

# 盾构切刀硬质合金与钢基体钎焊残余应力

夏毅敏<sup>1</sup>, 仝磊<sup>1</sup>, 柏彬<sup>2</sup>, 华伟明<sup>2</sup>  
(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 国网江苏省电力有限公司建设部, 江苏南京 211000)

**摘 要:** 针对盾构切刀容易出现焊接裂纹以及残余应力过大导致刀具切削时合金容易剥落的难题,建立了切刀钎焊热力耦合过程有限元分析模型,通过模拟计算和X射线衍射仪对残余应力进行试验验证,研究不同焊接结构切刀的钎焊温度场和残余应力场. 研究表明,切刀刀头钎焊后冷却过程中温度场呈现梯度分布. 当钎料厚度为0.25 mm时,刀头应力危险区残余应力最小,160 mm刃宽切刀的合金块数设计为3块可降低焊接残余应力、提高焊接强度. 残余应力试验结果与数值模拟结果趋势基本吻合,钢基体表面为压应力.

**关 键 词:** 盾构切刀; 硬质合金; 钢基体; 钎焊; 残余应力

中图分类号: TG 454      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2020)01-0101-07

## Residual Stress in Soldering and Brazing Between Cemented Carbide and Steel Substrate of Shield Machine Cutters

XIA Yi-min<sup>1</sup>, TONG Lei<sup>1</sup>, BAI Bin<sup>2</sup>, HUA Wei-ming<sup>2</sup>  
(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Ministry of Construction, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211000, China. Corresponding author: XIA Yi-min, E-mail: xiaymj@csu.edu.cn)

**Abstract:** Aiming at the problem that shield machine cutters are prone to welding cracks and the residual stress is too large, which leads to the alloy spalling easily in the cutting process of cutters, the finite element analysis model of the brazing process of cutters was established, and the brazing temperature field and residual stress field of cutters with different welding structures were studied through simulation calculation and X-ray diffractometer experimental verification. The results show that the temperature field presents a gradient distribution in the cooling process after brazing the cutter head. When the thickness of the solder is 0.25 mm, the residual stress in the dangerous area of cutter head stress is the smallest. The number of cemented carbide blocks of 160 mm blade width cutters is designed as 3 pieces to reduce welding residual stress and improve welding strength. The results of residual stress test are basically consistent with the numerical simulation results, and the surface of steel matrix is compressive stress.

**Key words:** shield machine cutters; cemented carbide; steel matrix; soldering and brazing; residual stress

盾构机掘进过程是依靠切刀对岩土切削作用来实现对掌子面的开挖,为了提高切刀的耐磨性,一般在钢质刀体上钎焊硬质合金来作为工作刃切削岩土<sup>[1]</sup>. 但是由于硬质合金材料的塑性、韧性以及线膨胀系数与钢基体差别较大<sup>[2-4]</sup>,在钎焊冷却过程中会因材料参数的不匹配而使焊缝处产生较大的残余应力甚至产生变形、裂纹. 焊接残余应力是切刀切削过程中发生合金破碎、剥落的重要因素,对盾构切刀硬质合金与钢基体钎焊残余应力进行研究,有助于分析盾构切刀硬质合金破碎、合金头脱落等非正常失效的原因.

近年来,研究者对于硬质合金钎焊残余应力及焊接接头组织性能进行了大量研究<sup>[5-9]</sup>. 葛志德等<sup>[5]</sup>从试验角度入手,研究了YG8硬质合金采

用镍基钎料钎焊过程中的加热温度、焊料层厚度及冷却方式等对焊接强度的影响. 岳喜山、刘海汉等<sup>[6-7]</sup>从数值模拟的角度,研究了接头形状、焊缝厚度等对  $\phi 50$  mm 硬质合金圆环焊后残余应力分布的影响规律.

盾构机切刀硬质合金与钢基体焊接面较大、焊接结构复杂,其实际使用过程对焊缝强度要求较高,但是目前针对盾构切刀钎焊残余应力的研究相对缺乏. 本文借助 ABAQUS 数值模拟软件,通过建立三维非线性焊接热力耦合有限元模型,考虑材料热物理性能参数随温度的变化关系,通过模拟计算盾构切刀钎焊刀头的温度场和残余应力场,得到刀头的残余应力分布及大小,并通过 X 射线衍射仪对残余应力进行测试,验证模拟结果,最后对钎料厚度和合金块数进行优化,从而对实际切刀焊接结构设计进行指导.

# 1 切刀钎焊仿真模拟

## 1.1 有限元模型的建立

研究对象为刃宽 160 mm 的盾构切刀,其钢基体材料为 Q235,硬质合金牌号为 YG13C,该切刀单排合金为 3 块,宽度尺寸分别为 50, 60, 50 mm,合金截面尺寸均为 15 mm  $\times$  30 mm. 切刀加工制造工艺路线为:毛坯铣—热处理(调质)—清洗—钎焊—冷却—喷砂. 刀体与硬质合金通过银基钎焊方式连接,钎料为 Bag70CuZn,钎料厚度为 0.2 mm. 切刀在感应加热器中加热,加热温度为 780  $^{\circ}\text{C}$ . 钎焊完成后,切刀在空气中自然冷却降温,环境温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ . 切刀装配图如图 1 所示.

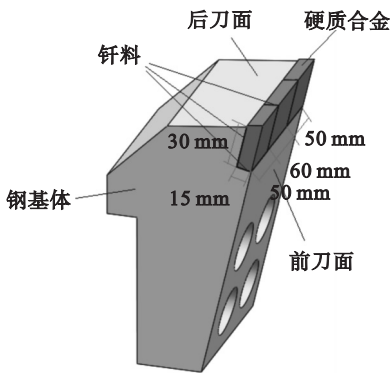


图 1 切刀装配图

Fig. 1 Assembly drawing of cutters

切刀在实际感应加热钎焊过程中,只有靠近刀头合金焊接区域会被加热到钎焊温度,切刀靠近焊接面的刀头区域残余应力分布情况是影响切刀焊缝强度的关键,同时为了减少模拟计算量,本

模型仅对切刀刀头区域进行网格划分和热应力计算. 本文基于 ABAQUS 建立切刀刀头三维非线性有限元模型,对其进行温度场和残余应力场分析. 由于温度场计算需采用热分析单元,故选用 DC3D8 单元. 焊接残余应力场分析需采用热应力单元,为了避免金属材料发生体积自锁,选择线性减缩积分单元 C3D8R. 图 2 为切刀刀头网格划分模型.

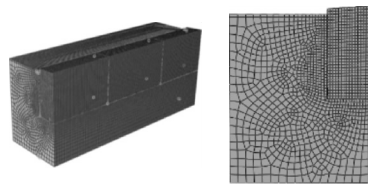


图 2 刀头区域三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of the cutter head region

## 1.2 有限元模拟过程

钎焊后冷却残余应力场采用间接法进行模拟,即将第一步温度场分析结果作为载荷施加到第二步热应力分析中进行计算.

首先模拟出钎焊后冷却过程中温度场的变化情况. 本文对盾构切刀钎焊冷却过程中温度场计算分析,考虑了刀头与空气发生对流传热及热辐射过程,在 ABAQUS 中设置切刀刀头与空气接触的表面对流传热系数为 10 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),斯特潘-玻尔兹曼常数为  $5.67 \times 10^{-8}$  W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),辐射率为 0.85<sup>[10]</sup>.

然后将前一步温度场随时间的变化结果,作为载荷施加到模型上进行热应力计算. 由于钎料加热处于熔化自由状态,其对钢基体和硬质合金的铺展、润湿及渗透过程可缓解由于线膨胀系数的差别所导致的热应力,故可只考虑钎料凝固后冷却过程中产生的钎焊残余应力. 钢基体钎焊前调质处理会消除本身残余应力,硬质合金 WC 粒径尺寸较大时本身残余应力也较小,故忽略钢基体和硬质合金本身残余应力的影响. 本次试验采用的钎料为 Bag70CuZn,室温下屈服强度为 254 MPa、抗拉强度为 353 MPa,其熔点为 730 ~ 750  $^{\circ}\text{C}$ ,因此在进行钎焊仿真时,设定 745 $^{\circ}$ 为 0 应力参考温度. 由于刀体未加热部分对刀头存在约束作用,在模型底面和左侧面施加固定约束,考虑约束产生的应力场和温度降低产生的应力场共同作用,得到最终钎焊残余应力场.

## 1.3 材料性能参数

切刀中钢基体、硬质合金和钎料三种材料的性能参数<sup>[11-16]</sup>随温度变化如表 1 所示.

表 1 材料性能参数  
Table 1 Material property parameters

材料	温度/℃	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\nu$	热膨胀系数/℃ <sup>-1</sup>	屈服强度/MPa
钢基体	25	210 400	0.29	12.32	235
	300	193 100	0.3	13.31	180
	600	157 900	0.31	14.43	125
	1 000	106 200	0.35	13.2	35
硬质合金	25	550 500	0.25	6.81	1 500
	300	531 300	0.25	7.05	1 500
	600	509 200	0.26	7.28	1 500
	1 000	461 400	0.26	7.89	1 500
钎料	25	87 920	0.358	18.68	254
	300	75 800	0.36	19.86	140
	600	59 800	0.36	21.28	65
	700	51 000	0.36	21.77	30

2 模拟结果及分析

2.1 钎焊后刀头温度场变化特征

图 3 为切刀硬质合金表面(A 点)、焊接面拐角处(B 点)和钢基体内部(C 点)三个位置示意图及其降温曲线. 可以看出,冷却过程中刀头温度场呈现梯度分布,三个位置的冷却速度明显不同. 由于切刀在空气中冷却主要通过对流换热、

热传导及热辐射方式,刀体表面冷却速度较快,内部冷却相对较慢. 不同位置的冷却速度差异,使切刀焊接后形成不均匀分布的残余应力场.

2.2 残余应力场分布规律

图 4 为切刀刀头钎焊冷却后各方向残余应力分布云图. 由图 4 可知,X 和 Y 方向产生的残余应力并不大,且分布较均匀,而 Z 方向上的残余应力明显较大,且应力梯度变化较大. 这是因为刀头钎焊的热影响区在 Z 方向的尺寸大于 X,Y 方向,在钎焊冷却过程中刀头逐渐散热收缩,Z 方向上的累计收缩量大于 X,Y 方向;同时,钢基体与硬质合金线膨胀系数差别较大,导致两种材料在 Z 方向上的收缩变形差大于 X,Y 方向. 因此在 Z 方向上两种材料的变形牵制作用更强,残余应力更大.

硬质合金最大等效应力位于中间块合金靠近焊接面拐角一侧,约为 922 MPa. 焊缝处最大等效应力为 252 MPa,钢基体最大等效应力为 228 MPa. 由于钎料和钢基体屈服强度较低,可通过塑性变形来缓解应力集中,故焊缝和钢基体区域残余应力对接头强度影响较小. 硬质合金属于脆性材料,较大的残余应力可能使其受载时发生脆性断裂,故中间合金块靠近焊接面拐角一侧为应力危险区域(见图 4d).

2.3 钢基体/焊缝/硬质合金应力分布规律

由于切刀结构对称,云图显示中间截面各向应力最大. 故在刀头中间截面布置 3 条距后刀面不同深度的路径,提取路径上各向应力进行分析,路径布置如图 5 所示.

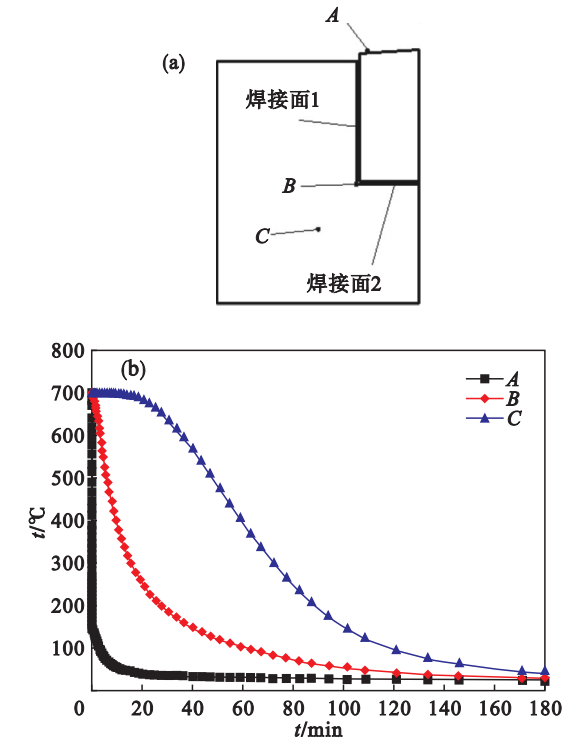


图 3 切刀不同位置降温曲线图  
Fig. 3 Cutters' cooling curves at different positions  
(a)—测点示意图;(b)—降温曲线图.

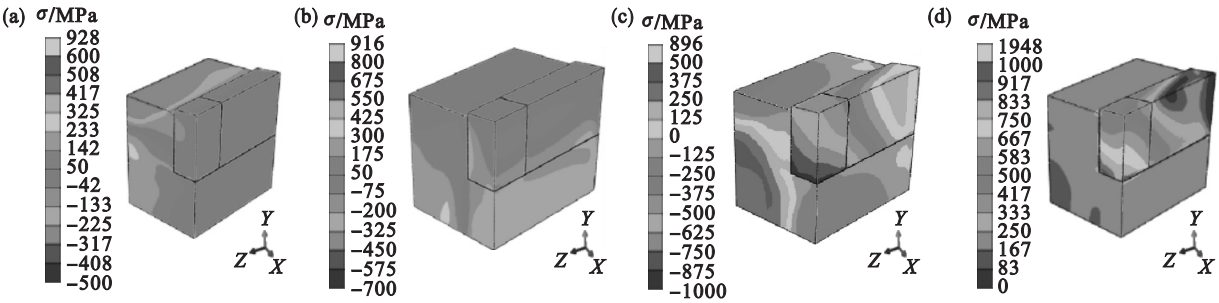


图 4 切刀刀头钎焊冷却后各方向残余应力分布云图

Fig. 4 Distribution of residual stress in different directions after brazing and cooling of the cutter head  
(a)—X 向应力; (b)—Y 向应力; (c)—Z 向应力; (d)—等效应力.

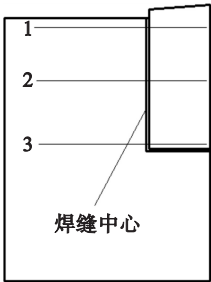


图 5 路径布置示意图

Fig. 5 Path layout diagram

图 6 为切刀刀头各方向 1~3 路径-应力分布曲线. 其中,横坐标 0 为焊缝中心, -10~0 mm 为钢基体区域,0~15 mm 为硬质合金区域. 由图 6 可知,3 条路径 X 向应力分布规律不同,在钢基体一侧,路径 1 由压应力转变为拉应力,路径 2 压应力较小且稳定,路径 3 远离焊缝处拉应力较大,而靠近焊缝处拉应力较小. 3 条路径上硬质合金残余应力均表现为离焊缝越远应力越小.

钢基体一侧 3 条路径的 Y 向应力均较小. 硬质合金一侧 Y 向应力均表现为小于 300 MPa 压应力,远小于硬质合金屈服极限. 3 条路径在焊缝

处 Y 向应力集中,路径 1 和 2 焊缝均为拉应力,而路径 3 焊缝为压应力,波动较大的双向残余应力状态使切刀在承受 Y 向载荷时初始裂纹易在焊缝处产生.

3 条路径 Z 向应力分布规律为:钢基体路径 1 (表层)为压应力,路径 3 (心部)为拉应力,路径 2 应力基本为 0;焊缝/硬质合金焊接面出现应力集中;远离焊缝的硬质合金区域均为 600 MPa 左右的压应力. 由于焊缝/硬质合金焊接面应力集中、硬质合金较大的压应力分布状态,切刀在承受 Z 方向载荷时更容易出现焊缝开裂和合金过载破碎现象.

3 条路径上钢基体及焊缝处等效应力分布规律基本相同,钢基体应力稳定约为 228 MPa,焊缝与合金焊接面最大约为 922 MPa. 由于钎料在两侧金属中的渗透作用可以提高接头承载能力,降低残余应力,而模拟中没有考虑钎料的扩散过程,故焊缝处模拟结果存在应力集中,实际应力要比模拟值小. 在硬质合金一侧路径 3 最大,其次路径 2,路径 1 最小,且路径 3 上离焊缝距离越近应力越大,故切刀受载时合金崩裂容易从路径 3 靠近焊缝处开始.

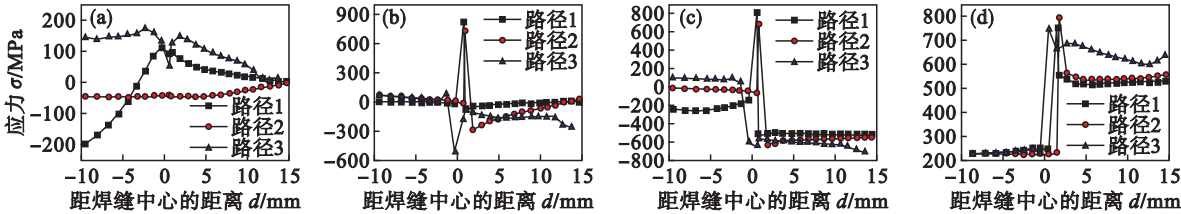


图 6 切刀刀头各方向路径-应力分布曲线

Fig. 6 Path-stress distribution curves of the cutter head in all directions  
(a)—X 向应力; (b)—Y 向应力; (c)—Z 向应力; (d)—等效应力.

2. 4 钎料厚度对钎焊残余应力的影响

图 7 为不同钎料厚度(0.05~0.40 mm)对刀头中间截面钎焊等效残余应力分布的影响. 改变钎料厚度会使近缝区硬质合金残余应力发生明显

变化,而焊缝及其附近钢基体残余应力变化不大. 这是由于钎缝及钢基体屈服强度相对较低,塑性好,接头在降温过程中,钎料层及钢基体发生塑性变形,可以缓解其内部残余应力. 图 8 为不同钎料



厚度(0.05 ~ 0.40 mm)对焊缝拐角附近硬质合金残余应力的影响. 随着钎料厚度的增加,等效残余应力呈现出先增大后减小再增大的趋势,当钎料层厚度为 0.25 mm 时,等效残余应力最小. X 向残余应力波动较大,当钎料厚度为 0.35 mm 时应

力最小. 在钎料厚度为 0.25 mm 时,Y 向应力最小. Z 向残余应力在钎料厚度为 0.10 mm 时最小. 综合考虑各向残余应力结果,当钎料层厚度为 0.25 mm 时,靠近焊缝处的应力危险区残余应力较小,焊接强度较高.

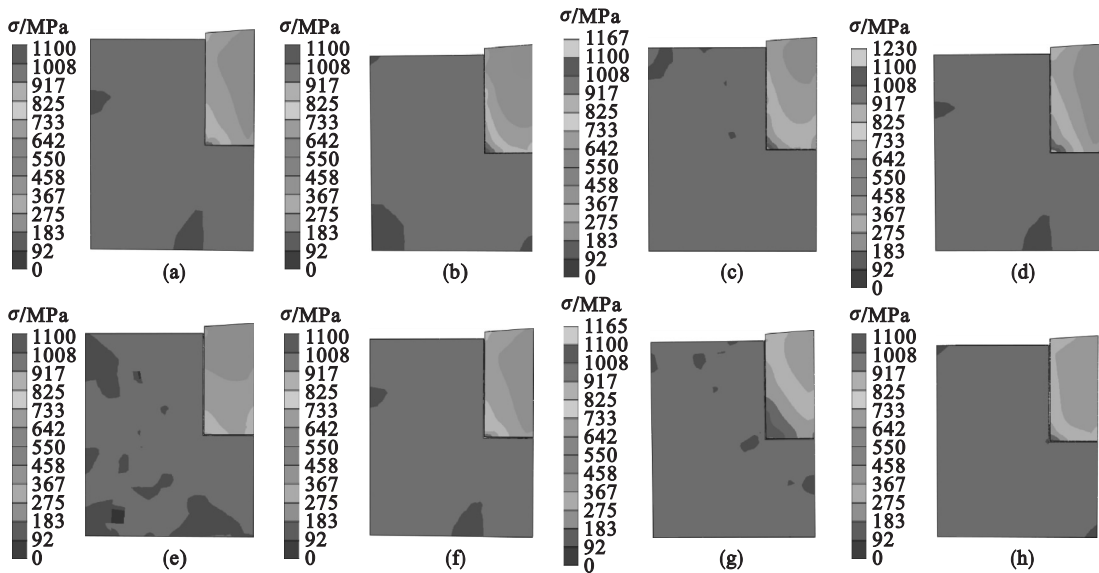


图 7 不同钎料厚度对钎焊等效残余应力分布的影响

Fig. 7 Effect of different solder thickness on the distribution of equivalent residual stress in brazing

(a)—0.05 mm; (b)—0.10 mm; (c)—0.15 mm; (d)—0.20 mm; (e)—0.25 mm;  
(f)—0.30 mm; (g)—0.35 mm; (h)—0.40 mm.

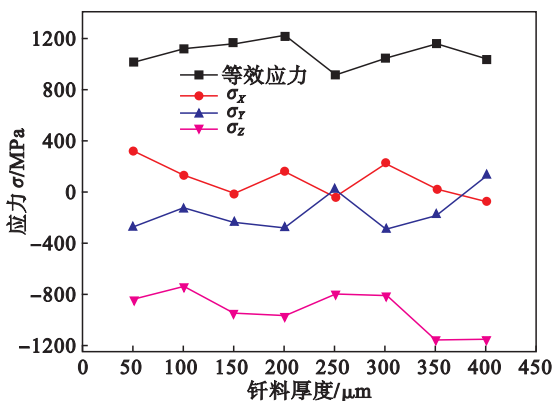


图 8 不同钎料厚度对焊缝拐角附近合金残余应力的影响

Fig. 8 Effect of different solder thickness on residual stress of cemented carbides around weld corner

## 2.5 合金块数对钎焊残余应力的影响

由于硬质合金材质脆硬、韧性差且价格高,合金块尺寸不宜过大. 同时合金块尺寸太小会导致合金块数增加,从而提高焊接结构的复杂性. 工程上 160 mm 刃宽切刀的合金块数通常为 3 ~ 5 块,图 9 为不同合金块数对路径 3 上焊缝周边区域钎焊残余应力的影响. 由图可知,改变合金块数不会影响各向残余应力分布走势. X 向应力在 5 块合金时最小,Y 向、Z 向及等效应力均在 3 块合金时最小,故从降低焊接残余应力的角度考虑,160 mm 刃宽切刀将合金块设计为 3 块可提高切刀焊接强度.

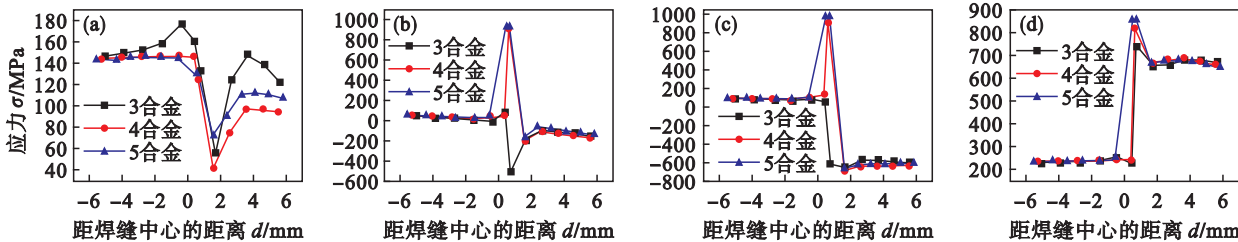


图 9 不同合金块数对钎焊残余应力的影响

Fig. 9 Effect of different number of cemented carbide blocks on residual stress of brazing

(a)—X 向应力; (b)—Y 向应力; (c)—Z 向应力; (d)—等效应力.

3 试验验证

残余应力测试试验采用加拿大 Proto 公司 iXRD 型残余应力测试仪,可以通过 X 射线衍射方法对多晶金属材料进行非破坏性残余应力测量,得到零件表面残余应力值. 对切刀后刀面焊缝周边钢基体表面残余应力进行测量,靶材选用 Cr 靶  $K\alpha$  辐射方式,X 射线管电压为 10.0 kV,电流为 1.0 mA. 应力测量节点如图 10 所示.

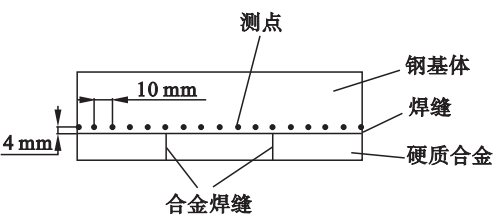


图 10 残余应力测试节点示意图  
Fig. 10 Diagram of residual stress test nodes

图 11 为各节点 Z 方向残余应力试验测试结果与模拟结果对比. 测试结果与模拟结果曲线走向基本吻合,但存在 50 ~ 150 MPa 的差值,其原因可能是模拟未考虑钢基体的初始残余应力,同时测试切刀在钎焊后的喷砂处理也会使表面残余压应力增大<sup>[17]</sup>. 由于刀头表面温度率先趋于室温,心部温度继续降低使材料收缩,而表层材料阻止其收缩,造成钢基体表面受压应力,心部受拉应力. 测点路径上钢基体表面两侧压应力最小、中间最大,在距离为 40 mm 和 120 mm 处均存在局部压应力低峰,其原因为此处附近存在两条合金焊缝,钎料的熔化渗透作用消除了部分应力.

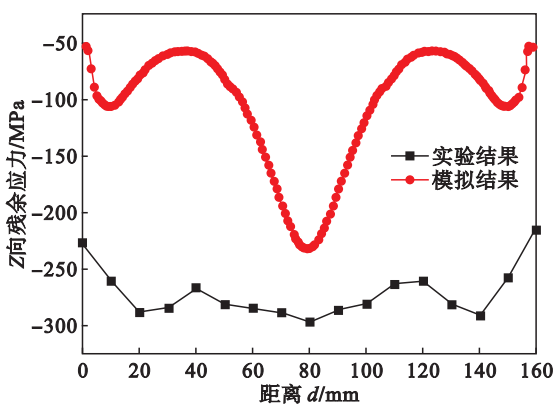


图 11 测点路径试验与模拟结果对比  
Fig. 11 Comparison of the measured point path test and simulation results

4 结 论

1) 通过有限元计算软件,模拟了盾构切刀刀头钎焊冷却过程中的温度场和残余应力场,刀头合金、焊缝及钢基体不同位置降温速度的差异,导致焊后残余应力场分布不均匀.

2) 切刀刀头钎焊后,硬质合金靠近焊接面拐角处等效残余应力最大为 922 MPa,刀头在此处为应力危险区域;焊缝处等效残余应力最大为 252 MPa,钢基体等效残余应力最大为 228 MPa.

3) 焊缝/硬质合金焊接面 Z 向应力集中且合金压应力较大,切刀在承受 Z 方向载荷时更容易出现焊缝开裂和合金过载破碎现象. 硬质合金等效应力路径 3 最大,合金崩裂容易从路径 3 靠近焊缝处开始.

4) 160 mm 刃宽切刀将合金块数设计为 3,钎料厚度取为 0.25 mm,可使刀头靠近焊缝处的应力危险区残余应力最小,提高焊接强度.

5) 对切刀后刀面钢基体上 Z 向残余应力的检测结果与数值模拟结果曲线走向基本吻合,钢基体表面为压应力,且两侧应力最小、中间最大.

参考文献:

[1] Li X, Li X, Yuan D. Application of an interval wear analysis method to cutting tools used in tunneling shields in soft ground[J]. *Wear*, 2017, 392: 21–28.

[2] Hasanabadi M, Shamsipur A, Sani H N, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of tungsten carbide brazed joints using Ag-Cu-Zn + Ni/Mn filler alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27 (12): 2638–2646.

[3] Tkalic D, Kane A, Saai A, et al. Wear of cemented tungsten carbide percussive drill-bit inserts: laboratory and field study [J]. *Wear*, 2017, 386/387: 106–117.

[4] Nagentrau M, Tobl A L M, Kamdi Z, et al. A study on wear failure analysis of tungsten carbide hardfacing on carbon steel blade in a digester tank [J]. *Journal of Failure Analysis & Prevention*, 2017, 17(5): 861–870.

[5] 葛志德, 郭勐, 荆皓. 硬质合金钎焊工艺的研究[J]. *机械制造*, 2018, 246(56): 60–63.

(Ge Zhi-de, Guo Meng, Jing Hao, et al. Study on brazing process of cemented carbide [J]. *Machinery*, 2018, 246(56): 60–63.)

[6] 岳喜山, 孙凤莲. 硬质合金圆环与钢基体钎焊过程的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2005, 26(9): 35–38.

(Yue Xi-shan, Sun Feng-lian. Numerical simulation of brazing process between cemented carbide ring and steel substrate. [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(9): 35–38.)

[7] 刘海汉, 李强, 陈小勇, 等. 有限元法在钎焊中残余应力的分析及应用[J]. *电焊机*, 2018, 48(1): 5–8.

(Liu Hai-han, Li Qiang, Chen Xiao-yong, et al. Analysis and application of residual stress in brazing by finite element

method[J]. *Electric Welding Machine*, 2018, 48(1): 5–8. )

[ 8 ] 黄须强,王大伟,修世超. AISI304/低碳钢真空扩散焊接头组织和性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(12): 1759–1763.

( Huang Xu-qiang, Wang Da-wei, Xiu Shi-chao. Microstructure and performance of AISI304 /mild steel vacuum diffusion bonded joint[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2017, 38(12): 1759–1763. )

[ 9 ] 任朝晖,鞠建忠,吕冬杰,等. 试件形状对铝合金摩擦叠焊成形的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 39(7): 1000–1004.

( Ren Zhao-hui, Ju Jian-zhong, Lyu Dong-jie, et al. Effects of specimen shapes on the friction hydro-pillar processing forming of aluminum alloys[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2017, 39(7): 1000–1004. )

[ 10 ] Cui J, Zhai Q, Xu J, et al. Adding Sn on the performance of amorphous brazing fillers applied to brazing TA2 and Q235[J]. *Journal of Surface Engineered Materials & Advanced Technology*, 2014, 4(6): 342–347.

[ 11 ] 耿鲁阳,涂善东,巩建鸣,等. 不同材料硬化模型模拟 13MnNiMoR 钢超厚圆筒对接环焊接残余应力[J]. 机械工程材料, 2019, 43(3): 60–66.

( Geng Lu-yang, Tu Shan-dong, Gong Jian-ming, et al. Simulation of welding residual stress of 13MnNiMoR super thick cylinder butt ring by different material hardening model [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(3): 60–66. )

[ 12 ] Barrena M I, Salazar J M G D, Gómez-Vacas M. Numerical simulation and experimental analysis of vacuum brazing for steel/cermet[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(7): 10557–10563.

[ 13 ] Zhang J, Jin L Y. Numerical simulation of residual stress in brazing joint between cemented carbide and steel[J]. *Metal Science Journal*, 2013, 21(12): 1455–1459.

[ 14 ] Sui Y, Luo H, Lv Y, et al. Influence of brazing technology on the microstructure and properties of YG20C cemented carbide and 16Mn steel joints[J]. *Welding in the World*, 2016, 60(6): 1269–1275.

[ 15 ] Nagatsuka K, Sechi Y, Ma N, et al. Simulation of cracking phenomena during laser brazing of ceramics and cemented carbide[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(8): 682–688.

[ 16 ] Kaiwa K, Yaoita S, Sasaki T, et al. Effects of Ni and Co additions to filler metals on Ag-brazed joints of cemented carbide and martensitic stainless steel[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 922, 322–327.

[ 17 ] Li X, Ye J, Zhang H, et al. Sandblasting induced stress release and enhanced adhesion strength of diamond films deposited on austenite stainless steel[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 412, 366–373.



(上接第 88 页)

[ 7 ] Sun Y, Gong Y D. Experimental study on the microelectrodes fabrication using low speed wire electrical discharge turning (LS-WEDT) combined with multiple cutting strategy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 121–131.

[ 8 ] Fang F Z, Wu H, Liu X D, et al. Tool geometry study in micro machining[J]. *Journal of Micromechanics and Micro Engineering*, 2003, 13(5): 726–731.

[ 9 ] Kuppan P, Rajadurai A, Narayanan S. Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 38(1/2): 74–84.

[ 10 ] 张雷. 深小孔微细电火花加工间隙流场仿真及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

( Zhang Lei. Simulation and experiment research of gap flow for micro-EDM deep-small hole machining[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. )

[ 11 ] Zhao W S, Wang Z L, Di S C, et al. Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 120(1): 101–106.

[ 12 ] Sun Y, Gong Y D. Experimental study on fabricating spirals microelectrode and micro-cutting tools by low speed wire electrical discharge turning[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 271–285.

[ 13 ] 高连, 刘志东, 邱明波, 等. 电火花线切割单晶硅的损伤层[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(5): 874–879.

( Gao Lian, Liu Zhi-dong, Qiu Ming-bo, et al. Damaged layer of monocrystalline silicon cut by wire electrical discharge machining[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(5): 874–879. )