

文章编号:1673-2049(2019)03-0001-15

高性能混凝土高温爆裂研究进展

肖建庄¹, 刘良林¹, 董毓利², 骆发江³, 高皖扬¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
3. 中国建筑第三工程局有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于高性能混凝土应用的广泛性和遭遇火灾的危害性, 对国内外关于高性能混凝土在高温或火灾下发生爆裂的研究进行分类总结。高性能混凝土爆裂研究的梳理工作围绕爆裂机理、爆裂影响因素、爆裂抑制 3 个方面来展开。结果表明: 当前爆裂机理学说还不能全面揭示高性能混凝土爆裂发生的原因, 但是存在的共同点是蒸汽压力和热应力与混凝土抗拉强度的相互作用; 高性能混凝土爆裂的影响因素众多, 有必要对基本因素的孔压计算方法开展进一步研究; 高性能混凝土爆裂的预防措施众多且有效, 单掺聚丙烯纤维、钢纤维的掺量可参照相关表达式进行预测, 二者混杂时掺量间的关系还未见报道, 经过综合对比分析, 推荐在高性能混凝土中掺入聚丙烯纤维; 针对新建、既有的高性能混凝土结构以及超高性能混凝土, 建议开展爆裂设计, 从源头上实现爆裂抑制; 对于掺入外加物的高性能混凝土结构, 还需要进行火灾中与火灾后的力学性能研究, 而对于采取外涂或外贴方式抑制爆裂的结构则需要进行拆装施工工艺与规范化的研究。

关键词: 高性能混凝土; 爆裂机理; 影响因素; 爆裂抑制; 高温

中图分类号:TU375 文献标志码:A

Progress of Study on Explosive Spalling of High Performance Concrete at Elevated Temperatures

XIAO Jian-zhuang¹, LIU Liang-lin¹, DONG Yu-li², LUO Fa-jiang³, GAO Wan-yang¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. China Construction Third Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Based on the extensive use of high performance concrete (HPC) and the danger of fire, researches on HPC explosive spalling at elevated temperatures or fire were classified and summarized, both at home and abroad. The sorting of HPC explosive spalling was focused on three aspects: mechanism, influence factor, inhibition. The results show that the current theories cannot fully explain HPC explosive spalling under elevated temperature or fire, but there is a common point that the explosive spalling is the interaction of thermal pressure and vapor stress and tensile strength of concrete. Many factors can induce the explosive spalling, therefore, it is necessary to continue a further study on the method of calculating the pore pressure as the basic factor. Inhibition measures for explosive spalling are numerous and effective. As a single addition to HPC, the amount of polypropylene fiber (PPF) or steel fiber can be predicted differently by regression expressions. The relationship of the hybrid ratio is not reported when

PPF and SF are mixed, and the PPF is the recommended addition to the high strength concrete after comprehensive comparison and analysis. Aiming to the new, existing high performance concrete structure and the ultra-high performance concrete, the design of explosive spalling is introduced to represent inhibition measures for the explosive spalling, which will be beneficial to bring about the inhibition effect in the initial stage of building design. For the high performance concrete structures with admixture for inhibition for explosive spalling, it is suggested that the further work should focus on mechanical behaviors of the structure under or after fire. But to the structure with external coating or posting measures for inhibition for explosive spalling, it is necessary to get further study and improve on the assembled and disassembled techniques and standardization constructions.

Key words: high performance concrete; mechanism of explosive spalling; influence factor; inhibition for explosive spalling; elevated temperature

0 引言

国内外对于高强混凝土与普通混凝土的分界历来存在差异。20世纪80年代以50 MPa作为高强混凝土与普通混凝土的分界线,90年代以70 MPa或更高作为二者的分界线^[1]。Xie^[2]将高强混凝土定位为抗压强度为60~100 MPa的混凝土,超过100 MPa的混凝土为超高强混凝土。Kodur等^[3]、Raut等^[4]以55 MPa为分界线,抗压强度超过55 MPa的混凝土即为高强混凝土。《高强混凝土应用技术规程》(JGJ/T 281—2012)^[5]规定强度等级不低于C60的混凝土为高强混凝土。基于此,为了分析需要,本文的高性能混凝土均指国内外研究资料中抗压强度为60~100 MPa的混凝土。

为了适应现代经济发展的需要,以及满足高层建筑、大跨度结构的设计要求,越来越多的实际工程采用高强混凝土^[6]。特别是在高层建筑中,由于高强混凝土比普通混凝土有更高的强度与更好的耐久性,可以减轻建筑物自重^[6-7],因此具有显著的经济、建筑与结构优势^[8-9]。随着高强混凝土在建筑上的应用增多,暴露于升温环境(包括意外火灾或持续高温^[10])中的风险也在增加^[11-12],主要风险之一是火灾引起的混凝土剥落^[13]。混凝土的剥落是指结构单元暴露于高温与快速升温的环境如经历火灾时,单元的表面呈块状或片状破裂的现象^[13-14]。剥落的形式包括集料撕裂、表层脱落、角部开裂剥离、爆裂等^[1],其中爆裂特别危险且造成的后果是灾难性的^[1,15],爆裂碎片给逃生人员与救火队员带来危险^[16],除此之外爆裂还给结构带来风险^[17]。

爆裂对高强混凝土造成的影响具体表现为:试件突然分解,且高速抛射的混凝土碎块四处飞

溅^[18];截面显著减少,引起承载力的下降^[19-21];截面温度场发生突变,钢筋直接暴露于高温环境而迅速软化,降低了构件的耐火性能,加速了构件的破坏历程,导致结构过早破坏^[22],显著降低可靠性^[23];混凝土质量快速流失,将混凝土内部暴露于高温中,加速了热量往内部的传递,包括传给钢筋^[24-25];伴随着极大的爆炸声,混凝土被强力碎片化^[26]。由此可以看出爆裂对高强混凝土本身及周围环境将造成严重的影响,故有必要对高强混凝土爆裂的研究情况进行梳理。本文从爆裂机理、爆裂影响因素、爆裂抑制3个方面进行国内外高强混凝土爆裂研究的总结,为进一步的研究提供参考与依据。

1 爆裂机理

为了探求在火灾或高温下高强混凝土爆裂的机理,国内外学者进行了理论分析与试验归纳总结方面的研究,目前有如下几种理论可以用来阐述爆裂的形成原因。

1.1 蒸汽压论

在火灾中受热时孔隙中产生的蒸汽压力由于高强混凝土的高密度和低渗透性而不能释放,积聚的蒸汽压随着温度的升高达到饱和,当超过混凝土的抗拉强度时,将导致混凝土块从结构单元上脱落,根据火灾与混凝土的特性,脱落物可能带有爆炸性^[13]。该理论可以从如下研究得到验证:首先是Phan等^[27]的试验表明爆裂发生的温度范围与试件内外形成很高温度梯度的时间一致,Noumowe等^[28]也发现在试件内外产生很高的温度梯度时发生爆裂;其次是饱和塞现象^[29-31],在高温作用下混凝土孔隙中的蒸汽与空气部分从试件表面排出,部分往内部迁移并在低温区重新凝结成液态水,阻碍后

续的水分迁移而形成准饱和层,因此在该层形成较高的孔隙压力;根据 Diederichs 等^[32]的研究成果可知,蒸汽压力可以达到 17 MPa(350 °C 时),而高性能混凝土的抗拉强度仅为 5 MPa 左右。

1.2 热应力论

Bazant^[33]假设距受热表面一定距离形成的高孔隙压力使得混凝土内部形成裂缝,一旦裂缝开始张开,由于周围的水暂时不能进来,突然形成比裂缝中蒸汽水与液态水大几个数量级的体积,导致孔隙压力瞬间接近于 0,等到周围的孔隙水流入裂缝时,爆裂已经发生,孔隙压力只是触发裂缝出现,而不能迫使裂缝扩展,因此爆裂必然是由一种能量造成,这种能量来自于热应力产生的势能。该理论从以下研究中得到证实:Ulm 等^[34-35]建立混凝土弹塑性变形、温度耦合的本构模型,对 1996 年发生火灾的英吉利海峡隧道进行有限元分析,结果表明爆裂源自于约束热应力在混凝土表面引起的压应力;Kodur^[18]认为该理论与试验中观察到的预先干燥试件不容易发生爆裂的现象一致。

1.3 热开裂论

高温下混凝土内部存在多种裂缝^[36-37]。傅宇方等^[38-39]认为开裂不仅降低了混凝土的强度,也提高了混凝土的渗透性,在混凝土高温劣化过程中起到了“双刃”作用,基于此建立了热开裂论:一方面裂缝作为通道可以释放孔隙水(汽)压力,在快速升温过程中,裂缝数量和孔隙水(汽)压力均会出现增加趋势,当裂缝增加所提供的空间(渗透性提高)足以缓解孔隙水(汽)压力时,混凝土爆裂发生的可能性就会降低,反之,爆裂发生的可能性则增加;另一方面,裂缝的累积与水化物的分解不断降低混凝土的强度;因此,热开裂与孔隙水(汽)压力的相互作用是混凝土爆裂发生的根本原因。

1.4 综合论

由于上述理论只能解释爆裂的某种或某几种特性,所以国内外学者提出或建议将上述理论学说进行综合,如 Majorana 等^[26]、Khoury^[17,40]提出蒸汽压论与热应力论的综合。此外,高宇剑^[41]认为蒸汽压论中孔隙压力与混凝土劈裂强度的关系导致“裂”,“沸腾液体膨胀蒸汽爆炸”理论中高温下混凝土内部水的汽、液相在混凝土裂缝处体积急剧变化带来的爆炸声与混凝土碎块抛射导致“爆”,二者相结合即为高强混凝土发生爆裂的机理。

上述爆裂机理还有其他的应用,如 Fu 等^[39]利用热开裂论解释缓慢升温的高强混凝土也会发生爆

裂现象,高宇剑^[41]利用综合论解释了升温快、慢均会造成爆裂以及严重程度不一致(前者发生快但是程度低,后者发生慢但是程度严重)的现象,Peng 等^[42]利用蒸汽压论初步解释了普通强度高性能混凝土的爆裂现象,这些应用均从另外的角度说明相关爆裂机理的正确性。总之,4 个机理均未能完全涵盖爆裂的全部特征,具有一定的互补性,但是存在共同点,即爆裂的发生取决于 2 个基本要素:蒸汽引发的孔压力或热应力引起的压力、同时刻高性能混凝土的抗拉强度。

2 爆裂影响因素

20 世纪 80 年代以来,新型混凝土——高性能混凝土、高强混凝土、自密实混凝土的出现,增大了爆裂研究的难度。Klingsch^[43]指出多个因素对于爆裂程度与危险性有重要影响,其中大部分参数与爆裂直接相关。为了实现爆裂的准确预测与抑制,需要对这些参数的影响程度进行分析。由于爆裂的机理尚不清楚,Hertz 等^[44]认为这种分析只能基于实践与试验后的经验。基于此,本文对国内外关于高强混凝土爆裂影响因素的研究文献进行梳理分类。

2.1 含湿量

Chan 等^[45-46]认为含湿量是指试件某时刻所含可蒸发水质量与水养试件刚从水中取出时所含可蒸发水质量的比值,通过试验研究发现含湿量是高性能混凝土爆裂的主要因素之一,占据主导地位。Peng 等^[42,47]试验研究发现含湿量极大地影响爆裂的发生,且认为含湿量存在门槛值(如 C70 高性能混凝土为 88%),超过门槛值后发生爆裂的概率增大。Bian 等^[48]的试验研究发现,对于 83.5 MPa 高性能混凝土,该门槛值为 75%。Terrasi 等^[49]的板试验研究发现含湿量低是试件爆裂程度大幅降低的原因之一。Kodur 等^[50]的柱试验发现造成 2 个试件爆裂程度相当高的原因之一就是含湿量(69%,86%)比另外 4 个试件高(68%,64%,57%,50%)。Sullivan^[51]通过试验研究发现含湿量为 65%~85% 时钢筋混凝土梁易发生爆裂。

2.2 升温速率

Kodur 等^[8-9]的高强混凝土梁试验研究发现快速升温的烃类火灾造成的爆裂程度相对较高。Ali 等^[15]通过柱试验发现低升温速率可以降低爆裂风险。Sullivan^[51]基于梁试验结果认为升温速率是影响高强混凝土爆裂的主要因素之一。Dwaikat

等^[52]通过理论推导与数据验证结合的方式论证了升温速率对爆裂有显著影响,升温速率越快爆裂程度越严重。陶津等^[53]通过试件的高温试验比较 $3.5, 5, 13, 20\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 四种升温速率对高强混凝土爆裂的影响,发现在较低目标温度($400\text{ }^{\circ}\text{C}$)下升温速率对于爆裂无明显影响,在较高目标温度($600\text{ }^{\circ}\text{C}$)下升温速率 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时无爆裂,在 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时发生表面剥落,因此建议高强混凝土升温速率的临界值为 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.3 初始应力

初始应力是指施加在试件的初始荷载与承载力的比值^[50],当前研究认为初始应力对高强混凝土试件爆裂程度影响不同。对于柱试件,Raut 等^[4]试验表明试件初始应力高则爆裂严重,Ali 等^[15]发现试件初始应力增大并未增加发生爆裂的可能性,Kodur 等^[50]基于不同初始应力(54%~90%)试件对应爆裂程度不同而认为该值对爆裂有影响。对于梁试件,Sullivan^[51]发现初始应力增大会降低素混凝土试件爆裂风险,但对钢筋混凝土试件没有任何影响,Dwaikat 等^[54]试验结果表明试件的初始应力大则爆裂严重。对于试块,陶津等^[53]试验发现初始应力为 20%,0% 的试件分别出现爆裂、无爆裂,故认为该值对爆裂影响显著。

2.4 骨 料

首先是轻骨料与普通骨料,Sullivan^[51]研究发现石灰石相对陶粒作为粗骨料制作的钢筋混凝土梁爆裂程度严重,未配筋时骨料类型对爆裂影响不明显;Bilodeau 等^[55]通过轻骨料钢筋混凝土块试验发现高吸水率轻骨料试件更容易引起爆裂。其次是骨料材质,Kodur 等^[50, 56-57]基于柱试验结果认为,骨料类型对高温下试件的性能有显著影响,硅质骨料比钙质骨料的试件爆裂程度严重;Shakya 等^[58]根据预应力高强空心板的试验结果发现硅质骨料试件发生爆裂,而钙质骨料试件无爆裂;对于不同的硅质材料,Yan 等^[59]研究发现热膨胀系数越大抗爆裂效果越好,如石英砂岩制备的粗骨料抗爆裂效果甚至高于钙质的白云石骨料。最后是砂率,Bastami 等^[60]研究发现砂率增大可以减少爆裂,建议最优砂率为 $0.33\sim 0.44$ 。

2.5 水灰比与水胶比

Sullivan^[51]研究发现素混凝土梁水灰比为 0.25 与 0.35 比 0.5 更容易发生爆裂,钢筋混凝土梁水灰比为 0.35 最容易发生爆裂,水灰比为 0.25 与 0.5 发生爆裂的可能性下降。Bastami 等^[60]根据圆柱体

试件的研究结果发现水胶比对减少试件爆裂率有显著影响,且含有硅灰的试件通过增大水胶比后爆裂程度急剧下降,建议最优水胶比为 $0.23\sim 0.32$ 。

2.6 渗透率

Raut 等^[4]通过试验发现高强混凝土柱的爆裂程度大于普通混凝土柱,认为渗透率对爆裂有显著的影响。Dwaikat 等^[9]通过试验发现渗透率及其在梁截面上的分布对爆裂有显著影响,对于梁截面而言顶部比底部更容易发生爆裂。Harmathy^[29]计算得出渗透率高于 $5\times 10^{-15}\text{ m}^2$ 则不会发生饱和塞现象引发的爆裂。Dwaikat 等^[52]认为强度为 62.8 MPa 的轻骨料混凝土试块其渗透率大于 $20\times 10^{-18}\text{ m}^2$ 时不会发生爆裂。Majorana 等^[26]通过理论分析认为 C60,C90 高强混凝土在渗透率高于 $1\times 10^{-16}\text{ m}^2$ 时不可能发生爆裂,在 $1\times 10^{-17}\sim 1\times 10^{-16}\text{ m}^2$ 之间时则不确定,更低则会发生爆裂。

2.7 混凝土强度

Chan 等^[45]、朋改非等^[47]通过高强混凝土立方体试块(边长 100 mm)高温性能试验研究发现强度是混凝土爆裂的主要影响因素之一。朋改非等^[47]研究表明,对于强度等级低于 C60 的混凝土,即使饱水试件也不会发生爆裂;对于强度等级高于 C60 的混凝土,当含湿量高于门槛值时,含湿量越高则爆裂发生概率越大。Dwaikat 等^[52]通过理论推导与数据验证结合的方式论证了混凝土抗拉强度对爆裂有显著影响,抗拉强度越高爆裂程度越低。

2.8 硅 灰

Kodur 等^[56]基于不同硅灰掺量($0, 56.7\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)的高强混凝土柱抗火试验,发现硅灰掺量越高,爆裂程度越严重。Bastami 等^[60]研究硅灰掺量对高强混凝土试件高温性能的影响,从统计意义上发现随着硅灰掺量增加,爆裂程度线性增大,建议硅灰的最优掺量为 $25\sim 89\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.9 孔压力

Phan 等^[27]通过圆柱体的试验现象与结果,认为孔压力是爆裂发生的首要原因。Kanema 等^[61]通过试验发现普通强度混凝土试件温度梯度比高强混凝土试件的高,因此认为温度梯度不是决定爆裂的因素,应该把孔压力作为爆裂发生的首要因素。Phan^[62]认为孔压力对于爆裂发生有显著影响,通过试验测得尺寸($100\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$)、抗压强度(75.3 MPa)均相同的 2 个试块爆裂发生时孔压力分别为 2.02, 2.10 MPa。

然而,孔压力对爆裂影响还存在争议: Ba-

zant^[33]认为孔压力只起到触发爆裂的作用; Felicetti 等^[63]认为孔压力在引发爆裂方面起到了主要作用,但没有证据表明孔压力能自身引发爆裂; 爆裂发生时,Diederichs 等^[32]、Phan^[62]、Mindegua 等^[64]测到的最高孔压力分别为 17, 2.1, 1.2 MPa, 而高性能混凝土的抗拉强度为 5 MPa^[32]; Jansson 等^[65]研究发现爆裂与孔压力间未呈现规律性对应,因此认为孔压力不是爆裂的驱动力。

2.10 试件尺寸

Kanema 等^[61]通过圆柱体试件高温试验发现只有大尺寸试件发生爆裂。高丹盈等^[66]通过试验研究发现边长 150 mm 的立方体试块在 600 °C 高温下爆裂严重,但 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试块均未发生爆裂,说明截面尺寸较大试件发生

爆裂的几率更大。

表 1 中罗列了上述影响因素。此外,箍筋端部弯钩呈 135°交叉连接且加密布置、复合箍筋等有利于减轻高强混凝土柱高温爆裂^[50,56]。Ko 等^[67]通过钢筋混凝土试件高温试验研究从浇筑起 3 个月内空气中养护(表面干燥)时间对爆裂的影响,结果表明养护时间越短爆裂程度越高。影响高强混凝土爆裂的因素还有骨料的尺寸、纵筋、引气剂、内部裂缝等^[26],以及混凝土保护层厚度、偏心荷载、受火面数量、截面形状等^[17,68-69]。同时,也需要进一步确认一些因素对爆裂的影响程度,如粗骨料与水泥浆体的过渡界面黏结强度^[70]、混凝土内部随机分布的孔隙^[71],从而为高性能混凝土爆裂抑制措施的形成提供依据。

表 1 爆裂主要影响因素

Tab. 1 Main Influence Factors of Explosive Spalling

影响因素	对爆裂的影响程度	数据来源
含湿量	素混凝土含湿量超过 88% ^[47] , 75% ^[48] 时发生爆裂概率增加	朋改非等 ^[47] 、Bian 等 ^[48]
	钢筋混凝土柱含湿量为 69%, 85% 时爆裂程度高 ^[50] ; 钢筋混凝土梁含湿量为 65%~85% 时易发生爆裂 ^[51]	Kodur 等 ^[50] 、Sullivan ^[51]
升温速率	升温临界值为 5 °C · min ⁻¹	陶津等 ^[53]
初始应力	钢筋混凝土梁 ^[54] 、柱 ^[4] 初始应力越大爆裂越严重; 初始应力是显著影响试块爆裂的外部因素之一 ^[53]	Raut 等 ^[4] 、陶津等 ^[53] 、Dwaikat 等 ^[54]
骨料	普通骨料比轻质骨料爆裂严重,吸水率高的轻质骨料爆裂较严重 ^[51,55] ; 碳酸盐骨料形成的混凝土爆裂程度小 ^[50,56,58] ,尤其是热膨胀系数大的骨料爆裂程度越小 ^[59] ; 砂率建议采用 0.33~0.44 ^[60]	Sullivan ^[51] 、Bilodeau 等 ^[55] 、Kodur 等 ^[50,56,58] 、Yan 等 ^[59] 、Bastami 等 ^[60]
水灰比与水胶比	高强混凝土梁在水灰比为 0.35 时最容易发生爆裂 ^[51] ; 建议高强混凝土的水胶比取值为 0.23~0.32 ^[60]	Sullivan ^[51] 、Bastami 等 ^[60]
渗透率	轻质骨料混凝土试块渗透率大于 $20 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 时不会发生爆裂 ^[52] ; 高强混凝土渗透率高于 $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 时不可能发生爆裂 ^[26]	Majorana 等 ^[26] 、Dwaikat 等 ^[52]
混凝土强度	强度高于 C60 的混凝土含湿量高于门槛值越大则爆裂发生几率越大 ^[47] ; 抗拉强度越高爆裂程度越小 ^[52]	朋改非等 ^[47] 、Dwaikat 等 ^[52]
硅灰	硅灰含量越高,爆裂越严重 ^[56,60] ; 建议掺量为 25~89 kg · m ⁻³ ^[60]	Kodur 等 ^[56] 、Bastami 等 ^[60]
试件尺寸	截面尺寸小的试件发生爆裂的几率低	Kanema 等 ^[61] 、高丹盈等 ^[66]

3 爆裂抑制

由于爆裂的危害性、机理的不确定性、影响因素的多样性,国内外学者开展了爆裂抑制措施的广泛研究。从 1992 年以来,防止高强混凝土发生爆裂的最有效措施就是在混凝土受火面外包热障碍和(或)在混凝土中掺入聚丙烯纤维^[17]。随着研究的深入,国内外学者对于爆裂具体抑制措施提出了更多的建议。根据这些措施应用于混凝土的方式,本文分成内掺型、外包型以及其他 3 个方面进行高强混凝土爆裂抑制措施研究成果的分类与梳理。

3.1 内掺型

内掺型是指为了抑制爆裂,在高强混凝土中掺入外加材料的做法,包括聚丙烯纤维(Polypropylene Fibre, PPF)、聚乙烯醇纤维(Polyvinyl Alcohol Fibre, PVAF)、黄麻纤维(Jute Fibre, JF)、钢纤维(Steel Fibre, SF)、橡胶纤维(粉)、稻谷壳等,适用于新建建筑的防火保护。本文按照内掺材料的数量,分为单掺、双掺(或混杂)等情况来进行阐述。

3.1.1 单 掺

单掺是指将前述材料的某一种单独掺入高强混凝土的做法。

(1) PPF。PPF 可能是最有效的减少爆裂风险的措施^[72],对于 PPF 掺入高强混凝土中减轻爆裂的程度或抑制爆裂的机理,Klingsch^[43]、肖建庄^[73]、Cree 等^[74]均认为 PPF 在高温中熔化增加通道;对于熔化态的 PPF,Bentz^[75]、Kalifa 等^[76]、Liu 等^[77]、Ye 等^[78]均认为其被周围水泥基体所吸收,而 Bosnjak 等^[72]通过 SEM 技术认为其流入 PPF 周围的水泥基体微裂缝中,总之给液态水、蒸汽与气体带来新的传输路径,使得热量与水蒸汽可以从水泥胶体内部逸出,避免高温下混凝土进一步损伤;除了熔化降压的作用外,Sullivan^[51]认为 PPF 在熔化前与砂浆基体的不协调运动产生的长微裂缝也可以起到降低孔隙压力的作用。图 1(a)中罗列了文献中抑制爆裂的 PPF 体积掺量 ρ_{PPF} 与高强混凝土抗压强度 f_{cu} 的关系。

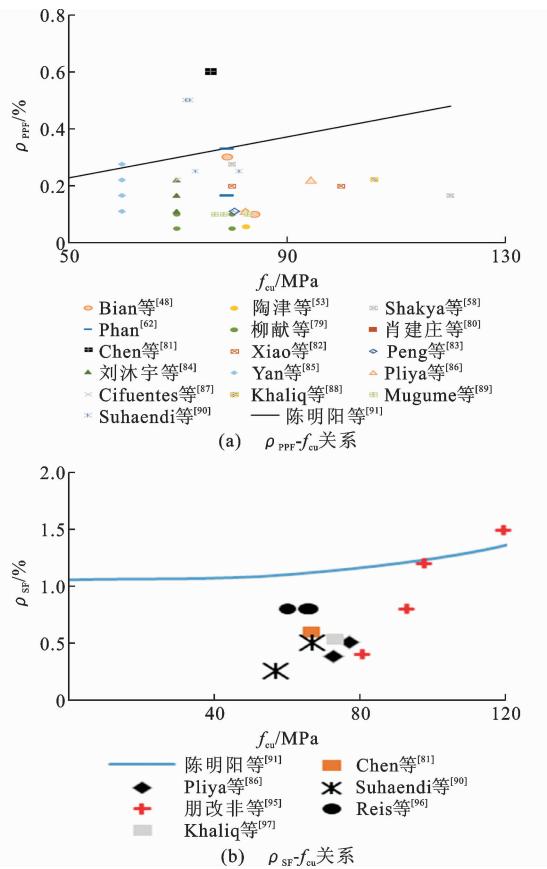


图 1 高强混凝土爆裂抑制的 PPF(SF)体积掺量与 f_{cu} 的关系

Fig. 1 Relations Between Volume Ratio of PPF (SF) and f_{cu} of HSC with Inhibition for Explosive Spalling

(2) SF。Lie 等^[92]研究发现 SF 对于混凝土的热性能几乎没有影响,对力学性能影响相对更大,有望提高纤维长度增强混凝土火灾下的耐火极限。对于 SF 掺入高强度混凝土中抑制爆裂的机理,Qian

等^[93]指出 SF 相比 PPF 长度更长,且弹性模量更大,对于裂缝的控制更有利;Luo 等^[94]指出掺入钢纤维的目的是为了限制混凝土在温度急剧变化和高温环境下产生的体积变化,减轻混凝土内部微缺陷的引发和扩展;朋改非等^[95]通过试验研究认为钢纤维增强混凝土的内部阻裂作用,使混凝土在高温下的抗拉强度足以抵抗因内部蒸汽压所引起的局部拉应力,同时钢纤维在混凝土中呈三维乱向分布且互相搭接,较好的导热性能可使混凝土在高温下更快地达到内部温度的均匀一致,减少温度梯度产生的内部应力,最终改善高性能混凝土的抗爆裂性能。图 1(b)中罗列了国内外文献中抑制爆裂的 SF 体积掺量 ρ_{SF} 与高强混凝土抗压强度 f_{cu} 的关系。

(3) 其他。Mugume 等^[89]通过试验研究发现,PVAF 长度 12 mm 比长度 6 mm 的高强混凝土试件爆裂程度小很多,Ozawa 等^[98]通过试验研究发现 PVAF,JF 掺量分别为 1.98,1.03 kg · m⁻³ 能各自抑制高强混凝土爆裂。Akturk 等^[99]还研究了掺入稻谷壳的超高强混凝土在高温下的性能,发现稻谷壳掺量为 13.5 kg · m⁻³ 时没有发现爆裂,但是 Cifuentes 等^[87]指出大掺量使用稻谷壳时需要对其进行测试,以防高强混凝土力学性能降低过多。

此外,对于将废旧轮胎处理加工后掺入高强混凝土,Hernandez-Olivares 等^[100]研究表明,不同体积掺量(3%,5%,8%)橡胶纤维可以减小高强混凝土爆裂的风险;刘锋等^[101]研究发现,橡胶粉粒径小有助于改善混凝土的高温脆性与高温抗爆裂性能;李丽娟等^[102-103]通过试验研究发现橡胶粉粒径 1.2 mm、体积取代率 1% 的高强混凝土试件无爆裂;周梅等^[104]通过试验发现,橡胶粉等体积取代砂(取代率分别为 2%,4%,6%,8%,10%)的高强混凝土经历 600 °C 高温作用会有表面疏松与表皮脱落现象。对于材料取代,Poon 等^[105]用粉煤灰或磨细高炉矿渣取代胶凝材料(取代率最高可达 40%),制成的高强混凝土试件均没有发生爆裂。

3.1.2 双掺

双掺是指将前述防爆裂材料的某 2 种共同掺入高强混凝土的做法,又称为混杂。

(1) PPF 与 SF。该混杂纤维高强混凝土中的 PPF 在高温下熔解,使致密的混凝土内部产生大量的毛细孔,降低因水汽迁移引起的蒸汽压力,从而抑制爆裂的发生;同时 SF 对混凝土升温过程中的体积变化起到一定的约束作用,减少了微缺陷的开裂和扩展^[66]。在快速升温(大于 10 °C · min⁻¹)但是小

于标准升温曲线 ISO 834)时,Bangi 等^[106]认为该混杂纤维中的 SF 由于与混凝土较差的黏结界面,起到了降低混凝土深处(50 mm)高压区孔压力的作用。高丹盈等^[66]、Chen 等^[81]、Pliya 等^[86]、Dong

等^[107]、Peng 等^[108]的研究均表明,PPF 与 SF 共同掺入高强混凝土不但可抑制试件发生爆裂,还能提高高温下和高温后的力学性能。国内外关于该混杂纤维高强混凝土爆裂抑制的研究结果如表 2 所示。

表 2 PPF 与 SF 混杂纤维对爆裂的影响

Tab. 2 Effects of Hybrid Fibres of PPF and SF on Explosive Spalling

数据来源	$\rho_{\text{PPF}} / \%$	$\rho_{\text{SF}} / \%$	抗折强度/MPa	效果
Bian 等 ^[48]	0.10	1.00	87.20	无论含湿量大小均无爆裂,表面完整无开裂 抑制爆裂,表面基本完整,提高高温后抗折强度
高丹盈等 ^[66]	0.05	1.00	60.00	
	0.10	0.50	60.00	
	0.10	1.00	60.00	
	0.10	1.50	60.00	
	0.30	1.00	60.00	
	0.10	1.00	80.00	
Chen 等 ^[81]	0.30	0.30	86.30	无爆裂,改善高温作用试件性能
Pliya 等 ^[86]	0.11	0.38	73.50	无爆裂
	0.22	0.38	72.90	
	0.11	0.51	79.60	
	0.22	0.51	77.10	
Mugume 等 ^[89]	0.10	0.50	71.04	无爆裂
Suhaendi 等 ^[90]	0.50	0.25	59.70	无爆裂
	0.25	0.50	65.50	
Khaliq 等 ^[97]	0.11	0.54	76.00	无爆裂,提升耐火极限,减缓抗拉强度衰减速度
Dong 等 ^[107]	0.11	0.90	64.00	无爆裂,有效地改善火灾后性能,为火灾后修复与救援提供必要的保障
	0.22	0.71	65.00	
	0.33	0.51	63.00	
Peng 等 ^[108]	0.07	1.03	82.84	无爆裂,高温后残余强度较高
	0.20	0.90	84.84	
Kodur 等 ^[109]	0.22	0.54	62.00	减轻爆裂程度
Yermak 等 ^[110]	0.08	0.38	70.00	前三者无爆裂,后者因为骨料原因有坑状剥落及密集裂缝,但是 PPF 掺量 0.08%、SF 掺量 0.76% 的组合最优
	0.16	0.38	70.00	
	0.08	0.76	70.00	
	0.16	0.38	70.00	
鞠丽艳等 ^[111]	—	—	—	无爆裂
Yan 等 ^[112]	0.22	1.00	61.10	无爆裂

注:“—”代表文献中没有提及。

(2)其他。Chen 等^[81]进行碳纤维(Carbon Fiber,CF)与 SF,CF 与 PPF(体积掺量各为 0.3%,共 0.6%)的混杂纤维高强混凝土高温试验研究,结果表明该混杂纤维起到了延缓爆裂发生与提高高温力学性能的作用。Mugume 等^[89]通过高强混凝土试件的高温研究发现,PVAF(掺量 1.3 kg·m⁻³)与 SF(掺量 39 kg·m⁻³)混杂的试件不但抑制了爆裂,而且高温后的力学性能较好。此外,针对 Terrasi 等^[49]研究中 PPF 掺量过高可能带来的自密实混凝土和易性下降的问题,Lura 等^[113]引入高吸水性树脂,将 PPF 掺量降低到 0.2% 后也能防止板爆裂,

Heo 等^[114]通过混杂纤维(PPF+尼龙纤维)的方式确保和易性不下降且能抑制爆裂。

3.2 外包型

外包型是指为了抑制爆裂,在高强混凝土构件外表面涂抹、包裹热惰性材料来降低构件表面温度从而使构件得到隔热保护的做法,适用于新建、既有建筑的防火保护。Witek 等^[115]利用有限元分析法对高强混凝土建筑构件外涂反射材料、外喷含 PPF 的混凝土保护层、安装多孔材料保护层 3 种方法的抗爆裂效果进行了模拟分析,结果表明 3 种方法均能抑制爆裂。基于此,本文从涂料、防火板、装修材

料等方面进行外包型预防爆裂措施研究成果的梳理。

3.2.1 涂 料

钱春香等^[116]研究发现,采用防火涂层(厚 6 mm 左右)可以在一定程度上抑制高强混凝土爆裂的发生,并建议选择含有氮磷碳化学阻燃成分的厚涂型防火涂料。吴波等^[117]设置厚度为试验变量研究非膨胀性隧道防火涂料对高强混凝土的爆裂抑制作用,结果表明涂料厚度 10 mm 对爆裂抑制效果不佳,15,20 mm 厚可以分别在 3,4 h 内完全抑制爆裂。需要注意的是涂料厚度并非越厚越好,当涂料有局部破损时,Ryder 等^[118]研究发现涂料厚度越大反而越不利于防火保护。基于经济性与高温后高强混凝土抗渗性能,吴波等^[119]建议构件表面涂抹非膨胀性隧道防火涂料(106-2 型)的厚度取 20 mm 为宜。

3.2.2 防火板与饰面材料

肖建庄等^[7,120]进行带防火牺牲层(C40,40 mm 厚)的剪力墙(现浇部分的强度为 C90)火灾试验,研究发现该剪力墙爆裂的持时、深度、范围、体积均远小于现浇试件(减小爆裂面积 90% 以上)。吴波等^[121]进行防火板(单、双层)、马赛克、防火涂料、花岗岩(干法、湿法)以及无装饰等 8 种饰面材料的高强混凝土柱火灾试验,结果表明除双层防火板无爆裂外,其余饰面材料试件的爆裂程度均比无装饰的高强混凝土柱爆裂严重。

3.2.3 篦筋约束

基于温度与质量传递耦合的高温下钢筋混凝土试件模拟分析,Chung 等^[122]认为箍筋的存在阻碍了水分往混凝土内部的流动,在箍筋的外围形成平均高达 6.7 MPa 的孔压力。Kodur 等^[50]通过试验研究发现箍筋端部弯钩为 135° 的试件爆裂发生在钢筋笼之外。吴波等^[123]进行外包箍筋约束高强混凝土(C80)试件(100 mm×100 mm×315 mm)的高温试验研究,结果发现无约束试件发生爆裂,而将箍筋布置在外围的有约束试件均没有发生爆裂。

3.3 其他可供参考的做法

一些普通强度混凝土的研究结果也许可为高性能混凝土的爆裂抑制措施提供参考:Han 等^[124]采用 PPF 与金属网的组合掺入混凝土,高温试验结果显示均没有爆裂现象;Kodur 等^[125]在 FRP 加固试件的外围包裹防火砂浆与密封材料进行火灾试验,结果发现经过防火保护的 FRP 加固柱耐火极限不低于一般柱;Xiao 等^[126]进行 4 片 C50 剪力墙火灾

后的抗震性能试验,结果表明 PPF 不但可抑制高性能混凝土爆裂,还可显著改善剪力墙的耗能能力与刚度。

从图 1(a)中可看出,虽然 Chen 等^[81]、Peng 等^[83]、Yan 等^[85]、Suhaendi 等^[90]中的 5 个数据点真实情况与试验结果相反,但绝大部分数据点(36 个中的 31 个)均位于陈明阳等^[91]所拟合曲线的下方;图 1(b)中除 Chen 等^[81]、朋改非等^[95]、Reis 等^[96]共 5 个点与实际情况相反外,其余均位于该拟合曲线的下方,表明陈明阳等^[91]所拟合曲线为爆裂抑制的 PPF,SF 掺量上限值。从表 2 可看出,对于 PPF 与 SF 混杂抑制爆裂,PPF 的体积掺量为 0.05%~0.33%,SF 的体积掺量为 0.5%~1.0%。防火涂料越厚,对于爆裂的抑制效果越好;防火板(层)的做法均有较好的爆裂抑制效果,尤其有利于既有建筑结构构件的防火措施补强;钢筋混凝土构件中箍筋加密且弯钩呈 135° 指向试件中心对于核心混凝土有抗爆裂的作用,可为高强混凝土构件配筋设计提供参考。此外,基于 Kodur 等^[50]、吴波等^[123]关于箍筋约束抑制爆裂的研究,在混凝土表面构造约束作用形成环箍效应来抑制爆裂的猜想也许可作为爆裂抑制的措施在工程实践中加以利用。

4 高性能混凝土爆裂研究展望

高性能混凝土已在中国大力推广与应用,当遭遇火灾作用时,其在高温下发生爆裂给结构安全、人员逃生与救援带来极大风险。此外,新型水泥基复合材料——超高性能混凝土的出现,因其微观结构更为致密,给当前爆裂的抑制方法带来挑战。因此,有必要对高性能混凝土结构进行爆裂设计,对不同类型的建筑,从源头上抑制爆裂的发生:拟建建筑采取在高性能混凝土中外加(如 PPF)、外涂(防火涂料)或外贴(防火板)等方式进行爆裂防护;既有建筑采取外贴(防火板)的方式作为爆裂的抑制措施;对于新型水泥基复合材料如超高性能混凝土则优先采用外加的方式,从前述提及的爆裂抑制措施中选择环保、可靠、有效的方法进行试验研究。基于此,考虑到外加物可能带来的火灾后性能降低问题,应该开展经过爆裂设计后的高性能混凝土结构力学性能研究,而外贴方式可能带来的拆装施工工艺与规范化等问题尚需进一步加强研究,进而实现全面保障结构火安全,为实际工程防灾减灾提供理论依据与技术支持。

5 结语

(1)当前高温爆裂机理尚不统一,但是理论共识在于蒸汽产生的孔压力或热应力产生的压力与同时刻温度下混凝土抗拉强度之间的关系。

(2)PPF 单掺、SF 单掺的用量可以分别用图 1 中曲线对应表达式计算,具体的规格对 PPF 应选用长纤维、小直径,对 SF 应选用弯钩形、大小直径相间。综合比较来看,PPF 仍然是高强混凝土抑制爆裂与提升高温后性能的最优选择。

(3)高强混凝土中其他内掺材料如 PVAF, JF、生稻谷壳、橡胶纤维(粉)等能够抑制爆裂,但是还需要进行高温后力学性能保持及钢筋混凝土构件性能的研究。

(4)纤维混杂的做法包括尼龙纤维、CF, PVAF 与 PPF 或 SF 等,其中 PPF 与 SF 混杂不但能抑制高强混凝土爆裂,还能保持良好的力学性能,但二者的合理掺量有必要进一步研究。

(5)隧道推荐采用非膨胀性防火涂料,但是需要采取保护措施,防止涂料破损;防火板则需要研究施工拆装工艺。

(6)建议开展高性能混凝土表面施加约束抑制爆裂的机理与措施研究。

(7)建议开展高性能混凝土结构爆裂设计,并进行设计后的火灾中与火灾后的力学性能、拆装施工工艺和规范化研究。

参考文献:

References:

- [1] ALI F. Is High Strength Concrete More Susceptible to Explosive Spalling than Normal Strength Concrete in Fire? [J]. *Fire and Materials*, 2002, 26 (3): 127-130.
- [2] XIE J R. Numerical Investigation of Eccentrically Loaded Tied High Strength Concrete Columns[D]. Edmonton: University of Alberta, 1994.
- [3] KODUR V K R, WANG T C, CHENG F P. Predicting the Fire Resistance Behaviour of High Strength Concrete Columns[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(2): 141-153.
- [4] RAUT N K, KODUR V K R. Response of High-strength Concrete Columns Under Design Fire Exposure[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137 (1): 69-79.
- [5] JGJ/T 281—2012, 高强混凝土应用技术规程[S]. JGJ/T 281—2012, Technical Specification for Application of High Strength Concrete[S].
- [6] 肖建庄. 可持续混凝土结构导论[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- [7] XIAO Jian-zhuang. An Introduction to Sustainable Concrete Structures[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [8] XIAO J Z, XIE Q H, LI Z W, et al. Fire Resistance and Post-fire Seismic Behavior of High Strength Concrete Shear Walls[J]. *Fire Technology*, 2017, 53(1): 65-86.
- [9] KODUR V K R, DWAIKAT M B. Fire-induced Spalling in Reinforced Concrete Beams[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*, 2012, 165(7): 347-359.
- [10] DWAIKAT M B, KODUR V K R. Fire Induced Spalling in High Strength Concrete Beams[J]. *Fire Technology*, 2010, 46(1): 251-274.
- [11] BEHNOOD A, GHANDEHARI M. Comparison of Compressive and Splitting Tensile Strength of High-strength Concrete with and Without Polypropylene Fibers Heated to High Temperatures[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8): 1015-1022.
- [12] WU B, ZHOU H, TANG G H, et al. Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Square Cross Section [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2009, 10(4): 353-369.
- [13] KIM G Y, KIM Y S, LEE T G. Mechanical Properties of High-strength Concrete Subjected to High Temperature by Stressed Test[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2009, 19: 128-133.
- [14] KODUR V K R. Spalling in High Strength Concrete Exposed to Fire-concerns, Causes, Critical Parameters and Cures[C]//ASCE. *Proceedings of ASCE Structures Congress 2000*. Philadelphia: ASCE, 2000: 1-8.
- [15] KODUR V K R. Strategies for Improving the Performance of High-strength Concrete Columns Under Fire Hazard[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15(6): 921-938.
- [16] ALI F A, O'CONNOR D, ABUTAIR A. Explosive Spalling of High-strength Concrete Columns in Fire [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2001, 53 (3): 197-204.
- [17] CZOBOLY O, LUBLOYE, HLAVICKA V, et al. Fibers and Fiber Cocktails to Improve Fire Resistance of Concrete[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 128(3): 1453-1461.
- [18] KHOURY G A. Passive Fire Protection of Concrete Structures [J]. *Structures and Buildings*, 2008, 161 (3): 135-145.

- [18] PHAN L T, LAWSON J R, DAVIS F L. Effects of Elevated Temperature Exposure on Heating Characteristics, Spalling, and Residual Properties of High Performance Concrete[J]. Materials and Structures, 2001, 34(2): 83-91.
- [19] KHOURY G A, MAJORANA C E, PESAVENTO F, et al. Modelling of Heated Concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2002, 54(2): 77-101.
- [20] SCHREFLER B A, MAJORANA C E, KHOURY G A, et al. Thermo-hydro-mechanical Modelling of High Performance Concrete at High Temperatures[J]. Engineering Computations, 2002, 19(7): 787-819.
- [21] HERTZ K D. Limits of Spalling of Fire-exposed Concrete[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(2): 103-116.
- [22] 吴波,袁杰,李惠,等.高温下高强混凝土的爆裂规律与柱截面温度场计算[J].自然灾害学报, 2002, 11(2): 65-69.
- WU Bo, YUAN Jie, LI Hui, et al. Explosive Spalling Rules of High Strength Concrete Under High Temperature and Calculation for Temperature Field of Column Cross Section[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(2): 65-69.
- [23] XIAO J Z, XIE Q H, HOU Y Z, et al. Reliability Analysis of High-strength Concrete Columns During a Fire[J]. Key Engineering Materials, 2015, 629-630: 273-278.
- [24] KODUR V K R, CHENG F P, WANG T C, et al. Effect of Strength and Fiber Reinforcement on Fire Resistance of High-strength Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 253-259.
- [25] KODUR V K R. Guidelines for Fire Resistance Design of High-strength Concrete Columns[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2005, 15(2): 93-106.
- [26] MAJORANA C E, SALOMONI V A, MAZZUCCO G, et al. An Approach for Modelling Concrete Spalling in Finite Strains[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80(8): 1694-1712.
- [27] PHAN L T, CARINO N J. Effects of Test Conditions and Mixture Proportions on Behavior of High-strength Concrete Exposed to High Temperatures [J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(1): 54-66.
- [28] NOUMOWE A N, SIDDIQUE R, DEBICKI G. Permeability of High-performance Concrete Subjected to Elevated Temperature (600 °C)[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 1855-1861.
- [29] HARMATHY T Z. Effect of Moisture on the Fire Endurance of Building Elements[J]. ASTM Special Technical Publication, 1965, 385: 74-95.
- [30] KALIFA P, MENNETEAU F D, QUENARD D. Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(12): 1915-1927.
- [31] ZEIML M, LEITHNER D, LACKNER R, et al. How Do Polypropylene Fibers Improve the Spalling Behavior of In-situ Concrete? [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(5): 929-942.
- [32] DIEDERICHS U, JUMPPANEN U M, SCHNEIDER U. High Temperature Properties and Spalling Behaviour of High Strength Concrete[C]// SCHWESINGER P, WITTMANN F H. Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete. Weimar: HAB, 1995: 219-235.
- [33] BAZANT Z P. Analysis of Pore Pressure, Thermal Stresses and Fracture in Rapidly Heated Concrete [C]// PHAN L, CARINO N, DUTHINH D, et al. Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-strength Concrete (NIST Special Publication 919). Gaithersburg: NIST, 1997: 155-164.
- [34] ULM F J, COUSSY O, BAZANT Z P. The "Chunnel" Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(3): 272-281.
- [35] ULM F J, ACKER P, LEVY M. The "Chunnel" Fire. II: Analysis of Concrete Damage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(3): 283-289.
- [36] FU Y F, WONG Y L, TANG C A, et al. Thermal Induced Stress and Associated Cracking in Cement-based Composite at Elevated Temperatures — Part I: Thermal Cracking Around Single Inclusion[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2): 99-111.
- [37] FU Y F, WONG Y L, POON C S, et al. Numerical Tests of Thermal Cracking Induced by Temperature Gradient in Cement-based Composites Under Thermal Loads[J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29(2): 103-116.
- [38] 傅宇方, 黄玉龙, 潘智生, 等. 高温条件下混凝土爆裂机理研究进展[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 323-329.
- FU Yu-fang, WONG Yuk-lung, POON Chi-sun, et al. Literature Review of Study on Mechanism of Explosive Spalling in Concrete at Elevated Temperatures [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 323-329.
- [39] FU Y F, LI L C. Study on Mechanism of Thermal Spalling in Concrete Exposed to Elevated Tempera-

- tures[J]. Materials and Structures, 2011, 44(1): 361-376.
- [40] KHOURY G A. Polypropylene Fibres in Heated Concrete. Part 2: Pressure Relief Mechanisms and Modelling Criteria [J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(3): 189-204.
- [41] 高宇剑. 高强混凝土火灾后力学性能退化及高温爆裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- GAO Yu-jian. Study on the Mechanical Performance Degradation and Spalling Mechanism of High Strength Concrete Exposed to Fire[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [42] PENG G F, JIANG Y C, LI B H, et al. Effect of High Temperature on Normal-strength High-performance Concrete[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S2): 290-293.
- [43] KLINGSCH E W H. Explosive Spalling of Concrete in Fire[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2014.
- [44] HERTZ K D, SORENSEN L S. Test Method for Spalling of Fire Exposed Concrete[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(5): 466-476.
- [45] CHAN Y N, PENG G F, ANSON M. Fire Behavior of High-performance Concrete Made with Silica Fume at Various Moisture Contents[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(3): 405-409.
- [46] CHAN Y N, PENG G F, ANSON M. Residual Strength and Pore Structure of High-strength Concrete and Normal Strength Concrete After Exposure to High Temperatures [J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1): 23-27.
- [47] 朋改非, 陈延年, MIKE Anson. 高性能硅灰混凝土的高温爆裂与抗火性[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3): 193-198.
- PENG Gai-fei, CHAN Yan-nian, MIKE Anson. Explosive Spalling Thermally Induced and Fire Property of High Performance Silica Fume Concrete[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(3): 193-198.
- [48] BIAN S H, PENG G F, ZHAO Z L, et al. Effect of Various Moisture Contents, Variety and Dosage of Fibers on Explosive Spalling and Residual Compressive Strength of High Performance Concrete Subjected to High Temperatures[J]. Key Engineering Materials, 2006, 302-303: 618-623.
- [49] TERRASI G P, BISBY L, BARBEZAT M. Fire Behavior of Thin CFRP Pretensioned High-strength Concrete Slabs[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(4): 381-394.
- [50] KODUR V, MCGRATH R. Fire Endurance of High Strength Concrete Columns [J]. Fire Technology, 2003, 39(1): 73-87.
- [51] SULLIVAN P J E. A Probabilistic Method of Testing for the Assessment of Deterioration and Explosive Spalling of High Strength Concrete Beams in Flexure at High Temperature[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2): 155-162.
- [52] DWAIKAT M B, KODUR V K R. Hydrothermal Model for Predicting Fire-induced Spalling in Concrete Structural Systems [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(3): 425-434.
- [53] 陶津, 柳献, 袁勇, 等. 自密实混凝土高温爆裂性能影响因素的试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(10): 22-26.
- TAO Jin, LIU Xian, YUAN Yong, et al. Experimental Study of Factors Affecting the Spalling of Self-compacting Concrete Under High Temperatures[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(10): 22-26.
- [54] DWAIKAT M B, KODUR V K R. Response of Restrained Concrete Beams Under Design Fire Exposure [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(11): 1408-1417.
- [55] BIODEAU A, KODUR V K R, HOFF G C. Optimization of the Type and Amount of Polypropylene Fibres for Preventing the Spalling of Lightweight Concrete Subjected to Hydrocarbon Fire[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2): 163-174.
- [56] KODUR V K R, MCGRATH R. Effect of Silica Fume and Lateral Confinement on Fire Endurance of High Strength Concrete Columns[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(1): 93-102.
- [57] KODUR V K R, SULTAN M A. Structural Behaviour of High Strength Concrete Columns Exposed to Fire[C]//NRCC. International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete. Sherbrooke: NRCC, 1998: 217-232.
- [58] SHAKYA A M, KODUR V K R. Response of Precast Prestressed Concrete Hollowcore Slabs Under Fire Conditions[J]. Engineering Structures, 2015, 87: 126-138.
- [59] YAN X, LI H, WONG Y L. Effect of Aggregate on High-strength Concrete in Fire[J]. Magazine of Concrete Research, 2007, 59(5): 323-328.
- [60] BASTAMI M, CHABOKI-KHIABANI A, BAGHBADRANI M, et al. Performance of High Strength Concretes at Elevated Temperatures[J]. Scientia Iranica, 2011, 18(5): 1028-1036.

- [61] KANEMA M, PLIYA P, NOUMOWE A, et al. Spalling, Thermal, and Hydrous Behavior of Ordinary and High-strength Concrete Subjected to Elevated Temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7): 921-930.
- [62] PHAN L T. Pore Pressure and Explosive Spalling in Concrete[J]. Materials and Structures, 2008, 41(10): 1623-1632.
- [63] FELICETTI R, MONTE F L. Concrete Spalling: Interaction Between Tensile Behaviour and Pore Pressure During Heating [C]//EDP Sciences. METEC Web of Conferences 6. Paris: EDP Sciences, 2013: 03001.
- [64] MINDEGUIA J C, PIMENTA P, NOUMOWE A, et al. Temperature, Pore Pressure and Mass Variation of Concrete Subjected to High Temperature — Experimental and Numerical Discussion on Spalling Risk [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(3): 477-487.
- [65] JANSSON R, BOSTROM L. The Influence of Pressure in the Pore System on Fire Spalling of Concrete [J]. Fire Technology, 2010, 46(1): 217-230.
- [66] 高丹盈, 李 哈, 杨 帆. 聚丙烯-钢纤维增强高强混凝土高温性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(1): 187-193.
GAO Dan-ying, LI Han, YANG Fan. Performance of Polypropylene-steel Hybrid Fiber Reinforced Concrete After Being Exposed to High Temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1): 187-193.
- [67] KO J, RYU D, NOGUCHI T. The Spalling Mechanism of High-strength Concrete Under Fire[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(5): 357-370.
- [68] KODUR V, RAUT N. A Simplified Approach for Predicting Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Under Biaxial Bending [J]. Engineering Structures, 2012, 41: 428-443.
- [69] RAUT N. Response of High Strength Concrete Columns Under Fire-induced Biaxial Bending [D]. Ann Arbor: Michigan State University, 2011.
- [70] 罗俊礼, 徐志胜, 郭信君, 等. 隧道衬砌混凝土管片高温爆裂及火灾损伤试验研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(5): 159-164.
LUO Jun-li, XU Zhi-sheng, GUO Xin-jun, et al. Experimental Study on the Explosive Spalling and Fire Damage of the Lining Segment in Tunnel Construction[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(5): 159-164.
- [71] ALI F, NADJAI A, SILCOCK G, et al. Outcomes of a Major Research on Fire Resistance of Concrete Columns[J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(6): 433-445.
- [72] BOSNJAK J, OZBOLT J, HAHN R. Permeability Measurement on High Strength Concrete Without and with Polypropylene Fibers at Elevated Temperatures Using a New Test Setup[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 53: 104-111.
- [73] 肖建庄. 高性能混凝土结构抗火设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
XIAO Jian-zhuang. Fire Safety Design Principle of High-performance Concrete Structures[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [74] CREE D, PLIYA P, GREEN M F, et al. Thermal Behaviour of Unstressed and Stressed High Strength Concrete Containing Polypropylene Fibers at Elevated Temperature[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2017, 8(4): 402-417.
- [75] BENTZ D P. Fibers, Percolation, and Spalling of High Performance Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(3): 351-359.
- [76] KALIFA P, CHENE G, GALLE C. High-temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fibres: From Spalling to Microstructure[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10): 1487-1499.
- [77] LIU X, YE G, DE SCHUTTER G, et al. On the Mechanism of Polypropylene Fibres in Preventing Fire Spalling in Self-compacting and High-performance Cement Paste [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(4): 487-499.
- [78] YE G, LIU X, DE SCHUTTER G, et al. Phase Distribution and Microstructural Changes of Self-compacting Cement Paste at Elevated Temperature[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(6): 978-987.
- [79] 柳 献, 袁 勇, 叶 光, 等. 高性能混凝土高温爆裂的机理探讨[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 61-68.
LIU Xian, YUAN Yong, YE Guang, et al. Investigation on the Mechanism of Explosive Spalling of High Performance Concrete at Elevated Temperatures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 61-68.
- [80] 肖建庄, 王 平. 掺聚丙烯纤维高性能混凝土高温后的抗压性能[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(3): 281-285.
XIAO Jian-zhuang, WANG Ping. Study on Compressive Behavior of HPC with PP Fiber at Elevated Temperature[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(3): 281-285.
- [81] CHEN B, LIU J Y. Residual Strength of Hybrid-fiber-reinforced High-strength Concrete After Expos-

- sure to High Temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 1065-1069.
- [82] XIAO J Z, FALKNER H. On Residual Strength of High-performance Concrete with and Without Polypropylene Fibers at Elevated Temperatures[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41: 115-121.
- [83] PENG G F, YANG W W, ZHAO J, et al. Explosive Spalling and Residual Mechanical Properties of Fiber-toughened High-performance Concrete Subjected to High Temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(4): 723-727.
- [84] 刘沐宇,林志威,丁庆军,等.不同PPF掺量的高性能混凝土高温后性能研究[J].华中科技大学学报:城市科学版,2007,24(2):14-17.
LIU Mu-yu, LIN Zhi-wei, DING Qing-jun, et al. Study on the Properties of High Performance Concrete with Different Content Polypropylene Fiber After High Temperature[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2007, 24(2): 14-17.
- [85] YAN R Z, DU H X, WANG H F, et al. Behavior of HSC with Polypropylene Fibers After Exposure to High Temperatures[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99-100: 994-999.
- [86] PLIYA P, BEAUCOUR A L, NOUMOWE A. Contribution of Cocktail of Polypropylene and Steel Fibres in Improving the Behaviour of High Strength Concrete Subjected to High Temperature[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 1926-1934.
- [87] CIFUENTES H, LEIVA C, MEDINA F, et al. Effects of Fibres and Rice Husk Ash on Properties of Heated HSC[J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(5), 457-470.
- [88] KHALIQ W, KODUR V. Behavior of High Strength Fly Ash Concrete Columns Under Fire Conditions[J]. Materials and Structures, 2013, 46(5): 857-867.
- [89] MUGUME R B, Horiguchi T. Prediction of Spalling in Fibre-reinforced High Strength Concrete at Elevated Temperatures[J]. Materials and Structures, 2014, 47(4): 591-604.
- [90] SUHAENDI S L, Horiguchi T. Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fibre Reinforced High Strength Concrete After Heat Exposition[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1672-1678.
- [91] 陈明阳,侯晓萌,郑文忠,等.混凝土高温爆裂临界温度和防爆裂纤维掺量研究综述与分析[J].建筑结构学报,2017,38(1):161-170.
CHEN Ming-yang, HOU Xiao-meng, ZHENG Wen-zhong, et al. Review and Analysis on Spalling Critical Temperature of Concrete and Fibers Dosage to Prevent Spalling at Elevated Temperatures[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 161-170.
- [92] LIE T T, KODUR V K R. Thermal and Mechanical Properties of Steel-fibre-reinforced Concrete at Elevated Temperatures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(2): 511-517.
- [93] QIAN C X, STROEVEN P. Development of Hybrid Polypropylene-steel Fibre-reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 63-69.
- [94] LUO X, SUN W, CHAN S Y N. Effect of Heating and Cooling Regimes on Residual Strength and Microstructure of Normal Strength and High-performance Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(3): 379-383.
- [95] 朋改非,段旭杰,黄广华.钢纤维对高性能混凝土高温爆裂行为的抑制作用[C]//中国土木工程学会.“全国特种混凝土技术及工程应用”学术交流会暨2008年混凝土质量专业委员会年会论文集.北京:中国土木工程学会,2008:566-571.
PENG Gai-fei, DUAN Xu-jie, HUANG Guang-hua. Inhibitory Effect of Steel Fiber on High Performance Concrete Spalling Behavior [C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of National Academic Exchange Conference on Special Concrete Technology and Engineering Application and 2008 Annual Meeting of Concrete Quality Professional Committee. Beijing: China Civil Engineering Society, 2008: 566-571.
- [96] REIS M D L B C, NEVES I C, TADEU A J B, et al. High-temperature Compressive Strength of Steel Fiber High-strength Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(3): 230-234.
- [97] KHALIQ W, KODUR V. Effectiveness of Polypropylene and Steel Fibers in Enhancing Fire Resistance of High-strength Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(3): 04017224.
- [98] OZAWA M, MORIMOTO H. Effects of Various Fibres on High-temperature Spalling in High-performance Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 83-92.
- [99] AKTURK B, YUZER N, KABAY N. Usability of Raw Rice Husk Instead of Polypropylene Fibers in High-strength Concrete Under High Temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(1): 04015072.

- [100] HERNANDEZ-OLIVARES F, BARLUENGA G. Fire Performance of Recycled Rubber-filled High-strength Concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(1): 109-117.
- [101] 刘 锋, 张文杰, 何东明, 等. 橡胶粉-纤维改性高强混凝土的高温性能[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(1): 124-131.
LIU Feng, ZHANG Wen-jie, HE Dong-ming, et al. High Temperature Performance of High Strength Concrete Modified by Rubber Powder and Fiber[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(1): 124-131.
- [102] 李丽娟, 谢伟锋, 刘 锋, 等. 高温作用后高强橡胶混凝土的性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(6): 692-698.
LI Li-juan, XIE Wei-feng, LIU Feng, et al. High Temperature Performance of High Strength Rubber Concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(6): 692-698.
- [103] LI L J, XIE W F, LIU F, et al. Fire Performance of High Strength Concrete Reinforced with Recycled Rubber Particles[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2011, 63(3): 187-195.
- [104] 周 梅, 沈梦阳, 张 倩. 橡胶集料高强混凝土高温前后性能研究[J]. *工业建筑*, 2017, 43(1): 113-117.
ZHOU Mei, SHEN Meng-yang, ZHANG Qian. Study of the Behavior of High Strength Concrete Modified with Rubber Fine Aggregate Before and After High Temperature[J]. *Industrial Construction*, 2017, 43(1): 113-117.
- [105] POON C S, AZHAR S, ANSON M, et al. Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal-and High-strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(9): 1291-1300.
- [106] BANGI M R, HORIGUCHI T. Pore Pressure Development in Hybrid Fibre-reinforced High Strength Concrete at Elevated Temperatures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(11): 1150-1156.
- [107] DONG X J, DING Y N, WANG T F. Spalling and Mechanical Properties of Fiber Reinforced High-performance Concrete Subjected to Fire[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, 2008, 23(5): 743-749.
- [108] PENG G F, BIAN S H, GUO Z Q, et al. Effect of Thermal Shock Due to Rapid Cooling on Residual Mechanical Properties of Fiber Concrete Exposed to High Temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 948-955.
- [109] KODUR V K R, RAUT N K, MAO X Y, et al. Simplified Approach for Evaluating Residual Strength of Fire-exposed Reinforced Concrete Columns[J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(12): 2059-2075.
- [110] YERMAK N, PLIYA P, BEAUCOUR A L, et al. Influence of Steel and/or Polypropylene Fibres on the Behaviour of Concrete at High Temperature: Spalling, Transfer and Mechanical Properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132: 240-250.
- [111] 鞠丽艳, 张 雄. 混杂纤维对高性能混凝土高温性能的影响[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(1): 89-92, 101.
JU Li-yan, ZHANG Xiong. Effects of Hybrid Fiber on High Performance Concrete Properties Under High Temperature[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2006, 34(1): 89-92, 101.
- [112] YAN Z G, SHEN Y, ZHU H H, et al. Experimental Investigation of Reinforced Concrete and Hybrid Fibre Reinforced Concrete Shield Tunnel Segments Subjected to Elevated Temperature[J]. *Fire Safety Journal*, 2015, 71: 86-99.
- [113] LURA P, TERRASI G P. Reduction of Fire Spalling in High-performance Concrete by Means of Superabsorbent Polymers and Polypropylene Fibers: Small Scale Fire Tests of Carbon Fiber Reinforced Plastic-prestressed Self-compacting Concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 49: 36-42.
- [114] HEO Y S, SANJAYAN J G, HAN C G, et al. Synergistic Effect of Combined Fibers for Spalling Protection of Concrete in Fire[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(10): 1547-1554.
- [115] WITEK A, GAWIN D, PESAVENTO F, et al. Finite Element Analysis of Various Methods for Protection of Concrete Structures Against Spalling During Fire[J]. *Computational Mechanics*, 2006, 39(3): 271-292.
- [116] 钱春香, 游有鲲. 抑制高强混凝土受火爆裂的措施[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(7): 846-852.
QIAN Chun-xiang, YOU You-kun. Measures for Improving Spalling Resistance of High Strength Concrete Exposed to Fire[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 33(7): 846-852.
- [117] 吴 波, 周 鹏. 表面设置防火涂料高强混凝土的爆裂[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(3): 406-412.
WU Bo, ZHOU Peng. Explosive Spalling of High Strength Concrete Coated with Fire Retardation Coating at High Temperatures[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(3): 406-412.
- [118] RYDER N L, WOLIN D W, MILKE J A. An Investi-

- gation of the Reduction in Fire Resistance of Steel Columns Caused by Loss of Spray-applied Fire Protection[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2002, 12(1):31-44.
- [119] 吴 波,周 鹏,吴耀鹏.防火涂料对高强混凝土高温后氯离子渗透性影响[J].湖南大学学报:自然科学版,2013,40(1):9-14.
WU Bo, ZHOU Peng, WU Yao-peng. Influence of Fire Insulation on the Chloride Ion Permeability of High Strength Concrete After High Temperature[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences, 2013, 40(1):9-14.
- [120] 肖建庄,侯一钊,谢青海.高强混凝土剪力墙抗火性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(12):91-98.
XIAO Jian-zhuang, HOU Yi-zhao, XIE Qing-hai. Experimental Study on Fire Resistant Behavior of HSC Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12):91-98.
- [121] 吴 波,李 杰,黄玉龙,等.不同饰面材料高强混凝土柱的耐火性能[J].华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(3):120-126,131.
WU Bo, LI Jie, WONG Yuk-lung, et al. Fire-resistant Performance of High-strength Concrete Columns with Different Decorative Materials [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Sci- ence Edition, 2009, 37(3):120-126,131.
- [122] CHUNG J H, CONSOLAZIO G R. Numerical Modeling of Transport Phenomena in Reinforced Concrete Exposed to Elevated Temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(3):597-608.
- [123] 吴 波,宿晓萍,李 惠,等.高温后约束高强混凝土力学性能的试验研究[J].土木工程学报,2002,35 (2):26-32.
WU Bo, SU Xiao-ping, LI Hui, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Confined High-strength Concrete After High Temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2):26-32.
- [124] HAN C G, HAN M C, HEO Y S. Improvement of Residual Compressive Strength and Spalling Resistance of High-strength RC Columns Subjected to Fire [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (1):107-116.
- [125] KODUR V, BISBY L A, GREEN M F. Experimental Evaluation of the Fire Behaviour of Insulated Fibre-reinforced-polymer-strengthened Reinforced Concrete Columns[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41 (7): 547-557.
- [126] XIAO J Z, LI J, JIANG F. Research on the Seismic Behavior of HPC Shear Walls After Fire[J]. Materials and Structures, 2004, 37(8):506-512.