



不同结构形式丁坝水毁过程分析*

苏伟, 王平义, 喻涛, 门永强
(重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 通过水槽概化模型试验对不同坝型、坝长和挑角丁坝的水毁过程进行对比分析, 找出冲刷坑深随时间变化的规律, 观测到不同结构形式丁坝对河床冲刷地形的影响。在此基础上, 对比分析不同的坝型的试验数据, 提出具有较好稳定性的新型坝身横断面结构形式, 并且深入研究丁坝不同坝长、挑角下河床冲刷及丁坝水毁机理。

关键词: 丁坝; 水流; 结构形式; 水毁; 过程

中图分类号: U 656.35*2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0118-06

Analysis of damage process of different types of spur dikes

SU Wei, WANG Ping-yi, YU Tao, MEN Yong-qiang

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the contrast analysis through the flume model tests for the damaging process of different types of spur dikes, the length of spur dike and the pick angle of dike, we discover the temporal characteristics of scour pit depth, observe riverbed erosion topographic effects in different types of spur dikes, based on which, we compare and analyze the test data of different dam types, propose a new dam body cross-sectional structure with better stability, and probe into the mechanism of river bed scouring and dike's water damage under different dike lengths and pick angles.

Key words: spur dike; current; structural type; water damage; process

在航道整治工程中, 丁坝是最常见的建筑物之一。对于布置在沙卵石浅滩上的丁坝, 由于基础没有经过处理, 当遇到洪峰或者库流下泄时, 水流对丁坝就会产生巨大的冲击作用, 在水流的这种作用下, 丁坝就会产生不同程度的水毁^[1-2]。经过长时间的探索和研究发现, 不同结构形式的丁坝受到水流作用后产生的破坏是不同的。找到一种优良的结构形式迫在眉睫, 但是目前对这一问题的研究甚少。为了能够找到这种优良的结构形式, 就得深入了解不同结构形式丁坝的水毁过程, 对比分析不同结构形式丁坝开始破坏的时间、位置以及丁坝随时间推移破坏程度的变化,

掌握不同形式丁坝的破坏机理和相关数据, 最终确定较优的丁坝结构形式。因此, 对不同结构形式丁坝水毁过程进行研究分析非常必要。

1 模型的建立和试验工况的拟定

试验在重庆交通大学水利水运工程重庆市重点实验室航道试验厅长30 m, 宽2 m的矩形玻璃水槽中进行。进口流量由电磁流量系统控制, 尾门由翻板门结合小水阀控制水位。丁坝布置在水槽的左岸, 丁坝坝体采用散抛石坝, 丁坝横断面采用梯形断面和圆弧断面, 梯形断面迎水坡坡度为1:1.5, 背水坡坡度为1:2, 向河坡为1:5, 坡面采

收稿日期: 2012-04-30

*基金项目: 国家自然科学基金(51079165); 西部交通建设科技项目(2009328814012); 重庆交通大学省部共建水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2010B06)

作者简介: 苏伟(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学工程方面的学习研究。

用圆弧形, 坝顶顶宽为 7.5 cm, 坝高 10 cm。河床采用无护底形式, 控制水深采用 14 cm (淹没丁坝), 控制流量采用 95 L/s。

原型丁坝观测的最大冲刷深度为 6 m 左右, 平均冲刷坑深度为 4 m 左右。根据模型比尺水槽底部拟平铺试验沙平均厚 0.1 m, 丁坝周围区域铺沙厚 0.22 m, 在水槽的中部铺设了 8.0 m 长的动床段, 模型布置(图1)。根据上述各种因素的变化, 进行试验设计, 列出 5 种试验组合工况 (例如: M4——在动床试验模型中, 布置坝长为 50 cm, 挑角为 90°的梯形断面圆弧直头丁坝, 进行一次来水流量为 95 L/s, 控制水深为 14 cm 的动床冲刷试验, 其它类比见表 1。在动床冲刷试验中, 经过长时间的观察, 持续冲刷 4 h 的时候, 基本达到稳定

状态, 此时冲刷坑的深度趋于稳定, 故选定量测最大冲刷坑深度时间为 4 h。丁坝布置位置、形式及结构分别见图 2~4。

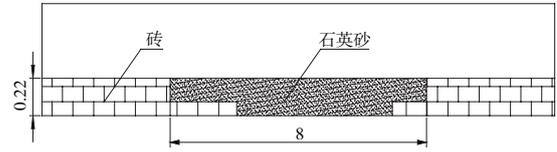


图 1 动床试验模型布置 (单位: m)

表 1 清水冲刷试验工况组合

工况	坝长/cm	挑角/(°)	坝型
M4	50	90	梯形断面圆弧直头丁坝
M5	50	90	圆弧断面圆弧直头丁坝
M9	50	90	梯形断面圆弧勾头丁坝
M10	70	90	梯形断面圆弧勾头丁坝
M12	70	120	梯形断面圆弧勾头丁坝

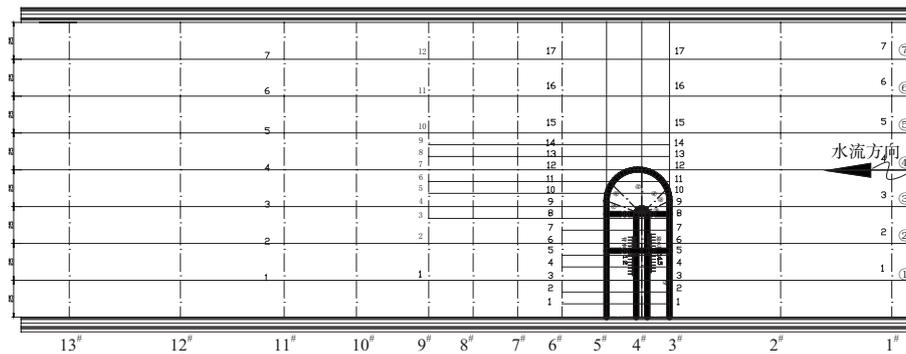


图 2 丁坝布置位置

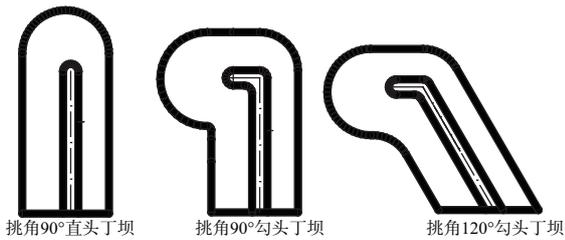


图 3 各种坝体形式

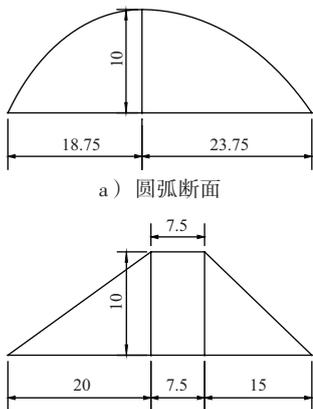


图 4 坝身横断面

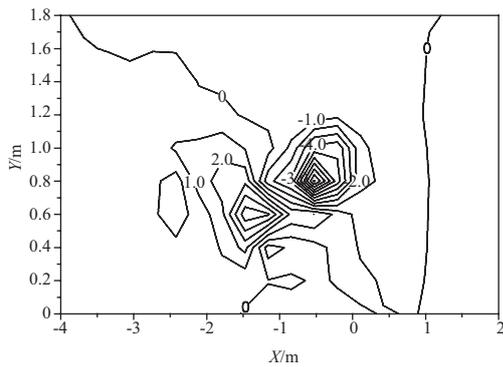
2 模型试验结果

2.1 不同坝型丁坝水毁过程对比

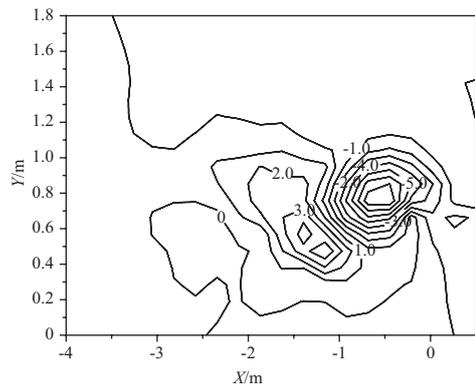
控制条件为来水流量 $Q=95 \text{ L/s}$, 控制水深 $H=14 \text{ cm}$, 河床中值粒径 $D_{50}=1 \text{ mm}$, 坝长 50 cm, 挑角 90°的无护底丁坝。选取动床工况 M4、工况 M5 和工况 M9 对比 (图 5)。



a) 工况 M4 最终冲刷



b) 工况M4最终冲刷地形

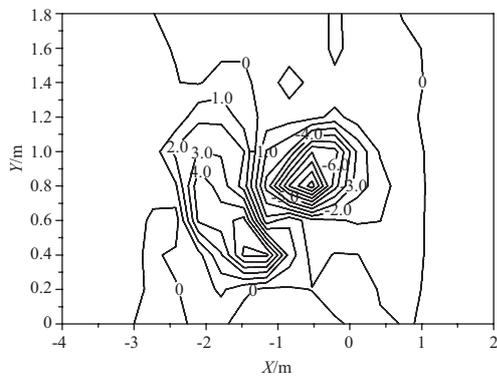


f) 工况M9最终冲刷地形

图5 丁坝冲刷前后对比



c) 工况M5最终冲刷



d) 工况M5最终冲刷地形



e) 工况M9最终冲刷

由图6可见，坝后的冲刷坑最大冲深随着时间推移不断增大，在前50 min，工况M4和工况M5最大冲深变化率比工况M9大，在50~150 min，工况M4和工况M5最大冲深变化率减小，工况M9最大冲深变化率基本不变，直至150 min时，3种工况的最大冲深基本达到稳定。在试验过程中观察到，坝头位置处于跌水区域，底流和面流流速都较大（表2）。坝体后沿的坝底位置处于跌水水流的顶冲点，下探水流直接冲刷坝头和坝体后沿水槽底部的泥沙，而坝头位置跌水较为明显（坝轴线所在位置横坐标为0），如图7所示，对比图7中3条曲线，工况M5的跌水落差最大为0.9 cm，工况M9的跌水落差最小为0.7 cm，工况M4的跌水落差居

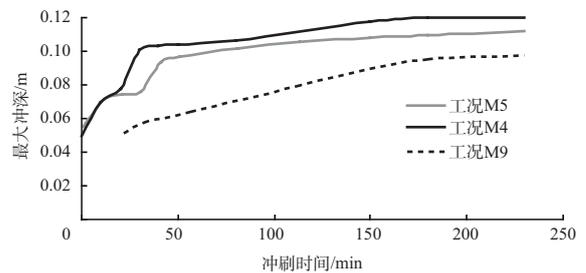


图6 不同坝体结构形式丁坝最大冲深变化

表2 丁坝坝头流速比较

工况	流速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	
	面流	底流
M4	66.35	33.50
M5	61.57	56.71
M9	62.56	56.48
M10	72.61	67.62
M12	59.10	55.68

中为0.8 cm, 而且在3种工况中, 整个纵断面的水位工况M9是最高的, 工况M4是最低的。冲刷坑最深处在坝头稍靠下游的位置, 有些丁坝的整个坝头位置已经成为冲刷坑的一部分, 具体破坏情况如图5所示。

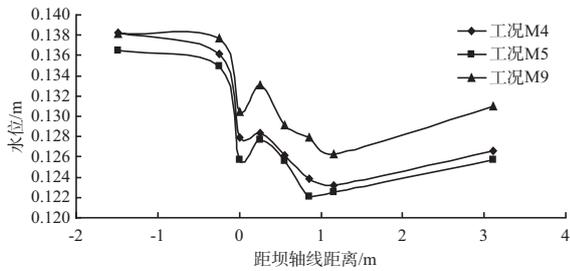


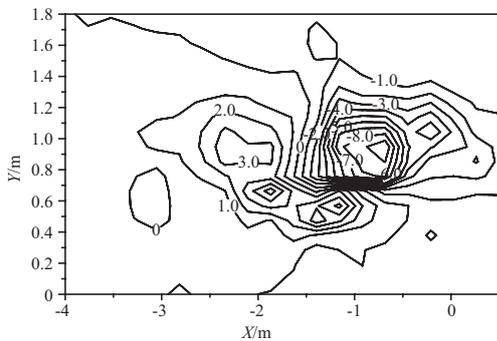
图7 不同坝体结构形式丁坝坝头所在断面水面线分布

2.2 不同坝长丁坝破坏过程对比

控制条件为 $Q=95 \text{ L/s}$, $H=14 \text{ cm}$, $D_{50}=1 \text{ mm}$, 挑角 90° , 无护底梯形断面圆弧勾头丁坝。选取动床工况M9和工况M10进行对比 (图8 ~ 10)。



a) 工况M10最终冲刷



b) 工况M10最终冲刷地形

图8 不同坝长丁坝最终冲刷地形

由图8和图5可以看出, 在相同条件下, 工况M10的冲刷坑面积、坝后淤积面积、最大坑深明显大于工况M9; 从图9可以看出, 在冲刷的全过

程中, 工况M10的最大冲深都要大于工况M9; 从最大冲深变化率来看, 在前40 min, 工况10的最大冲深变化率大于工况9, 在40 ~ 240 min, 2条曲线在同一时刻的斜率基本相同, 即最大冲深变化率基本相同。对比丁坝坝头的流速可以发现, 工况10的面流和底流都大于工况9 (表2)。从图10中可以看到: 工况M9整个纵断面的水位都大于工况M10, 但工况M10的跌水落差 (1.3 cm) 大于工况M9的跌水落差 (0.7 cm)。此外, 在试验中还观察到, 工况M10坝头附近比工况M9卡门涡所造成的紊动强度要大。

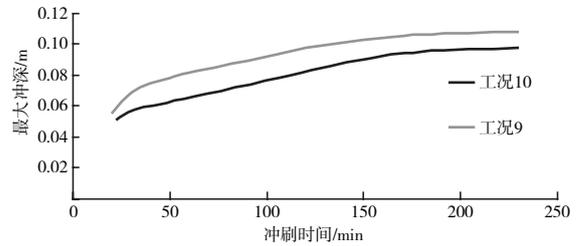


图9 不同坝长丁坝最大冲深变化

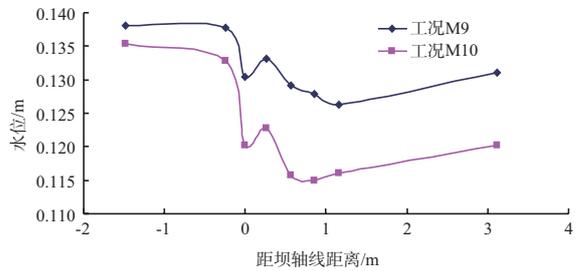


图10 不同坝长丁坝坝头所在断面水面线分布

2.3 不同挑角丁坝破坏过程对比

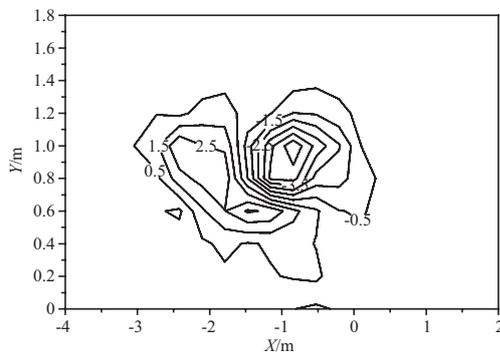
控制条件为 $Q=95 \text{ L/s}$, $H=14 \text{ cm}$, $D_{50}=1 \text{ mm}$, 无护底梯形断面圆弧勾头丁坝。选取动床工况M10 (挑角 90°) 和工况M12 (挑角 120°) 进行对比 (图11 ~ 13)。

从图12中图线整体变化趋势上看, 丁坝下游冲刷坑深度随着时间的变化而逐渐增大, 并且在同一时刻, 工况M10的冲刷深度大于工况M12冲刷深度。在前50 min, 工况10的最大冲深变化率大于工况12, 在50 ~ 240 min, 2条曲线在同一时刻的斜率基本相同, 即最大冲深变化率基本相同。

对比丁坝坝头的流速可以发现, 工况10的面流和底流都大于工况12 (表2)。从图13中可以



a) 工况M12最终冲刷



b) 工况M12最终冲刷地形

图11 不同挑角丁坝最终冲刷地形

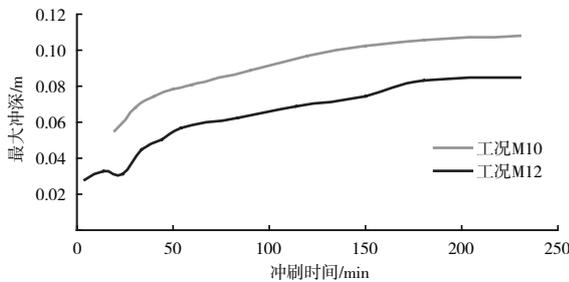


图12 不同挑角丁坝最大冲深变化

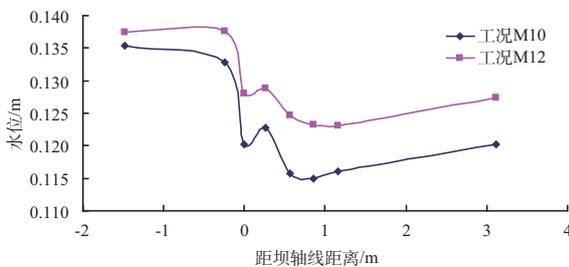


图13 不同挑角丁坝坝头所在断面水面线分布

看到工况M12的整个纵断面的水位都要大于工况M10，但工况M10的跌水落差（1.3 cm）大于工况M12的跌水落差（0.96 cm）。

由图8和图11可以看到，在坝后皆有沙垄出现，工况M10的最大沙垄高度可达5 cm，工况M12的仅有3.5 cm。工况M10的冲刷坑面积和沙垄堆积面积都大于工况M12。

3 试验结果分析

3.1 不同坝型丁坝水毁过程

1) 冲刷坑在开始冲刷的时候，由于表面的细颗粒推移质和悬移质容易起动，冲刷速率都很大，随着细颗粒泥沙的减少，表面的粗化层越来越厚；冲刷坑慢慢变大，过水面积增大，流速减小，能够起动的泥沙减少，这时冲刷速率降低，最后达到基本稳定^[3]。对比3种工况，工况M4和工况M5，在开始阶段迅速冲刷，之后速率减小，最终达到平衡，是“先快后慢”型，而工况M9是“匀速增加”型。

2) 坝头位置出现跌水，此处流速最大，从而导致工况M4坝头位置出现少量碎石被冲离坝体的现象。碎石起动最早出现在坝头最前沿，既坝身轴线与坝头圆弧段相交的位置，此处也就是所谓的拐点位置（图14），拐点位置是冲刷坑的起冲点，也是坝体最先受到水流冲击的位置，水流由于受到丁坝的阻碍，坝前水位升高，成壅水状态^[4]。此时高于丁坝的水流，翻坝而过，形成翻坝水，而低于丁坝的下层水流由于受到丁坝的阻碍，水流改变方向，转向右岸，这部分水流不仅方向改变了，而且受到上层水流的压制，成为压缩流，流速增大，此时这部份底流贴近丁坝坝面流动，与丁坝坝头作用强烈，是使丁坝破坏的主

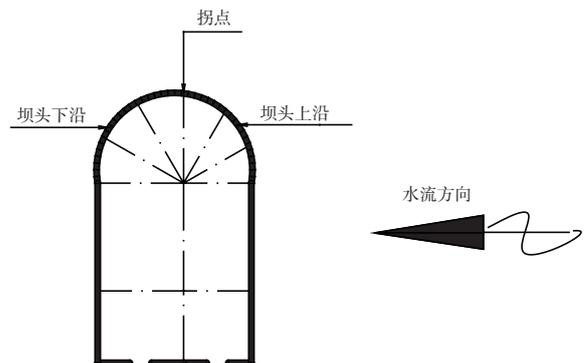


图14 丁坝坝头位置区域分布

要因素。

3) 工况M5坝体断面为圆弧断面, 从力学角度讲, 水流接触坝体表面后, 受到坝体的阻力要比工况M4和工况M9的小, 水流对坝体的作用力工况M5小于工况M4和工况M9, 工况M5坝顶破坏程度较轻; 从水流特性角度来讲, 工况M5坝身阻力较小, 致使翻坝流量比工况M4和工况M9的翻坝流量大, 绕过丁坝向下游行进的水流量变小, 水流对坝头的破坏作用较轻。因此从整个坝体的稳定性来看, 工况M5比工况M4和工况M9更稳定。而且在试验中也得到了验证, 工况M5坝体基本没有水毁破坏, 只有微量小粒径碎石被冲离坝体。

3.2 不同坝长丁坝破坏过程

综合不同坝长丁坝的试验结果可知: 丁坝的存在使丁坝附近的水流结构和压力场都随之变化。当来水遇到丁坝受阻后, 一部分水流被迫沿坝头绕流而下, 另外一部分水流翻坝后流向下流。坝前水位壅高, 由于丁坝的束水作用, 水流大部分集中到右岸, 水流平均速度明显增大^[5-7]。丁坝越长其束窄水流的能力越强, 对丁坝附近水流结构的影响越大, 平均流速和单宽流量增加幅度越大, 坝头附近流速的增加导致更为激烈的大尺度紊动发生, 底部流速的增大和床面漩涡扰动较剧烈是造成丁坝附近冲刷较大的主要原因^[8]。

3.3 不同挑角丁坝破坏过程

综合不同挑角丁坝的试验结果可知: 丁坝坝顶以上的面流基本上保持原水流方向不变, 在坝体附近及下游, 面流受底流影响流速有所减小, 流向也稍许向坝头方向偏转。而坝顶以下的底流, 从上游绕过坝顶, 在坝顶形成一个很强的水平轴回流区。这个平轴漩涡体系可以将坝下游回流区底沙卷向上游, 使丁坝背水面淤积。对于工况M10, 底流经坝头时方向突然改变, 过水断面面积突然减小, 流速突然增加, 紊动强度突然变大, 使坝头位置及丁坝下游位置冲刷严重。而对于工况M12, 在底流过坝时, 流向和流速都有一个渐变的过程, 紊动强度较小, 流速变化梯度较

小, 冲刷坑深度及沙垄高度较工况M10小。

4 结论

1) 从坝身横断面形式(梯形断面与圆弧断面)的角度对比研究散抛石坝的稳定性问题, 指出同样的水流条件下坝身采用圆弧形横断面的结构形式相对坝身采用梯形横断面的结构形式具有较好的稳定性。

2) 不同坝长的丁坝, 在开始冲刷阶段, 长丁坝作用下的河床冲刷坑深度变率明显大于短丁坝, 等冲刷坑达到一定深度后, 丁坝的长度对河床冲刷坑深度变率的影响减小。

3) 水流经过坝头时, 挑角 120° 的丁坝坝头位置的紊动强度和流速梯度比挑角 90° 的丁坝小, 其坝头破坏程度及下游河床冲刷深度也比挑角 90° 的丁坝小。

参考文献:

- [1] 王平义, 程昌华, 荣学文, 等. 航道整治建筑物水毁理论及模拟技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] 张秀芳, 王平义, 喻涛. 非恒定流作用下丁坝水毁研究现状分析[J]. 科技信息, 2010, 26:453-455.
- [3] Yu Tao, Wang Ping-yi, Liu Qian-ying, et al. Study on the beach protection with the tetrahedron like penetrating frame groups[C]// Zhou Xue-jun. Advances in Civil Engineering. Jinan: Trans Tech Publication, 2011: 2 533-2 536.
- [4] 荣学文. 丁坝的水毁机理及其平面二维水流数值模拟[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2003.
- [5] Yu Tao, Wang Ping-yi, Yang Cheng-yu, et al. Experimental study of water force acting on spur dike[C]//Zhao Jing-ying. Advances in Civil Engineering. Kunming: Trans Tech Publication, 2011: 3 558-3 562.
- [6] 应强, 焦志斌. 丁坝水力学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [7] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992.
- [8] Yu Tao, Wang Ping-yi, Gao Gui-jing. Turbulence Kinetic and Local Scour around Spur Dike[C]//Zhou Bao-zhi. 2010 Conference On Modern Hydraulic Engineering. Xi'an: London Science Publishing Co, Ltd, 2010: 46-50.

(本文编辑 郭雪珍)