

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.022

# 铜始极片预剥离技术的研究

钟 晨, 孙东明, 蒋龙飞, 莫翰林  
(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**针对铜始极片预剥离失败导致后续剥离无法进行的问题,运用材料力学理论对铜始极片与钛种板结合面的剪切力进行了分析。以钛板厚度和挠曲力的作用位置为变量设计了 9 种组合,并分别建立了三维模型,应用 ANSYS Workbench 软件进行了模拟仿真,对各组合的界面端剪应力及板结构的挠曲变形进行了比较分析,找出了所设变量对铜始极片预剥离阶段的影响,确定了有利于提高铜始极片剥离质量和效率且对钛种板损伤小的较优组合。研究结果表明:铜始极片界面端处剪应力达到最大值,解释了始极片开口原因;选择较小的钛板厚度,并使挠曲力作用位置靠近界面端则会更有利于始极片的预剥离。

**关键词:**阴极铜剥片机;预剥离;ANSYS Workbench;应力分析

**中图分类号:**TP391.9;TF804.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2018)08-0898-05

## Study on pre-stripping technology of copper initiator

ZHONG Chen, SUN Dong-ming, JIANG Long-fei, MO Han-lin  
(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University  
of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the pre-stripping of the copper pole piece failed to lead to subsequent peeling, the shear stress of copper starting sheet joint and titanium seed plate joint was analyzed by using the theory of material mechanics and according to the thickness of the titanium plate and flexural force, nine kinds of combinations were designed. The three-dimensional model was established for each combination, and simulated by using ANSYS Workbench software. By analyzing the interface shear stress and the plate structure deformation. Find out the influence of the set variables on the pre-delamination phase of the copper pole piece, determined the better combination that good for improve the quality and efficiency of copper stripping quality with less damage to the titanium starting plate. The results indicate that the shear stress reaches the maximum at the copper pro-plate interface, explaining the reason for the opening of the projectile. Choosing a smaller thickness of the titanium plate and placing the force in the deflecting near the interface will be more conducive to pre-peel.

**Key words:** cathode copper stripping; pre-stripping; ANSYS Workbench; stress analysis

## 0 引 言

传统的电解铜生产水平已经不能满足目前的市场需求。国外的铜冶炼企业早在 20 世纪 20 年代就开始了电解铜自动化生产线的研究。近些年,国内的冶炼厂也加大了该领域投入。其中,铜始极片及电解铜的剥离是研发自动化生产线的关键<sup>[1-2]</sup>。在始极片的剥片工艺中,剥离装置设计有预剥离、完全剥离两个工

序,预剥离是完全剥离的前置工序,其核心部件为挠曲装置,即对种板施加一个挠曲力使种板产生一个弯曲力矩从而使附着在种板上的铜始极片端部产生开口。如果预剥离失败,则完全剥离无法继续进行,严重影响生产效率<sup>[3]</sup>。

为提高始极片的剥离成功率、减少返工工作量、延长钛种板的使用寿命,本文将对始极片预剥离技术进行研究。

1 始极片结合界面应力计算

传统法生产阴极铜必须先制作铜始极片,目前许多铜冶炼厂生产铜始极片所用的种板为钛种板。因此,以钛种板为例,分析挠曲力作用在钛板的中间位置( $x=0$  处)时,铜始极片与钛板结合界面的切向剪应力,及下层铜始极片上的横向剪应力。

板结构在挠曲力  $F$  作用下的计算模型如图 1 所示。

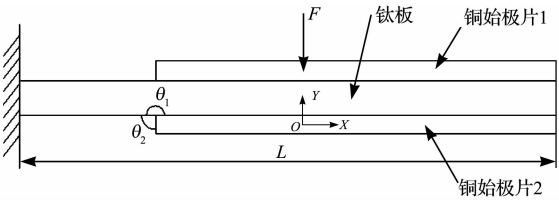


图 1 板结构力学模型

在如图 1 所示的挠曲力的作用下,由于结合界面端附近的剪应力比较大,并且界面端附近具有应力奇异性,铜始极片 2 与钛种板结合界面的界面端处会率先分离<sup>[4]</sup>。作用在板结构上的挠曲力使板结构发生弯曲,板结构所受挠曲力近似均匀分布在一条直线上,在板的挠曲变形比较小时,将板沿纵向分成若干份,各小份可以看作矩形等截面梁。因此,对细分成的梁用材料力学的弯曲理论进行应力分析。由于板在横向受力均匀,细分后梁的弯曲正应力、挠度、切应力可以代表板的应力情况。

研究对象为夹层等截面直板,中间层比表面层稍厚。当板结构受到横向集中载荷的作用时,对夹层板单元进行受力分析,除了要考虑剪力、弯矩以外,还要考虑层间剪切力和轴向拉力的作用<sup>[5-12]</sup>。夹层板下层受力分析如图 2 所示。

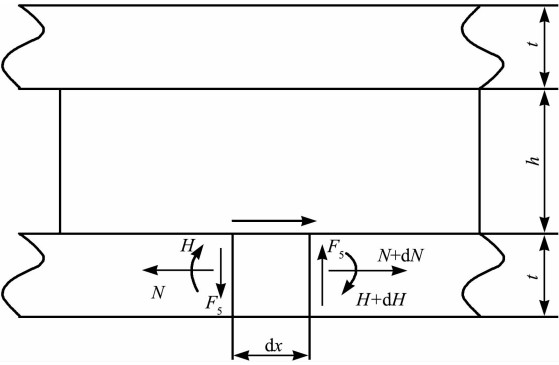


图 2 夹层板微元受力平衡

参考图 2,由夹层板微单元的弯矩平衡和  $x$  方向的力平衡方程得到:

$$\frac{dN}{dx} = -b\tau \tag{1}$$

$$\frac{dM}{dx} = \frac{1}{2}b\tau(h+t) - \frac{F}{2} \tag{2}$$

式中: $\tau$ —剪应力; $b$ —截面宽度; $h$ —钛板厚度; $F$ —挠曲力。

由(2) 式得:夹层板与均质板的区别在于,夹层板的弯矩不仅与横向剪力有关,还与层间剪切力有关。

夹层板的上下表层受到弯矩和轴向力的作用,应用 Euler-Bernoulli 理论进行分析,可得应力应变关系:

$$E \frac{du}{dx} = \frac{N}{t} \tag{3}$$

$$\frac{bEt^3}{12} \frac{d^2v}{dx^2} = M \tag{4}$$

式中: $E$ —弹性模量; $t$ —始极板厚度; $u$ —夹层板轴向的位移; $v$ —夹层板横向的位移。

由式(1 ~ 4) 得:

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{b\tau}{Et} \tag{5}$$

$$\frac{d^3v}{dx^3} = \frac{6}{bEt^3} [bt(h+t) - F] \tag{6}$$

式中: $u$ —夹层板轴向的位移; $v$ —夹层板横向的位移; $E$ —弹性模量; $t$ —始极板厚度; $b$ —截面宽度; $h$ —钛板厚度。

夹层板层间变形协调关系如图 3 所示。

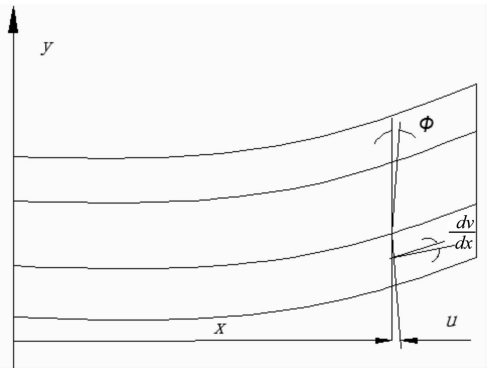


图 3 夹层板层间变形协调关系

由于面内剪切力的作用,中间层钛板会发生剪切变形,因此,依据上下表层与中间层的变形协调关系,剪切变形的角度为:

$$\varphi = \frac{\left[ \frac{du}{dx}(h+t) - 2u \right]}{h} \tag{7}$$

式中: $\varphi$ —剪切变形的角度; $u$ —夹层板轴向的位移; $t$ —始极板厚度; $h$ —钛板厚度。

因此,层间剪切应力为:

$$\tau = G\varphi = \frac{G}{h} \left[ (h+t) \frac{dv}{dx} - 2u \right] \tag{8}$$

式中:  $G$ — 剪切模量;  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $u$ — 夹层板轴向的位移;  $v$ — 夹层板横向的位移;  $\varphi$ — 剪切变形的角度。

对式(8)求  $x$  二阶导数, 并将式(5,6)代入可得:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \frac{2G}{Eht^3}[3(h+t)^2 + bt^2]\tau = -\frac{6G(h+t)}{bEht^3}F \quad (9)$$

式中:  $G$ — 剪切模量;  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $u$ — 夹层板轴向的位移;  $v$ — 夹层板横向的位移;  $\varphi$ — 剪切变形的角度;  $E$ — 弹性模量;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力。

解式(9)得到层间剪切力表达式为:

$$\tau = A\sinh(mx) + B\cosh(mx) + \frac{3(h+t)}{b[3(h+t)^2 + bt^2]}F \quad (10)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力。

$$m^2 = \frac{2G}{Eht^3}[3(h+t)^2 + bt^2] \quad (11)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $b$ — 截面宽度;  $E$ — 弹性模量;  $G$ — 剪切模量。

将边界条件:  $x = 0$  时,  $\tau = 0$ , 代入式(10)可求得:

$$B = -\frac{3(h+t)}{b[3(h+t)^2 + bt^2]}F \quad (12)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力。

对式(8,10)微分, 并进行比较有:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{G}{h}\left[(h+t)\frac{d^2v}{dx^2} - 2\frac{du}{dx}\right] =$$

$$\frac{2G}{Eht}\left[\frac{6(h+t)}{t^2}M - N\right] = m[A\cosh(mx) + B\sinh(mx)] \quad (13)$$

式中:  $G$ — 剪切模量;  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $u$ — 夹层板轴向的位移;  $v$ — 夹层板横向的位移;  $\varphi$ — 剪切变形的角度;  $E$ — 弹性模量;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力;  $N$ — 轴力;  $M$ — 弯矩。

由边界条件:  $x = L/2$  时,  $M = N = 0$ , 结合式(13)可以求得:

$$A = -B\sinh\left(\frac{mL}{2}\right) \quad (14)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $L$ — 跨度。

联立式(12,14)解得常数  $A$ 、 $B$ , 并代入式(10)求得层间剪切力的表达式为:

$$\tau = \frac{3(h+t)F}{b[3(h+t)^2 + bt^2]}\left[\sinh\left(\frac{mL}{2}\right)\cosh(mx) - \cosh(mx) + 1\right] \quad (15)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $L$ — 跨度;  $b$ — 截面宽度。

将式(15)代入式(1)积分并结合边界条件( $x = L/2$  时,  $N = 0$ )求得轴力的表达式为:

$$\begin{aligned} N &= \frac{3(h+t)F}{b[3(h+t)^2 + bt^2]}\tau \\ &= \frac{3(h+t)F}{2b[3(h+t)^2 + bt^2]}\left[\frac{\sinh\left(\frac{mL}{2}\right)}{m}\cosh(mx) - \frac{\cosh(mx)}{m} - \left(\frac{L}{2} - x\right)\right] \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $L$ — 跨度;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力。

将式(14)代入式(2)并对  $x$  积分, 结合边界条件( $x = L/2$  时  $M = 0$ )求得弯矩为:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3(h+t)F}{2b[3(h+t)^2 + bt^2]}\left[\frac{\sinh\left(\frac{mL}{2}\right)}{m}\cosh(mx) - \frac{\cosh(mx)}{m} + \frac{t^2\left(L - \frac{x}{2}\right)}{3(h+t)^2}\right] \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $L$ — 跨度;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力。

下层铜始极片正应力计算如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{N}{bt} - \frac{12My}{bt^3} = \frac{3(h+t)F}{bt[3(h+t)^2 + bt^2]} \\ &\quad \left[\left[\frac{\sinh(mx)}{m} - \frac{\cosh(mx)}{m}\right] \left[1 + \frac{6(h+t)}{t^2}y\right] + (L-x)\left(1 - \frac{2}{t+h}\right)\right] \end{aligned} \quad (18)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $L$ — 跨度;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力;  $N$ — 轴力;  $M$ — 弯矩。

下层铜始极片上横向剪应力的分布表示为:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \int_{-\frac{1}{2}}^y \left(\frac{12y}{bt^3}\frac{dM}{dx} - \frac{dN}{dx}\frac{1}{bt}\right)dy \\ &= \frac{3}{t}\left[\left(\frac{y}{t}\right)^3 - \frac{1}{4}\right]\left[\tau(h+t) - \frac{F}{b}\right] + \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{t}\right)\tau \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $h$ — 钛板厚度;  $t$ — 始极板厚度;  $b$ — 截面宽度;  $F$ — 挠曲力;  $N$ — 轴力;  $M$ — 弯矩;  $\tau$ — 剪应力。

由于始极片的剥离涉及不同材料、接触、大变形以及界面端的应力奇异性等非线性问题, 很难使用理论分析的方法对结合界面的应力进行精确分析。

2 始极片预剥离过程仿真

2.1 建 模

在 Soild works 中建立铜始极片预剥离机构的简化模型,导入 ANSYS Workbench 中对始极片进行静力学分析<sup>[13]</sup>。

简化模型如图 4 所示。

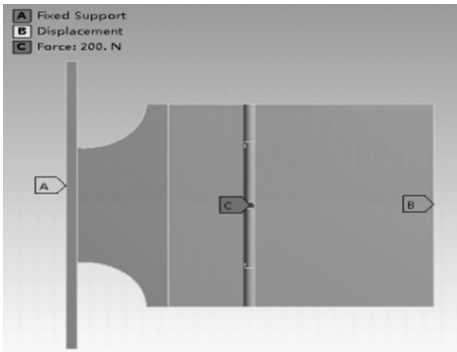


图 4 预剥离机构简化模型

在 ANSYS 中设置铜始极片弹性模量  $E = 12.86 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.36$ ;钛种板的弹性模量  $E = 108$ ,泊松比  $\nu = 0.33$ 。由于铜始极片从钛种板上剥离下来是因为受到油缸驱动的推杆的横向力的作用,因此本仿真的力载荷施加在推杆上,力的类型为集中力,大小为  $200 \text{ N}$ 。

由于目前始极片的预剥离装置中挠曲力机构通常设置在钛种板长度方向的中间位置,距离铜始极片界面端  $1/4$  处。因此,选取挠曲力作用位置和钛种板厚度为变量,分析钛板厚度和挠曲力作用位置的变化对铜始极片与钛种板结合界面端的应力分布的影响,进而以应力值和挠度值作为评价指标,选出较优的有利于剥离的组合。

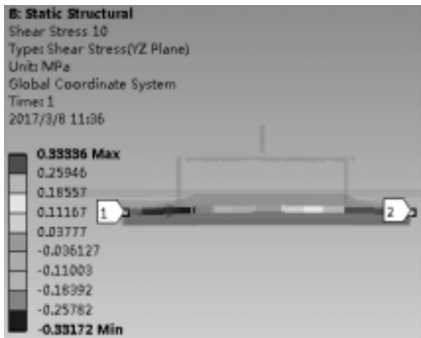
本文选取挠曲力的作用位置分别为铜始极片的中间位置(位置 1)、钛种板的中间位置(位置 2)、距离铜始极片界面端  $1/4$  处(位置 3)。由于厚度为  $2 \text{ mm}$  以下的钛种板在挠曲力作用下容易变形,而钛板厚度太大会造成浪费。因而,选取钛板的厚度分别为  $2 \text{ mm}$ 、 $3.25 \text{ mm}$ 、 $4.5 \text{ mm}$ 。综合考虑力的作用位置和板厚,可得到 9 种组合,如表 1 所示。

表 1 挠曲力的作用位置和钛板板厚的组合

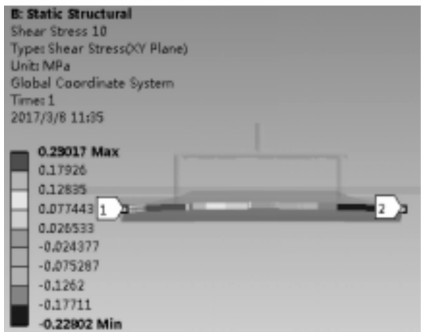
| 力的作用位置 | 板厚 2/<br>mm | 板厚 3.25/<br>mm | 板厚 4.5/<br>mm |
|--------|-------------|----------------|---------------|
|        | mm          | mm             | mm            |
| 位置 1   | 组合 1        | 组合 4           | 组合 7          |
| 位置 2   | 组合 2        | 组合 5           | 组合 8          |
| 位置 3   | 组合 3        | 组合 6           | 组合 9          |

2.2 始极片与钛种板结合界面端应力及挠度分布

经 ANSYS Workbench 软件分析后得出各组合的静力学分析结果。组合 1 的铜始极片与钛板结合界面端的横向剪应力分布云图及切向剪应力分布云图如图 5 所示(其他组合云图相似)。



(a) 组合1结合界面端横向剪应力分布图



(b) 组合1结合界面端切向剪应力分布图

图 5 界面上沿宽度方向界面端的剪应力分布云图(组合 1)

9 种不同组合下,铜始极片与钛板组成的板结构沿厚度方向的挠度变化云图如图 6 所示。

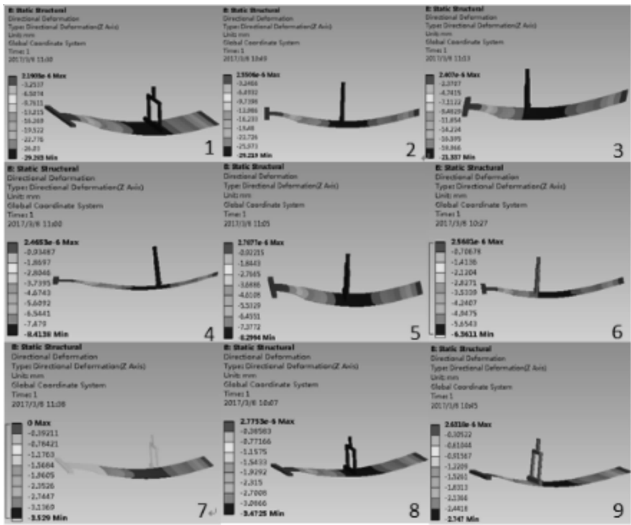


图 6 各组合沿厚度方向的挠度值分布云图

图中数字 1 到 9 表示组合 1 到组合 9 的挠度云图的编号。

最后将所得仿真数据汇总,如表 2 所示。

表 2 各组合界面端剪应力及挠度最大值

|      | 横向剪应力最大值  | 切向剪应力最大值  | 挠度最大值   |
|------|-----------|-----------|---------|
|      | /MPa      | /MPa      | /mm     |
| 组合 1 | 0.333 36  | 0.230 17  | 29.283  |
| 组合 2 | 0.593 55  | 0.410 23  | 29.219  |
| 组合 3 | 0.739 7   | 0.507 08  | 21.337  |
| 组合 4 | 0.080 907 | 0.063 515 | 8.413 8 |
| 组合 5 | 0.179 54  | 0.142 85  | 8.299 4 |
| 组合 6 | 0.234 64  | 0.189 31  | 6.361 1 |
| 组合 7 | 0.043 379 | 0.037 177 | 3.529   |
| 组合 8 | 0.096 75  | 0.083 518 | 3.472 5 |
| 组合 9 | 0.121 71  | 0.106 09  | 2.747   |

2.3 实验及结果分析

将仿真数据汇总得到表 2,将表 1 的数据结合表 2 可以得出:在钛板厚度不变的情况下,力的作用位置越靠近界面端,板结构的最大挠度值越小,界面端剪应力值越大。从表 2 可以看出:组合 3 的剪应力值比组合 1 和组合 2 的大,有利于剥离,而且组合 3 的最大挠度值比组合 1 和组合 2 小很多,对铜始极片和钛板的挠曲损伤比组合 1 和组合 2 小,可以减少铜始极片后续矫直的工作量并延长钛板的使用寿命,因此组合 3 相对组合 1、组合 2 是较优选择。同理,组合 6 相对于组合 4、组合 5 是较优选择,组合 9 相对于组合 7、组合 8 是较优选择。

在力的作用位置不变的情况下,钛板厚度越大,板结构的最大挠度值越小,结合界面界面端的剪应力值越小,板厚越小,界面端剪应力及板结构挠度对板厚的变化越敏感。从表 2 中比较挠曲力的作用位置为距离铜始极片界面端 1/4 处(位置 3)但板厚分别为 2 mm、3.25 mm、4.5 mm 的组合 3、组合 6、组合 9,可以看出:组合 3 的剪应力值比组合 6、组合 9 大,更有利于剥离,但挠度值也比较大。

因此,在钛板强度允许的条件下,选择较小的钛板厚度,将力的作用位置设置在靠近界面端的位置会有利于剥离并延长钛板的使用寿命。

3 结束语

本文分析了铜始极片与钛种板结结合界面上的剪

应力分布,并应用有限元方法研究了钛种板厚度和挠曲力作用位置的变化对预剥离的影响。

研究表明:在铜始极片上,剪应力在界面端处达到最大值,在其他区域剪应力比较小,而且没有出现突变,这也是在外力作用下始极片率先从界面端分离的原因。在钛板强度允许的条件下,选择较小的钛板厚度,将力的作用位置设置在靠近界面端的位置会有利于剥离,并且能减小钛种板和始极片的挠曲变形,延长钛板的使用寿命,减少后续始极片的矫平工作量。

参考文献(References):

[1] 蒋开喜. 加压湿法冶金[M]. 北京:冶金工业出版社, 2016.

[2] 姚素平. 永久阴极铜电解技术评述[J]. 有色金属设计与研究,2000,21(3):11-19.

[3] 程佳卫,陈惠贤,尹海鹏,等. 阴极铜剥片机组中挠曲模型的建立及其仿真[J]. 机械制造,2015,53(3):25-27.

[4] 许金泉. 界面力学[M]. 北京:科学出版社,2006.

[5] 石 勇,朱 锡,梅志远. 横向载荷作用下夹层梁力学性能分析[J]. 船舶力学,2008,12(4):624-628.

[6] 欧阳煜,钱在兹. 粘贴片材加固混凝土梁的粘接剪应力分析[J]. 工程力学,2000,17(6):92-96.

[7] ALLISON I M. Laminated beams subjected to transverse load [J]. STRAIN,1998,34(3):91-98.

[8] 彭细荣,杨庆生. 杂交梁界面剪应力的理论分析和数值模拟[J]. 应用力学学报,2005,22(1):114-118.

[9] 陈清琦,轩福贞,涂善东. 基于数值模拟的弹性一蠕变双材料界面应力分析[J]. 机械强度,2009,31(3):497-502

[10] 张永康,孔德军,冯爱新,等. 涂层界面结合强度检测研究:涂层结合界面应力的理论分析[J]. 物理学报,2006, 55(3):2897-2900

[11] DUNDERS J. Effect of elastic constants on stress in a composite under plane deformation[J]. Composite Material, 1976,1(3):310-322

[12] DUNDERS J. Boundary condition at interface [D]. Evanston:Departments of Civil Engineering and Mechanical Engineering, Northwestern University,1990.

[13] 凌桂龙,丁金滨,温 正. ANSYS Workbench13.0 从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2012.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

钟 晨,孙东明,蒋龙飞,等. 铜始极片预剥离技术的研究[J]. 机电工程,2018,35(8):◆-◆,◆. ZHONG Chen, SUN Dong-ming, JIANG Long-fei, et al. Study on pre-stripping technology of copper initiator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(8):◆-◆,◆. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn