

# 聚丙烯纤维混凝土的研究现状及问题探讨

广州宏达工程顾问有限公司 贺常乐  
湖南科技大学土木工程学院 欧志华

**摘要:**聚丙烯纤维混凝土由于具有抗裂、防渗、韧性好且成本不高等优良的特性而逐步得到广泛使用,简要分析聚丙烯纤维混凝土的研究现状及亟待解决的几个问题。

**关键词:**聚丙烯纤维 混凝土 研究现状

## 1 国内外研究现状与水平

近 10 多年来,人们把耐久性作为混凝土追求的主要目标,并引入超细活性掺和料,作为混凝土的重要组成部分,从而发展了具有高耐久性、高流动性和体积稳定性,并具有一定强度的高性能混凝土(High Performance Concrete,缩写为 HPC),成为近期混

土技术的主要发展方向。

混凝土的固有弱点是因脆性而容易产生裂缝。普通混凝土的抗拉强度与抗压强度只有 9%左右,高强混凝土则更低,仅为 6%(当混凝土的强度等级超过 C45 时),脆性显著,对早期开裂非常敏感。随着混凝土强度的提高,其断裂韧性、结构延性和抗震性

### 3.1 节约成本

安健能使空气渗漏降低到最低程度,减少了热对流所导致的能量损失,降低了取暖和制冷设备的成本和运行费用。使用安健能可以比使用传统保温隔热材料节省能源 50%。避免因潮气引起的斑痕、霉菌等问题的产生,这同样节省了建筑的维修费用。一套两桶的安健能液体原材料可获得 37~40 m<sup>3</sup> 的发泡效果,大大节省了储存和运输的费用。

### 3.2 健康的室内环境

安健能可将建筑外维护结构完全密封,阻止风及潮气对建筑室内的渗透,实现了无强气流的室内舒适环境。由于安健能可以阻止灰尘、过敏源、气味及污染源等进入室内,再配有合理的机械通风系统设计可以使室内的空气比室外的空气还健康。因为安健能不释放任何有害气体或味道,所以能为那些患有过敏症、呼吸道病症和化学敏感症的人们带来健康的居住环境。

### 3.3 满足不同的要求

由于安健能现场喷涂施工而且极易填堵所有缝

隙,所以它赋予了建筑形式和形状上的最大自由度。它不但可以解决已建建筑的保温、隔热、隔声和防潮等问题,更能满足新建工业建筑、农业建筑和商业建筑对保温隔热的复杂要求。

### 3.4 绿色环保

安健能保温隔热材料不含破坏大气臭氧层的化学元素,有效的保温隔热使取暖和制冷的能源消耗降低到最低。

## 4 结语

安健能公司是全球生产 100%水质现场发泡保温隔热材料的领先企业,其产品已在美国、加拿大、日本及韩国等国家得到广泛应用。

作为膨胀性现场发泡保温隔材料,安健能很容易被使用在不同的建筑上,并达到严丝合缝的水平。由于它有助于减少建筑维护结构内的潮气问题,使得建筑的维护成本降低。此外它还明显降低了取暖、制冷设备的负荷,并降低设备运行成本。总之,安健能可以为人们提供运营成本低、健康舒适的建筑环境。

能均会降低。当结构受弯时,荷载等于破坏荷载的15%~20%时就会产生裂缝(这时钢筋的应力远小于屈服极限),裂缝扩展会造成结构物抗渗性能降低,并使构件容易受到介质侵蚀,影响结构物的耐久性。在结构设计时因裂缝宽度的限制,高强混凝土的“高强”的优越性往往得不到充分的应用。

除了作用荷载之外,混凝土裂缝产生的原因通常有:收缩(包括塑性收缩、干燥收缩、自干燥收缩和碳化收缩)、热变形、化学反应(如碱-集料反应、延迟钙矾石)和其它因素(如沉降、环境、钢筋锈蚀、施工质量)。

混凝土的裂缝问题一直困扰着人们,人们也在从不同途径解决这一问题,如掺膨胀剂、掺高聚物化学材料、掺高效减水剂和超细矿物掺和料、施加预应力等,但这并不能从根本上解决混凝土本身固有的延性和韧性问题。钢管混凝土具有较好的延性,应用范围却受到限制。活性粉末混凝土(Reactive Powder concrete,缩写为RPC)是一种超高性能混凝土,可以使混凝土的断裂能提高两个数量级,不过其原材料和工艺要求较高。相比之下,在混凝土中掺入微细纤维的纤维混凝土不仅能够提高混凝土本身的延性和韧性,增强混凝土的抗裂能力,而且对原材料和工艺几乎没有特别的要求,成本增加不大(甚至有可能降低)。

钢纤维增强混凝土最早出现在1849年,但直到1963年J.P.Romualdi和J.B.Batson关于纤维混凝土增强理论研究报告的发表,钢纤维混凝土的研究和应用才有了较快的发展。合成纤维则是开始于1965年Goldfein建议用聚丙烯纤维作为混凝土掺合料,建造美国工兵部队的防爆建筑,随后,由于其优良的品质和低廉的价格,聚丙烯纤维混凝土迅速推广应用。据悉,目前美国所用混凝土总量中合成纤维混凝土约占7%,超过先期研究的钢纤维混凝土(占3%)。

我国在20世纪70年代开始了钢纤维混凝土技术的研究和应用,合成纤维则是20世纪90年代初。随着我国自主研制的价格低廉、性能优良的合成纤维的大量出现,合成纤维在我国混凝土中的应用越来越广泛。其中“聚丙烯合成纤维网在桥面混凝土铺装层中的应用”已经成为建设部2003年度推广应用的技术。

纤维混凝土是一种复合材料。纤维增强混凝土的机理主要有两种理论:一种是基于复合材料的混合定律,认为纤维混凝土的诸性能(如强度等)是纤维与混凝土这些性能的加和值;另一种是建立在断裂力学基础上的纤维间距理论,认为混凝土的破坏是因为其内部的微裂缝、空隙等初始缺陷,在外力作用下产生应力集中引起的,而微细纤维对裂缝尖端产生反向的应力场,从而降低裂缝尖端的应力集中程度,使得裂缝的发展受到约束,纤维混凝土的抗裂强度因而增加。

通常根据纤维的弹性模量把纤维分成高弹模纤维(如钢纤维、玻璃纤维和碳纤维等)和低弹模纤维(包括天然的有机纤维如纤维素纤维和合成纤维如聚丙烯纤维、尼龙纤维);根据纤维的长度把纤维分成非连续的短纤维和连续的长纤维。

聚丙烯(polypropylene)(单体分子式为 $C_3H_6$ )是一种结构规整的结晶型聚合物,为乳白色、无味、无毒、的热塑性塑料,由它制成的纤维具有下列优点:(1)质轻:密度为 $0.90\sim 0.91\text{ g/cm}^3$ ;(2)熔点高( $165^\circ\text{C}$ );(3)化学稳定性好,耐酸碱;(4)表面疏水,不会被水泥浆浸湿。主要缺点是与基体间的粘结较差。

目前,聚丙烯短纤维已经作为混凝土的次要加筋材料广泛用于混凝土中,由于微细,比表面积大,若每立方米混凝土掺入1kg聚丙烯纤维,可使 $1\text{cm}^3$ 混凝土中分布有近20条纤维丝,故纤维能够在混凝土内部构成一种均匀的三维乱向支撑体系,从而产生一种有效的二级加强效果。

目前在混凝土使用的聚丙烯纤维主要有拉丝聚丙烯纤维、膜裂聚丙烯纤维、聚丙烯网状纤维。

从目前国内研究水平来看,主要集中于对混凝土聚丙烯纤维增强混凝土的物理、力学性能的研究:华渊等的研究表明与基准混凝土相比,随着纤维体积率的增加(0~1.1%),纤维混凝土的抗压强度变化很小,抗折强度则提高了12~26%,韧性也随之增加,它们提出了聚丙烯纤维混凝土的裂纹发展规律,定性分析了增韧机理。孙家瑛研究了不同掺量聚丙烯高性能混凝土的抗折强度、脆性和抗冲击性能。曹诚、王春阳研究了低掺量聚丙烯纤维在混凝土中的增稠效应、阻裂效应和界面效应。戴秉国和黄承奎研究了网状聚丙烯纤维混凝土的施工性能、抗压、抗弯性能、韧性、抗渗性、热老化稳定性及收缩性试验结果。姚

武等提出了基于体积稳定性的混凝土开裂指数的研究。

在聚丙烯应用方面,朱江分析了聚丙烯纤维混凝土的防水机理,并介绍了广州新中国大厦以及广州南方实业大厦的地下室底板中添加聚丙烯纤维的施工情况。谷章昭、倪梦象等指出尼龙及聚丙烯纤维具有较好的抗裂性,可提高混凝土的使用功能及耐久性,并已经成功地上海 8 万人体育场看台、地铁工程及东方明珠电视塔等工程的推广应用。苏建波、李士恩较详细介绍了自 1996 年开始,杜拉纤维(即束状单丝聚丙烯纤维)在我国的广泛应用。如广州市的东环、西环、南环等高速公路的路面,不仅解决了收费站的无磁性要求问题,而且有效满足了路面的抗裂、抗磨、抗冲击等要求。在重庆、厦门、武汉等地杜拉纤维还大量用于桥面铺装、软路面等工程。在民用建筑中,它有效解决了高强钢管混凝土柱的施工工艺,提高了高强混凝土的延性和韧性。重庆世界贸易中心在特大型转换层大梁中,应用杜拉纤维增强混凝土成功地解决了高强度等级大体积混凝土施工中的抗裂和提高韧性等问题。

从国外研究来看,对聚丙烯纤维混凝土的研究在基本性能的基础上,已有一定的延伸。Sydney Furlan Jr. 等对 14 根梁做了抗剪试验,指出与素混凝土相比,抗剪强度、刚度(特别是在第一开裂期后)和韧性都有提高,同时还研究了箍筋对纤维混凝土梁的影响。G.D.Manolis 等试验了一系列纤维含量不同、支撑条件不同的聚丙烯纤维混凝土板的抗冲击性能及自振周期,发现纤维引入混凝土板的抗冲击性能随纤维含量的增加逐渐提高,但对自振周期基本无影响。Kamal 等人对若干聚丙烯纤维梁进行了弯曲疲劳试验,得到纤维可以推迟混凝土结构中裂缝的出现,延长裂缝的发展过程中的间隙时间,这与素混凝土的突然破坏相比安全性能大大提高。

综合已有的研究成果,掺入适量的聚丙烯纤维对混凝土具有阻裂、增韧,增加抗拉、抗弯和抗剪、耐疲劳强度的作用,可以明显改善混凝土的延性和耐久性,加上其价格低廉,在广泛使用高性能混凝土中具有良好的应用前景。

## 2 存在的问题

### 2.1 对聚丙烯纤维阻裂效果的认识不统一

目前,还有很多人都认为聚丙烯纤维仅仅能够限制混凝土硬化前的塑性裂缝,而对硬化后混凝土裂缝的发展没有限制作用。这个认识是基于“混合定律”,因为聚丙烯纤维的弹性模量比硬化前的塑性混凝土的要高,比硬化混凝土的要低。而现在很多试验均表明,聚丙烯纤维对硬化混凝土也有明显的阻裂作用,这主要考虑到“纤维间距理论”。

### 2.2 对聚丙烯纤维阻裂效果的评价方法需要完善

《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)采用的方法是:测定受约束“平板式试件”经风干后的裂缝的名义面积。这种方法对混凝土的塑性阶段和 3d 前的收缩裂缝的评价可能有效,对混凝土 3d 以后的裂缝评价需要试验检验。此外,对自干燥收缩较大的低水胶比混凝土的评价不一定有效。

### 2.3 对聚丙烯纤维阻裂机理研究有待深化

目前认为,聚丙烯纤维的阻裂作用是因为纤维在混凝土中起到一种“桥联”效果。事实上,收缩受约束产生的拉应力和由于徐变释放的应力之间的相互影响,是硬化混凝土出现早期开裂的核心。混凝土裂缝的形成原因很复杂,除了应力场之外,包括收缩、徐变、温度场、湿度场等诸多因素,在混凝土中掺入聚丙烯纤维对这些性能(还有相关的因素如热膨胀系数,热传导系数)的影响对裂缝的形成和发展有待深入研究。而聚丙烯纤维对裂缝的细化作用,是否会细化混凝土的孔结构而增加混凝土的自干燥收缩也值得关注。

要综合考虑这些因素,目前单个无约束的试块试验显然不够,必须要做在约束条件下的构件的试验。

在测定聚丙烯纤维混凝土强度时,对 3d 和 1d 强度关注较少,更多关注 3d 和 1d 甚至 12h 强度或许对分析纤维的阻裂机理有用。

此外,目前对掺入聚丙烯纤维后,混凝土的抗压强度有所降低的机理尚存争议。

### 2.4 对聚丙烯纤维阻裂的规律性总结不够

已有的研究表明掺入适量的聚丙烯纤维对混凝土具有阻裂、增韧,增加抗拉、抗弯和抗剪、耐疲劳强度的作用,可以明显改善混凝土的延性和耐久性。但不同强度、不同性质、不同原材料混凝土对聚丙烯纤维的上述性能有什么影响还要总结。