

GFRP 筋锚固及抗拉强度试验研究

王延诚 高雁莉 李小倩 崔明慧
山东科技大学, 山东 青岛 266590

[摘要] GFRP 材料因其所具有的诸多技术优势和材料特性在锚固工程中被广泛运用。在 GFRP 抗拉强度试验中, 采用六种不同长度的 GFRP 锚杆, 用套筒粘结式锚具进行拉拔试验, 测定 GFRP 锚杆长度对其抗拉性能的影响。得出以下主要结论: (1) 试件从开始加载至达到极限荷载的整个过程是弹性变形, 达到极限荷载后, 试件发生断裂, 是一种脆性破坏。(2) 采用钢筋套筒粘结型锚具并浇灌植筋胶能够使 GFRP 筋达到极限抗拉强度, 此锚固方式是行之有效的锚固方式。(3) 在相同的锚固长度下, GFRP 锚杆的极限抗拉强度随着长度的增加而增大, 破坏时的位移随试件长度的增大而逐渐增大, 但增大的速率逐渐变缓。

[关键词] FRP; GFRP 锚杆; 试件长度; 抗拉强度; 锚固强度

DOI: 10.33142/aem.v1i4.1016

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Experimental Study on Anchorage and Tensile Strength of GFRP Bars

WANY Yancheng, GAO Yanli, LI Xiaoqian, CUI Minghui

Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong, 266590, China

Abstract: GFRP material is widely used in anchorage engineering because of there are many technical advantages and material characteristics. In tensile strength test of GFRP, six different lengths of GFRP bolts are used, and pull-out test is carried out with sleeve bond anchorage to determine the influence of GFRP bolt length on its tensile performance. There are conclusions as follows: (1) the whole process from beginning of loading to ultimate load is elastic deformation. After the ultimate load, specimen breaks, which is a kind of brittle failure. (2) ultimate tensile strength of GFRP Bars can be achieved by using bond type anchorage device of steel sleeve and pouring steel planting glue, which is an effective anchorage method. (3) under the same anchorage length, ultimate tensile strength of GFRP bolt is increased by increasing of length and the displacement is increased by increasing of length of specimen, but the increasing rate slows down.

Keywords: FRP; GFRP bolt; length of test piece; tensile strength; anchorage strength

1 研究背景

近年来, 钢筋混凝土锚杆支护在各个领域应用广泛, 因为它具有经济、简单、安全、易操作、工期短的优点^[1], 但是在应用中也存在着很多突出问题, 比如钢锚杆的抗腐蚀性差、防腐处理费用高、自重较大、运输和安装任务艰巨等。在一些应用领域尤其是隧道、港口、桥梁建设中, 钢筋混凝土结构会受到潮湿温度变化等侵蚀, 尽管在施工过程中采用了锚杆注浆浆液中加入防腐剂、外套波纹管等防腐措施, 但是仍无法从根本上解决钢筋锈蚀的问题。^[2]

为了避免钢锚杆受到腐蚀后强度降低易断裂的缺陷, 锚杆工程中开始采用复合材料锚杆, 主要为玻璃纤维增强聚合物 (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP), 它是由增强材料和合成树脂作为基体材料共同组成的^[3]。GFRP 具有耐腐蚀性强、抗拉强度高、质量轻、抗冲击性好、介电性能好、抗拉强度高、疲劳性能好等优点^[4]。同时, 还有力学性能较好且性价比^[5]。但是目前没有得到广泛应用, 原因主要是其横向抗压强度和抗剪能力较低, 所以不能使用传统锚固方式进行锚固。^[6-7]

对于 GFRP 的一系列问题, 许多学者做了大量试验, 发现筋材的直径、锚固长度、灌浆体特征、表面形态、荷载和温度等因素对抗压强度有一定影响,^[8-12]也有一些学者发现锚具提供的抗拔承载力十分有限, 所以针对锚具开展了研究。詹界东等人将锚具分为机械夹持式及黏结型两类。其中黏结型锚具有套管黏结式锚具^[13]和钢套筒灌胶锚固^[14]等。

套筒灌胶锚具是目前锚杆工程中应用最为广泛的黏结式锚具之一。套筒灌胶式 FRP 筋材锚固体系有如下优点: 由于有套筒的保护, 胶体安全可靠; 纤维筋被保护在粘结套筒中, 不会受到削弱; 在某些特殊的环境下可以用非金属套筒代替金属套筒, 以抵抗腐蚀。但是也有一些缺点: 施工困难; 胶体凝固时间长; 胶材不同, 锚固性能也不同; 胶材的长期性能存在缺陷; 价格高不经济^[15]。基于此, 本文使用钢套筒粘结式锚具, 对 6 种不同试件长度的 GFRP 筋锚杆进行拉拔试验, 通过试验研究 GFRP 试件长度对试件抗拉强度的影响以及通过试验的试件破坏形态和荷载位移曲线来分析锚固端强度和锚固机理。

2 试验过程

2.1 试验准备

试件制作参照《钢筋套筒灌浆连接应用技术规范》(JGJ355-201)参照已有的FRP筋混凝土实验文献,此次试验共制作6个不同长度相同直径的GFRP筋套筒粘结试件。将GFRP筋的两端插入钢套筒,其间隙用植筋胶进行填充胶结,待其胶结强度充分发挥后,6个不同长度相同直径的试件,在RRH-6010型号穿心千斤顶(如图2.1.1所示)下进行拉拔试验。此次试验为破坏试验,以测定GFRP筋试件长度对抗拉性能的影响以及GFRP筋两端锚固强度。



图 2.1.1 RRH-6010 型号穿心千斤顶

2.2 试验步骤

选取一组50cm、75cm、100cm、125cm、150cm、175cm长度,直径均为18mm的GFRP锚杆(如图2.2.1所示)并在两头用植筋胶(如图2.2.2所示)进行套筒灌胶,灌胶后放置数日等待胶体凝固,锚固端稳固后,利用液压穿心千斤顶进行拉拔实验。由于试验锚杆长度较大,实验前需提前定制一定规格的金具(如图2.2.3所示),分别为直径6cm长度50cm、直径6cm长度25cm以及直径7cm长度10cm的3个套筒和长宽分别为20cm、14cm,厚度为2cm,中间有一个孔直径为19mm的3个垫板,在拉拔实验中起到固定GFRP锚杆的作用。



图 2.2.1 GFRP 锚杆



图 2.2.2 植筋胶



图 2.2.3 金具

2.3 试验测量方法及内容

试验一为破坏试验，当 GFRP 筋被拉断或从锚固端拔出时停止试验。利用液压千斤顶对 GFRP 产生拉拔力，通过百分表记录 GFRP 锚杆的位移量。从 3Mpa 开始，液压千斤顶表盘每经过一兆帕记录一次位移量，直到试件破坏，记下最大压强和位移量，通过公式换算测出 GFRP 筋的极限抗拉强度和锚固端强度。

对长度为 50cm、75cm、100cm、125cm、150cm、175cm 的试件分别编号为 S1、S2、S3、S4、S5、S6。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

试件在液压千斤顶加压过程中，一开始并不会发出声音，偶尔会听见胶体损伤的破裂声，随着不断地按压手动液压泵，GFRP 筋受到的拉力越来越大，此时手动液压泵也越来越难按压，当听见一声巨响，液压千斤顶迅速降压后，取出试件观察发现，玻璃纤维发生离散，成放射状分离，试件断裂成为两部分，部分断裂 GFRP 筋（如图 3.1.1、3.1.2、3.1.3 所示）。



图 3.1.1 断裂的 GFRP 筋

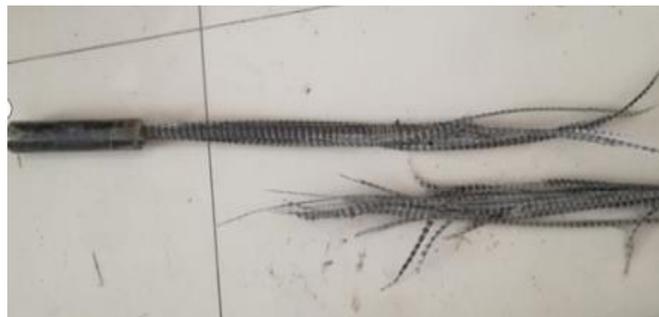


图 3.1.2 断裂的 GFRP 筋



图 3.1.3 断裂的 GFRP 筋

试验中 GFRP 筋锚杆的极限抗拉强度可按公示 3.1.1 计算：
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1.1)$$

式中： σ ——GFRP 筋锚杆的极限抗拉强度 (MPa)；

P——极限拉拔力 (N)；

0——GFRP 筋锚杆起始横截面积 (mm^2)。

试验结果汇总见表 3.1.1

表 3.1.1 拉拔试验结果汇总表

试件编号	试件长度 (cm)	试件直径 (mm)	粘结长度 (mm)	极限荷载 (KN)	极限抗拉强度 (Mpa)	破坏时试件 位移 (mm)
S1	50	18	170	115.03	452.04	15.37
S2	75	18	170	116.11	456.27	15.49
S3	100	18	170	132.23	519.64	20.34
S4	125	18	170	122.56	481.62	25.32
S5	150	18	170	125.78	494.30	27.22
S6	175	18	170	124.71	490.07	27.85

3.2 结果分析

3.2.1 破坏形态

试件破坏形式为只在试件中部位试件被拉断成两部分，而在锚杆加固端没有锚杆的拔出破坏发生，说明在套筒锚固端 GFRP 筋材与高强灌筋料的粘结力满足发挥杆体本身的极限抗拉强度的条件，型号为 GT18 型套筒粘结长度为 17cm 时，是行之有效的锚固方法。

3.2.2 锚杆的荷载-位移曲线

根据对 6 个试件全过程的实测结果，绘制出 6 张 GFRP 筋的荷载-位移曲线图（如图 3.2.1-3.2.6）

因为液压千斤顶的操作是人为控制的，GFRP 筋安装在液压千斤顶上不能实现均匀的受力，总会存在轻微的偏心荷载。另外人工读数也存在一定的误差，这就导致 GFRP 筋荷载-位移曲线存在误差。由曲线图像可以看出，GFRP 锚杆在加载初期，可以看成一条通过原点的近似斜直的线，从而试件开始加载到极限破坏的过程是弹性变形。当达到极限荷载时，GFRP 筋发生断裂，产生一种脆性破坏。

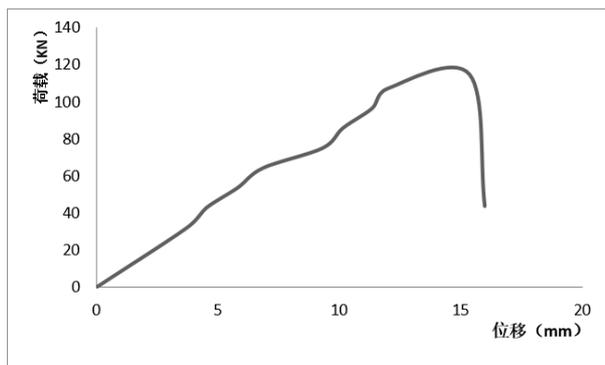


图 3.2.1 试件 S1 荷载-位移曲线

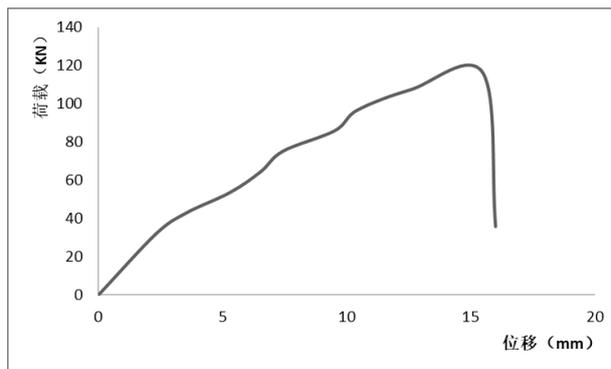


图 3.2.2 试件 S2 荷载-位移曲线

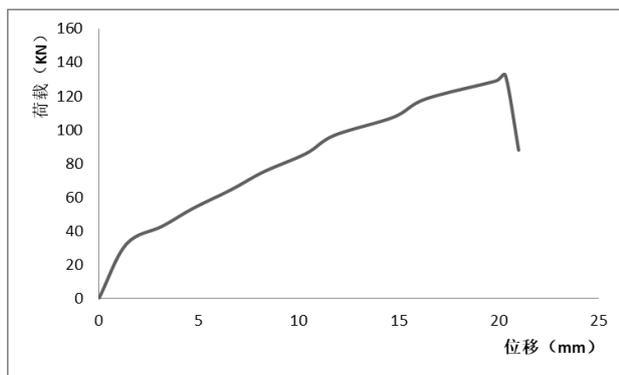


图 3.2.3 试件 S3 荷载-位移曲线

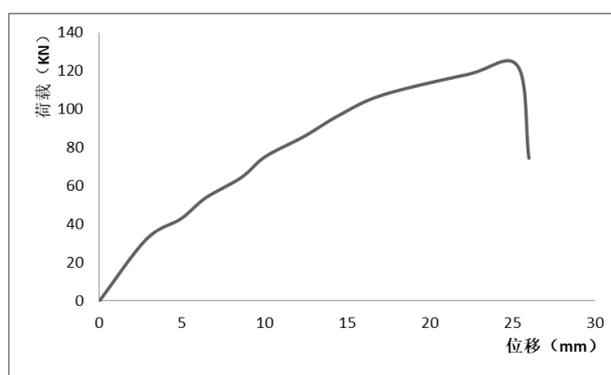


图 3.2.4 试件 S4 荷载-位移曲线

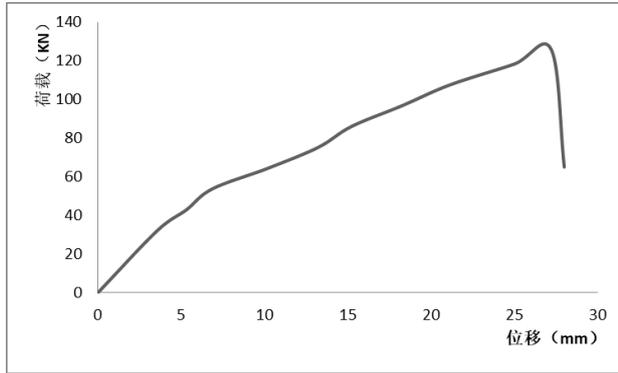


图 3.2.5 试件 S5 荷载-位移曲线

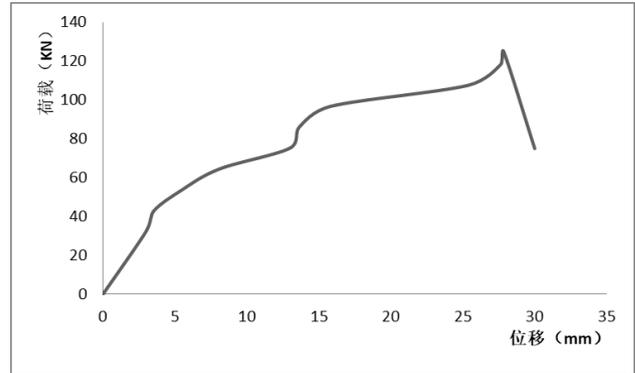


图 3.2.6 试件 S6 荷载-位移曲线

3.3 GFRP 长度与其抗拉强度关系

在 GT18 型号锚具用植筋胶粘结锚固强度均为 17 cm 的情况下，6 个直径都为 18 mm 的 GFRP 锚杆。长度为 50 cm 的 GFRP 锚杆极限抗拉强度为 452.04Mpa；长度为 75 cm 的 GFRP 锚杆极限抗拉强度为 456.27Mpa；长度为 100 cm 的 GFRP 锚杆极限抗拉强度为 519.64 Mpa；长度为 125 cm 的 GFRP 锚杆极限抗拉强度为 418.62 Mpa；长度为 150 cm 的 GFRP 锚杆极限抗拉强度为 494.30Mpa；长度为 175 cm 的 GFRP 锚杆极限抗拉强度为 490.07Mpa。依次，大致画出 GFRP 筋长度与其极限抗拉强度的关系曲线图（如图 3.3.1）。

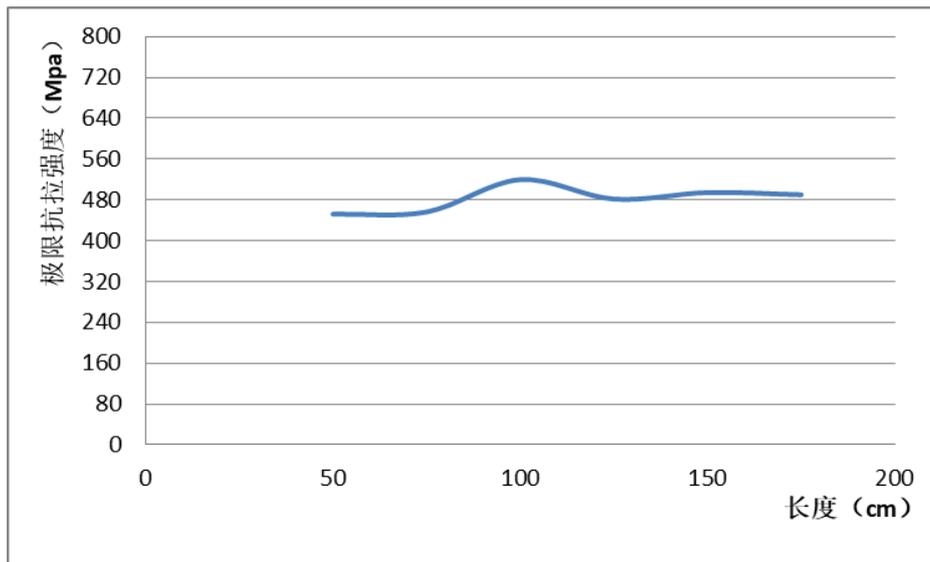


图 3.3.1 GFRP 筋长度与其极限抗拉强度关系曲线

由 GFRP 筋长度与其极限抗拉强度的关系曲线图可以看出，粘结锚固长度均为 17 cm 的情况下，呈现出一条缓慢上升，在 100cm 处出现峰值的曲线，鉴于试验中存在一定误差，笔者认为 100cm 处数据的突然起伏应该是误差所致，从而认为 GFRP 筋随着其长度的增加，其抗拉强度也缓慢增大。

3.4 GFRP 长度与锚杆破坏时位移的关系

在 GT18 型号锚具用植筋胶粘结锚固强度均为 17 cm 的情况下，6 个直径都为 18 mm 的 GFRP 锚杆。长度为 50 cm 的 GFRP 锚杆破坏时的位移为 15.37 mm；长度为 75 cm 的 GFRP 锚杆破坏时的位移为 15.49 mm；长度为 100 cm 的 GFRP 锚杆破坏时的位移为 20.34 mm；长度为 125 cm 的 GFR 锚杆破坏时的位移为 25.32 mm；长度为 150 cm 的 GFRP 锚杆破坏时的位移为 27.22 mm；长度为 175 cm 的 GFRP 锚杆破坏时的位移为 27.85 mm。依次，大致画出 GFRP 筋长度与其破坏时位移的关系曲线图（如图 3.4.1）。

由 GFRP 长度与锚杆破坏时位移的关系曲线图可以看出，粘结锚固长度均为 17cm 的情况下，GFRP 锚杆破坏时的位

移随长度的增大而逐渐增大，但增大的速率逐渐变缓。

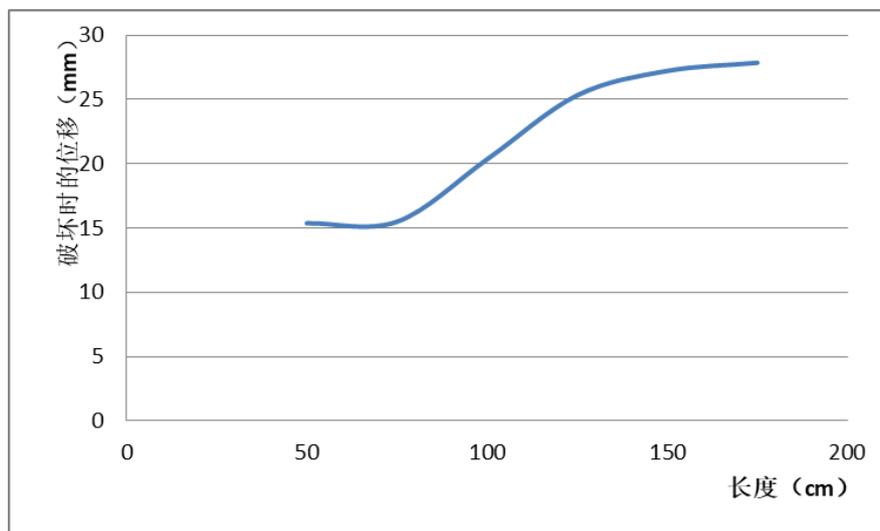


图 3.4.1 GFRP 筋长度与其破坏时位移关系曲线

4 结论

由于 GFRP 筋锚杆抗拉强度往往大于其两端锚固强度，在工程实际运用中，决定 GFRP 能否广泛运用的关键就是 GFRP 筋锚杆锚固端锚固强度。本文在拉拔试验的基础上，对 GFRP 锚固端锚固强度也做出一定的探索。观察试件的受力过程和破坏形式，测得荷载-位移曲线和粘结强度；分析了在相同直径，同一粘结强度下，不同试件长度对 GFRP 锚杆套筒粘结的锚固端的粘结性能和锚固强度，得出以下主要结论：(1) 试件从开始加载至达到极限荷载的整个过程是弹性变形，达到极限荷载后，试件发生断裂，是一种脆性破坏。(2) 采用钢筋套筒粘结型锚具并浇灌植筋胶能够使 GFRP 筋达到极限抗拉强度，此锚固方式是行之有效的锚固方式。(3) 在相同的锚固长度下，GFRP 锚杆的极限抗拉强度随着长度的增加而增大，破坏时的位移随试件长度的增大而逐渐增大，但增大的速率逐渐变缓。

[参考文献]

- [1] 杨勤. 浅谈钢筋混凝土锚杆支护挡墙防护施工工艺[J]. 科技资讯, 2007(17): 59.
 - [2] 李明, 张庆彬, 叶智威, 付书印, 梁添, 邓海军. GFRP 锚杆与常规锚杆在隧道支护中的承载力对比试验[J]. 中外公路, 2018, 38(02): 177-181.
 - [3] 薛伟辰. 纤维塑料筋混凝土研究新进展[J]. 中国科学基金, 2004(01): 12-14.
 - [4] L. Javier Malvar. Tensile and bond properties of GFRP reinforcing bars[J]. Materials Journal, 1995, 92(3): 276-285.
 - [5] 闫富有, 贾新, 袁勇. 砂浆粘结 GFRP 锚杆试验研究[J]. 工业建筑, 2004(12): 59-97.
 - [6] 詹界东, 杜修力, 邓宗才. 预应力 FRP 筋锚具的研究与发展[J]. 工业建筑, 2006(12): 65-68.
 - [7] 王洋, 冯君, 李珈瑶, 赖冰, 杨涛. FRP 锚杆在岩土锚固中的研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(03): 776-784.
 - [8] ZHANG B, BENMOKRANE B. Pullout bond properties of fiber-reinforced polymer tendons to grout[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 399-408.
 - [9] KATZ A. Bond to concrete of FRP rebars after cyclic loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(3): 137-144.
 - [10] OKELLO R. Realistic bond strength of FRP rebars in NSC from beam specimens[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2007, 20(3): 133-140.
 - [11] GOLAFSHANI E M, RAHAI A, SEBT M H. Bond behavior of steel and GFRP bars in self-compacting concrete[J]. Construction & Building Materials, 2014, 61(3): 230-240.
 - [12] VILANOVA I, BAENA M, TORRES L, et al. Experimental study of bond-slip of GFRP bars in concrete under sustained loads[J]. Composites Part B, 2015(74): 42-52.
 - [13] 王伟, 付凯. 玻璃纤维筋锚具研制及其力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010(2): 194-198.
 - [14] 李国维, 倪春, 葛万明, 等. 大直径喷砂 FRP 筋应力松弛试件锚固方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 227-234.
 - [15] 钱洋, 张继文, 涂永明. 套筒灌胶式 FRP 筋材锚固体系的试验研究[J]. 山西建筑, 2007(25): 90-92.
- 作者简介: 王延诚 (1997-), 男, 山东科技大学, 本科。