

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.08.019

不同种类拉挤 FRP 筋材压缩强度研究

黄亚新¹, 苗大胜¹, 程曦², 陈立¹, 赵启林¹

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007; 2. 南京城建项目建设管理有限公司, 南京 210017)

摘要: 针对拉挤纤维增强树脂基复合材料(FRP)筋材的压缩强度远低于其拉伸强度的问题, 分别对玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋材、碳纤维增强复合材料(CFRP)筋材和混杂纤维增强复合材料(HFRP)筋材进行了端部有约束和无约束压缩实验, 研究纤维类型、端部约束条件对FRP筋材在轴压状态下的破坏形式与压缩强度的影响规律。结果表明, 无端部约束时不同纤维类型的FRP筋材的破坏现象与压缩强度差别较大; 端部约束可以改变筋材的破坏方式, 提高筋材的压缩强度; 不同端部约束形式对不同FRP筋材压缩强度的提高作用不同。

关键词: FRP 筋材; 端部约束; 压缩强度

中图分类号: TU559 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)08-0081-05

Compressive Strength of Different Kinds of Pultruded FRP Rods

Huang Yaxin¹, Miao Dasheng¹, Cheng Xi², Chen Li¹, Zhao Qilin¹

(1. Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Nanjing Urban Construction Item Management & Development Co. Ltd., Nanjing 210017, China)

Abstract: Aiming at the problem of pultruded fiber reinforced resin composites (FRP) rods' compressive strength being much lower than its tensile strength, compression tests of glass fiber reinforced composites (GFRP) rods, carbon fiber reinforced composites (CFRP) rods and hybrid fibre reinforced composites (HFRP) rods with end restraint or not were performed to study the influence law of fiber type and the condition of the end restraint on FRP Rods' failure pattern and compressive strength under axial pressure. The results showed that the differences of failure phenomena and compressive strength between different kinds of FRP rods without end restraint were significant. The failure pattern of FRP rods could be changed by end restraint, and the compressive strength was improved accordingly. The influences of each kind of end restraint to improve the compressive strength of different kinds of FRP rods were different.

Keywords: FRP rods; end restraint; compressive strength

纤维增强树脂基复合材料(FRP)具有比强度和比刚度较高、耐腐蚀等优点, 已广泛用于各种结构工程领域。其中通过拉挤工艺生产的FRP筋材由于具有长度不受限制、截面可以制作得较大、成本相对低廉等优点, 且由于纤维沿单向排布而具有很高的纵向拉伸强度, 在土木工程领域尤其受到重视^[1-2], 已被用来取代钢材制作多种结构受拉构件, 如预应力混凝土桥的体外索和斜拉桥主索等^[3]。但FRP筋材作为土木工程受压构件使用则远未得到普及, 仅仅是在轻型桁架结构中的压杆^[4]、脚手架^[5]、电线杆^[6]等承载要求不高的结构中有所应用。其主要原因之一是拉挤FRP筋材的压缩强度比其拉伸强度低得多, 当其承受轴向压力载荷时会在远低于其拉伸强度的应力条件下破坏, 造成材料力学性能的较大浪费。张新越等^[7]的研究表明, 单向玻璃

纤维增强复合材料(GFRP)筋材和单向碳纤维增强复合材料(CFRP)筋材的压缩强度分别只有其拉伸强度的40%和11%左右; 周继凯等^[8]研究得到的GFRP筋材的压缩强度约为其拉伸强度的55%; 高丹盈等^[9]、龚永智^[10]和Wu Weipin^[11]的研究成果也得到了类似结论。尽管FRP筋材中亦有压缩强度较高者, 但其研究与应用主要集中在高新技术装备领域, 一般是采用高性能的纤维和基体, 通过层压固化等精心控制的工艺得到的, 从成本和生产效率方面均不适合土木工程使用。因此进一步开展拉挤FRP材料的压缩强度研究对深入认识其受压破坏机理, 研究提高其压缩强度的合理措施具有重要意义。笔

联系人: 苗大胜, 硕士, 主要研究方向为复合材料在桥梁工程中的应用

收稿日期: 2012-05-25

者以土木工程中常见的拉挤 FRP 筋材为对象进行了实验研究。

1 实验部分

1.1 原材料

碳纤维(CF): T700, 线密度为 800 tex, 日本东丽公司;

玻璃纤维(GF): 无捻粗纱, EW210H-4800, 线密度为 4800 tex, 四川华原玻璃纤维公司;

环氧乙烯基酯树脂: NB-103, 青岛佳创新型材料有限公司;

低分子量聚酰胺类环氧树脂固化剂: YM-200, 天津市伊美克精细化工厂。

1.2 主要仪器与设备

万能材料试验机: DNS300 型, 长春试验机研究所。

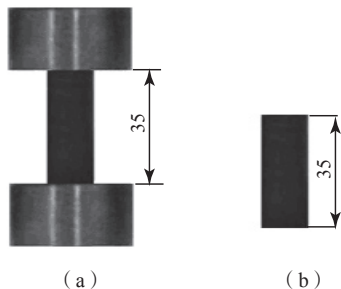
1.3 试样制备

将 CF, GF 束浸渍在环氧乙烯基树脂中, 并掺入适量的低分子量聚酰胺类环氧树脂固化剂(固化剂的质量为树脂质量的 1.7%), 采用直径为 11 mm 的圆柱型模具, 经拉挤成型工艺得到 3 种不同的 FRP 筋材, 分别为 CFRP 筋材、GFRP 筋材和混杂纤维增强复合材料(HFRP)筋材。3 种筋材的配方见表 1。

表 1 3 种 FRP 筋材的配方

材料	成分			纤维体积 分数 / %	纤维质量 分数 / %
	纤维	基体树脂	固化剂		
GFRP	GF	NB-103	YM-200	61.0	76.4
CFRP	CF	NB-103	YM-200	61.0	70.0
HFRP	GF+CF	NB-103	YM-200	44.0	58.7

将以上筋材沿横截面切割成压缩实验所需试样, 分为端部无约束和有约束两种试样。端部无约束试样的长度为 35 mm, 端部有约束试样除去约束部分以外的中段自由部分长度为 35 mm, 如图 1 所示。为减小偶然性对实验结果的影响, 每种筋材和约束形式的试样均制备 6 个, 取 4 个有效结果。



a—端部有约束试样; b—端部无约束试样

图 1 试样种类及尺寸

1.4 性能测试

常温压缩强度按 GB/T 1448-2005 测试。

2 结果与讨论

2.1 试样破坏形式

(1) GFRP 筋材试样

第一组 GFRP 筋材试样端部未施加约束(称为 GA 系列)。当压缩载荷增大时, 伴随细小的劈裂声, 试样端部出现纵向微裂缝。试样破坏时, 突然发出一声脆响, 载荷几乎垂直下降, 试样几乎完全失去承载力。破坏后的试样基本保持原来的圆柱形, 并存在贯穿全长的纵向主裂纹, 如图 2a 所示。试样的破坏形式是端部局部开裂引起的纵向开裂。



a—端部无约束; b—端部灌胶约束

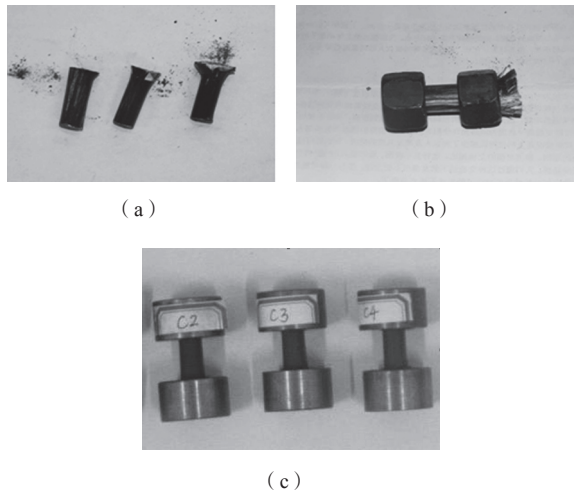
图 2 GFRP 筋材试样的压缩破坏形式

第二组 GFRP 筋材试样端部均采用钢套筒灌胶形式进行约束(称为 GB 系列)。初始加载时表现无明显变化, 直至突然在中段发生开裂, 并伴随着清脆的劈裂声, 形成很多条纵向裂缝, 筋材完全裂开, 纤维外翻露出, 如图 2b 所示。试样的破坏形式是中部纵向开裂。

(2) CFRP 筋材试样

第一组 CFRP 筋材试样的端部未施加约束(称为 CA 系列)。在较低载荷下, 试样的端部就会发生开裂, 呈花瓣状放射性散开, 并碎裂脱落。继续加载时试验机数据采集系统显示载荷不再继续增加, 试样内逐渐形成贯穿全长的主裂缝, 导致失去承载力, 整个加载期间几乎没有劈裂声, 破坏现象如图 3a 所示。

第二组 CFRP 筋材试样端部采用钢套筒灌胶约束(称为 CB 系列)。与 CA 系列类似, 在较低载荷下, 试样的端部就会发生开裂, 呈花瓣状放射性散开, 并碎裂脱落, 导致套筒与筋材之间脱粘, 套筒向中段滑移。继续加载时载荷不再继续增加, 试样端部继续散开脱落, 套筒继续向中段滑移, 直至两端套筒相接触为止, 如图 3b 所示。CB 系列与 CA 系列的破坏形式基本相同, 均为端部局部开裂, 极限载荷无明显差异。



a—端部无约束; b—端部灌胶约束;
c—端部过盈配合

图3 CFRP 筋材试样的压缩破坏形式

由于钢套筒灌胶约束效果不理想,第三组 CFRP 筋材试样端部采用钢套筒过盈配合约束。过盈配合量取两种,分别为无过盈配合量(称为 CC 系列)和 0.2 mm 的过盈配合量(称为 CD 系列)。CC 系列和 CD 系列试样的实验现象基本相同;从开始加载到破坏前,CFRP 筋材的表观无明显变化,直至试样与钢套筒接触位置突然发生剪切破坏,如图 3c 所示。

表 2 不同种类材料和端部约束形式的 FRP 筋材试样的压缩强度实验结果

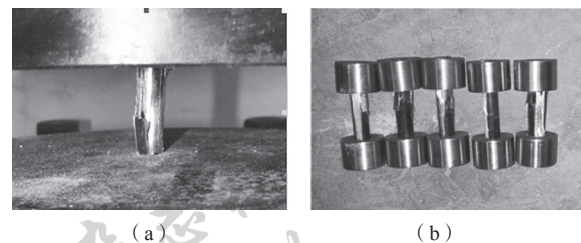
系列	材料	端部约束形式	过盈配合量/mm	破坏形式	平均压缩强度/MPa	标准差/MPa
GA	GFRP	无		端部局部开裂引起的纵向开裂	198.3	47.0
GB	GFRP	钢套筒灌胶		中部纵向开裂	298.0	17.6
CA	CFRP	无		端部局部开裂	216.5	47.7
CB	CFRP	钢套筒灌胶		端部局部开裂	227.5	35.6
CC	CFRP	钢套筒过盈配合	0	钢套筒边缘处剪切破坏	594	57.0
CD	CFRP	钢套筒过盈配合	0.2	钢套筒边缘处剪切破坏	634	11.6
HA	HFRP	无		端部局部开裂引起的纵向开裂	344	17.1
HB	HFRP	钢套筒过盈配合	0.2	中部纵向开裂	395.8	20.9

强度有较明显的作用,但不能抑制 CFRP 筋材端部的局部开裂,对提高其压缩强度没有作用,可见钢套筒灌胶约束的作用有限。钢套筒过盈配合约束可有效地抑制 CFRP 筋材试样与 HFRP 筋材试样的端部局部开裂并提高其承载力,这是因为过盈配合可在钢套筒和复合材料管间产生较大的接触压力,因而其约束作用较强。CD 系列的压缩强度高于 CC 系列,说明有一定过盈配合量比无过盈配合量好。

由表 2 还可以看出,在无约束状态下, HFRP 筋材试样的压缩强度最大, CFRP 筋材试样次之, GFRP 筋材试样最小;在采取适当的端部约束状态下, CFRP 筋材试样的压缩强度最大, HFRP 筋材试

(3) HFRP 筋材试样

第一组 HFRP 筋材试样的端部未施加约束(称为 HA 系列),其实验现象与无约束 GFRP 筋材试样基本相同,如图 4a 所示。根据对 GFRP 和 CFRP 筋材试样的实验经验,对第二组 HFRP 筋材试样采用钢套筒过盈配合的端部约束形式,过盈配合量为 0.2 mm(称为 HB 系列)。其实验现象与端部有约束的 GFRP 筋材(GB 系列)基本相同。破坏后的 HFRP 筋材试样中的 GF 没有断裂,但 CF 断裂严重,如图 4b 所示。



a—端部无约束; b—端部过盈配合

图4 HFRP 筋材试样的压缩破坏形式

2.2 压缩强度分析

不同种类材料和端部约束形式的 FRP 筋材试样的压缩强度实验结果列于表 2。

从表 2 可以看出,端部钢套筒灌胶约束可以抑制 GFRP 筋材试样的端部局部开裂,对其压缩

样次之, GFRP 筋材试样最小。

2.3 压缩破坏机理分析

从以上分析可以看出,对于 GFRP 筋材试样和 CFRP 筋材试样,不论其端部有无约束,其破坏现象都有明显差别,不同约束条件对这两种筋材试样的压缩强度的增强作用也不尽相同。笔者对这两种筋材在不同约束条件下的破坏机理进行分析。由于 HFRP 筋材中 GF 的含量较大,其破坏现象与机理都类似于 GFRP 筋材,在此不作单独讨论。

(1) 无约束 FRP 筋材试样

不加端部约束时, GFRP 筋材试样和 CFRP 筋材试样的破坏过程可以分为 3 步。

首先,由于试样与压头的接触端面不可能完全平整,在端部会存在微小的局部应力集中点,如图5所示。由于脆性材料难以实现材料内部应力的重分布,这些局部应力会导致材料的局部开裂破坏。对于复合材料,这种局部破坏体现为沿纵向不断扩展的微裂缝。

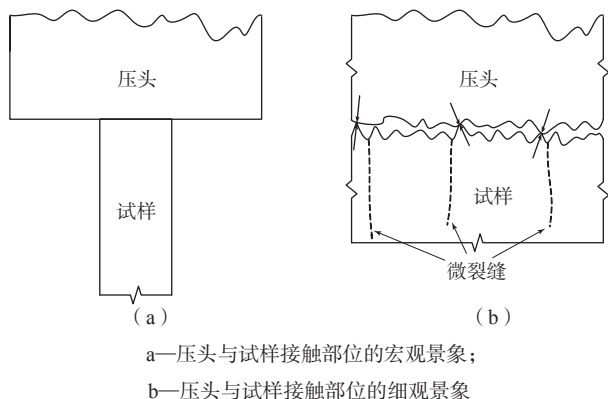


图5 试样端部微裂缝的产生和扩展过程

微裂缝出现后,横向应力继续存在并致使微裂缝扩展。在端部无约束情况下,FRP端部的横向应力主要靠树脂的横向拉伸应力及纤维的横向弯曲和剪切应力来抵抗。CF的韧性较GF的低,容易被弯折和剪断^[12]。因此在上述横向应力存在时,CFRP筋材试样比GFRP筋材试样更容易发生断裂。故CFRP筋材试样在裂缝扩展到一定长度时,其端部会发生放射性散开,并碎裂脱落。此后端部变得凹凸不平,横向应力进一步增大,微裂缝不断扩展形成主裂缝。而GFRP筋材试样由于抗弯折和剪切能力强,在其端部微裂缝扩展形成主裂缝的过程中,不会发生端部散开和碎裂脱落的现象。最后,主裂缝在端部压力的作用下不断扩展,直至试样完全开裂,失去承载力。

(2) 钢套筒灌胶约束 FRP 筋材试样

当以钢套筒灌胶形式进行端部约束时,由于胶层的弹性模量较低,对试样端部的横向约束较弱。当微裂缝出现后,CFRP筋材试样的端部在微裂缝的长度很小时就会发生碎裂脱落,钢套筒灌胶约束对此不能提供足够的抑制作用。随着试样端面表层复合材料的碎裂脱落,载荷逐渐转移到周边的套筒上,使套筒不断向下滑移,套筒与筋材之间脱粘,同时,CFRP筋材试样端部继续碎裂脱落,套筒不断滑移,直至两端的套筒相互接触。在此期间,载荷基本上保持不变。虽然套筒灌胶对筋材试样的横向约束弱,但亦足以使得微裂缝无法穿越套筒约束段而向

筋材试样中段扩展,故两钢套筒之间的中间段一直没有出现主裂缝。GFRP筋材试样在加载时不会出现端面表层的碎裂脱落,灌胶套筒始终与试样端面共同受力,故能够抑制其端部的局部破坏。

(3) 钢套筒过盈配合约束 FRP 筋材试样

当以钢套筒过盈配合形式对FRP筋材试样端部进行约束时,由于钢套筒的刚度较大,横向约束作用强,故能有效抑制试样端部的横向变形,端部微裂纹难以产生和扩展。由于CF的弹性模量较高,使CFRP筋材试样发生纵向开裂的载荷也较高,而其横向抗剪能力较差,故在载荷远低于其纵向开裂载荷时,因泊松比效应引起的试样横向膨胀会导致试样在与钢套筒边缘接触处被剪坏。GFRP筋材的横向抗剪能力比CFRP筋材强,同时由于GF的弹性模量较低,故发生纵向开裂的载荷也较低,因此不容易在试样与钢套筒边缘接触处被剪切破坏,而是最终在试样的中段发生开裂。

3 结论

(1) 在端部无约束的情况下,3种FRP筋材试样受纵向压缩时均发生自端部开始的局部开裂破坏,因此应对其端部采用适当形式的约束,端部约束可以提高筋材的压缩强度。

(2) 在不同端部约束形式下,3种FRP筋材试样的压缩破坏形式有所区别,不同约束形式对3种FRP筋材试样的压缩强度的增强作用也不尽相同。端部钢套筒灌胶约束形式的约束效果不如钢套筒过盈配合约束形式。端部钢套筒灌胶约束可以有效抑制GFRP筋材试样的端部局部开裂并提高其压缩强度,但对CFRP筋材试样的效果不好。端部钢套筒过盈配合约束可以有效抑制CFRP筋材试样和HFRP筋材试样的端部局部开裂并提高其压缩强度,但会导致CFRP筋材试样在套筒边沿处被剪切破坏,CFRP筋材试样的抗压能力仍然不能被充分发挥出来。

(3) 由于HFRP筋材试样的GF含量较高,其破坏形式接近于GFRP筋材试样。

(4) 在无约束状态下,HFRP筋材试样的压缩强度最大,CFRP筋材试样次之,GFRP筋材试样最小;在采取适当的端部约束状态下,CFRP筋材试样的压缩强度最大,HFRP筋材试样次之,GFRP筋材试样最小。

参考文献

- [1] Youakim S A, Karbhari V M. An approach to determine long-term

- behavior of concrete members prestressed with FRP tendons [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (5): 1 052-1 060.
- [2] Wang Xin, Wu Zhishen. Evaluation of FRP and hybrid FRP cables for super long-span cable-stayed bridges [J]. Composite Structures, 2010, 92 (10): 2 582-2 590.
- [3] 梅葵花. FRP 筋的特点及在桥梁工程中的应用[J]. 公路, 2007 (7): 12-15.
- [4] Xiong Jian, Ma Li, Wu Linzhi, et al. Fabrication and crushing behavior of low density carbon fiber composite pyramidal truss structures [J]. Composite Structures, 2010, 92 (11): 2 695-2 702.
- [5] Hollaway L C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (12): 2 419-2 445.
- [6] Stewart R. Pultruded poles carry power [J]. Reinforced Plastics, 2003 (2): 20-24.
- [7] 张新越, 欧进萍. FRP 加筋混凝土短柱受压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2006, 38 (4): 467-472.
- [8] 周继凯, 杜钦庆, 袁明亮, 等. GFRP 筋抗压力学性能试验研究[J]. 河海大学学报, 2008, 36 (4): 542-545.
- [9] 高丹盈, 李士会, 朱海堂, 等. 玻璃纤维增强聚合物筋压缩和剪切性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009 (3): 28-32.
- [10] 龚永智. FRP 筋混凝土柱的研究进展[J]. 建筑技术, 2006, 37 (11): 836-838.
- [11] Wu Weipin. Thermomechanical properties of fiber reinforced plastics (FRP) bars [D]. Morgantown: West Virginia University, 1991.
- [12] D·赫尔. 复合材料导论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.

我国掌握生物降解二氧化碳基塑料产业化技术

不久前, 中科院长春应用化学研究所承担的中科院知识创新工程重要方向项目“二氧化碳基塑料的产业化关键技术”通过验收, 同时该所已建成万吨级二氧化碳基塑料生产线, 并完成 3 万 t/a 生产线工艺包的设计。

二氧化碳基塑料是以二氧化碳和环氧化物为主要原料, 经化学方法制得的绿色高分子材料, 它既可高效利用二氧化碳, 变废为宝, 又具有良好的阻气性、透明性, 并可完全生物降解, 有望广泛应用在一次性医疗和食品包装领域。

中科院长春应化所于 2001 年在国内较早地开展了该领域的研发, 并在 2004 年与蒙西集团合作建成了世界上第一条具有完全自主产权的年产千吨级二氧化碳共聚物生产线。为加速推进二氧化碳基塑料的产业化, 长春应化所于 2008 年承担了中科院知识创新工程重要方向项目“二氧化碳基塑料的产业化关键技术”的研究。

科研人员开发出高效、稳定、低成本的稀土组合和载体催化催化剂, 开发了万吨级二氧化碳基塑料的生产技术、低锌含量的聚合物后处理技术, 聚合物中重金属含量达到了美国生物降解塑料协会的要求; 改性后的二氧化碳基塑料薄膜达到高密度聚乙烯薄膜的水平, 并通过了美国 BPI 认证, 为二氧化碳基塑料的产业化提供了切实可行的系统技术。该项目研究期间, 申报国际专利 3 项, 国内发明专利 17 项, 授权国内发明专利 2 项。

2009 年该所与中海油合作建成年产 3 000 t 二氧化碳共聚物现代化生产线, 2011 年 12 月与浙江台州邦丰塑料有限公司合作建成了万吨级二氧化碳基塑料生产线, 于今年 5 月 15 日完成运转试验, 并完成了 3 万 t/a 生产线工艺包的设计, 为我国建立具有世界竞争力的生物降解二氧化碳基塑料产业奠定了技术基础。(慧聪网)

全球基础化学品需求将大幅萎缩

美国化工理事会(ACC)不久前发布的 2012 年度中期

预测报告中, 再次下调了全球化工业增速预期。ACC 称, 欧洲经济衰退迟迟难以好转, 加上世界第二大经济体中国经济增长明显放缓, 将影响全球 GDP 增长率。受此影响, 今年全球基础化学品的需求将大幅萎缩, 但特种和专用化学品仍将需求强劲; 化学品总产量虽会继续增加, 但增速预期被下调。

ACC 预计, 今年化学品需求情况分化将更加严重。受欧洲经济持续衰退影响, 主要下游终端市场, 特别是建筑业和电子业增长乏力, 对大宗化学品需求明显减弱。制造业遇冷, 直接导致今年全球基础化学品需求大幅萎缩。高成本遭遇低需求, 也将使化工企业, 尤其是杜邦、陶氏等超大型化工企业的运营环境更加严峻。不过与生活密切相关的消费类产品、农用化学品以及特种化学品等受经济大环境影响相对较小, 2012 年的需求仍会强劲增长。

不过, ACC 表示, 虽然世界经济不景气, 但能源价格降低会使消费者的支出温和增长。全球化学品产量仍将继续增长, 预计 2012 年、2013 年、2014 年增速将达到 2.3%、4.3%、4.7%。新兴地区化学品产量增速将超过发达地区产量增速, 亚太地区(特别是印度)、非洲、中东和拉美都将强劲增长。中国也将继续增长, 但会比过去 10 年增速有所放慢。

报告显示, 美国化学品产量约占全世界的 19%。由于欧洲经济衰退致使其对美国产品的需求减弱, 将导致美国化工行业增速放缓。由此推测, 美国 2012 年化学品产量预计将增长 0.5%, 2013 年增速可能为 2.3%。其中, 基础化学品产量 2012 年将增长 1.1%, 2013 年将增长 2.2%; 特种化学品产量 2012 年和 2013 年将分别增长 5.1% 和 3%。丰富的页岩天然气和液化天然气优势使得美国石化产品仍然保持竞争地位。

ACC 预计, 未来几年新兴市场需求反弹增长以及欧洲走出经济危机, 将有助于化工产业恢复增长。但由于经济继续呈缓慢复苏状态, 化工行业仍然会存在贸易、税收以及其他政策的风险。(中化网)