

# 环氧掺量对乳化沥青性能及微表处混合料影响

杨杰<sup>1</sup>, 吴泳豪<sup>2</sup>, 刘梦梅<sup>2</sup>, 石靖文<sup>2</sup>, 周智勇<sup>2</sup>, 魏必成<sup>1</sup>

(1. 福建省高速技术咨询有限公司, 福建 福州 350100;

2. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为进一步促进水性环氧乳化沥青(waterborne epoxy resin emulsified asphalt, WERA)在微表处的发展及应用,以普通乳化沥青为对照组,研究了水性环氧树脂(waterborne epoxy resin, WER)掺量分别为5%、10%、15%、20%、25%时, WERA的基本性能和黏附性能,并测试了其微表处耐磨耗、抗车辙、抗水损害性能。结果表明, WERA蒸发残留物的软化点随着 $w_{\text{WER}}$ 增加而上升,而针入度及延度下降; $w_{\text{WER}}$ 增加导致集料的沥青损失率减少;此外,微表处磨耗值、车辙深度率和宽度变形率均随着 $w_{\text{WER}}$ 增加而降低,冻融劈裂抗拉强度比随 $w_{\text{WER}}$ 增加而增大。故 WER提高了乳化沥青的高温稳定性和黏附性,但会表现出低温脆性;基于微表处混合料, WER改性对其耐磨耗、抗车辙及水稳定性也有良好的改善效果。综合考虑性能及成本,推荐 $w_{\text{WER}}$ 为15%。

**关键词:** 道路工程;水性环氧树脂;微表处;傅里叶红外光谱;黏附性能;耐磨耗性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)06-0528-05

## Effect of epoxy content on performance of emulsified asphalt and micro-surfacing mixture

YANG Jie<sup>1</sup>, WU Yonghao<sup>2</sup>, LIU Mengmei<sup>2</sup>, SHI Jingwen<sup>2</sup>, ZHOU Zhiyong<sup>2</sup>, WEI Bicheng<sup>1</sup>

(1. Fujian Provincial Expressway Technology Consulting Co., Ltd., Fuzhou 350100, China;

2. School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to further promote the development and application of waterborne epoxy resin emulsified asphalt (WERA) in micro-surfacing, the basic properties and adhesion properties of WERA were studied when the content of waterborne epoxy resin (WER) was 5%, 10%, 15%, 20% and 25% respectively, and the wear resistance, rutting resistance and water damage resistance of WERA in micro-surfacing were studied with ordinary emulsified asphalt as the control group. Test results show that the softening point of WERA evaporation residue increases with the increase of WER content, while the penetration and ductility decrease. The increase of WER content leads to the decrease of asphalt loss rate of aggregate. In addition, the wear value, rut depth rate and width deformation rate of micro-surface decreases with the increase of WER content, and freeze-thaw cycle splitting tensile strength ratio increases with the increase of WER content. Therefore, WER improves the high temperature stability and adhesion of emulsified asphalt, but it will show low temperature brittleness; based on the micro-surfacing mixture, WER modification also has a good improvement effect on its wear resistance, rutting resistance and water stability. Considering the performance and cost, the recommended WER content is 15%.

**Keywords:** road engineering; waterborne epoxy resin; micro-surfacing; FT-IR; adhesion performance; abrasion performance

微表处是将改性乳化沥青、集料、填料、水和 添加剂等,按比例混合后直接摊铺于原路面上的

收稿日期: 2024-11-17

基金项目: 福建省高速公路工程重点实验室开放课题项目(BKY00-20231098);福建省中青年教育科研项目(JAT210086)

第一作者简介: 杨杰(1972—),男,福建南平人,高级工程师,研究方向:道路结构与材料、道路检测。

通信作者: 刘梦梅(1994—),女,福建龙岩人,讲师,博士,研究方向:道路交通安全、道路结构与材料。

道路表面表层罩面技术,具有修复车辙病害、提高路面抗滑、耐磨性能等优势<sup>[1]</sup>。在实际应用过程中,由于乳化沥青与集料黏附性能不足,微表处存在松散、剥落、抗水损能力弱等问题,因此,需要对乳化沥青进行改性,以提升其性能。目前,乳化沥青的改性主要采用丁二烯和苯乙烯共聚物(styrene butadiene rubber, SBR)或苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS),但存在成本昂贵、乳化难度大及改性后的疲劳寿命不理想等问题<sup>[2]</sup>。近年来,因 WER 具有良好的黏结性、耐受性和强度,且与乳化沥青适应性好,其作为改性剂备受关注。刘梦梅等<sup>[3]</sup>对不同 WER 体积掺量( $w_{\text{WER}}$ )的乳化沥青进行抗剪及抗拉强度试验(高温、低温及浸水条件),结果表明,高温、低温条件下,其抗剪和抗拉强度显著大于普通乳化沥青和 SBS 改性乳化沥青;常温浸水条件下,环氧改性乳化沥青能减缓随浸水时间增加黏结性下降的速率。韩森等<sup>[4]</sup>提出 WER 在乳化沥青中形成的三维网状物能改善与混合料的黏度,从而提高层间抗剪强度。孔学玉等<sup>[5]</sup>使用布氏黏度、拉拔试验分析了 WEREA 的黏结性能,并对  $w_{\text{WER}}$  为 15% 的 WEREA 混合料进行浸水马歇尔试验和飞散试验,结果表明,WER 提高了乳化沥青的黏结强度,且  $w_{\text{WER}}$  15% 下的浸水马歇尔稳定性和飞散损失率满足热拌沥青混合料的规范要求。

综上,水性环氧树脂和固化剂反应在沥青中形成的空间立体网状结构能提高乳化沥青的黏度及黏结性能,增强混合料早期强度,具有优异的改性效果。本研究使用水性环氧树脂作为改性剂,对不同  $w_{\text{WER}}$  的 WEREA 的技术指标(针入度、软化点、延度)、黏附性能进行分析,并基于微表处混合料的湿轮磨耗试验、负荷车轮试验及冻融劈裂试验,探究不同  $w_{\text{WER}}$  下水性环氧乳化沥青微表处混合料的耐磨耗、抗车辙及抗水损害能力。

## 1 材料与试验

### 1.1 试验材料

使用阳离子乳化沥青,其筛上剩余量为 0.02%,残留物含量为 62.3%,1 d 的储存稳定性为 0.5%。选用双酚 A 型水性环氧树脂与脂肪胺-脂环胺复合水性固化剂,两者基本性能见表 1。微表处混合料选用 MS-3 型中值级配,各筛孔通

过率如图 1 所示。粗集料采用玄武岩,水泥为普通硅酸盐水泥 P·O 42.5,矿粉为石灰岩矿粉,试验用水为去离子水。

表 1 水性环氧树脂与固化剂技术性质指标

Tab.1 Technical properties of waterborne epoxy resin and curing agent

技术性质	水性环氧树脂	固化剂
性状	乳白色	淡黄透明
环氧值	0.36	—
胺值/ $\text{mg KOH} \cdot \text{g}^{-1}$	—	180
比重 <sub>25℃</sub> / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	1.05	1.05
固含量/%	69	35.5
黏度 <sub>25℃</sub> / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	1.2	30

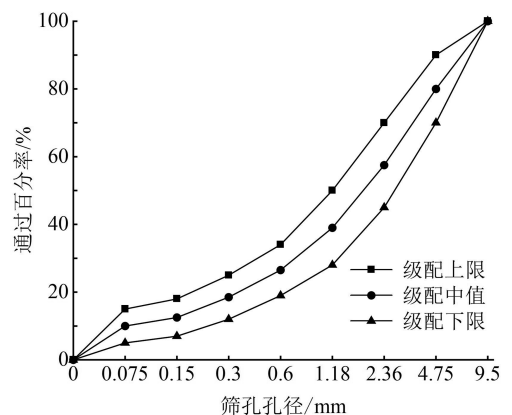


图 1 矿料级配

Fig.1 Mineral aggregate gradation

### 1.2 试样制备

采用先乳化后改性的方式制备 WEREA。具体步骤:1)将基质沥青(130~140℃)和乳化剂(50~60℃)置于容器中,采用机械剪切方式混合均匀,制备乳化沥青;2)将水性环氧树脂与水性固化剂按照 1.5:1 的质量比置于容器中,在 25℃下以 60 r/min 机械搅拌 3 min,使之拌和均匀,制备水性环氧树脂体系;3)将水性环氧树脂体系掺入乳化沥青中,在 25℃下以 200 r/min 机械搅拌 3 min,完成 WEREA 制备。

以基质乳化沥青作为对照组( $w_{\text{WER}}$  为 0%),分别设置水性环氧乳化沥青的  $w_{\text{WER}}$  为 5%、10%、15%、20%、25%,制备 6 组试样。

### 1.3 改性乳化沥青试验

#### 1.3.1 基本性能试验

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)<sup>[6]</sup>的试验步骤,对不同  $w_{\text{WER}}$  的水性环氧乳化沥青进行三大指标试验,包括针入度(25 ℃)、软化点及延度(15 ℃)。

#### 1.3.2 修正的水煮法

采用修正的水煮法测试环氧改性乳化沥青的黏附性能<sup>[7]</sup>。将烘干后的粗集料用铁丝系好并称取质量  $m_a$  (精确至小数点后 3 位);按照水煮法试验,把集料先后浸入水和不同  $w_{\text{WER}}$  乳化沥青,再悬挂于支架上 24 h,称取质量  $m_b$ ;最后,将裹覆 WERA 的集料放入微沸的水中浸煮,取出后放入烘箱烘干,称取质量  $m_c$ 。试验后的沥青质量损失率  $P$  的计算式见公式(1)。

$$P = \frac{m_b - m_c}{m_b - m_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $m_a$  为铁丝与集料质量, g;  $m_b$  为铁丝与沥青裹覆集料的质量, g;  $m_c$  为水煮后铁丝与沥青裹覆集料的质量, g。

#### 1.4 微表处混合料性能测试

##### 1.4.1 湿轮磨耗试验

将不同  $w_{\text{WER}}$  混合料试件放入 25 ℃ 的恒温水浴中 1 h,然后放入托盘中并注入 25 ℃ 的水,使其完全浸没;再将其固定在湿轮磨耗仪试件平台,抬升平台,开动仪器磨耗 5 min;取出试件并放入 60 ℃ 的烘箱中烘干,测量试件的重量。以试件磨耗前后质量变化来判断混合料的耐磨耗性能优劣。磨耗值越小,耐磨耗性能越好。磨耗值  $W_{\text{TAT}}$  按公式(2)计算。

$$W_{\text{TAT}} = (m_d - m_e) / A \quad (2)$$

式中,  $W_{\text{TAT}}$  为微表处磨耗值,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $m_d$  为磨耗前试件质量, g;  $m_e$  为磨耗后试件质量, g;  $A$  为胶管的磨耗面积,  $\text{m}^2$ 。

##### 1.4.2 车辙变形试验

将不同  $w_{\text{WER}}$  混合料试件固定于复荷车轮试验仪,开动试验仪碾压 1 000 次,然后取出试件,测量其车辙深度率  $P_{\text{VD}}$  和宽度变形率  $P_{\text{LD}}$ 。以车轮碾压前后试件的厚度和宽度变化情况,评价混合料的抗车辙变形能力。  $P_{\text{VD}}$  和  $P_{\text{LD}}$  分别按公式(3)、公式(4)计算。

$$P_{\text{LD}} = (L_b - L_a) \times 100 / L_a \quad (3)$$

$$P_{\text{VD}} = d_b \times 100 / d_a \quad (4)$$

式中,  $P_{\text{LD}}$  为试件单位宽度变形率, %;  $L_a$  为试件加载前的宽度, mm;  $L_b$  为试件加载后的宽度, mm;  $P_{\text{VD}}$  为试件单位厚度变形率, %;  $d_a$  为试件加载前的厚度, mm;  $d_b$  为试件加载后的厚度, mm。

##### 1.4.3 冻融劈裂试验

试件在真空环境中浸水 15 min,再在常压下浸水 30 min,然后放入 -18 ℃ 的冰柜中 16 h,随后置入 60 ℃ 恒温水浴中 24 h,最后将未冻融及冻融的试件全部浸入 25 ℃ 的恒温水浴中 2 h,取出试件后擦拭其表面残留的水分,放置于马歇尔试验仪进行测试。使用冻融劈裂试验强度比 ( $T_{\text{SR}}$ ) 来评价环氧改性乳化沥青微表处混合料的抗水损害能力。  $T_{\text{SR}}$  按公式(5)计算。

$$T_{\text{SR}} = \frac{\bar{R}_{\text{T1}}}{\bar{R}_{\text{T2}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $T_{\text{SR}}$  为冻融劈裂试验强度比, %;  $\bar{R}_{\text{T1}}$  为未冻融循环试件的劈裂抗拉强度, MPa;  $\bar{R}_{\text{T2}}$  为冻融循环试件的劈裂抗拉强度, MPa。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水性环氧乳化沥青性能分析

#### 2.1.1 技术性能分析

由表 2 可知,随着  $w_{\text{WER}}$  增加,乳化沥青残留物的针入度逐渐下降。对比基质乳化沥青,  $w_{\text{WER}}$  为 25% 时, WERA 蒸发残留物的针入度值下降了 92.9%,表现出较大的硬度。这是因为 WER 会吸收沥青中的轻质组分,从而使其变硬,随着  $w_{\text{WER}}$  增加,该现象越明显<sup>[8]</sup>。且  $w_{\text{WER}}$  增加越多,水性环氧树脂与固化剂聚合交联形成的空间网状结构就越明显,则刚度越大,即表现为针入度减小;掺入 WER 后 WERA 残留物软化点迅速升高。当  $w_{\text{WER}}$  为 5% 时,软化点提升了 24.1%。随着 WER 浓度增加,软化点也持续增加,  $w_{\text{WER}}$  为 15%~25% 时, WERA 蒸发残留物软化点均突破 90,这是因为 WER 和固化剂形成的三维空间网络渗透于沥青,从而提高了沥青的抗高温性能<sup>[9]</sup>;而掺入 WER 后 WERA 残留物延度急速下降。  $w_{\text{WER}}$  为 5% 时, WERA 残留物延度降为 10.6 cm,  $w_{\text{WER}}$  为 10%~25% 时,下降趋势逐渐缓慢,直至降为 0。这是由于沥青与环氧树脂聚合交联生成的三维网状结构提高了沥青的刚度。在车辆

荷载的作用下,网状物弛豫时间短,形变小,从而使延度下降,表现出低温脆性<sup>[10]</sup>。

表 2 不同  $w_{\text{WER}}$  乳化沥青蒸发残留物技术指标

Tab.2 Technical specifications of evaporated residues from emulsified asphalt with different WER content

$w_{\text{WER}}/\%$	针入度/0.1mm	软化点/℃	延度 <sub>15℃</sub> /cm
0	71.3	49.3	>100
5	56.1	61.2	10.6
10	30.5	82.3	7.9
15	15.3	>90	4.3
20	9.2	>90	2.0
25	5.0	>90	0

### 2.1.2 黏附性能分析

由图 2 可知,随着  $w_{\text{WER}}$  的增加,乳化沥青与矿料的沥青损失率逐渐下降。这是因为水性环氧改性后,环氧中的极性官能团对集料有较好的浸润效果,使沥青能更充分、均匀地裹覆集料,减少脱落,且固化后形成的三维空间网状物能有效控制沥青膜的运动,增强沥青与集料的黏附强度<sup>[8]</sup>。因此,水性环氧乳化沥青表现出良好的黏附性能。

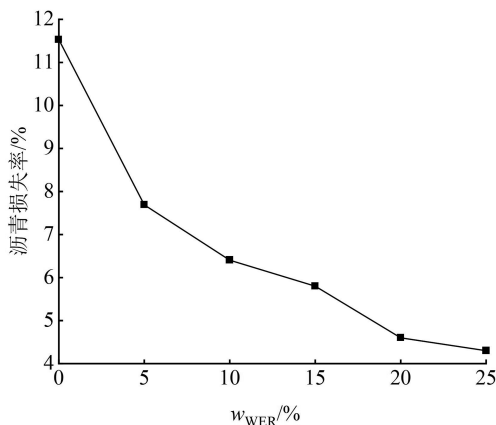


图 2 不同  $w_{\text{WER}}$  乳化沥青的沥青损失率

Fig.2 Asphalt loss rate of emulsified asphalt with different WER content

## 2.2 微表处混合料性能分析

### 2.2.1 湿轮磨耗分析

由图 3 可知,随着  $w_{\text{WER}}$  增加,混合料的  $W_{\text{TAT}}$  逐渐减小。基质乳化沥青因黏结力不足,在磨耗过程中出现较为严重的掉粒现象,磨耗效果差。掺入 WER 后,环氧树脂与固化剂固结网状物与乳化沥

青渗透交联形成的结构能够很好的抵抗磨耗仪的磨损。 $w_{\text{WER}}$  达 20% 时,随着  $w_{\text{WER}}$  持续增大, $W_{\text{TAT}}$  的下降速率减缓,即空间网状已形成, $w_{\text{WER}}$  增加,耐磨耗效果提升小。因此环氧改性能够提高微表处混合料的耐磨耗性能,但掺量过大提升不显著。

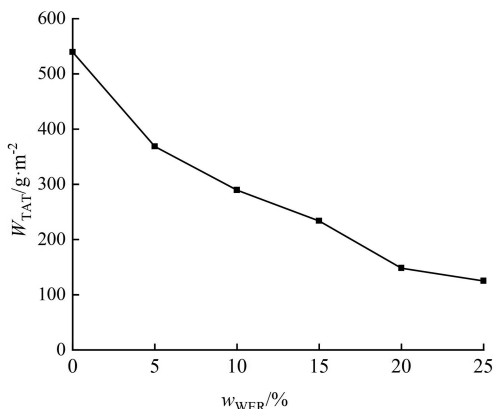


图 3 不同  $w_{\text{WER}}$  微表处  $W_{\text{TAT}}$

Fig.3  $W_{\text{TAT}}$  of micro-surfacing with different WER content

### 2.2.2 车辙变形分析

由图 4 可知,随着  $w_{\text{WER}}$  增加,微表处混合料的  $P_{\text{VD}}$  和  $P_{\text{LD}}$  持续减小。这是因为 WEREA 的黏度大,与集料黏结性能好,能防止集料松散且水性环氧树脂与沥青交联形成的物质结构强度大,刚度大,能抵御车轮荷载的反复作用<sup>[4]</sup>。因此掺入水性环氧树脂能够提高微表处混合料的抗车辙变形能力。

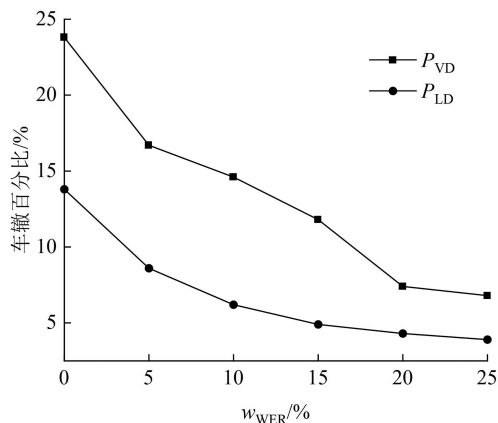


图 4 不同  $w_{\text{WER}}$  微表处  $P_{\text{VD}}$  和  $P_{\text{LD}}$

Fig.4  $P_{\text{VD}}$  和  $P_{\text{LD}}$  of micro-surfacing with different WER content

### 2.2.3 冻融劈裂强度比分析

由图 5 可知,随着  $w_{\text{WER}}$  增加, $T_{\text{SR}}$  逐渐增加。 $w_{\text{WER}}$  达 10% 时, $T_{\text{SR}}$  达到规范要求。这是因为水性

环氧树脂形成的空间网状结构抑制了水的置换;并且,水性环氧乳化沥青自身黏结性强,且与集料黏附性能好<sup>[11]</sup>。这两方面原因共同提升了混合料的水稳定性。

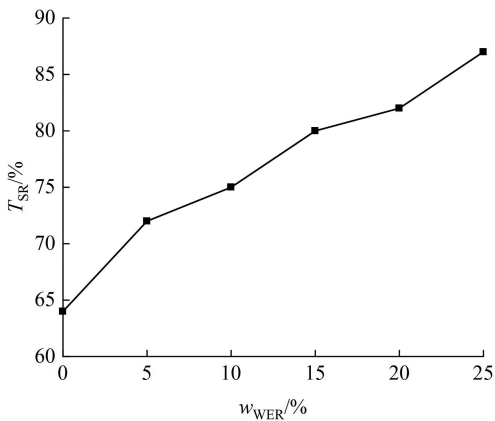


图 5 不同  $w_{WER}$  微表处  $T_{SR}$

Fig.5  $T_{SR}$  of micro-surfacing with different WER content

结合图 3—图 5 可知,使用 WER 进行改性,大大改善了乳化沥青微表处的耐磨耗、抗车辙性能及水稳定性。 $w_{WER}$  达 15% 时,其  $W_{TAT}$ 、 $P_{VD}$ 、 $P_{LD}$  及  $T_{SR}$  指标满足规范要求。增加  $w_{WER}$  会使微表处各项性能继续提升,但考虑到水性环氧树脂价格

较高,提高  $w_{WER}$  会增加工程成本。因此,考虑到各项因素,推荐  $w_{WER}$  为 15%。

### 3 结论

1) WERA 蒸发残留物的软化点上升,针入度和延度下降,表明 WER 能有效改善沥青的高温性能,但会导致沥青低温性能出现一定幅度的削弱。

2) 随着  $w_{WER}$  增加,乳化沥青与粗集料的沥青损失率降低。WER 的官能团对集料有很好的浸润作用,且形成的三维网状物可有效防止沥青膜剥落,增强乳化沥青与集料的黏附性。

3) 微表处混合料性能指标  $W_{TAT}$ 、 $P_{VD}$  及  $P_{LD}$  均随  $w_{WER}$  的增加出现降低趋势,当  $w_{WER}$  达 20% 后,下降速率趋于平缓。因此,在一定范围内,掺入 WER 能提高微表处混合料的耐磨耗及抗车辙性能。

4) 水稳定性评价指标  $T_{SR}$  随着  $w_{WER}$  增加逐渐增大,说明 WER 和乳化沥青形成的三维网状结构能抵御水的置换,提升微表处的抗水损害能力。综合考虑各因素,推荐  $w_{WER}$  为 15%。

### 参考文献:

- [1] 居浩,黄晓明.微表处混合料性能影响因素研究[J].公路,2007,52(7):212-218.
- [2] 常嵘,马融.某省公路沥青路面性能发展规律及养护方案[J].公路,2018,63(11):291-296.
- [3] 刘梦梅,韩森,潘俊,等.水性环氧树脂乳化沥青在高温、低温和浸水条件下的粘结性能[J].材料导报,2018,32(10):1716-1720.
- [4] 韩森,郭寒,尚为公,等.水性环氧树脂微表处的层间抗剪性能[J].科学技术与工程,2019,19(36):325-330.
- [5] 孔学玉,王春,柳霞,等.水性环氧乳化沥青混合料配合比设计方法研究[J].热固性树脂,2024,39(4):30-35.
- [6] 中华人民共和国交通运输部.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20-2011[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [7] 韩森,李微,刘梦梅,等.基于表面能的掺消石灰沥青黏附性分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2020,41(4):491-496.
- [8] 姚晓光.环氧改性乳化沥青冷再生混合料力学性能提升机理及自修复行为研究[D].南京:南京林业大学,2022.
- [9] 张庆,郝培文,白正宇.水性环氧树脂改性乳化沥青制备及其黏附性研究[J].公路交通科技,2015,32(9):9-14.
- [10] QIAN Z D, CHEN L L, JIANG C L, et al. Performance evaluation of a lightweight epoxy asphalt mixture for bascule bridge pavements[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(7): 3117-3122.
- [11] 郭寒.隧道环氧乳化沥青薄层罩面技术研究[D].西安:长安大学,2019.

(责任编辑:马晓磊)