

# 伽马辐射作为混凝土废料回收工具

比尼亚姆·尼古西·埃代

埃塞俄比亚 亚的斯亚贝巴 纳米技术、生物和新兴技术研究所

**摘要:** 这篇特别的综述论文考虑了伽马辐射作为从废物中回收材料的结构改性工具及其用于制备混凝土。已考虑使用伽马辐射来提高混凝土的机械性能以及废料的再利用和回收。钢筋混凝土现在对建筑行业的技术进步至关重要。大型工程项目和一般建筑经常使用它。许多重大的技术发展有助于创造更坚固、更有效的材料,并提供巨大的优势。大多数情况下,经过很短的使用时间后,这些东西会变成垃圾,从而破坏环境。由于这种情况,现在在全球范围内存在重大的环境问题。调查应集中于利用尖端和健康的技术(如伽马辐射)进行回收,作为传统机械和化学回收技术的替代方案,以解决这个问题,促进可持续发展,减少环境污染。混凝土的机械质量,如抗压强度和弹性模量,通过加入废颗粒和使用伽马辐射来提高,伽马辐射是再利用和回收废料的有效工具。

**关键词:** 废料; 伽马辐射; 混凝土; 回收; 机械性能

## Gamma Radiation as a Recycling Tool for Waste Materials Used in Concrete

Biniyam Nigussie Edae

Nanotechnology, Bio and Emerging Technology Institute, Addis Ababa, Ethiopia

**Abstract:** This particular review paper considered the use of gamma radiation as a tool for structural modification of recovered materials from waste and its use for preparing concrete. The use of gamma radiation to enhance the mechanical properties of concrete as well as the reuse and recycling of waste materials have been taken into consideration. Reinforced concrete is now crucial to the technological advancement of the building sector. Major engineering projects and general construction frequently employ it. Numerous significant technological developments have helped to create stronger, more effective materials that offer great advantages. Most often, after a very brief period of usage, these things degrade the environment by becoming garbage. Due to this circumstance, there is now a major environmental problem on a global scale. Investigations should have concentrated on recycling utilizing cutting-edge and healthy technologies, such as gamma radiation, as an alternative to traditional mechanical and chemical recycling techniques in order to tackle this issue, promote sustainable development, and reduce environmental pollution. The mechanical qualities of concrete, such as the compressive strength and elastic modulus, are increased by the inclusion of waste particles and the use of gamma radiation, which are effective instruments for reusing and recycling waste materials.

**Keywords:** Waste materials; Gamma radiation; Concrete; Recycling; Mechanical properties

### 1. 引言

混凝土是一种多相材料,通常用作储存和处置放射性废物的结构材料<sup>[1]</sup>。几千年来,水泥和混凝土一直以各种形式使用。早期的水泥和混凝土建筑,如罗马的万神殿,仍然屹立不倒,证明了材料在正确配制、生产和安装时的可靠性和耐用性。

通过对胶凝材料特性和历史建筑数据的深入调查,对该系统有了扎实的实证理解。这些知识以及该物质的合理成本使其成为核领域使用的绝佳选择。该行业在广泛的应用中使用水泥和混凝土。通过这种方式,混凝土在核反应堆中用作屏蔽,除了用于封装特定形式的中间废物(ILW)<sup>[2, 3]</sup>外,还用作一般建筑材料。

制造商有兴趣开发方法,通过减少产生的残留物数量或处理由于更严格的环境立法和市场对环保产品的市场需求而不可避免地产生的残留物来减轻工业过程对环境的影响。在各种生产过程中使用工业和家庭废物作为新鲜材料的替代品或补充,其动机是原材料提取过程中产生的环境危害以及提取技术的高成本。可靠,安全的原材料库存的枯竭和保护不可再生资源的需求进一步鼓励了寻找重新利用废料的方法的需求<sup>[4]</sup>。

近年来,已经提出了一些工具和方法来应对建筑业的环境挑战,包括 a) 增加废物的使用,特别是那些作为工业过程副产品的废物;b) 使用回收材料代替自然资源,这将使该行业更具可持续性;c) 提高耐久性以及机

械和其他性能,从而减少建筑替代材料的体积<sup>[4]</sup>。回收被认为是第三大首选废物处理选择,具有众多的环境效益,是抵消与建筑行业相关的环境影响的可行选择<sup>[5]</sup>。

理论上,伽马辐射、X射线和电子束等电离辐射可用于改变复合材料的分子结构。辐射可以通过断链和交联导致聚合物降解。这些活动发生的程度主要取决于聚合物的化学组成<sup>[6]</sup>。在伽马辐射的帮助下,回收的废聚合物可以交联,以产生具有改进特性的材料。从经济,生态和环境的角度来看,在聚合物回收中使用辐射技术是一个合适的选择<sup>[4, 7]</sup>。

本章展示了伽马辐射与废料和回收材料相结合如何提高混凝土的物理和化学质量提供不同的方法。本文综述了利乐容器中聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)瓶、轮胎橡胶和纤维素等废料的物理化学改变,以及它们在增强混凝土质量方面的应用。这种考虑集中在帮助改善环境保护的方法上<sup>[4, 8]</sup>。

## 2. 水泥行业的碳排放

混凝土是应用最广泛的建筑材料,因其优异的机械和耐久性能而产生<sup>[9-11]</sup>。混凝土是世界上最常用的结构材料,因为它制备简单,成本低<sup>[4, 12]</sup>。混凝土是地球上第二常用的材料,仅次于水。水泥行业是减少温室气体排放的关键部门,因为它产生了世界上约5%的人为二氧化碳排放量<sup>[13]</sup>。

然而,混凝土的骨料由具有各种来源、成分和纹理的岩石组成。这些岩石根据它们的来源分为岩浆(火成岩)、沉积岩、变质岩和矿石岩。除了花岗岩、花岗闪长岩、锂辉石和砂岩中的硅酸盐矿物外,岩石还可能含有赤铁矿和磁铁矿等氧化物矿物以及石灰石和白云石中的碳酸盐矿物。每块岩石都有独特的质地,这取决于它来自哪里以及它是如何形成的。因为有这么多不同的因素在起作用,所以很难理解岩石对辐射的反应。然而,可以从辐照岩石对其矿物成分的反应以及其他因素(如岩石的质地和起源)推断出受辐照岩石的行为<sup>[14]</sup>。

## 3. 混凝土中使用的回收和废料

鉴于对环境问题的认识不断提高,在工业运营中使用废料是一个有吸引力的潜在领域。回收和再循环固体废物有助于解决废物处理问题,同时还可以减少对环境的破坏<sup>[4, 5]</sup>。固体废物的化学成分用于将其分类为有机或无机。无机固体废物的主要成分包括玻璃、陶瓷和包装中使用的金属,如铝。其他材料包括锌、铜和铁<sup>[15]</sup>。

可持续建筑的七项原则之一是使用回收材料。国际建筑理事会于1994年根据资源效率制定了这些准则。回收材料可用于代替水泥和混凝土生产中的主要原材料。

例子包括回收混凝土骨料、再生砖骨料、城市垃圾中的废玻璃和石膏板回收的废石膏。水泥和混凝土的生产完全依赖于自然资源<sup>[9]</sup>。

在过去的六十年中,全球混凝土产量增长了十二倍。

今天,地球上的每个人平均每年生产一吨混凝土。一方面,在水泥和混凝土生产中使用回收材料有助于减少原材料数量和城市土地利用。另一方面,成品的质量受到部分替代原材料中使用的回收材料的影响<sup>[9]</sup>。

聚对苯二甲酸乙二醇酯是有机固体废物(PET)中最具代表性的元素之一。2007年,全球每年使用2.5亿个PET(1000万吨废物)。每年,50,000,000,000瓶被倾倒在垃圾填埋场<sup>[4, 16]</sup>。根据世界银行关于固体废物管理的统计数据,世界城市目前每年产生约13亿吨固体废物,这个体积是二氧化碳的数量,此外,立法禁止堆肥和燃烧某些废物<sup>[5]</sup>。

PET废物可以在环境中徘徊数百年,因为它不可生物降解。乙二醇和二元酸可用于从PET废物中制造不饱和聚酯树脂(UPR)。高抗压强度聚合物混凝土(PC)可以使用这种物质作为粘合剂来制造。聚合物混凝土的更高抗压强度可以通过2:1的PET/乙二醇比获得<sup>[4, 16]</sup>。

由于地球上汽车数量的增加,收集大量废旧轮胎已成为一个重大的废物管理问题。2002年,美国生产了约2.75亿条废旧轮胎,日本生产了1.1亿条,联合王国生产了3700万条。台湾每年生产超过10万吨的垃圾轮胎。磨损轮胎的最终处置是一个重大的环境问题;轮胎倾倒地提供严重的火灾和健康风险<sup>[4]</sup>。

摆脱轮胎废料的最流行技术之一是燃烧轮胎废料以产生能量以产生蒸汽或电力。废旧轮胎现在经常用于美国 and 欧洲的水泥炉。沥青路面中用于凝集改性的气功粉尘的沥青热拌是利用废旧轮胎的一种应用。将其用作混凝土的细骨料或粗骨料替代品是一种额外的选择。与沙子或石头相比,其质量可以增强混凝土的机械性能,例如强度和弹性模量<sup>[4, 7, 9]</sup>。

在建筑领域回收旧轮胎有助于减少环境污染并创造更具成本效益的结构。在这方面,在过去的二十年中,废旧轮胎橡胶在预拌混凝土中的使用显着增长,引起了全球科学界的重大关注。为了保护海洋平台免受海浪或船舶的冲击,使用了少量未经加工的废轮胎。在世界某些地方,轮胎燃烧仍在进行,这导致了无法忍受的污染水平。因此,使用新鲜和创造性的方法促进回收至关重要。许多国家限制或不鼓励在垃圾填埋场储存废旧轮胎,这是研究回收方法的强烈动机。其中一种方法需要将旧轮胎转化为替代骨料,在降低总消耗的同时增加经济价值<sup>[4, 15, 17, 18]</sup>。

轮胎橡胶用于制造沥青橡胶(AR)路面以及各种弹性和塑料制品。用于橡胶混凝土混合物的粘合剂是氯氧水泥。在最近的一项研究中,开放级配法和间隙分级设计都用于制备沥青橡胶。根据结果,性能令人满意,并且可以在家庭中使用。湿法最适合含有磨碎轮胎橡胶(GTR)的普通沥青混合料。需要注意的是,橡胶沥青混合物符合ASTM国际标准(前身为美国测试和材料协

会)。改性沥青是使用区域材料和摊铺方法的传统混合物更好的选择,通过使用各种 AR 和 GTR 浓度<sup>[4, 15, 18, 19]</sup>。

综述研究了增强环氧粉末轮胎橡胶基聚合物混凝土的力学特性。利用直接神经建模和反向神经元建模对混合物进行经济高效的优化;在这种情况下,树脂含量是关键的成本因素。使用直接神经建模确定产生最高抗压、弯曲和抗拉强度值的混合物。使用逆向神经建模分析了不同环氧树脂粉末浓度下获得的最高机械属性值。结果表明,含有 0.3 (重量百分比) 轮胎粉末和 0.215 (重量分数) 环氧树脂的组合物表现出很强的抗压缩性。轮胎粉末环氧树脂和 0.17 树脂分别达到 0.23 的最高弯曲强度和 0.24 的最高拉伸强度<sup>[4, 20]</sup>。

当轮胎橡胶用作骨料时,混凝土的抗压强度会降低,这可能会影响混凝土在某些结构应用中的实用性。尽管如此,它还具有降低密度、提高抗冲击性和韧性、提高延展性和卓越的隔音性能等优势品质。这些属性在一系列建筑应用中非常有用,例如通道。使用废旧轮胎制造混凝土涂层轮胎橡胶颗粒可以显著减少废旧轮胎产生的垃圾量。氯氧镁可用于制造具有更优越性能和更好弹性体粘质量的高强度混凝土<sup>[4, 20]</sup>。

此外,用氯氧镁制备轮胎橡胶骨料可能会增加轮胎橡胶颗粒与其他组成混凝土元素的附着力。轮胎颗粒的大小和浓度、水泥类型、化学和矿物添加剂的使用以及轮胎橡胶颗粒预处理技术是影响附着力的一些变量。轮胎粉可用于砂浆和混凝土,具体取决于尺寸。此外,与不含添加剂的石膏相比,纺织纤维含量增加(来自回收轮胎)的石膏可减少阻力降低。复合材料含有各种废物,例如回收的轮胎纤维、颗粒软木和废弃纸张中的纤维素纤维。许多研究集中在使用各种复合材料生产工艺(例如直接成型或压制)制造新的复合材料<sup>[4, 20]</sup>。

天然纤维主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,并含有微量的果胶、蜡和水溶性化合物。当线性纤维素分子之间的氢键横向连接它们以形成线性束时,就会产生晶体结构。最重要的纤维素结构因素之一是结晶度。随着结晶与无定形区域的比例上升,纤维素纤维变得更加坚硬,柔韧性降低。此外,纤维素纤维的添加增强了复合材料的弯曲能力<sup>[4]</sup>。

含纤维素的废物,如利乐容器,是最重要的。三种原材料用于制造这种包装:纸(约占总数的 75%),低密度聚乙烯(约 20%)和金属(约 5%)。水力制浆是一种简单、众所周知的回收用过容器的方法。在此过程中,纤维素纤维从聚乙烯和铝的微观层中分离出来<sup>[4, 5]</sup>。

造纸污泥(PS)是造纸工业产生的大部分废物,被燃烧以产生 PS 灰。它是水泥的原料,也是改良土壤的工具。PS 灰具有很强的吸水能力,有助于提高高刚性混凝土的强度。当添加到混凝土中时,由于水泥的水化,它与氢氧化钙发生火山灰反应,产生比没有 PS 灰分的

混凝土具有更高抗压强度的材料。该物质的 38.1% 是二氧化硅(SiO<sub>2</sub>), 21.4% 是氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 28.9% 是氧化钙(CaO)。在 PS 灰分的扫描电子显微镜(SEM)照片中并没有可见的球形颗粒,只有粗糙形式的颗粒。200 kg/m<sup>3</sup> 水泥和 100 至 300 kg/m<sup>3</sup> PS 灰分是典型浓度。在水泥基质中,植物纤维和“人造”纤维素纤维用于替代石棉纤维,因为它们以更便宜的成本表现出相似的性能,其值主要基于纤维的特性以及纤维与基质之间的粘附程度<sup>[4, 15]</sup>。

从包装中回收的纸张已被用于制造复合材料,纸浆纤维由 40% 的树脂木材,35% 的阿尔法草(*Stipa tenacissima* L.) 和 25% 的叶木组成。对于低于 1.25 mm 的值,光纤直径被归类为细,对于 1.25 mm 到 5 mm 之间的值,被归类为粗直径。研究表明,随着浆状纤维含量的增加,抗压强度下降,主要是因为随着纤维含量的增加,会产生更多的空隙,从而减轻重量并削弱复合材料。计算水/水泥比(W/C)很重要,因为在水泥中添加废纤维会增加制备所需的水量,以弥补纤维吸收的水分。来自 SEM 显微镜的含有 10% 纤维(W/C = 0.56)的复合材料的图像揭示了非均匀分散中的纤维团聚。当引入更多的水(W/C = 0.64)时,显示出更好的纤维分散性,但由于额外的水产生的空隙,强度降低<sup>[4, 5, 15]</sup>。

当纤维素纤维(按重量计为 2-16%)添加到复合材料中时,导热系数下降,从而节省能源。热导率是衡量材料抵抗热流能力的指标。因此,纤维被用作水泥替代品。这种行为是由纤维本身的绝缘特性和混合过程中产生的气泡在纤维包装中产生的孔隙率引起的。当混合物中有更多的空隙时,复合试样更轻,导热系数更低<sup>[4]</sup>。

代替水泥,来自回收包装的纤维素纤维已被用于轻质混凝土,浓度高达重量的 16%。根据研究结果,使用适量的水和水泥,在混凝土中添加更多的纤维会降低其抗压强度并提高其隔热能力,同时确保纤维均匀分布在整个基体中。通过改善水泥基体的隔热性和低密度,使轻质建筑材料成为可能。建筑隔墙(抗压强度 8.6 MPa),隔断,天花板和屋顶使用这种形式的轻质混凝土<sup>[4]</sup>。

使用 PET 材料作为混凝土骨料替代品是一种重要的回收替代方案。鉴于建筑行业的技术需求,研究正在寻找创造替代材料的可能性,这些替代材料比标准材料具有更大的实用性,更低的成本和优越的物理,化学和机械质量<sup>[4, 16]</sup>。

由于这些材料的增强性能,用于路面的原始聚合物在过去 20 年中显示出优势。研究人员采用了几种聚合物,当与沥青正确结合时,可以提高路面的产量和使用寿命。然而,废聚合物可能是有害的,并继续污染环境,因此它们必须成功回收或重新利用<sup>[4, 7]</sup>。

沥青可以用多种化合物来改变,其中大部分是稀有且昂贵的原始成分,以提高路面的产量。利用塑料瓶等

废物作为替代品可能有助于最大限度地减少浪费并可能提高产量。塑料瓶 PET 纤维的使用增加了混凝土的延展性。研究表明,即使是少量的纤维也会显著影响混凝土开裂后的行为。O 型和层状纤维都增加了混凝土的硬度。后者有助于将混凝土的每个开裂区域的侧面融合在一起<sup>[4, 16]</sup>。

通过短期蠕变实验,许多研究人员预测了含有 CaCO<sub>3</sub>, 粉煤灰和再生 PET 树脂的聚合物混凝土的长期蠕变。根据结果, PET 导致早期混凝土比普通混凝土蠕变得更快。前两天占长期蠕变的 20% 以上,前 20 天占 50%。此外,由于 CaCO<sub>3</sub> 颗粒的表面积增加,未加固的聚合物混凝土的蠕变变形大于含 CaCO<sub>3</sub> 的混凝土。为了尽量减少聚合物混凝土的变形,加固至关重要。由于具有再生 PET 材料的聚合物混凝土的粘弹性,非线性性质,蠕变值随着施加力的增加而增加,但是,增加不是成比例的<sup>[4, 16]</sup>。

高达 3% 的再生 PET 瓶纤维已用于混凝土生产。碱强度是制造 PET 纤维的关键挑战,尽管研究表明,这对于混凝土中使用的纤维来说不是问题。PET 纤维已被用于覆盖和粉碎隧道,特别是摩托车的隧道。未来的用途可能包括困难的环境地下建筑,例如位于水边或靠近海岸的建筑。此外,它可以用作弯曲、陡峭和狭窄道路上的人行道。在一项比较 PET 与其他纤维的研究中,发现 PET 纤维的水分含量低于聚乙烯醇(PVA)纤维,但水分含量高于聚丙烯(PP)纤维<sup>[4, 16]</sup>。

通过添加由回收瓶制成的 PET 颗粒,减少了混凝土裂缝。这些颗粒的长度为 10、15 和 20 毫米,体积浓度为 0.05%、0.18% 和 0.30%。在第 28 天和第 150 天,进行了弯曲和冲击测试。随着纤维的加入,压缩强度值发生了显著变化。此外,纤维含量的增加导致杨氏模量降低,纤维浓度增加后表面发生变化<sup>[4]</sup>。

PET 浓度会影响混凝土的抗压强度。就带有 PET 颗粒的混凝土的表面特性而言,可以描述这种行为。沙子和砾石骨料分布颗粒在没有 PET 颗粒(0%PET)的混凝土中表现出粗糙的表面。PET 颗粒以较少的数量覆盖矿物聚集体,并且可以看到更粗糙的表面(1.5%的 PET)。随着 PET 颗粒浓度的增加,混凝土的表面形态发生变化,变得更加均匀,并包含某些致密区域(2.5%的 PET)。然而,当 PET 颗粒浓度进一步升高(5.0%PET)时,可以看到一些裂缝的区域<sup>[4, 16]</sup>。

在另一项关于固化时间的研究中,发现纤维在 28 天时的存在提高了弯曲、冲击和拉伸强度。然而,由于碱性混凝土环境中的纤维劣化和脆弱,这种改善在 150 天后不再可见。一年后,将纤维添加到混凝土中以增加孔隙率。在建筑中利用回收资源是可持续性的关键部分之一,再生 PET 瓶纤维提供了钢筋混凝土的替代品<sup>[4]</sup>。

#### 4. 利用伽马辐射对废料进行结构改造

当放射性原子核破裂时,当一些亚原子粒子衰变时,

就会产生伽马射线。在电磁波谱伽马射线部分的公认分类中存在一些波长重叠。伽马辐射的波长通常小于零点几埃,而伽马射线的光子能量超过数万电子伏特<sup>[4]</sup>。由于光子既不是无质量也不是无电荷的,它们可以比  $\alpha$  和  $\beta$  辐射更深入地穿透材料和大气<sup>[14]</sup>。

通常,聚合物化学结构和机械行为的改变用于评估伽马辐射对这些材料的影响。化学键由于这些变化而重组,这允许更大的结构网状或聚合。为了增强其特性并增加其与复合材料的相容性,聚合物已经改变<sup>[4, 7]</sup>。

目前,伽马辐射正成功地用于消费后塑料的回收。从经济和环境的角度来看,这种技术是可行的。以下是该应用的一些最显著的优点:更快速的聚合物分解,特别是通过断链,产生低分子量,可用作各种工艺中的添加剂或原料;b)更先进的高分子材料生产,专门创造为环保<sup>[4, 18]</sup>;c)主要通过交联或改性几个组合相表面来改善回收聚合物或聚合物混合物的机械性能和性能<sup>[7]</sup>。

在众多类型的研究中,已经研究了伽马辐射对 PET 的影响。例如,电子自旋共振(ESR)和光学吸收光谱用于评估辐射引起的 PET 降解过程。PET 薄膜在黑暗中暴露在 196°C 的温度下辐射。该薄膜在暴露于辐射后变成红紫色,使 ESR 能够检测 PET 自由基离子物种。另一项研究使用伽马辐射进行光敏化程序。使用反相高效液相色谱和红外光谱监测结果。注意到由于放射解和 PET 断裂区而产生对苯二甲酸<sup>[4, 16]</sup>。

根据对 0-200 kGy 剂量范围内伽马辐射对 PET 包装膜的影响的研究,二甘醇浓度在低剂量(5-10 kGy)时上升,但在高剂量(30-200 kGy)时下降。当剂量大于 60 kGy 时,分子量、特性粘度和末端羧基均出现适度下降;尽管如此,渗透率、热特性、颜色和表面电阻率在任何剂量下都不会受到影响<sup>[4]</sup>。SEM 用于分析回收 PET 颗粒表面的形态,其尺寸范围为 0.5 至 3.0mm,通过切割 PET 瓶生产<sup>[15, 16]</sup>。

对于以 28 kGy/h 的速率高达 3.5 MGy 的剂量,研究了伽马辐射的非晶 PET 薄膜在环境条件下的热行为。玻璃化转变温度(T<sub>g</sub>)和结晶度水平使用差示扫描量热法(DSC)计算<sup>[21]</sup>。研究表明,随着剂量的增加,T<sub>g</sub>和热容都下降,这是由聚合物断链机制引起的。可以想象得出的结论是,T<sub>g</sub>可用作 PET 中的剂量吸收比指示<sup>[4, 16]</sup>。

通过 DSC、X 射线光电子能谱、SEM 和分子量测定法,以 1.65 MGy/h 的速率评估了  $\gamma$  辐射对 PET 的影响。在 5MGy 的剂量下,观察到分子量下降,这归因于聚合物链断裂;然而,在剂量高于 5MGy 时,摩尔质量增加,主要是由于重组和分支的产生<sup>[4, 15]</sup>。

为了评估辐射 PET 在 0-2 MGy 剂量范围内的光学和结构特性,使用了 X 射线衍射和紫外光谱。衍射图揭示了 PET 的半结晶特性,结晶度随辐射暴露而增加。紫外分析显示,在较高剂量下,禁带缩小,而活化能和吸

收能均增加。在另一项调查中, PET 瓶暴露在 0 至 670 kGy 的辐射下。结果显示, 产生的颗粒中的结晶度和晶体尺寸增加<sup>[4, 16]</sup>。

使用 25、50 和 100 kGy 的施用量, 研究了伽马辐射对低密度聚乙烯 (LDPE) 和乙烯醋酸乙烯酯 (EVA) 再生 PET 混合物的机械和热性能的影响。结果表明, 在 100 kGy 下辐照的再生 PET 中有 10% 产生了最大的交联链。伽马辐射用于将乙烯-甲基丙烯酸-丙烯酸缩水甘油酯单体接枝到 PET 上。与非辐照混合物相比, 生产的弹性体在三元共聚物质量仅为 0.1% 的情况下, 冲击强度提高了 30%。这些发现支持了伽马辐射是增加复合材料中聚合物相容性的特别有效的方法 (现场) 的观点<sup>[4, 7, 16]</sup>。

当暴露于高达 1 MGy 的辐射剂量时, 对热塑性芳香族聚酯 (用于其电绝缘能力) 的研究表明, 由于苯环的存在, 聚合物链稳定。辐照 PET 样品由于较高剂量 (5MGy) 的链断裂导致分子量降低<sup>[4]</sup>。

根据关于伽马辐射对纤维素物理化学特性影响的某些研究, 剂量增加 25kGy (平均) 导致在 0-1MGy 的剂量范围内纤维素结晶度损失 1%。高达 31.6 kGy 时, 纤维素会降解 (从 6% 到 12%), 而在高达 300 kGy 时, 结晶度不变。高达 1 kGy, 获得聚合度 (DP); 超过 10 kGy, 这些减少。此外, 比重和晶格常数的变化高达 1MGy, 纤维素在 6.55MGy 左右完全降解<sup>[4, 22]</sup>。

沿着纤维素的微纤维长度, 存在结晶度被破坏的无定形区域。化学物质可以通过这些区域进入微纤维。此外, 纤维素被伽马辐射分解成水溶性的较短链, 以及水分子容易进入的“新微裂缝的打开”<sup>[4, 22]</sup>。在未辐照的纤维素中可以看到光滑和均匀的表面以及一些颗粒。在 50 kGy 时, 有更多的分散颗粒和一些可见的裂缝; 在更大的剂量下, 纤维素表面之间有更多的空间以及一些微观间隙。这些改变可能与主要的伽马辐射影响有关, 其中包括纤维素分子链的断裂和交联<sup>[4]</sup>。

未暴露于辐射的颗粒表现出均匀的表面, 但经过 200 kGy 剂量的颗粒表现出空隙和表面粗糙度。伽马辐射剂量的增加会导致更大的表面损伤和空隙的形成 (大于 100 米)。最后, 在 300 kGy 辐射下, 表面损伤更加明显, 并表现出显著的伽马辐射诱导裂缝<sup>[4, 23]</sup>。

### 5. 含有废料和回收材料的混凝土: 伽马辐照的影响

利用伽马辐射对于回收 PET 和提高混凝土的机械质量具有实质性的好处, 这可以归因于表面化学成分的改变。伽马辐射具有许多优点, 其中最重要的是改善了纤维和基质之间的附着力。伽马辐射增加了单体聚合到陶瓷基体中的开始。混凝土的应变、压缩和冲击强度、屈服点变形和分解、变形值和弹性模量是其主要力学性能, 需要研究<sup>[4, 16]</sup>。

伽马辐射用于回收材料并提高混凝土的机械质量。这些好处可以通过表面化学结构的变化来解释。伽马辐

射能够通过加速单体进入陶瓷基体的引发和聚合过程来产生显著的优势。提高聚合物和基质之间的附着力是最关键的。混凝土的应变、压缩和冲击强度、屈服点变形和击穿, 以及变形值和弹性模量, 是要检查的关键机械参数<sup>[24]</sup>。

电离辐射对聚合物和陶瓷制成的复合材料的影响一直是一些研究的主题。例如, 石膏/聚(丙烯酸甲酯)复合材料的聚合产率随着辐射剂量的增加而增长。在 3-4 kGy 的剂量下, 产量达到 87-88%。由于该过程在室温下进行, 因此除了降低保持复合材料压力的价格外, 还可以显著节省热能。当创建陶瓷聚合物复合材料时, 压力使大量单体 (通常非常挥发) 能够填充陶瓷基质中的间隙<sup>[4, 23]</sup>。

伽马辐射对混凝土的影响一直是一些调查的主题。通过使用适当的辐射剂量, 可以管理产生的后果。例如, 可以改变表面以产生更粗糙和更断裂的材料, 从而与水泥基材料具有更高的相容性<sup>[4]</sup>。

对于含有辐照废轮胎颗粒的混凝土, 抗压强度值也出现了类似的模式。该值范围为 7.4 至 17.5 MPa, 并随着颗粒浓度的增加而降低。最高值是含有 10% 的 2.8 毫米大小颗粒的混凝土; 该值比控制混凝土低 27%。颗粒为 2.8 mm 的混凝土比颗粒为 0.85 mm 的混凝土具有更高的值。与具有非辐照颗粒的混凝土相比, 具有 20% 或 30% 颗粒的混凝土显示出更大的价值。因此, 使用较大的颗粒尺寸比使用较小的颗粒更有效<sup>[4]</sup>。

废弃轮胎颗粒的大小和数量会影响混凝土的机械质量。这些颗粒的存在降低了混凝土的抗压强度和抗拉强度, 因为它们会促进应力集中区并产生拉伸应力, 导致混凝土快速破裂和开裂。然而, 在某些情况下, 对废轮胎颗粒进行伽马辐射处理会导致机械质量的提高。似乎具有 2.8 毫米大小, 10% 辐照颗粒的混凝土会产生最大的结果。高达 30% 的轮胎颗粒可以用辐照颗粒添加到混凝土中, 这有助于降低混凝土的最终成本<sup>[4, 15]</sup>。

## 6. 结论

当使用废料代替混凝土中的沙子时, 伽马辐射、废料和回收材料都可以成为提高材料机械质量的有效工具<sup>[5]</sup>。特别是, 当添加给定浓度的废料并施加一定量的伽马辐射时, 抗压强度和弹性模量的值会提高。相反, 与辐照混凝土相比, 非辐照混凝土的机械性能较差<sup>[23]</sup>。

伽马辐射和废料 (用废料代替砾石或沙子) 都是提高混凝土机械质量的有用方法。特别是, 随着特定废料添加浓度和特定剂量的伽马辐射, 压缩强度和弹性模量值得到改善。另一方面, 非辐照混凝土的机械质量低于标准。

各种形状的废料 (颗粒或纤维) 可能适合作为建筑材料, 因为混凝土抗压强度是工程师使用的关键结构设计标准。为了提高机械质量, 在混合料设计中可以使用一小部分废料代替细骨料。伽马辐射也可以成为回收废

料的实用工具和适当过程<sup>[17]</sup>。废物浓度会影响弯曲强度和抗压强度性能。当废物浓度足够高以减少颗粒基质粘附不足的不利影响时，机械特性通常会得到改善。获得延展性是以牺牲抗压强度和抗弯强度为代价的<sup>[22]</sup>。

在未辐照样品的混凝土中，压缩应变通常随着 PET 颗粒浓度的增加而稳步上升，尽管抗压强度和弹性模量不受浓度变化的影响。抗压强度和弹性模量的最大值都取决于 PET 粒径。对于辐照混凝土与非辐照混凝土，可以看到不同的行为。抗压强度值随着 PET 浓度的升高而降低。压缩应变的降低更为明显。然而，弹性模量的行为与未辐照混凝土相反。伽马辐射对废料的作用及其对混凝土机械质量的影响得到了 SEM 图像的进一步支持<sup>[14, 15, 22]</sup>。

### 参考文献

- [1] M. Robira, B. Hilloulin, A. Loukili, G. Potin, X. Bourbon, A. Abdelouas. (2018). "Multi-Scale Investigation of the Effect of  $\Gamma$  Irradiations on the Mechanical Properties of Cementitious Materials", *Construction and Building Materials*.
- [2] Alexander J Potts. (2021). *The Assessment of Gamma Radiation on the Properties of Structural Concrete*, PhD dissertation, University of Manchester.
- [3] Maxime Robira, Benoit Hilloulin, Ahmed Loukili, Gaël Potin, X. Bourbon, et al. (2018). *Multi-scale Investigation of The Effect Of  $\Gamma$  Irradiations on The Mechanical Properties of Cementitious Materials*. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 2018, 186, pp. 484-494, [10.1016/j.conbuildmat.2018.07.038](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.038).
- [4] Gonzalo Martínez-Barrera, et. al. (2015). *Gamma Radiation as a Recycling Tool for Waste Materials Used in Concrete*, <http://dx.doi.org/10.5772/60435>.
- [5] Oriyomi M. Okeyinka, David A. Oloke, and Jamal M. Khatib, (2015). *A Review on Recycled Use of Solid Wastes in Building Materials*, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering* Vol: 9, No: 12.
- [6] Aliyu Usman, Muslich Hartadi Sutanto, Madzlan Napiah. (2018). "Effect of Recycled Plastic in Mortar and Concrete and the Application of Gamma Irradiation - A Review", *E3S Web of Conferences*.
- [7] A Cesur, NU Kockal. (2019). *Effects of Gamma Irradiation on Polymer-Modified Concrete (PMC): A Review* *Cur Trends Civil & Struct Eng.* 3 (3): CTCSE. MS. ID.000563. DOI: 10.33552/CTCSE.2019.03.000563.
- [8] Ehab E. Khozemy, H. Radi, and Nabila A. Mazied. (2022). *Upcycling of Waste Polyethylene and Cement Kiln Dust to Produce Polymeric Composite Sheets Using Gamma Irradiation*, *Polymer Bulletin*, <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04310-2>.
- [9] Tereza Pavl. (2018). *The Utilization of Recycled Materials for Concrete and Cement Production- A Review*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 442, doi: 10.1088/1757-899X/442/1/012014.
- [10] Miguel Mart'inez-L'opez et al. (2015). *Waste Materials from Tetra Pak Packages as Reinforcement of Polymer Concrete*, *International Journal of Polymer Science*, Volume 2015, Article ID 763917, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/763917>.
- [11] Tereza Pavl. (2018). "The Utilization of Recycled Materials for Concrete and Cement Production- A Review", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- [12] Carolyn E. Schaefer, Kunal Kupwade-Patil, Michael Ortega, Carmen Soriano, Oral Büyüköztürk, Anne E. White, Michael P. Short. (2018). "Irradiated Recycled Plastic as A Concrete Additive for Improved Chemo-Mechanical Properties and Lower Carbon Footprint", *Waste Management*.
- [13] Schaefer, C. E., et al. (2017). *Irradiated Recycled Plastic as A Concrete Additive for Improved Chemo-Mechanical Properties and Lower Carbon Footprint*, *Waste Management*, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.033>.
- [14] Mustafa Hameed Alsaied (2017). *Toward the Understanding of Irradiation Effects on Concrete: The Irradiated Minerals, Aggregates, and Concrete Database*, MSc Thesis, University of Tennessee, Knoxville.
- [15] G. Martínez-Barrera et al. (2020). *Waste Tire Rubber Particles Modified by Gamma Radiation and Their Use as Modifiers of Concrete*, *Case Studies in Construction Materials* 12 (2020) e00321.
- [16] Usman, A.; Sutanto, M. H.; Napiah, M.; Zoorob, S. E.; Yaro, N. S. A.; Khan, M. I. (2021). *Comparison of Performance Properties and Prediction of Regular and Gamma-Irradiated Granular Waste Polyethylene Terephthalate Modified Asphalt Mixtures*, *Polymers*, 13, 2610. <https://doi.org/10.3390/polym13162610>.
- [17] Nikola Tošić, Jelena Dragaš, and Vedran Carević. (2016). *Use of Recycled and Waste Materials in Concrete a Serbian Perspective*, *Conference Paper*, <https://www.researchgate.net/publication/304498237>.
- [18] de la Cruz, J. M. C., Guzman, C. G., Mejia, F. C., Acevedo, B. L., Cedillo, O. F., de Buen, I. G., Ocampo, A. M. and Valencia, H. M. (2021). *Effect of the Substitution of Sand by Rubber of Waste Tires on the Mechanical Properties of Hydraulic Concrete and Exposure to Gamma Radiation*, *Journal of Minerals and Materials Characterization*

and Engineering, 9, 245-256, <https://doi.org/10.4236/jmmce.2021.93017>.

[19] EL. Sayed Fathy EL. Sayed. (2010). Recycling of Some Polymeric Wastes Using Ionizing Radiation, MSc Thesis, Zagazig University 1995, National Centre for Radiation Research and Technology (NCRRT), Atomic Energy Authority.

[20] G. Martínez-Barrera et al. (2019). Modified Recycled Tire Fibers by Gamma Radiation and Their Use on The Improvement of Polymer Concrete, Construction and Building Materials 204, 327-334.

[21] Munzer Kattan. (2006). "Thermal Behavior of Gamma Irradiated Amorphous Poly (Ethylene Terephthalate) Films", Polymer Engineering & Science.

[22] Jeon D. H., Lee H. K., Park H. J. (2003). The

Effects of Irradiation on Physicochemical Characteristics of PET Packaging Film, Radiation Physics and Chemistry 2004; 71: 1059-1064, 10.1016/j.radphyschem.2003.10.009.

[23] Siddhartha S. A., Kapil D., Suresh-Kumar R., Krishna J. B., Wahab M. A. (2012). Effect of Gamma Radiation on The Structural and Optical Properties of Polyethyleneterephthalate (PET) Polymer, Radiation Physics and Chemistry 2012; 81 (4): 458-462, 10.1016/J.RADPHYSICHEM.2011.12.023.

[24] Gonzalo Martinez-Barrera, Witold Brostow and Susana Hernandez-Lopez. (2015). Waste and Recycling Materials Used in Concrete, International Journal of Advances in Science Engineering and Technology, Issn: 2321-9009, Volume- 3, Issue-3.