

# 界面端奇异应力场分析在异种材料焊接中的应用

## Application of Singular Stress Field Analysis on Dissimilar Material Joining

中航工业北京航空制造工程研究所 李晓红 赵 磊  
北京航空航天大学机械工程学院 张彦华

**[摘要]** 依据界面力学的奇异性理论,阐述了接触角为  $90^\circ$  的对接界面的奇异应力场特征,并以此为基础,分别对异种钛合金的线性摩擦焊材料选用、 $C_f/C$  复合材料与 TC4 钛合金钎焊接头的钎料选择及界面层设计进行了分析,结果表明:TC4/TC17 较 TC11/TC17 具有较好的界面匹配,更易获得良好的线性摩擦焊接头;选用 AgCuTi 钎料较 TiZrNiCu 钎料更适于  $C_f/C$  复合材料与 TC4 合金的钎焊;选用 TiZrNiCu 钎料时,采用  $C_f/C$  复合材料/TiZrNiCu/Cu/ TiZrNiCu/Mo/TiZrNiCu/TC4 界面结构进行钎焊可获得较好的匹配连接。

**关键词:** 应力奇异性 线性摩擦焊 钎焊

**[ABSTRACT]** On base of the theory of singularity in interfacial mechanics, singular stress field at the interface edge of bonded dissimilar materials in  $90^\circ$  is analyzed. The choices of materials for linear friction welding of dissimilar titanium alloy, solder and filler metal for brazing  $C_f/C$  composite and TC4 alloy are analyzed by stress singularity theory. Result shows that matching of TC4/TC17 interface is better than that of TC11/TC17, and can realize better joint through linear friction welding. AgCuTi alloy is fitter for brazing  $C_f/C$  composite and TC4 alloy than TiZrNiCu alloy. Using  $C_f/C$  composite / TiZrNiCu / Cu / TiZrNiCu / Mo / TiZrNiCu / TC4 interface structure can get matching joint for brazing  $C_f/C$  composite and TC4 by TiZrNiCu alloy filler metal.

**Keywords:** Stress singularity Linear friction welding Brazing

从结构角度看,异种材料的焊接问题在本质上是焊接接头的界面问题。由于异种材料在物性参数方面存在诸多差异,接头界面处难免存在应力奇异性问题<sup>[1]</sup>。降低应力奇异性,克服或减弱异种材料之间的界面力学失配效应,是各种焊接方法及工艺实现稳定连接、获得完整性构件所要解决的关键问题之一。

作为一门有效的理论分析方法,界面力学已在材料的结构分析、连接构件的疲劳及断裂行为分析中得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。为了充实界面力学的应用领域,本课题以

异种金属材料的焊接和非金属材料与金属材料的钎焊为例,进行了材料间相互匹配的界面奇异性分析,可为界面力学理论在异种材料焊接工艺设计中的应用提供经验。

### 1 界面力学理论基础

在异种材料的连接结构中,由于材料之间在物理、化学及力学等性能方面存在差异,难免出现连接界面应力、微孔、开裂等焊接缺陷,这些接头失配现象直接影响到连接构件的强度和可靠性。

界面力学和弹性力学分析表明,两种不同的各向同性均匀弹性体以任意角结合时(图 1 所示  $B$  为两种材料连接界面,  $O$  为界面端部,两种材料结合角为  $a$ 、 $b$ ),其

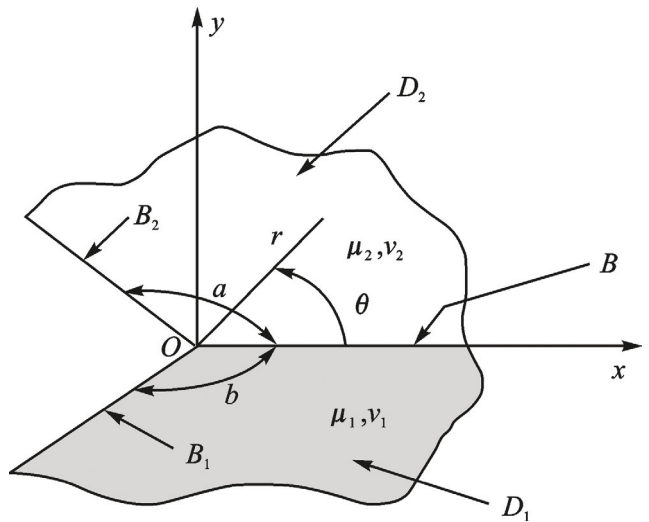


图1 异种材料连接接头界面端部模型<sup>[1]</sup>

Fig.1 Interface section model of dissimilar material joint

界面端部的应力  $\sigma$  和应力指数满足如下关系式<sup>[1,2,6]</sup>:

$$\sigma_{ij} \propto r^{-1+p}, \quad (1)$$

$$D(a, b, \alpha, \beta, p) = A\beta^2 + 2Ba\beta + C\alpha^2 + 2D\beta + 2E\alpha +$$

$$F = 0, \quad (2)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$  是与结合角有关的系数。  $\alpha$ 、 $\beta$  称为 Dundurs 参数,表征异种材料连接界面弹性力学失配度,与连接材料的弹性常数有关,可表示为<sup>[1,2,6]</sup>:

$$\alpha = \frac{\mu_1(1-\nu_2) - \mu_2(1-\nu_1)}{\mu_1(1-\nu_2) + \mu_2(1-\nu_1)}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\mu_1(1-2\nu_2) - \mu_2(1-2\nu_1)}{2\{\mu_1(1-\nu_2) + \mu_2(1-\nu_1)\}}$$

式中,  $\alpha$  对应垂直于界面的拉伸性能在界面上下的错配;  $\beta$  对应平行于界面的面内性能在界面上下的错配。  $\mu$  是材料的剪切模量,  $\nu$  是泊松比。

式(2)中, 当给定结合材料及其界面端形状后, 只有特征值  $p$  是未知的, 此方程被称为界面端的特征方程<sup>[6]</sup>。

当接触角  $a=b=90^\circ$  时, 式(2)可改写为:

$$[\sin^2(\frac{\pi}{2}p) - p^2]^2 \beta^2 - p^2 [\sin^2(\frac{\pi}{2}p) - p^2] \alpha (\alpha - 2\beta) + \cos^2(\frac{\pi}{2}p) [\sin^2(\frac{\pi}{2}p) - p^2 \alpha^2] = 0. \quad (4)$$

由此可得出如图 2<sup>[6]</sup> 所示的  $p \sim (\alpha, \beta)$  轨迹。如图 2 所示, 在 I 和 III 区, 应力指数  $p \geq 1$ ,  $\alpha(\alpha - 2\beta) \leq 0$  界面边缘应力无奇异性, 属于等匹配和良性匹配状态; 而在 II 区,  $0 < \beta < 1$ ,  $\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$ , 界面端附近存在应力奇异性, 结构为失配状态<sup>[1,6]</sup>。

此外, 随接触角  $a, b$  的变化,  $p \sim (\alpha, \beta)$  轨迹也会发生变化。利用该轨迹分布, 可在工程应用中对给定接触角的材料组合进行选材设计, 也可对给定材料进行结构设计, 为获得性能匹配、界面端部奇异性小的接头提供理论依据。

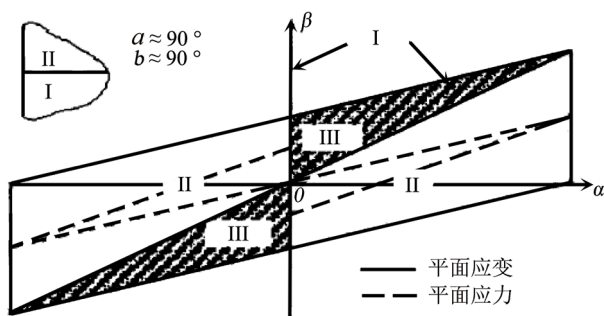


图2 界面端应力奇异指数与材料组合的关系<sup>[1,6]</sup>

Fig.2 Relation between stress singularity index of interface section and material combination

## 2 界面端奇异应力场分析在异种材料焊接中的应用

### 2.1 异种金属材料的焊接领域

线性摩擦焊是实现材料可靠优质连接的新型固相焊接技术, 尤其在异种材料的连接中已展现出广阔的发展势头和应用前景<sup>[7-10]</sup>。本文以异种钛合金的线性摩擦焊为例, 说明界面力学分析在焊接选材中的应用。

钛合金线性摩擦接头主要分为 3 个区域<sup>[9,10]</sup>: 焊合

区、热机影响区和母材。在界面力学模型的建模中<sup>[11,6]</sup>, 当实际结合部的界面层较薄时, 可将其简化为一个界面, 从力学分析角度看, 将复杂的界面相和界面层简化为理想的界面, 进而分析能描述界面受力或变形情况的参数, 将此参数作为评价参数, 通过试验的方法决定对应的界面特性, 则复杂界面层的影响就被包含在试验所得界面特性值中, 在分析界面的受力或变形情况时, 已没有必要考虑界面相的影响; 而当界面层较厚时, 在其中心位置附近通常会形成一个物性相对稳定的中间层, 此时应当作两个界面处理, 在界面分析时需对每个界面层分别进行考虑。

异种材料线性摩擦焊接头的界面层厚度一般在几  $\mu\text{m}$  左右<sup>[9-10]</sup>。为减少界面间相互影响因素并简化计算, 加之多层界面是单层界面的叠加, 其界面性能因各界面的相互连续变化, 并存在过渡区而使得界面不均匀性得到缓解, 以单层界面模型为基础开展分析和研究的结果对工程应用将具有更大的安全裕度, 因此在考虑接头宏观力学性能时, 可以把它理想化为一个界面(图 3)。

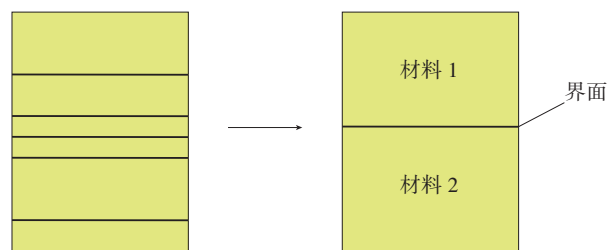


图3 异种材料线性摩擦焊单层界面力学模型的建立

Fig.3 Dynamics model construction for single interface of dissimilar material linear friction welding

表 1<sup>[11]</sup> 所示为 3 种典型钛合金材料 TC4、TC17 以及 TC11 的材料常数。按照式(3), 可以获得 TC4/TC17 界面端部界面力学性能失配参数  $\alpha, \beta$  的取值。

表1 TC4、TC17、TC11钛合金的相关物性参数<sup>[11]</sup>

材料	剪切模量 $\mu$ / GPa	弹性模量 $E$ / GPa	热膨胀系数 $\lambda$ / ( $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	泊松比 $\nu$
TC4	44	109	10	0.34
TC17	43.2	112	9.9	0.33
TC11	43	123	10.4	0.33

$\alpha = -0.01669$ ,  $\beta = -0.009794$ ,  $\alpha(\alpha - 2\beta) = -0.00004836762 < 0$ , 所以 TC4/TC17 的界面为“良性匹配”组合; 而 TC11/TC17 两种材料界面的失配参数  $\alpha = -0.00232$ ,  $\beta = 0.0005887$ ,  $\alpha(\alpha - 2\beta) = 0.000002650832 < 0$ , 所以 TC11/TC17 的界面为“不良匹配”组合。

从表 1 中材料的物性参数可以看出, TC4/TC17 组合与 TC11/TC17 组合相比, 前者的热、物理性能差异较

小,在线性摩擦焊热过程后界面两侧材料的内部热应力相对较小,因而前者组合更利于获得稳定接头。采用线性摩擦焊方法分别进行TC4/TC17和TC11/TC17的焊接,结果表明前者的接头界面残余应力(120MPa)明显小于后者(258MPa),验证了前面的分析。

### 2.2 非金属材料与金属材料的钎焊领域

以 C<sub>f</sub>/C 复合材料与 TC4 钛合金的钎焊连接为例,对钎焊构件的界面结构设计进行讨论。已有研究结果指出<sup>[12]</sup>,选用 AgCuTi 和 TiZrNiCu 两种钎料均可实现 C<sub>f</sub>/C 复合材料与 TC4 钛合金的钎焊连接,并且以 AgCuTi 钎料的连接效果较好,同时指出因残余应力等原因使接头位于 C<sub>f</sub>/C 复合材料侧的连接界面成为连接中的最薄弱部位,在钎焊过程中添加 Cu、Mo 箔作为应力缓冲层材料,能有效改善接头的界面应力。

通过界面力学,可对上述钎焊接头结构进行分析。根据表 2<sup>[12]</sup>所示材料相关数据,对 C<sub>f</sub>/C 复合材料-TC4 接头各界面端奇异性进行分析如下。

表2 C<sub>f</sub>/C复合材料、AgCuTi、TiZrNiCu、Cu、Mo的相关物性参数<sup>[12]</sup>

材料	剪切模量 μ/GPa	泊松比 ν	热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
C <sub>f</sub> /C	4.4	0.25	0.45
AgCuTi	36.7	0.363	19
TiZrNiCu	40.3	0.34	7.67
Cu	47	0.33	16.7
Mo	121	0.32	4.8

C<sub>f</sub>/C 复合材料/TC4:  $\alpha=-0.315, \beta=-0.136, \alpha(\alpha-2\beta)=0.013545$ ;

C<sub>f</sub>/C 复合材料/AgCuTi:  $\alpha=-0.815, \beta=-0.283, \alpha(\alpha-2\beta)=0.202935$ ;

C<sub>f</sub>/C 复合材料/TiZrNiCu:  $\alpha=-0.825, \beta=-0.283, \alpha(\alpha-2\beta)=0.213675$ ;

AgCuTi/TC4:  $\alpha=-0.073, \beta=-0.003, \alpha(\alpha-2\beta)=0.004891$ ;

TiZrNiCu/TC4:  $\alpha=-0.044, \beta=-0.011, \alpha(\alpha-2\beta)=0.000968$ ;

Cu/Mo:  $\alpha=-0.434, \beta=-0.107, \alpha(\alpha-2\beta)=0.09548$ ;

C<sub>f</sub>/C 复合材料/Cu:  $\alpha=-0.846, \beta=-0.288, \alpha(\alpha-2\beta)=0.22842$ ;

C<sub>f</sub>/C 复合材料/Mo:  $\alpha=-0.936, \beta=-0.314, \alpha(\alpha-2\beta)=0.288288$ ;

Cu/TC4:  $\alpha=0.026, \beta=0.0007, \alpha(\alpha-2\beta)=0.000624$ ;

Mo/TC4:  $\alpha=0.455, \beta=0.104, \alpha(\alpha-2\beta)=0.112385$ ;

Cu/TiZrNiCu:  $\alpha=-0.069, \beta=-0.012, \alpha(\alpha-2\beta)=0.003174$ ;

Mo/TiZrNiCu:  $\alpha=-0.489, \beta=-0.113, \alpha(\alpha-2\beta)=0.128607$ 。

通过上述计算,可以看出 C<sub>f</sub>/C 复合材料与 TC4 接头的各界面层均存在奇异性。为了降低接头两端的界面应力,获得良好接头,可通过钎料选择、界面结构设计来实现,具体如下:

(1) C<sub>f</sub>/C 复合材料/AgCuTi 界面的奇异性(0.013545)较 C<sub>f</sub>/C 复合材料/TiZrNiCu 组合界面的(0.213675)要小,因而在对 C<sub>f</sub>/C 复合材料进行钎焊时优选 AgCuTi 钎料;

(2) 在选定 TiZrNiCu 钎料的条件下,可通过添加中间层材料来调节接头界面结构的奇异性,从而提高接头质量。已知 Cu/TiZrNiCu 界面的奇异性(0.003174)小于 Mo/TiZrNiCu 界面的奇异性(0.128607),为保护 C<sub>f</sub>/C 复合材料侧的连接界面,将塑性较好、奇异性较小的 Cu/TiZrNiCu 界面置于接近 C<sub>f</sub>/C 复合材料侧,而将奇异性较大的 Mo/TiZrNiCu 界面置于 TC4 侧,使接头中的一部分界面应力分担到 Mo 中间层上,从而促进接头的连接质量。

试验结果表明<sup>[12]</sup>,选用 Cu-Mo 复合中间层对 C<sub>f</sub>/C 复合材料/TiZrNiCu/Cu/TiZrNiCu/Mo/TiZrNiCu/TC4 结构进行钎焊,能有效降低接头的焊接残余应力,提高接头的连接强度,这与前面所述分析结果相吻合。

综上分析,在钎焊物性差别较大的异种材料时,可通过对比接头界面层的奇异性差异,对接头的焊接结构进行匹配设计,为获得良好接头提供指导。

### 3 结论

通过材料间的界面奇异性分析和焊接试验验证,得出界面力学可为异种金属材料或非金属材料与金属材料的焊接选材及接头结构设计提供依据,具体如下:

(1) 对于物性差异较小的异种金属材料焊接构件,在焊接选材方面可通过异种材料间的界面奇异性指数  $\alpha$  和  $\beta$  进行匹配选用,为获得界面应力小的焊接接头提供指导;

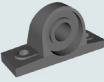
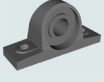

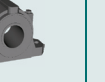






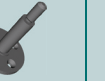










(2) 对于物性差异较大的非金属材料 and 金属材料,在焊接用钎料及中间层材料的选择和界面结构设计方面,通过界面层的奇异性分析可为接头界面应力的匹配分布提供设计依据。

### 参考文献

- [1] 许金泉. 界面力学. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 张彦华, 刘家奇, 段小雪. 异种材料连接中的界面力学问题. 电焊机, 2007,37(7):15-17.
- [3] 陈铮, 赵其章, 吴斌, 等. Si3N4/Ti/Ni/Ti/Si3N4 部分瞬间液

(下转第 95 页)

表1 部分检索结果示例

检索模型	检索结果排序(前6位)					
	①	②	③	④	⑤	⑥
						
						
						

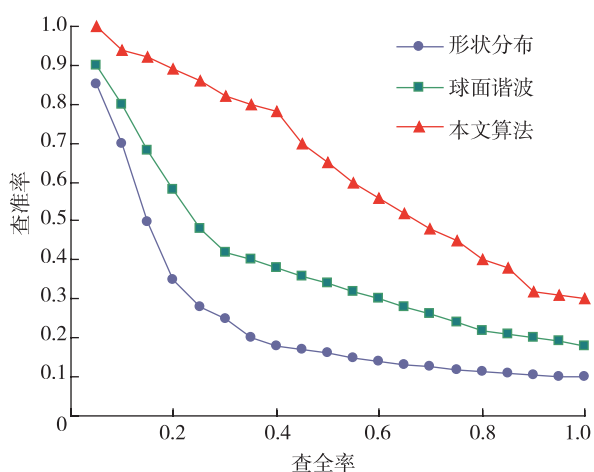


图2 3种算法的查全-查准率曲线

Fig.2 Recall ratio-precision ratio curve with 3 different algorithms

的子部分,然后对这些子部分进行语义描述和标注,在此基础上,充分利用模型的语义信息和用户的个性化信息,实现了基于语义的三维CAD模型检索算法。该算法的最大特点在于可以解决用户如何去检索及检索结果如何重用等问题。试验结果表明,本文算法的检索性能要明显的高于形状分布算法和球面谐波算法。

### 参考文献

- [1] Iyer N, Kalyanaraman Y, Lou K, et al. A reconfigurable intelligent 3D engineering shape search system part I: shape representation//ASME DETC Computers and Information in Engineering (CIE) conference, 2003:1-10.
- [2] Iyer N, Jayanti S, Lou K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends. Computer-Aided Design, 2005, 37(5): 509-530.
- [3] Leifman G, Meir R, Tal A. Semantic-oriented 3D shape retrieval using relevance feedback. The Visual Computer, 2005, 21(8):865-875.
- [4] Albertoni R, Papaleo R, Pitikakis M. Ontology-based searching framework for digital shapes. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3762: 896-905.

[5] Attene M, Robbiano F, Spagnuolo M. Part-based annotation of virtual 3D shapes//Proceedings of the International Conference on Cyberworlds. Hannover, 2007: 427-436.

[6] Joshi S, Chang T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from 3D solid model. Computer-Aid design, 1988, 20(2): 58-66.

[7] Messmer B T, Bunke H. Efficient subgraph isomorphism detection: a decomposition approach. IEEE Trans. On Knowledge and Data Engineering, 2000,12(2):307-323.

[8] Cicirello V, Regli W C. Machining feature-based comparisons of mechanical parts//International Conference on Shape Modeling and Application. Genova, 2001:176-185.

[9] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4):807-832.

[10] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors//Proceedings of Symposium on Geometry Processing. Aachen, 2003:156-164.

(责编 夏宛)

(上接第92页)

相连接头的强度与断裂.中国有色金属学报,1999,9:167-172.

[4] 戴瑛,嵇醒.界面端应力奇异性与复合材料界面剪切强度微观实验分散性分析.应用力学学报,2004,21(1):90-95.

[5] 吴志学.三维双材料结构的应力奇异性分析.计算力学学报,2004,21(5):592-596.

[6] 张彦华.焊接力学与结构完整性原理.北京:北京航空航天大学出版社,2007.

[7] 英国Thompson摩擦焊有限公司.线性摩擦焊技术介绍.航空制造技术,2008(17):65.

[8] 张田仓,韦依,周梦慰,等.线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用.航空制造技术,2004(11):57-58

[9] 马铁军,史栋刚,张勇,等.TC4+TC17线性摩擦焊接头的微观组织与力学性能.航空材料学报,2009,29(4):33-37.

[10] 季亚娟,张田仓,李晓红.TC11/TC17钛合金线性摩擦焊接头组织与性能.航空制造技术,2011(8):66-69.

[11] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册(第4卷).北京:中国标准出版社,2002.

[12] 秦优琼.C/C复合材料与TC4钎焊接头组织与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

(责编 三丰)