

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.01.002

2D C/C-SiC 复合材料钻削加工试验研究

刘琼¹, 黄国钦²

(1. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118;
2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用硬质合金麻花钻对二维正交编织结构碳纤维增强陶瓷基复合材料(2D C/C-SiC)进行了钻削试验研究。通过分析钻削的过程,研究了钻削加工参数对钻削轴向力、力矩以及孔加工质量的影响规律。结果表明:钻削加工参数对钻削轴向力及力矩影响很大,轴向力和力矩随着进给速度的增大逐渐增大,随着钻头转速的增加而减小。所以,采用较小的进给速度和较大的转速可以提高孔的加工质量。

关键词: 硬质合金麻花钻; 碳纤维复合材料; 钻削; 钻削轴向力

中图分类号: TH161

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)01-0007-06

Experimental study on drilling processing of 2D C/C-SiC composites

LIU Qiong¹, HUANG Guoqin²

(1. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Carbide twist drill was used to drill two-dimensional orthogonal braided carbon fiber reinforced ceramic matrix composites (2D C/C-SiC). By analyzing the drilling process, the influence of drilling parameters on the drilling axial force and torque as well as the hole processing quality were studied. Results show that the drilling parameters have a great influence on the drilling axial force and torque. The axial force and torque gradually increase with the increase of feed, and decrease with the increase of bit speed. The processing quality of holes can be improved by using a smaller feed and a larger rotational speed.

Keywords: carbide twist drill; carbon fiber composites; drilling; drilling axial force

2D C/C-SiC 复合材料是一种新型的耐高温结构材料和功能材料^[1-4],大量应用于航空航天城的光机械结构系统和车辆的制动设备等领域^[5-7]。它以碳、碳化硅为基体,碳纤维为增强材料,其碳纤维有效地改善了陶瓷基体(SiC)的脆性断裂形态,抑制了裂纹在陶瓷基体中的传播和扩展,从而大大提高了材料的整体韧性。2D C/C-SiC 复合材料通常是采用近净成型法制备,但有时因尺寸或装配要求,还需要进行二次加工。常

用的加工方法主要是磨削和钻孔。但因 2D C/C-SiC 复合材料具有各向异性的特点,在钻孔过程中容易产生毛刺、分层和撕裂等缺陷,影响孔的质量。因此,切削过程的分层和撕裂是碳纤维复合材料钻削加工面临的主要问题。

目前国内外对碳纤维增强树脂基的复合材料研究比较多,有关 2D C/C-SiC 复合材料二次加工方面的研究还比较少,特别是加工工艺方面的研究尚处于起步阶段,大部分都是采用一些特种加

收稿日期: 2018-11-24

基金项目: 福建省经信委企业技术创新项目(GY-Z15085);中央引导地方科技发展专项(2018L3001);福建省科技计划项目(2015H0001)

第一作者简介: 刘琼(1976-),女,安徽安庆人,副教授,博士,研究方向:高效精密加工和脆性材料加工技术。

工方法及特质的加工工具来进行研究。国内冯平法^[8]等人研究了 C/SiC 复合材料旋转超声加工中钻削撕裂缺陷,试验发现撕裂缺陷与钻削轴向力具有正相关关系。张国栋、邓建新^[9-10]等人采用金刚石套料钻对单向编织的 C/C-SiC 复合材料的钻削加工进行了研究,试验证明采用支撑石墨板钻孔比无支撑石墨板更能够提高钻孔的表面完整性,轴向力随着切削速度的降低和进给速度的增加而增加;通过提高主轴转速和降低进给速度可以减少分层因素、提高钻孔质量。本试验在前人研究的基础上,采用硬质合金麻花钻这种传统的加工工具研究二维编织的 C/C-SiC 复合材料在不同参数条件下的钻削试验,研究钻削参数对孔加工质量的影响,对这种材料的实际钻削加工及加工机理研究方面具有一定的指导意义。

1 试验条件

1.1 试验材料

试验所用的材料为二维正交编织结构的 C/C-SiC 复合材料,结构如图 1 所示。碳纤维在 0°和 90°方向交织和重叠。材料的主要成分是碳纤维、碳化硅基体和热解碳(PhC)界面。受制备工艺的影响,纤维与纤维或纤维与基体之间会产生空隙。试验前,采用电镀金刚石锯片将碳纤维复合材料板切割成长度为 100 mm× 100 mm 的正方形。

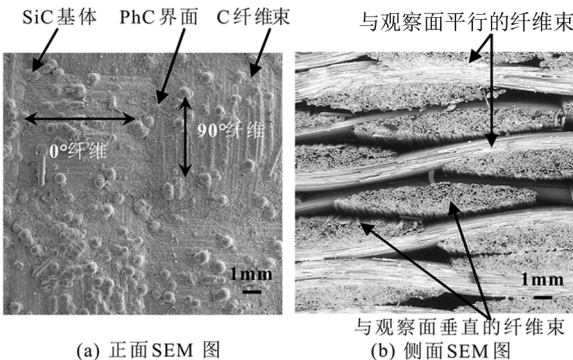


图 1 2D C/C-SiC 复合材料 SEM 形貌图

Fig.1 SEM micrographs of the 2D C/C-SiC composites

1.2 试验设备

试验过程均采用干式钻削。钻削试验是在立式加工中心(型号为德国生产的哈斯 OM2)上进行。机床主要技术参数为:主轴最高转速 30000 r/min,最高进给速度 19.2 m/min。工作台尺寸为

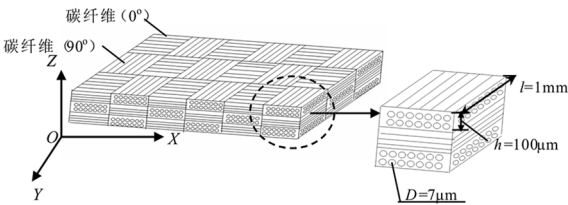


图 2 2D C/C-SiC 复合材料结构示意图

Fig.2 Structural diagram of the 2D C/C-SiC composites

508 mm×254 mm, X、Y、Z 向的行程分别为 203、254、305 mm。试验装置及试验测试系统原理图如图 3 和图 4 所示。该机床在钻孔过程中,必须设置有专用的夹具和测力仪。其中,测力仪的中心是空的。在进给过程中将钻头的轴向与测力仪中心对准,以确保钻削力和力矩数据测定的准确性。在工件的上方设有压块以便于装夹。试验中钻削力及力矩大小均为重复测量三次取平均值获得。

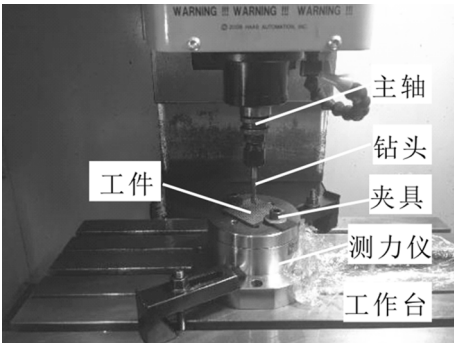


图 3 钻孔试验装置

Fig.3 Testing device for drilling

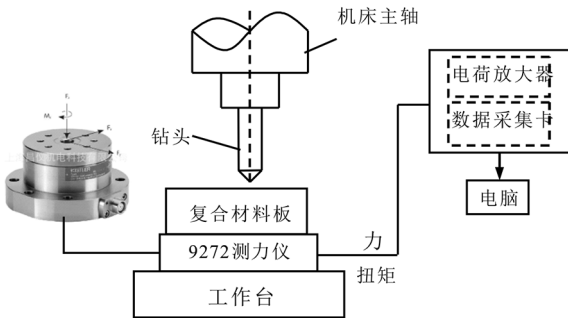


图 4 试验测试系统原理

Fig.4 Principle of test system

1.3 试验刀具及参数

试验所用的硬质合金麻花钻刀具直径为 6mm,材料为 YG6X 硬质合金。麻花钻结构如图

5 所示。



图 5 硬质合金麻花钻结构图

Fig.5 Structure diagram of cemented carbide twist drill

根据前期学者对钻削碳纤维复合材料的研究得知,在钻削过程中,主轴转速 n 和切削进给速度 f 是影响钻削轴向力和扭矩的重要参数,而且进给量的影响作用远超过主轴转速^[11]。所以,试验中设定参数时,对主轴转速的设定值浮动量较大,进给量浮动较小,以期更有效反映主轴转速和进给量对钻削力的影响作用。试验参数见表 1 所示。

表 1 试验参数表					
Tab.1 Test parameters					
序号	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$	序号	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$
1	1 000	10	9	5 000	10
2	1 000	20	10	5 000	20
3	1 000	30	11	5 000	30
4	1 000	40	12	5 000	40
5	3 000	10	13	7 000	10
6	3 000	20	14	7 000	20
7	3 000	30	15	7 000	30
8	3 000	40	16	7 000	40

2 结果与分析

2.1 钻削力和力矩分析

图 6 是利用测力仪测得的钻削轴向力和力矩在一个钻孔周期内的变化曲线。在钻削过程中,轴向力和扭矩是反映钻削过程稳定性的重要标志,对最终形成的钻孔形状和孔壁表面加工质量具有重要影响,因此对这两个指标进行综合分析是必要的。

从图 6 可以看出,钻头从最初接触到工件并开始逐渐切入时,钻削轴向力和力矩开始增加。当进入材料内部切削并进入稳定钻削状态的时候,轴向力达到最大值。由于材料试样厚度较薄,最大轴向力和扭矩持续时间较短。当钻头接触到

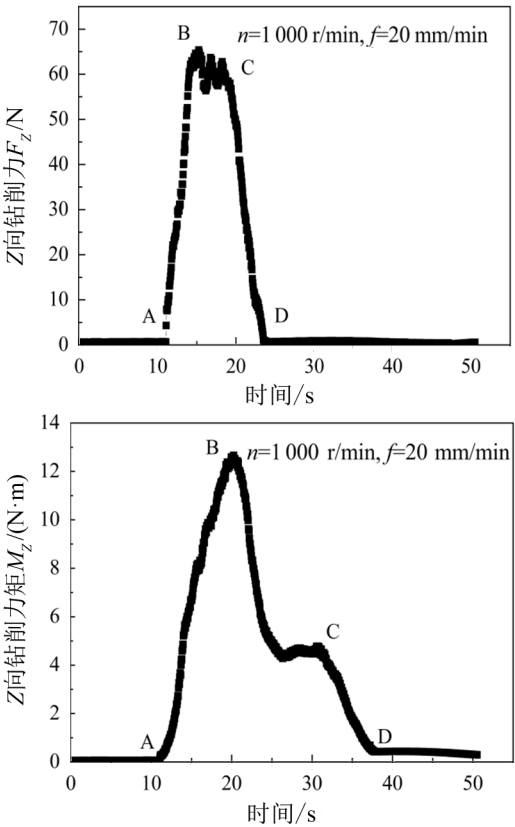


图 6 钻削过程中轴向钻削力和力矩变化曲线

Fig.6 Variation curves of axial drilling force and torque in the drilling process

材料底部并从材料底部钻出时,轴向力和扭矩迅速降低为零。在整个钻削过程中,轴向力和扭矩分别经历了图中所示的 A-B、B-C、C-D 3 个阶段。如图 6 所示,4 个轴向力突变点分别对应如图 7 所示的(a) (b) (c) (d) 钻头工作时的 4 个典型阶段,综合这几个阶段可以比较清楚地了解钻孔过程中的力学变化规律。

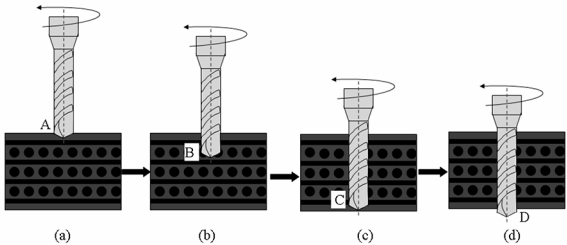


图 7 轴向力变化与钻头位置的关系

Fig.7 Relationship between the change of axial force and bit position

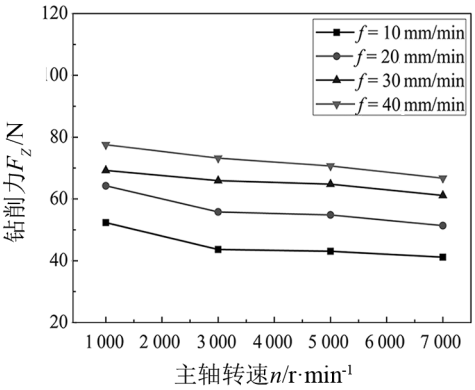
A—B 阶段: 钻头上的横刃开始接触到 2D C/

C-SiC 材料,直到主切削刃全部参与切削。

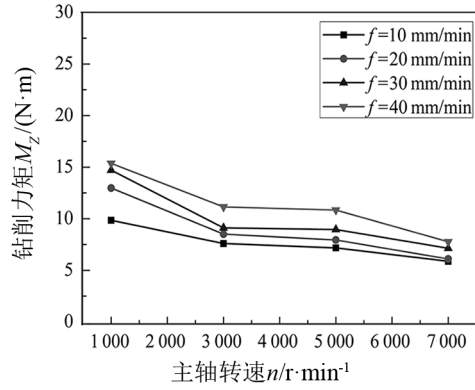
B—C 阶段:全部切削刃参与材料去除。在进给方向上,切削方向与碳纤维轴向夹角周期变化,轴向力最大值波动较小,显示为平稳切削。即将穿透时,横刃到达孔底,待切削层变薄,轴向力迅速下降。

C—D 阶段:此时刀具抵达孔的底部,主切削刃全部伸出孔外。同样地,由于碳纤维材料的高强度特性,以及 2D C/C-SiC 复合材料层间的结合强度较低的特点,材料在 C 点处受到向下方向的挤压作用逐渐被撕裂。随着刀具的进给,底部的碳纤维材料在主切削刃的切断、挤压作用下,在孔出口侧出现材料分层、层间撕裂、表面毛边等状态。刀具切出后,切削接触面积逐渐减小。当完全钻出这种复合材料的最底层时,轴向力和力矩均降至零。

图 8 显示了硬质合金麻花钻头钻削 2D C/C-SiC 复合材料时,钻削力和力矩与进给速度和主



(a) 钻削力



(b) 钻削力矩

图 8 钻削力和力矩变化曲线

Fig.8 Variation curves for drilling force and drilling torque

轴转速的关系。从图 8 可以看出,当钻头转速一定时,钻削力和力矩随着进给速度 f 的增加相应增大。其主要原因是随着进给速度的增加,每转纵向切削深度相应增加,从而使得钻削轴向力必然增加。在进给速度 f 一定时,钻削力和力矩随着转速 n 的增加略有下降。其主要原因是随着转速的增加,每转切削厚度减小,使得钻头后刀面的摩擦力减小,导致钻削轴向力和力矩变小。

2.2 工艺参数对孔进出口形貌的影响

在钻削加工碳纤维复合材料时,孔的进出口是最容易产生加工缺陷的部位。缺陷主要有崩边、毛刺和撕裂等。

2.2.1 孔进出口缺陷产生的原因

图 9 显示了孔的进口和出口形状。从图 9 可以看出,在孔的进口边缘处光滑平整,几乎没有缺陷产生。然而,孔的出口处具有明显的被刀具啃边造成的撕裂和边缘塌陷的缺陷。这主要是由于若保持大的钻削力不减,钻头上的切削刃在接触到复合材料底部时,底层材料在大的钻削力的推挤下抵抗能力降低造成碳纤维的撕扯,从而出现撕裂和毛刺。

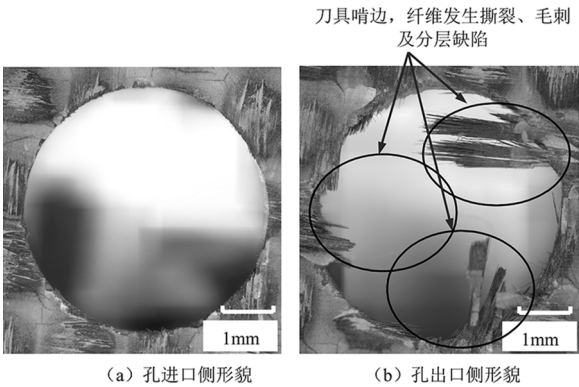


图 9 孔进出口侧形貌 ($n = 5\,000 \text{ r/min}$, $f = 20 \text{ mm/min}$)

Fig.9 Morphology of hole entrance and exit ($n = 5\,000 \text{ r/min}$, $f = 20 \text{ mm/min}$)

通过对孔入口、出口以及孔壁表面质量的观测,材料在钻削加工时由于自身的特点、纤维自身的强度以及纤维层之间的结合强度的相同,在纤维与切削刃角度不同时,均表现出不同的性能。从而导致孔成型后在入口和出口处存在撕裂、毛刺等缺陷,在孔壁上存在纤维拔出、微裂纹等缺陷,在接近出口处可能存在分层缺陷,如图 10 所示。碳纤维复合材料的孔壁表面微观形态和出入

口加工缺陷是孔加工质量的重要特征之一,碳纤维与基体材料间的性质差异相差较大,在外力下发生破损的机理不一样,因而碳纤维复合材料孔壁表面比较粗糙,难以形成像金属切削情况下产生的光滑表面。

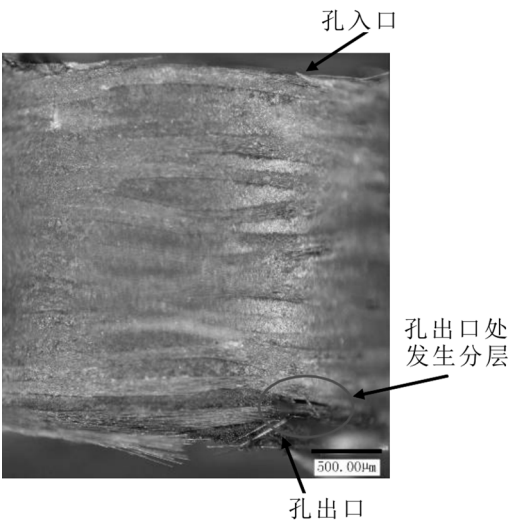


图 10 孔壁形貌图 ($n=3\,000\text{ r/min}$, $f=20\text{ mm/min}$)
Fig.10 Morphology of hole wall
($n=3\,000\text{ r/min}$, $f=20\text{ mm/min}$)

2.2.2 孔的表面质量与钻削参数的关系

图 11、图 12 为不同工艺参数下在超景深显微镜下观察到孔的进出口形貌。在相同的工艺参数下,孔的进出口形貌也不相同。孔进口处加工质量较好,碳纤维出现撕裂和毛刺比较少。但在出口处,均出现了不同程度的碳纤维和基体的撕裂以及碳纤维毛刺,撕裂的方向与钻头旋转方向一致。在相同的钻削参数下,孔进口侧表面质量明显比出口侧表面质量好。这主要与纤维的去除机制有关。在孔的进口侧,碳纤维的去除方式主要是剥离,在出口侧则是以推出的方式去除为主。由于刀具对碳纤维的推出导致的分层程度比剥离时要更加严重,从而出现宏观形貌较粗糙。

从图 11、图 12 可以看出,工艺参数对孔的进出口形貌具有一定的影响。孔的进出口形貌在不同工艺参数下呈现出不同的撕裂程度。在较高的主轴转速和较低的进给速度下,孔的进出口侧表面损伤较低,孔表面质量较好。随着主轴转速的提高,孔的出口处撕裂和毛刺缺陷相应减少。原因在于钻削力的变化情况,随着转速的提高,钻削力下降,钻头在出口处作用力降低,撕裂和分层缺陷相应减少。

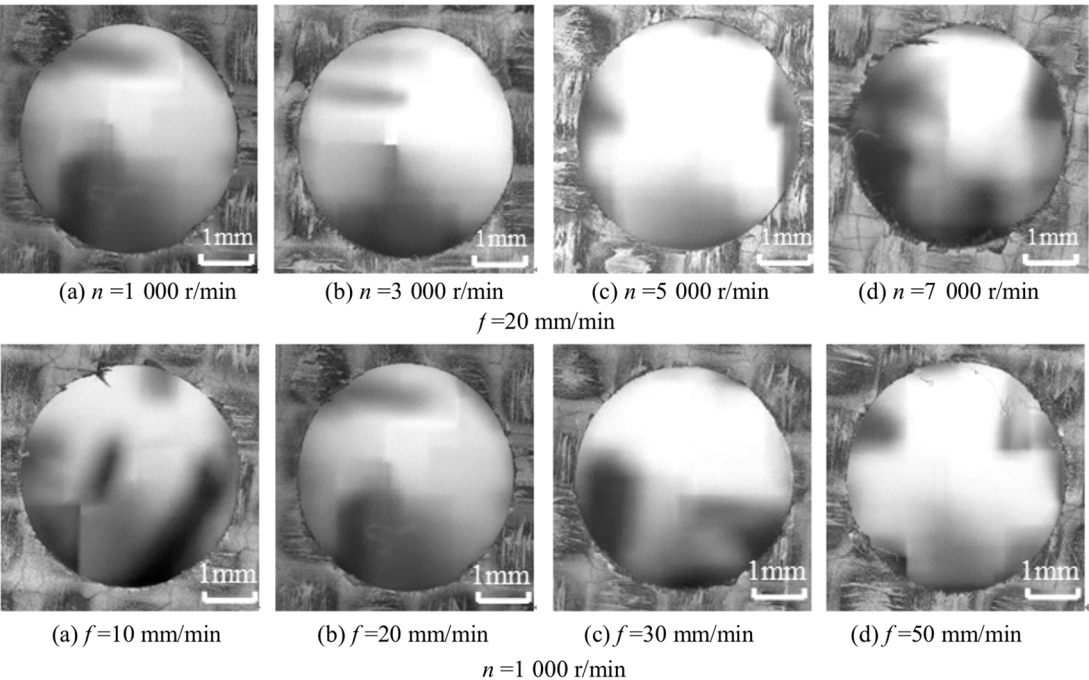


图 11 孔进口处表面形貌
Fig.11 Surface morphology at the entrance of hole

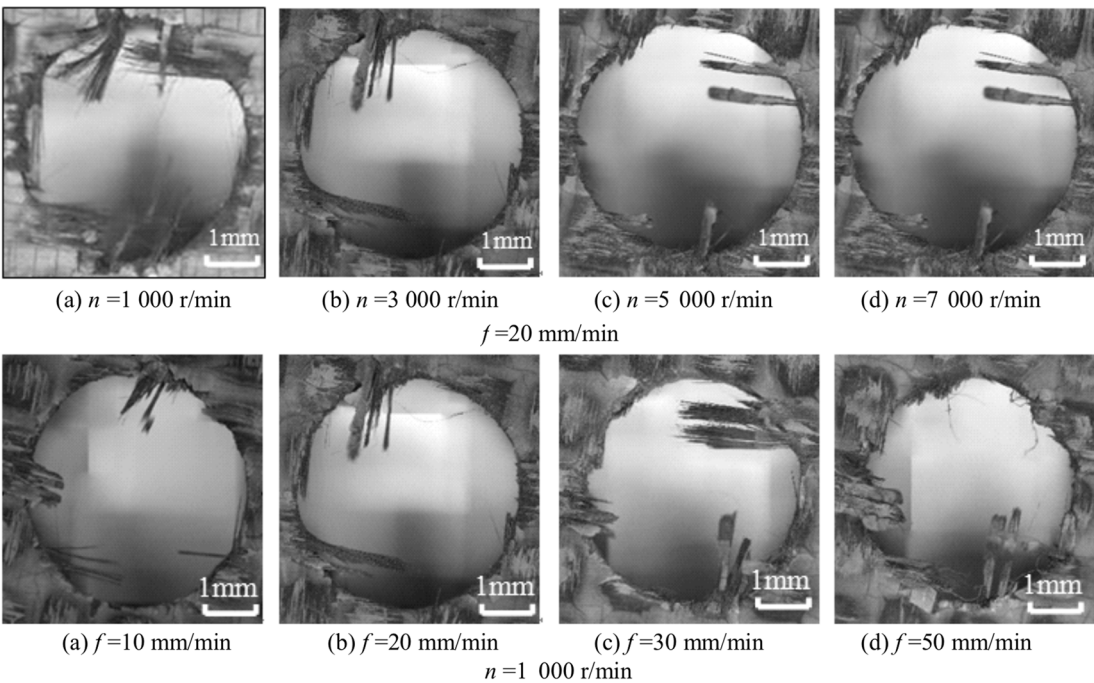


图 12 孔出口处表面形貌
Fig.12 Surface morphology at the exit of hole

当钻头上钻唇起初接触到工件时,切削力沿圆周方向逐渐产生作用,不断对碳纤维进行剥离,使得在孔入口处产生材料脱落。当钻头接近出口时,由于未加工层厚度变小,变形抗力大幅下降,已经不足以承受材料的不断挤出,使得出口处的损伤比入口处要严重得多。

3 结语

通过对二维编织的碳纤维增强陶瓷基复合材料钻削力和力矩的测定和分析,研究孔出入口表

面形貌,得出如下结论,为实际生产提供一定的指导意义。

- 1) 钻削 2DC/C-SiC 复合材料时,钻削参数对钻削力和力矩大小有一定的影响。进给速度一定时,钻头转速的增加使得钻削力和力矩略有降低。
- 2) 孔的进出口表面质量受工艺参数的影响较大。提高转速和降低进给速度可以在一定程度上提高孔加工质量,通常进口孔质量优于出口孔质量。

参考文献:

[1] HOCHENG H, TAI N H, LIU C S. Assessment of ultrasonic drilling of C/SiC composite material[J]. Composites: Part A. 2000, 2(31): 133-142.

[2] LIU Y, WANG J, LI W, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-holes drilling in SiC/SiC composites by picosecond laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 84(9/10/11/12): 1917-1925.

[3] 丁凯,傅玉灿,苏宏华,等. C/SiC 复合材料组织对磨削力与加工表面质量的影响[J]. 中国机械工程, 2013, 14(24): 1886-1890.

[4] 刘琼,黄国钦,徐西鹏. 2D-C/SiC 复合材料磨削加工表面形成机制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 1-6.

[5] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B. Intermittent grinding of ceramic matrix composites(CMCs) utilizing a developed segmented wheel [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2011, 51(2): 112-119.

[6] 杨进,李鹏南,唐思文,等. 金刚石涂层钻头钻削碳纤维增强复合材料的工艺[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(5): 119-124.

(下转第 16 页)

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.01.003

碳化再生细骨料对再生混凝土抗压强度的影响

丁进炜

(吉安市城市建设投资开发公司,江西 吉安 343000)

摘要:在再生粗骨料取代率为 70%的基础上,研究经碳化强化处理的再生细骨料对再生混凝土基本力学性能的影响规律。并与未碳化再生细骨料的情况进行对比,再生细骨料的取代率为 0、20%、30%、40%。实验结果表明:再生混凝土抗压强度随再生细骨料取代率提高而减小,碳化再生细骨料可提高再生混凝土抗压强度。

关键词:再生细骨料;再生混凝土;取代率;抗压强度;碳化

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)01-0013-04

Effects of the replacement ratio of carbonized recycled fine aggregate on the compressive strength of recycled concrete

DING Jinwei

(Ji'an City Construction Investment and Development Company, Ji'an 343000, China)

Abstract: Based on the replacement rate of recycled coarse aggregate which was 70%, the effects of recycled fine aggregate treated by carbonization on the basic mechanical properties of recycled concrete were studied. The replacement rate of recycled fine aggregate was 0, 20%, 30%, 40%, and the condition of fine aggregate was compared with that of non-carbonated recycled fine aggregate. Experimental results show that the compressive strength of recycled concrete decreases with the increase of the replacement rate of recycled fine aggregate, and the carbonated recycled fine aggregate can improve the compressive strength of recycled concrete.

Keywords: recycled fine aggregate; recycled concrete; replacement ratio; compressive strength; carbonization

将废弃建筑垃圾通过机械破碎、筛选分级等处理办法回收可利用的废弃混凝土制作成再生混凝土,不仅可以节约大量的处理成本,而且还可以降低废弃建筑垃圾的随意排放,进而缓解废弃混凝土对自然环境造成多重影响。现阶段实际工程中已广泛运用再生粗骨料混凝土,相比较而言,再生细骨料混凝土技术仍处于探索阶段,缺乏相应的试验数据给再生细骨料混凝土运用提供依据。肖建庄等^[1]研究了再生细骨料取代率(0~100%)对再生混凝土抗压强度的影响规律,得出可以用正态分布模型描述再生混凝土抗压强度的概率分布;张亚飞等^[2]研究了再生细骨料取代率对不同龄期的再生混凝土抗压强度性能的影响。本文分

别取再生细骨料取代率为 0、20%、30%、40%,研究经碳化强化处理的再生细骨料对再生混凝土力学性能的影响规律,并与未碳化再生细骨料的情况进行对比。

1 原材料

1.1 水泥

试验所用水泥为 42.5 普通硅酸盐水泥。

1.2 水

自来水。

1.3 减水剂

试验所用减水剂为聚羧酸高效减水剂 TW-JS。

收稿日期: 2018-10-18

作者简介: 丁进炜(1992-),男,江西抚州人,助理工程师,硕士,研究方向:高强与高性能混凝土。

1.4 天然粗骨料

试验所用天然粗骨料为粒径 20~40 mm 花岗岩,各项性能指标符合规范。

1.5 再生粗骨料

试验所用再生粗骨料是福建省三明尤溪路段 2012 年进行路面工程改造时所产生的废弃混凝土,然后经过砂石骨料加工厂进行机械破碎、筛选分级后得到,骨料粒径为 5~20 mm。

1.6 天然细骨料

试验所用天然细骨料是福州闽江细砂,细度模数为 2.14,表观密度为 2 719 kg/m³。筛分试验见表 1。

1.7 再生细骨料

试验所用再生细骨料细度模数为 3.4,表观密度为 2 518 kg/m³。筛分试验见表 1。

表 1 细骨料颗粒级配
Tab.1 Fine aggregate particle grading %

材料	筛孔尺寸/mm							筛底
	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
再生细骨料	1.1	27.4	49.9	73.4	92.9	97.1	99.9	100
天然细骨料	0	0.9	3.7	23.0	87.9	97.8	99.2	100

2 试验设计

2.1 碳化再生细骨料

碳化试验按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》^[3]进行,实验选 CABR-HTX12 型碳化箱,在碳化箱中控制 CO₂ 的浓度在 17%~23%,湿度控制在 65%~75%,温度控制在(15~

25)℃,碳化时间为 7 d。

2.2 再生细骨料混凝土配合比

表 2 为再生细骨料混凝土配合比。在试验过程中,将另一部分再生细骨料进行 7 d 碳化强化处理,并和未碳化再生细骨料的情况作对比,具体配合比见表 3。

表 2 再生细骨料混凝土配合比
Tab.2 Mix ratio of recycled fine aggregate concrete

编号	水泥/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	天然粗骨料/ (kg·m ⁻³)	再生粗骨料/ (kg·m ⁻³)	再生细骨料/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ %	坍落度/ mm
RC-70-0	450	180	669	327	764	0	0.70	170
RC-70-20	450	180	535	327	764	134	0.80	168
RC-70-30	450	180	468	327	764	201	0.88	165
RC-70-40	450	180	401	327	764	268	0.97	165

注:RC-70-20 中 RC—再生混凝土;70—再生粗骨料对天然粗骨料的取代率;20—再生细骨料对砂的取代率。其他以此类推。

表 3 碳化再生细骨料混凝土配合比
Tab.3 Mix ratio of carbonated recycled fine aggregate concrete

编号	水泥/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	天然粗骨料/ (kg·m ⁻³)	再生粗骨料/ (kg·m ⁻³)	再生细骨料/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ %	坍落度/ mm
RC-70-0-C	450	180	669	327	764	0	0.70	175
RC-70-20-C	450	180	535	327	764	134	0.75	170
RC-70-30-C	450	180	468	327	764	201	0.83	168
RC-70-40-C	450	180	401	327	764	268	0.92	167

注:RC-70-20-C 中,C—碳化强化处理。

3 再生混凝土立方体抗压强度

按照试验所设计的配合比拌制再生混凝土，并成型养护 28 d。依据 GB/T50081-2002^[4]，采用 YAW4306 微机控制电液伺服压力试验机对 150 mm×150 mm×150 mm 立方体标准试件进行抗压强度测试。

3.1 掺再生细骨料的再生混凝土抗压强度

再生细骨料混凝土 28 d 实测抗压强度见表 4。

表 4 再生细骨料混凝土 28 d 抗压强度

Tab.4 28 d compressive strength of recycled fine aggregate concrete		
序号	试件编号	抗压强度/MPa
1	RC-70-0	44.3
2	RC-70-20	42.4
3	RC-70-30	40.9
4	RC-70-40	38.7

从表 4 可以看出,随着再生细骨料掺量的增加,试件成型养护后测出的立方体抗压强度逐渐下降。当未碳化再生细骨料掺量达到 40%时,试件抗压强度与再生细骨料掺量为 0%时相比降低了 12.6%,和天然细骨料相比,再生细骨料的强度更低,并且再生细骨料经过机械破碎后,颗粒不规则,附着一定量的水泥石,表面不平整,整体品质较差,因此当混凝土试件成型养护后测出的抗压强度会有很大变化。

3.2 碳化再生细骨料混凝土抗压强度

碳化再生细骨料混凝土 28 d 实测抗压强度见表 5。

从表 5 可以看出,当再生细骨料经过 7d 的标准碳化后,随着再生细骨料掺量的增加,试件抗压强度逐步降低,但降低幅度和未碳化的再生细骨料混凝土相比要明显更小,当碳化强化处理的再生细骨料取代率为 40%时,强度降低了 8.6%,相比未碳化的再生细骨料,试件抗压强度增加了

4.7%;取代率为 20%和 30%时,碳化强化处理后的再生细骨料混凝土强度比未碳化的再生细骨料混凝土强度分别提高了 4.2%和 4.6%。经碳化强化处理后,再生骨料表观密度增大,再生骨料的吸水率、压碎值均有一定程度的减小。其次,二氧化碳与水泥浆中的主要成分水化硅酸钙、氢氧化钙均能发生碳化反应,生成的产物碳酸钙、硅胶等使得其固相体积增大,进而造成再生骨料附着水泥浆体的密实度提高,吸水率减小,使得搅拌混凝土时所需要的拌合水更少,生成了更多的氢氧化钙和水化硅酸钙凝胶,导致其强度更高。

表 5 碳化再生细骨料混凝土 28 d 抗压强度

Tab.5 28 d compressive strength of carbonized recycled fine aggregate concrete		
序号	试件编号	抗压强度/MPa
1	RC-70-0-C	44.3
2	RC-70-20-C	44.2
3	RC-70-30-C	42.8
4	RC-70-40-C	40.5

4 结论与展望

1) 在再生粗骨料取代率为 70%的基础上,再生混凝土的抗压强度随再生细骨料取代率的提高而降低。当未碳化再生细骨料取代率为 40%时,再生细骨料混凝土抗压强度较基准混凝土强度降低了 12.6%;当碳化再生细骨料取代率为 40%时,再生细骨料混凝土抗压强度较基准混凝土强度降低了 8.6%,碳化再生细骨料可适当提高再生混凝土抗压强度。

2) 对再生细骨料的开发利用,可以促进建筑废弃物的循环再生利用,符合我国的可持续发展战略要求。同时,将废弃建筑垃圾回收利用作为可再生资源应用在建筑材料生产中,对我国的经济、环境、社会将产生良好的效益。

参考文献:

[1] 肖建庄, 范玉辉, 林壮斌. 再生细骨料混凝土抗压强度试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 26-29.
[2] 张亚飞, 安新正, 牛薇, 等. 再生细骨料对再生骨料混凝土抗压性能影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学

版), 2018, 35(2): 71-74.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[4] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

(责任编辑: 陈雯)

(上接第 12 页)

[7] MEI H, WANG H, DING H, et al. Strength and toughness improvement in a C/SiC composite reinforced with slurry-prone SiC whiskers [J]. *Ceramics International*, 2014, 9(40): 14099-14104.

[8] FENG P F, WANG J J, ZHANG J F, et al. Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(1): 791-799.

[9] 张国栋, 邓建新, 张克栋, 等. C/C-SiC 复合材料钻削加工工艺研究[J]. *工具技术*, 2014, 48(9): 12-16.

[10] XING Y Q, DENG J X, ZHANG G D, et al. Assessment in drilling of C/C-SiC composites using brazed diamond drills [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 31-43.

[11] TSAO C C. Effect of pilot hole on thrust force by saw drill[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(14): 2172-2176.

(责任编辑: 方素华)