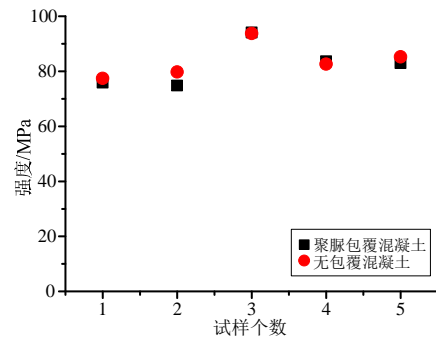
Fig.5 The residue of the specimen after impact tests

2.3 抗压强度

图6(a)为有无聚脲包裹混凝土在准静态压缩下的破坏强度统计图。从图中可以看出有聚脲包裹混凝土的准静态压缩强度较无包裹的混凝土压缩强度略低,考虑到混凝土试件本身的离散性,认为聚脲包裹对混凝土的准静态压缩强度无明显影响。有无聚脲包裹的混凝土在动态压缩下的破坏强度统计情况如图6(b)所示,聚脲包裹对混凝土的动态压缩强度也没有明显影响。



(a) 准静态试验



(b) 动态压缩试验

图6 压缩破坏强度

Fig.6 The compressive strength of the specimen

聚脲涂层喷涂在混凝土试样表面,由于聚脲的粘结强度只有4.8 MPa,并未对试样表面产生较大的粘结力,故无法抑制混凝土在加载过程中的裂纹发

展。而聚脲材料为超弹性材料，并且弹性模量较混凝土有量级上的差异，故在侧向围压上对混凝土的贡献也相当有限。因此在压缩过程中，聚脲涂层对混凝土的整体抗压强度影响不明显。

2.4 聚脲包覆混凝土吸能效果

从图 4(b)中可以发现，聚脲包覆混凝土材料的动态压缩应力-应变关系呈现类似多孔材料一样的应力平台，实验曲线表明聚脲包覆混凝土材料具有一定的吸能能力。故对图 4 中力-位移($F-\delta$)曲线进行积分，即可获得有无聚脲包覆混凝土材料吸收的能量，结果如图 7 所示。有无聚脲包覆混凝土在破坏发生前期，吸能防护效果一样。但是当压缩位移达到 3 mm 的时候，无聚脲包覆的混凝土试件瞬时崩塌，丧失承载力，从而吸能效果有限；而聚脲包覆混凝土仍可在一个较低的应力平台段长期承压，从而可以吸收更多的能量。在冲击实验过程中，外界输入的能量全部由锤头的重力势能转化而来，由锤头重量和下落高度可以计算出，外界输入能量约为 784 J。而从表 1 可以看出，在同样的实验条件下，聚脲包覆混凝土吸能效果远远优于无聚脲包覆的试样，数值相差 4 倍多，并且聚脲包覆混凝土的吸能率达到了 95% 以上，从而可以防止破坏造成的二次损伤。

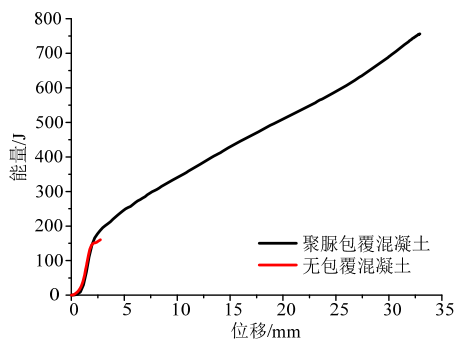


图 7 混凝土动态压缩实验中能量位移曲线

Fig.7 The dynamic absorption energy-displacement curve in the dynamic compression test

表 1 有无聚脲混凝土吸收的能量 /J

Table 1 The energy absorption of Polyurea-coated and uncoated concretes

编号	试验	
	聚脲包覆混凝土	无聚脲包覆混凝土
1	756.07	163.42
2	751.33	216.84
3	756.23	179.04
4	756.20	222.22
5	756.10	160.25

3 结论

(1) 有无聚脲包覆混凝土抗压强度无显著差异，但后期承载能力具有明显差异。无聚脲包覆混凝土达到破坏强度后，在很小的压缩范围内即会丧失承载力，而聚脲包混凝土可以在一个很大的压缩范围内承受一定荷载。

(2) 准静态加载下，有无聚脲包覆混凝土试件破坏机理相同，都是在最大缺陷主导的剪切破坏。在动态压缩过程中，无聚脲包覆混凝土由于多裂纹快速发展导致最终试件整体碎裂，而聚脲包覆混凝土由于侧向约束，试件受打击端部分局部发生碎裂，而底部破坏仍为 45° 剪切破坏。

(3) 动态加载下，外界提供约 800 J 的冲击能量，聚脲包覆混凝土的吸能率达到了 95% 以上，而无聚脲包覆混凝土仅有 25% 左右，两者相差约 4 倍。当混凝土结构受到突加强载荷时，结构可发生大的变形而不坍塌，喷涂于墙体表面时可保证发生意外时建筑物内有足够的生存空间，由于包覆效果，破坏过程中没有高速飞溅的混凝土碎块，避免二次伤害。同时聚脲涂层可以有效的提高混凝土的承载时间，为建筑物内部人员的安全离开提供更多的时间。

参考文献:

- [1] Johnson C F, Slawson T R, Ph D, P E, Cummins T K, Davis J L. Concrete masonry unit walls retrofitted with elastomeric systems for blast loads [C]. Proceedings for the Army Science Conference (24th), Orlando, Florida, December, 2005: ADM001736.
- [2] Irshidat M, AlOstaz A, Cheng A, Mullen C. Blast vulnerability evaluation of concrete masonry unit infill walls retrofitted with nano particle reinforced polyurea: modeling and parametric evaluation [C]. Structures Congress, Las Vegas, Nevada, United States, American Society of Civil Engineers, 2011: 2126—2141.
- [3] Davidson J S, Porter J R, Dinan R J, Hammons M I, Connell J D. Explosive testing of polymer retrofit masonry walls [J]. Performance of Constructed Facilities, 2004, 18(2): 100—106.
- [4] Davidson J S, Fisher J W, Hammons M I, Porter J R, Connell J D. Failure mechanisms of polymer-reinforced concrete masonry walls subjected to blast [J]. Structural Engineering, 2005, 131(8): 1194—1205.
- [5] Toutanji H A, Choi H, Wong D, Gilbert J A, Alldredge D J. Applying a polyurea coating to high-performance organic cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2013(38): 1170—1179.

(参考文献[6]—[13]转第 224 页)

- carbon-chromium steel under variable amplitude conditions [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(8): 1300—1308.
- [10] Ravi Chandran K S, Chang P, Cashman G T. Competing failure modes and complex *S-N* curves in fatigue of structural materials [J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(3): 482—491.
- [11] Bomas H, Burkart K, Zoch H W. Evaluation of *S-N* curves with more than one failure mode [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(3): 19—22.
- [12] Weibull, W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 1951, 18(3): 293—297.
- [13] Sakai T, Lian B, Takeda M, Shiozawa K, Oguma N, Ochi Y, Nakajima M, Nakamura T. Statistical duplex *S-N* characteristics of high carbon chromium bearing steel in rotating bending in very high cycle regime [J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(3): 497—504.
- [14] Stepnov M N. Evaluating the probability of failure in fatigue tests [J]. *Industry Laboratory*, 1962, 28(7): 886—888.

(上接第 209 页)

- [6] Grujicic M, Bell W C, Pandurangan B, Glomski P S. Fluid/structure interaction computational investigation of blast-wave mitigation efficacy of the advanced combat helmet [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 6(20): 877—893.
- [7] 甘云丹, 宋力, 杨黎明. 弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟[J]. *兵工学报*, 2009, 30(S2): 15—18.
Gan Yundan, Song Li, Yang Liming. Numerical simulation for anti-blast performances of steel plate coated with elastomer [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(S2): 15—18. (in Chinese)
- [8] 吕平, 史世凡, 向佳瑜, 等. 采用喷涂纯聚脲技术提高跨海大桥混凝土耐久性[J]. *混凝土*, 2012(8): 119—121.
Lü Ping, Shi Shifan, Xiang Jiayu, et al. Spray pure polyurea technology applied to improving the durability of concrete cross-sea bridge [J]. *Concrete*, 2012(8): 119—121. (in Chinese)
- [9] 汪家铭. 聚脲弹性体的发展概况与前景[J]. *化学工业*, 2009, 27(10): 17—21.
Wang Jiaming. The development situation and prospects polyurea elastomer [J]. *Chemical Industry*, 2009, 27(10): 17—21. (in Chinese)
- [10] 张燕, 邓智平, 刘朝辉, 等. 喷涂聚脲弹性体在军事永久工程防腐中的应用[J]. *表面技术*, 2013, 41(4): 110—112.
Zhang Yan, Deng Zhiping, Liu Zhaohui, et al. Application of spray polyurea elastomer in anti-corrosion of military permanent project [J]. *Surface Technology*, 2013, 41(4): 110—112. (in Chinese)
- [11] 张静, 吕平, 杨华东. 桥梁混凝土防护用聚脲涂层耐硫酸盐腐蚀研究[J]. *腐蚀研究*, 2012, 26(1): 48—51.
Zhang Jing, Lü Ping, Yang Huadong. Study on the inhibition effect of sulfate corrosion by polyurea for bridge concrete protection [J]. *Corrosion Research*, 2012, 26(1): 48—51. (in Chinese)
- [12] 张燕, 邓智平, 刘朝辉, 等. 聚脲在混凝土防护中的应用[J]. *表面技术*, 2012, 42(2): 116—118.
Zhang Yan, Deng Zhiping, Liu Zhaohui, et al. Application of polyurea in protection of concrete [J]. *Surface Technology*, 2012, 42(2): 116—118. (in Chinese)
- [13] 杨洁. 高拱坝坝踵喷涂聚脲防渗层的性能与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Yang Jie. The research in properties and application of spray polyurea elastomer anti-seepage coating in heel area of high arch dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)