

# TC21 + TC4-DT 线性摩擦焊接头组织与力学性能试验

张传臣, 张田仓, 金俊龙

(中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

**摘 要:** 针对高强 TC21 和中强 TC4-DT 异种钛合金进行线性摩擦焊工艺研究, 对接头进行不同热处理, 接头微观组织和力学性能进行试验分析. 结果表明, TC21 + TC4-DT 线性摩擦焊接头飞边成形良好, 飞边表面光滑根部无明显缺陷存在; 焊态条件下焊缝组织为典型的魏氏组织结构特征, 热处理后焊缝组织析出弥散的针状  $\alpha$  相, 随着热处理温度的升高析出的针状  $\alpha$  相逐渐长大粗化, 致使接头冲击和断裂性能先上升后下降; 接头拉伸性能与 TC4-DT 母材相当; 700  $^{\circ}\text{C}/3\text{ h}$  热处理接头、母材高周疲劳性能试验结果表明, 接头的疲劳极限达到 558 MPa, 与 TC4-DT 基体相当, 焊缝组织细化是提高接头疲劳极限的重要原因.

**关键词:** 线性摩擦焊; 钛合金; 组织; 性能

**中图分类号:** TG453+.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400326

## 0 序 言

轻质高效、长寿命、多功能(环境、维护性)、低成本是未来先进战机及无人作战飞机的重要发展方向, 整机的总体性能要求必须依靠轻质、高可靠性的材料和结构作为支撑. 钛合金由于比强度高、耐腐蚀等优点, 在飞机的主承力及次承力结构中获得大量应用, 作为飞机结构的主要应用材料, 需要满足损伤容限设计要求. TC21, TC4-DT 为国内自主研制的两种高损伤容限型钛合金, 目前已被大量应用在飞机结构上, TC21 是高强 ( $R_m \geq 1\ 100\text{ MPa}$ )、高韧 ( $K_{IC} \geq 70\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) 及综合力学性能匹配较好的钛合金, TC4-DT 合金是西北有色金属研究院和北京航空材料研究院共同研制的一款新型中强 ( $R_m \geq 825\text{ MPa}$ )、高韧性 ( $K_{IC} \geq 90\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) 损伤容限型钛合金<sup>[1-2]</sup>. 为了充分发挥材料性能及降低制造成本, 有特殊服役环境要求的结构通常选用异质材料连接, 先进战机折叠肋结构耳片尺寸小, 结构薄, 在服役过程中承受较大拉剪载荷, 对材料的强度要求较高, TC21 作为高强度损伤容限型钛合金可以作为主承力耳片结构, TC4-DT 为中等强度钛合金可以作为支撑梁. 机械连接的该类异种材料结构不能满足设计对结构可靠性、减重的要求. 焊接可以实现异种材料连接, 简化结构. 线性摩擦焊为

固相焊接方法, 工艺简单, 可在大气环境下实现高可靠性连接, 尤其对于钛合金具有较好的焊接性, 国内外已普遍进行了线性摩擦焊基础理论和性能方面研究, 且国外已将该方法用于发动机整体叶盘的焊接和修复<sup>[3-11]</sup>.

为了达到“物尽其用”, 充分发挥材料性能优势, 提高飞机结构综合力学水平, 研究了 TC21 + TC4-DT 异种钛合金线性摩擦焊工艺, 针对接头组织、性能及热处理制度等进行研究, 为异种钛合金线性摩擦焊工艺在飞机结构上的应用提供理论基础.

## 1 试验方法

TC21 钛合金的名义成分(质量分数, %)为 Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb-0.1Si, 合金在  $\alpha + \beta$  两相区进行退火, 组织为网篮组织, 如图 1 所示. 由于退火温度低于  $\beta$  相变点, 热加工过程原始  $\beta$  晶粒和  $\alpha$  晶界破碎,  $\alpha$ “集束”的尺寸变小,  $\alpha$  条变短, 且各  $\alpha$ “集束”交错排列<sup>[1]</sup>.

试验用 TC4-DT 钛合金在  $\beta$  相区固溶处理后, 在  $\alpha + \beta$  两相区以下进行时效处理, 以消除固溶产生的位错, 均衡组织, 产生针状片层(魏氏)组织, 如图 2 所示, 其特征是具有粗大的  $\beta$  晶粒和较完整的晶界  $\alpha$  相, 在  $\beta$  晶粒内存在位向不同的“集束”(片晶团), 同一“集束”内有很多近似平行的细

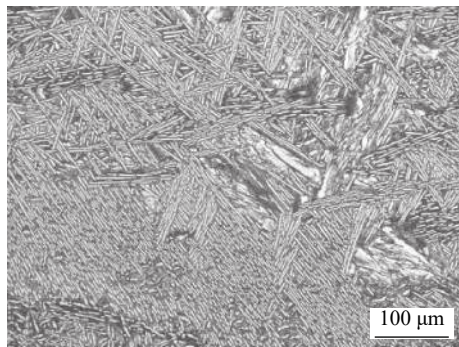


图 1 TC21 基体显微组织

Fig. 1 Microstructure of TC21

条状  $\alpha$  相, 具有较高的断裂韧性和疲劳裂纹扩散抗力<sup>[2]</sup>.

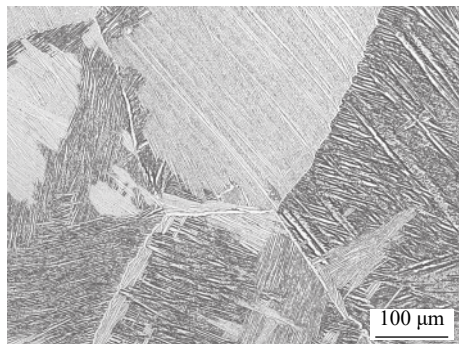


图 2 TC4-DT 基体显微组织

Fig. 2 Microstructure of TC4-DT

试样尺寸为  $L$ : 120 mm,  $W$ : 20 mm,  $H$ : 75 mm, 焊接面面积为  $1\,500\text{ mm}^2$ , 焊接试验在中国航空制造技术研究院自行研制的 15 吨线性摩擦焊机上进行.

## 2 试验结果分析

### 2.1 TC21 + TC4-DT 接头形貌与工艺参数优化

TC21 + TC4-DT 异种钛合金焊后接头宏观形貌如图 3 所示, 图中接头上部为 TC21. 从接头宏观形貌看, 接头产生的飞边主要由 TC4-DT 侧形成, 两者的缩短量比例约为 2.3:1, 主要是由于 TC21 强度比 TC4-DT 高, 在摩擦焊接过程中形成的高温塑性金属相对较少, 飞边挤出后偏向 TC21 侧.

对试样分别采用不同缩短量、振幅、频率和摩擦压力工艺试验, 通过对比试样接头飞边形貌, 发现在频率 50 Hz, 振幅 2.5 mm, 摩擦压力 66 MPa, 缩短量 5 mm 工艺参数条件下, 接头焊合最好, 飞边表面光滑, 成形良好, 根部无肉眼可见缺陷, 飞边表面光滑, 如图 4 所示.



图 3 TC21+TC4-DT 线性摩擦典型接头宏观形貌

Fig. 3 Typical macro photograph of TC21+TC4-DT LFW joints



图 4 接头飞边形貌

Fig. 4 Flash macro photograph of the joint

### 2.2 TC21 + TC4-DT 接头热处理参数优化

采用优化后的焊接工艺参数进行焊接, 对焊后接头分别进行热处理, 热处理制度分别为:  $650\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ h}$ , 炉冷;  $700\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ h}$ , 炉冷;  $750\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ h}$ , 炉冷. 针对不同热处理制度下的接头分别进行组织、性能分析, 择优选取. 图 5 为焊态,  $650$ ,  $700$  和  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  热处理条件下接头界面组织形貌, 图 5a 为焊态条件下焊缝组织具有典型的魏氏组织结构特征, 由于焊接过程中摩擦界面温度超过基体材料相变点, 焊后焊缝组织在摩擦界面残留较少, 随后冷却速度较快, 再结晶组织长大驱动力不足, 析出细小针状  $\alpha'$  相, 且在界面处形成共生晶粒, 原始摩擦界面消失, TC4-DT 侧  $\beta$  相呈细小颗粒状弥散分布. 图 5b 为  $650\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ h}$  热处理后接头组织形貌, 界面两侧的针状  $\alpha'$  相发生分解, 魏氏组织形貌消失, 形成弥散的  $\alpha + \beta$  组织. 随着热处理温度的升高,  $\alpha$  相发生粗化长大, 在  $750\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ h}$  热处理后,  $\alpha$  相长大成短棒状, 在两侧焊缝组织中, 转变  $\beta$  相含量呈明显增加趋势.

对接头进行拉伸性能试验, 按 GB/T228.1—2010 执行. 试验结果如表 1 所示. 拉伸断裂试样如图 6 所示. 从表 1 中不同热处理制度下的拉伸性能



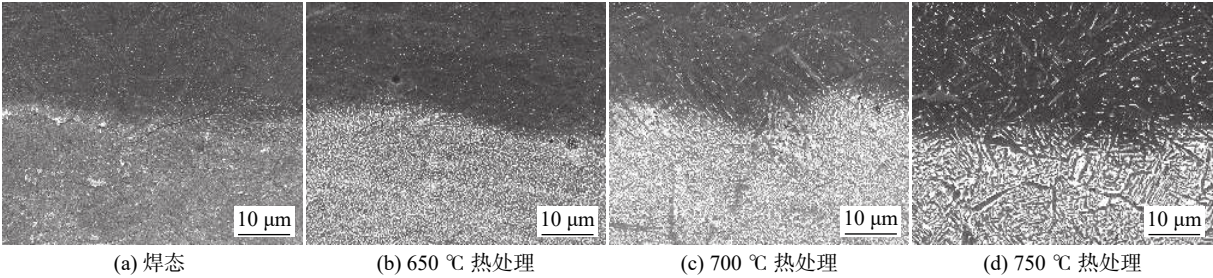


图 5 TC21+TC4-DT 线性摩擦焊焊缝区显微组织图片  
Fig. 5 Microstructure of TC21+TC4-DT IFW WZ

对比可以看出, 接头经过不同热处理后, 拉伸性能没有明显的差别, 结合图 7 接头宏观形貌, 接头断裂位置均在 TC4-DT 侧, 强度与 TC4-DT 母材相当, 表明三种热处理制度对接头的拉伸强度影响不明显, 主要原因是接头在焊后形成细晶, 细晶有利于接头抗拉强度的提高, 因此断裂位置发生在强度较低的 TC4-DT 母材侧。

表 1 TC21 + TC4-DT 线性摩擦焊接头拉伸性能  
Table 1 Mechanical property of TC21 + TC4-DT IFW joints

编号	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
650 °C	898.5	821.0	13	23.5
700 °C	908.3	837.3	14.2	18.4
750 °C	903.7	837.5	13.7	23.8
TC4-DT母材	891.20	771.71	7.60	15.54
TC21母材	1 192.33	973.16	8.68	26.43



图 6 不同热处理制度下接头拉伸宏观形貌  
Fig. 6 Tensile samples of TC21+TC4-DT IFW joint

不同热处理制度下接头冲击试样如图 7 所示, 图 7a, 7b, 7c 分别为 650, 700 和 750 °C 热处理条件下接头界面组织形貌. 通过对比不同热处理制度下接头的冲击吸收能量, 700 °C 热处理制度条件下接头的冲击吸收能量最高, 结合接头组织形貌, 说明晶粒度、相尺寸及其体积分数的变化对接头冲击性能影响明显。

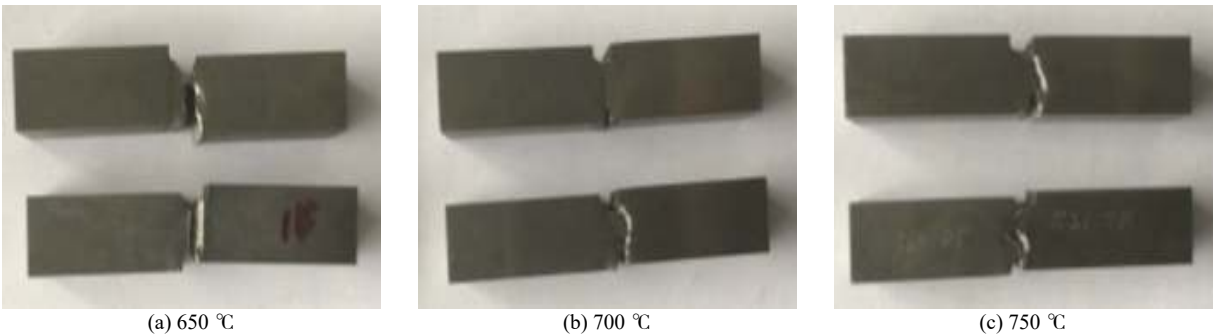


图 7 不同热处理制度下冲击接头宏观形貌  
Fig. 7 Impact specimen of TC21 + TC4-DT IFW joints

接头不同热处理制度的夏比缺口室温冲击性能试验按 GB/T229—2007 执行, 焊缝位置在试样中心位置, 试验结果如表 2 所示。

接头平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  试验按 GB/T 4161—2007 《金属材料 平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  试

验方法》进行, 试样按紧凑型试样  $B = 10$ ,  $W = 20$ , 试验结果如表 3 所示, 图 8 为部分断裂韧性接头宏观照片. 表 3 为不同热处理温度下接头断裂韧性值. 通过对比可以看出, 700 °C 热处理条件下, 接头焊缝区 (WZ)、热力影响区 (TMAZ) 断裂韧性值比

表 2 TC21 + TC4-DT 线性摩擦焊接头冲击性能  
Table 2 Impact property of IFW joints

编号	冲击吸收能量 $A_{KV}/J$
650 ℃	41.3
700 ℃	47.8
750 ℃	42.3

表 3 不同热处理温度下接头断裂韧性  
Table 3 Toughness of of TC21 + TC4-DT IFW joints

热处理温度	裂纹位置	临界应力强度因子值 $K_{IQ}/(MPa \cdot m^{1/2})$
750 ℃	WZ	41.28
	TMAZ-TC21	69.28
	TMAZ-TC4-DT	71.1
700 ℃	WZ	48.39
	TMAZ-TC21	61.3
	TMAZ-TC4-DT	75.14
650 ℃	WZ	36.5
	TMAZ-TC21	30.5
	TMAZ-TC4-DT	34.2

650, 750 ℃ 热处理条件下高。

在热处理制度优化基础上,按照 GB/T3075—2008 《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》对 TC4-DT 母材, TC21 + TC4-DT, TC21 母材进行高周疲劳性能测试,棒状试样  $K_t = 1$ , 应力比  $R =$



图 8 TC4-DT/TC21 接头高周疲劳性能试样  
Fig. 8 Fatigue specimens of TC21+TC4-DT IFW joint

0.1, 正弦波加载, 试验温度为室温. 试样在加工下料时, 通过腐蚀, 找到焊缝位置, 确保焊缝中心在试样中心位置. TC4-DT, TC21 基体的疲劳极限分别是 538 和 620 MPa, 接头疲劳极限是 558 MPa, 通过对比 TC4-DT 母材、TC21 + TC4-DT 接头和 TC21 母材疲劳极限值可以看出, TC21 + TC4-DT 线性摩擦焊接头的疲劳极限与 TC4-DT 母材相当, TC21 母材疲劳极限最高, 达到 620 MPa. TC21 + TC4-DT 异种钛合金线性摩擦焊接头疲劳性能与母材下限值相当, 主要是由于摩擦焊接过程中, 接头组织发生大的塑性变形, 焊后接头形成细小针状组织, 有利于提高接头静强度和疲劳强度.

采用扫描电镜对疲劳试样断口进行观察分析, 疲劳宏观断口如图 9 所示, 其中图 9a, 9b, 9c 分别为 TC4-DT 基体、TC21 基体和 TC21 + TC4-DT 接头的断口形貌, 均由裂纹源区、裂纹扩展区和瞬断区组成. 断口表面呈现明显的放射状河流花样, 疲劳源位置明显, 可以发现, 基体和接头的裂纹源均起源于表面或近表面.

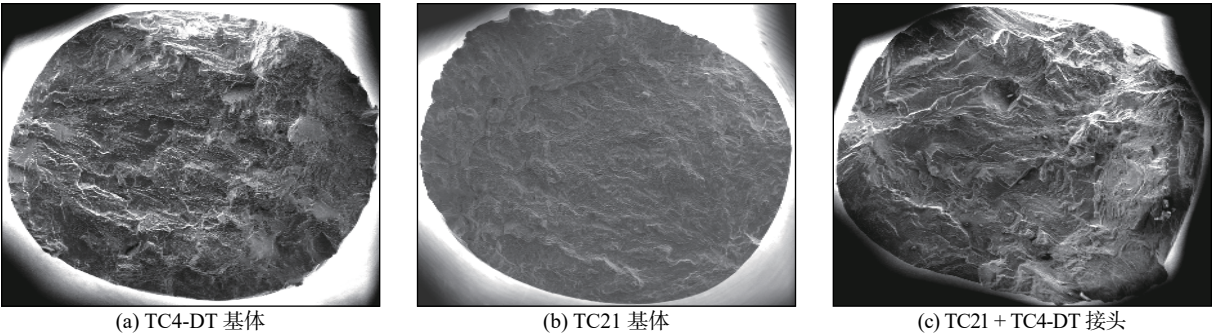


图 9 疲劳试样断口形貌  
Fig. 9 Macroscopic fracture surface of Fatigue specimens

图 10 为疲劳断口裂纹扩展区微观形貌, 微观组织对疲劳断裂特征的影响主要反应于疲劳裂纹扩展区, 其中图 10a, 10b 和 10c 分别为 TC4-DT 基体、TC21 基体和 TC21 + TC4-DT 接头的裂纹扩展区形貌. 对比可以看出, TC21 基体疲劳裂纹扩展区

疲劳辉纹及二次裂纹长度和深度明显高于 TC4-DT 基体和接头, 数量上的优势也很明显, 说明裂纹扩展过程中, 显著降低了裂纹扩展速度, 有利于疲劳寿命提高. 接头疲劳裂纹扩展区存在大量细小的疲劳辉纹及二次裂纹, 同时可以看出焊缝组织与母



材相比明显细小,焊缝组织晶粒细化有利于接头疲劳强度的提高。

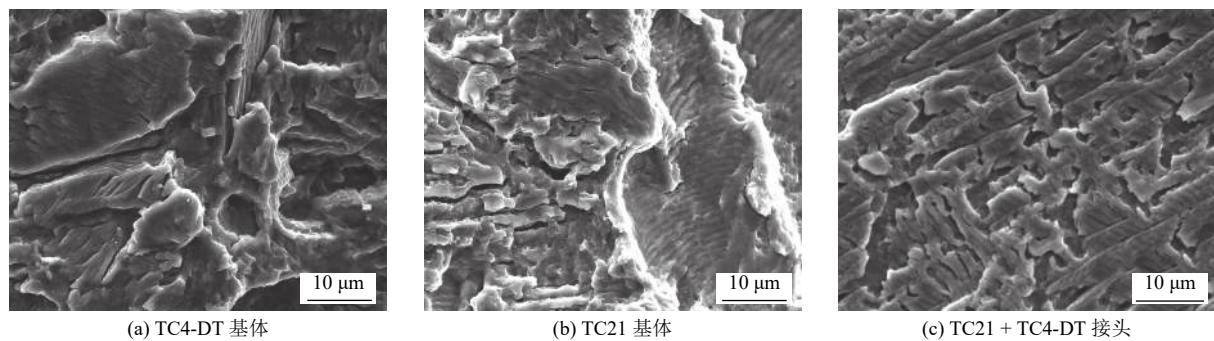


图 10 疲劳试样裂纹扩展区  
Fig. 10 Propagation of the fatigue cracks

### 3 结 论

(1) TC21 + TC4-DT 异种损伤容限型钛合金线性摩擦焊接头飞边成形良好,两边基体均有明显飞边产生,飞边表面光滑根部无明显缺陷存在。

(2) 焊态条件下焊缝组织具有典型的魏氏组织结构特征,热处理后焊缝组织弥散析出的  $\alpha+\beta$  针状组织,随着热处理温度的升高析出的针状  $\alpha$  相逐渐长大、粗化,导致接头冲击和断裂韧性先上升后下降。

(3) 接头母材高周疲劳性能试验结果表明,接头的疲劳极限达到 558 MPa,与 TC4-DT 基体相当,焊缝组织细化是提高接头疲劳极限的重要原因。

#### 参考文献:

- [1] Vairis A, Frost M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 292(1): 8 – 17.
- [2] Vairis A, Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy[J]. Wear, 1998, 217(1): 117 – 131.
- [3] 曹京霞, 黄旭, 李臻熙. TA15 钛合金的高周疲劳性能和断裂特征[J]. 材料工程, 2004(3): 28 – 30.  
Cao Jingxia, Huang Xu, Li Zhenxi. High cycle fatigue properties and fracture features of TA15 titanium alloy[J]. , 2004(3): 28 – 30.
- [4] 高灵清, 朱金华. TA5 钛合金焊板的疲劳断口分析[J]. 金属热处理, 2006, 31(8): 91 – 92.  
Gao Lingqing, Zhu Jinhua. Analysis on fatigue fractures of TA5 alloy welded plates[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(8): 91 – 92.
- [5] Bhamji I, Preuss M, Threadgill P L. Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(1): 2 – 12.
- [6] Wanjara P, Jahazi M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2005, 36A(8): 2149 – 2164.
- [7] 张传臣, 张田仓, 季亚娟, 等. 线性摩擦焊接头形成过程及机理[J]. 材料工程, 2012, 43(11): 39 – 43.  
Zhang Chuanchen, Zhang Tiancang, Ji Yajuan, et al. Formation process and mechanism of linear friction welding joint[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 43(11): 39 – 43.
- [8] 张传臣, 黄继华, 张田仓, 等. 异质钛合金线性摩擦焊接头微观组织与显微硬度分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 97 – 100.  
Zhang Chuanchen, Huang Jihua, Zhang Tiancang, et al. Investigation on microstructure and microhardness of linear friction welded joints of dissimilar titanium alloys[J]. Transactions of the China Welding institution, 2012, 33(4): 97 – 100.
- [9] Zhang C C, Zhang T C, Ji Y J, et al. Effects of heat treatment on microstructure and microhardness of linear friction welded dissimilar Ti alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 13: 3540 – 3544.
- [10] 马少俊, 吴学仁, 刘建中, 等. TC21 钛合金的微观组织对力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2006, 26(5): 22 – 25.  
Ma Shaojun, Wu Xueren, Liu Jianzhong, et al. Influence of microstructures on mechanical properties for TC21 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(5): 22 – 25.
- [11] 祝力伟, 王新南, 朱知寿. 不同热处理工艺下 TC4-DT 钛合金的显微组织及力学性能[J]. 钛工业进展, 2011, 29(1): 9 – 12.  
Zhu Liwei, Wang Xinnan, Zhu Zhishou. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4-DT alloy[J]. Titanium Industry Process, 2011, 29(1): 9 – 12.

第一作者简介: 张传臣, 男, 1981 年出生, 博士, 高级工程师. 主要从事摩擦焊理论及工艺研究. Email: [zhangchuanchen@sohu.com](mailto:zhangchuanchen@sohu.com)