



移动阅读

何源福,夏毅敏,赵先琼,等. 钎料层厚度对两种不同截齿工作过程接头应力的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2914-2922. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1426

HE Yuanfu, XIA Yimin, ZHAO Xianqiong, et al. Influence of brazing filler thickness on joint stress of two different pick operation processes[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2914-2922. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1426

## 钎料层厚度对两种不同截齿工作过程接头应力的影响

何源福,夏毅敏,赵先琼,乔 硕,宁 波

(中南大学 机电工程学院,湖南 长沙 410083)

**摘 要:**为了探究镐型截齿的硬质合金头脱落现象,针对普通截齿与耐磨截齿,研究镐型截齿工作过程中的钎焊接头应力分布情况以及钎料层厚度对接头应力的影响特征。利用 ANSYS 软件,分别建立普通截齿与耐磨截齿的弹塑性热力学模型,对两种镐型截齿进行热-结构顺序耦合分析,得到其钎焊残余应力分布,用实验验证模型正确性。将截齿破岩时的工作温度及外部载荷施加到钎焊残余应力模型上,仿真得到镐型截齿工作时钎焊接头的应力分布规律。分析结果表明:①未工作状态下,两种镐型截齿的钎料层与硬质合金头交界面处均出现最大钎焊残余应力,容易发生因热应力过大导致的钎缝开裂。②工作状态下,截齿的径向路径上,普通截齿与耐磨截齿的钎焊接头应力最大值近乎相等,均达到 210 MPa 左右,但其最大应力出现的位置不同,分别位于钎料层与刀体的交界面以及钎料层与硬质合金头的交界面处;轴向路径上,两种镐型截齿的应力最大值相差不大,且均出现在钎焊接头外表面处。耐磨层对镐型截齿整体应力的分布影响不大,但却使得镐型截齿最大应力出现的位置发生了偏移,使得镐型截齿硬质合金头脱落的危险位置发生变化。③普通截齿与耐磨截齿均在钎料层厚度为 0.1 mm 时得到接头应力最小值,此时镐型截齿钎焊接头的连接性能最好。

**关键词:**钎料层厚度;截齿;钎焊接头应力;耐磨层;残余应力;工作过程

中图分类号:TD421

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)09-2914-09

### Influence of brazing filler thickness on joint stress of two different pick operation processes

HE Yuanfu, XIA Yimin, ZHAO Xianqiong, QIAO Shuo, NING Bo

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to investigate the cemented carbide head shedding phenomenon of picks, the stress distribution of brazed joints in pick working process and the influence of brazing filler thickness on the brazed joint stress were studied. Using the ANSYS software, the elastic-plastic thermodynamic models of common pick and wear-resistant pick were established respectively. The thermal-structural sequential coupling analysis of the two picks were carried out to obtain the distribution of brazing residual stress, and the correctness of the models were verified by experiments. The working temperature and load of the pick were applied to the brazing residual stress model, and the stress distribution of the brazed joint was simulated. The results showed that ① under normal conditions, the maximum residual brazing stresses appeared at the interface between brazing filler and cemented carbide head of the two picks, which are prone to the

收稿日期:2018-10-25 修回日期:2019-02-28 责任编辑:毕永华

基金项目:湖南省战略新兴产业科技攻关计划资助项目(2015GK1009)

作者简介:何源福(1995—),男,福建莆田人,硕士研究生。E-mail:2821858566@qq.com

通讯作者:夏毅敏(1967—),男,江西永新人,教授。Tel:0731-88876926, E-mail:xiaymj@mail.csu.edu.cn

cracking of the brazing seam caused by excessive thermal stress. ② Under working condition, the maximum stresses of brazed joints of common pick and wear-resistant pick were nearly equal in the radial path, reaching about 210 MPa, but the locations of the maximum stress were different. The maximum stress of common pick was located at the interface between brazing filler and pick body, while the maximum stress of wear-resistant pick was located at the interface between brazing filler and cemented carbide head. On the axial path, the maximum stresses of the two picks were not much different, and both of them appeared on the outer surface of brazed joint. Wear resistant layer has little effect on the overall stress distribution of pick, but it made the position of the maximum stress of pick shift and changes the dangerous position of cemented carbide head shedding. ③ Both common pick and wear-resistant pick have the minimum joint stress when the brazing filler thickness is 0.1 mm, which makes the connection performance of brazed joints the best.

**Key words:** brazing filler thickness; pick; brazed joint stress; wear resistant layer; residual stress; working process

随着采煤装备的不断发展,开采的地层越来越复杂,开采速度越来越快,对镐型截齿的质量提出了更高的要求。硬质合金头脱落作为镐型截齿一种常见的失效形式<sup>[1]</sup>,会大大降低镐型截齿的寿命,增加煤矿开挖成本,降低施工效率。在截齿工作过程中,钎焊接头处的工作温度、破岩载荷以及钎焊残余应力等因素均会导致硬质合金头的松动,直至脱落。截齿合金头脱落的主要原因是焊缝质量差、强度低,钎料层厚度的合理选择能有效增强截齿的钎焊强度<sup>[2]</sup>。根据不同的施工地层,镐型截齿可分为两种,不加耐磨层的普通截齿与加耐磨层的耐磨截齿。耐磨层在增强截齿耐磨性的同时,对其钎焊接头处的连接性能也有一定的影响,有必要对两种截齿的钎焊接头分别进行钎焊性能分析与最优钎料层厚度的选择。

近年来,国内外大量学者对截齿展开了研究。王立平等<sup>[3-4]</sup>基于 Evans 截割模型,通过理论推导的方式,提出了镐齿截割力的修正模型。BAKAR M Z A<sup>[5]</sup>, JEONG H Y 等<sup>[6]</sup>通过实验的方式,研究了如截线间距、截割深度、岩石饱和度等参数对截齿截割力及比能耗的影响。张倩倩等<sup>[7]</sup>通过实验和数值模拟方法,研究了镐型截齿的耐磨性能及其磨损特征对截割力的影响。现有的对于截齿的研究主要集中在其截割力与磨损方面<sup>[8-12]</sup>,解决的是关于截齿截割性能与截齿磨损方面的问题,缺乏有关镐型截齿合金头脱落失效的研究。探究镐型截齿的合金头脱落现象,需要研究截齿工作过程中钎焊接头处的应力分布情况。目前国内外对于焊缝应力方面的研究,主要体现在简单模型的焊接残余应力分布规律上<sup>[13-15]</sup>。但是,镐型截齿硬质合金头脱落现象均出现在其工作过程中,仅研究残余应力,无法体现破岩载荷与工作温度对硬质合金头脱落的影响。而且考虑到镐型截齿刀体结构、钎料成分及焊接工艺的特殊性,已有研究并不能很好地解释镐型截齿硬质合金头脱落的现象。

本文基于 ANSYS 软件,以 u85 截齿为例,分别针对普通截齿与耐磨截齿,建立有限元模型,设置其材料热物性参数随温度而变化,仿真得到两种镐型截齿钎焊接头的残余应力场。将镐型截齿的工作温度与破岩载荷加载到钎焊接头残余应力场上,求解得到镐型截齿钎焊接头的工作应力分布规律。分析研究堆焊耐磨层对镐型截齿工作过程接头应力的影响,并提出两种镐型截齿钎料层厚度的优化决策方法。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 截齿钎焊的热传导模型

截齿钎焊冷却过程中,产生的应变包含了弹性应变、塑性应变以及热应变<sup>[16]</sup>。其中,热应变是截齿高温冷却时产生的收缩以及弹性模量和线膨胀系数随温度变化而引起的。其表达式可以写成:

$$d\varepsilon_T = \alpha dT + (T - T_0) \frac{\partial \alpha}{\partial T} + \frac{\partial D_e^{-1}}{\partial T} \sigma \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_T$  为截齿热应变;  $\alpha$  为截齿的热膨胀系数;  $T_0$  为截齿的钎焊温度;  $D_e$  为弹性模量矩阵;  $\sigma$  为截齿弹性应力;  $T$  为瞬时温度。

截齿钎焊过程主要通过热对流、热传导和热辐射等方式进行热能传递,热对流主要发生在截齿外表面与空气之间。截齿的焊后冷却过程是一个非稳态导热过程,导热方程可表示为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为截齿的导热系数;  $C_p$  为定压比热容;  $\rho$  为密度;  $x, y, z$  为系统内每个位置的坐标;  $Q$  为热量。

截齿钎焊之后的冷却过程中存在潜热的释放问题,采用热焓法处理,热焓  $H$  的表达式可以写成

$$H = H_0 + \int_{T_0}^T C dT + (1 - f_s) L_f \quad (3)$$

式中,  $H_0$  为钎焊温度  $T_0$  时钎料的比焓;  $C$  为等压热容;  $f_s$  为钎料熔化状态下固体的含量;  $L_f$  为熔融钎料的比热系数。

## 1.2 仿真模型的建立

镐型截齿是由 42CrMo 刀体、HSCuZnNi 铜基钎料及 YG15 硬质合金头组成, 为了增强截齿的耐磨性, 部分镐型截齿在刀体前端堆焊了 Fe-Cr-Nb-C 系耐磨层, 如图 1 所示。硬质合金头直径为 11.85 mm, 底部定心锥面的锥角为  $55^\circ$ , 合金头侧面上下两处圆角分别为 1 mm 与 2 mm。截齿前端的耐磨堆焊层厚度最大, 达到 1.75 mm, 最薄位置厚度为 0.5 mm。在钎焊过程中, 由于铜钎料的溢出, 会在硬质合金头与刀体表面覆盖一层很薄的铜钎料。考虑到表面钎料对工作应力的影响, 建立镐型截齿仿真模型时采用自由边界钎料形状。

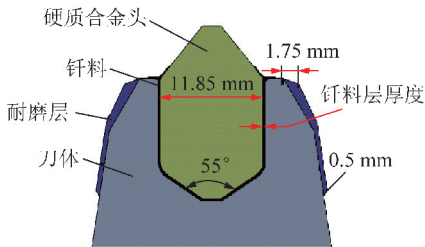


图 1 截齿钎焊连接示意

Fig. 1 Schematic diagram of brazing connection of pick

镐型截齿齿柄部分结构对焊缝应力的影响不大, 只取镐型截齿齿尖部分进行仿真模型建立, 如图 2 所示。为了研究镐型截齿钎料层厚度对工作应力的影响规律, 考虑实际焊接工艺的影响, 硬质合金头与耐磨层结构保持不变, 改变刀体孔的内径, 取 0.050 ~ 0.225 mm 的钎料层厚度, 分别对普通截齿与耐磨截齿进行模型建立。采用 Solid279 单元, 对模型进行网格划分, 钎焊接头区域选用更细密网格。

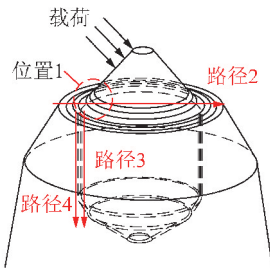


图 2 截齿模型

Fig. 2 Pick model

## 1.3 材料参数

引入以下假设:

- (1) 考虑钎料层弹塑性变形对接头应力的影响, 忽略熔池内部化学反应;
- (2) 与温度有关的物理和力学性能、应力应变在

微小的时间增量内线性变化;

(3) 材料的物理、力学性能各向同性。

HSCuZnNi 作为钎焊硬质合金最常用的钎料之一, 在室温下, 其硬质合金钎焊接头的抗剪强度达到 320 MPa, 抗拉强度达到 450 MPa; 当温度达到 300  $^\circ\text{C}$  时, 钎焊接头的抗剪强度为 250 MPa, 抗拉强度为 380 MPa。

截齿采用理想弹塑性线性强化模型, 在镐型截齿高温钎焊后的冷却过程中, 材料的物理和力学性能参数随温度变化而改变, 考虑各材料的屈服强度对热应力的影响, 具体材料参数见表 1。

表 1 截齿材料的性能参数

Table 1 Performance parameters of pick material

材料	温度/ $^\circ\text{C}$	比热容/ $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	弹性模 量/GPa	热膨胀系数/ $(10^6^\circ\text{C})^{-1}$	屈服强 度/MPa
刀体	20	470	210	11.1	930
	600	745	155	14.1	190
	1 000	677	108	19.6	50
钎料层	20	400	123	16.0	255
	300	430	104	17.5	104
	800	890	34	22.0	0
硬质合 金头	20	490	540	5.5	1 500
	300	497	530	6.0	1 200
	1 000	557	440	10.0	200
耐磨层	20	470	241	13.0	1 000
	300	580	226	13.7	800
	800	710	176	15.4	380

## 1.4 边界条件

温度达到 800  $^\circ\text{C}$  以上时, 截齿上钎料层与耐磨层均呈软化状态, 所承受应力很小, 对截齿残余应力影响较小, 不做考虑。本文研究截齿从 800  $^\circ\text{C}$  冷却到 20  $^\circ\text{C}$  室温过程的钎焊残余应力。

利用生死单元法, 模拟耐磨截齿先堆焊耐磨层后钎焊硬质合金头的工艺。设置镐型截齿的初始温度为钎焊温度 1 000  $^\circ\text{C}$ , 通过与空气对流换热的方式, 将截齿冷却到 800  $^\circ\text{C}$  后, 激活钎料层的单元, 模拟钎料层的凝固成形, 再空冷至室温, 钎焊完成。通过改变对流换热系数的方式进行截齿的焊后热处理, 模拟截齿 860  $^\circ\text{C}$  加热保温、淬火以及 360  $^\circ\text{C}$  回火, 最后空冷至室温的工艺过程, 得到镐型截齿的温度场。采用间接法顺序耦合分析, 将温度场作为体载荷施加到镐型截齿上, 得到截齿的钎焊残余应力。在截齿残余应力场的基础上, 施加外部载荷与工作温度, 得到镐型截齿工作过程中钎焊接头的应力分布情况。



## 2 钎焊残余应力仿真与实验验证

### 2.1 钎焊残余应力模拟结果

根据工程上的截齿实际结构参数,选择钎料层厚度为0.075 mm的镐型截齿模型,进行钎焊残余应力仿真。将笛卡尔坐标系转化成圆柱坐标系,查看仿真结果中的径向残余应力 $\sigma_x$ 、周向残余应力 $\sigma_y$ 与轴向残余应力 $\sigma_z$ 。

路径1位于截齿钎焊接头外表面,自刀体沿径向过渡到硬质合金头,如图3所示。

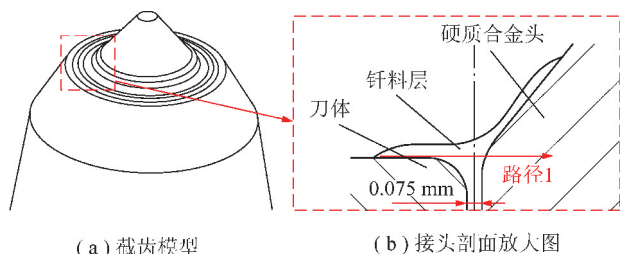


图3 路径1示意

Fig.3 Schematic diagram of path 1

提取普通截齿与耐磨截齿路径1上的钎焊残余应力数据进行分析,得到其残余应力分布曲线,如图4所示。

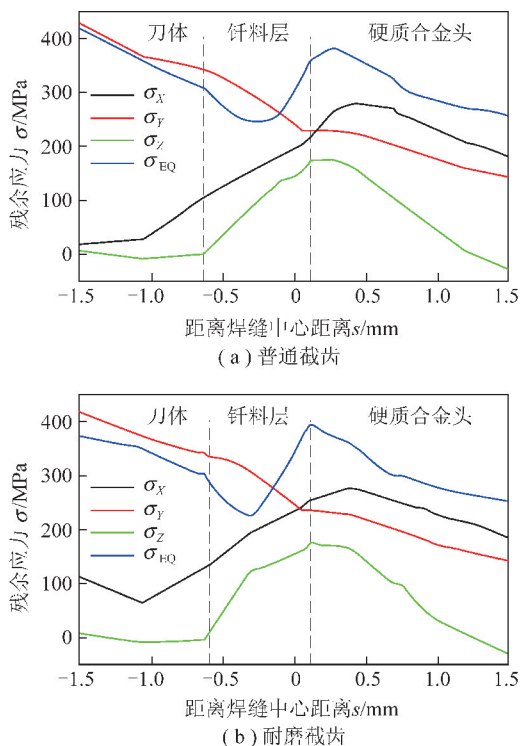


图4 钎焊接头残余应力分布

Fig.4 Distribution of residual stresses in brazing joints

可以看出普通截齿与耐磨截齿沿路径1的钎焊残余应力变化趋势大致相同,两者的等效残余应力 $\sigma_{EQ}$ 最大值均出现在钎料层与硬质合金头交界面附

近,说明该处为截齿钎焊接头的危险位置,容易发生因热应力过大导致的钎缝开裂。这是因为钎料与硬质合金的热膨胀系数差异较大,在冷却过程中产生较大应力集中<sup>[17]</sup>。在该位置,普通截齿的径向残余应力 $\sigma_x$ 达到214 MPa,周向残余应力 $\sigma_y$ 达到230 MPa;耐磨截齿的径向残余应力 $\sigma_x$ 达到253 MPa,周向残余应力 $\sigma_y$ 达到238 MPa。堆焊耐磨层使得截齿钎焊接头的径向残余应力 $\sigma_x$ 增大了39 MPa,对周向残余应力 $\sigma_y$ 影响不大。轴向残余应力 $\sigma_z$ 对钎焊接头的连接强度影响较小。

### 2.2 实验验证

利用Proto iXRD残余应力仪对截齿进行残余应力测试,如图5所示。该仪器采用X射线衍射方法进行非破坏性残余应力测试,可得到试件表面的沿其工作臂轴线方向的正应力,测试精度为 $\pm 10$  MPa。分别对钎料层厚度为0.075 mm的未钎焊截齿、普通截齿、耐磨截齿进行残余应力测试。测试未钎焊截齿得到加工初始残余应力,测试两个钎焊后截齿,得到总残余应力。

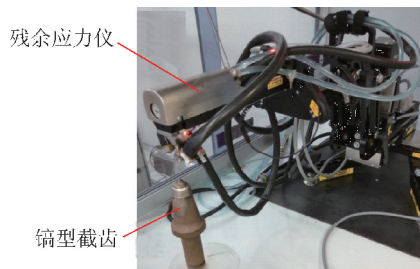


图5 残余应力测试实验

Fig.5 Residual stress test

根据应力叠加原理,总残余应力为加工初始残余应力与钎焊残余应力的矢量叠加<sup>[18]</sup>,根据测试结果获得截齿上各点的钎焊残余应力。对两种镐型截齿残余应力影响区域的外表面进行取点,如图6所示。在刀体顶部边缘位置分别取2个对称点;普通截齿刀体处沿母线方向取3个间距为7 mm的点,耐磨截齿在耐磨层下方的刀体处沿母线方向取两个间距为2.5 mm的点。

将镐型截齿竖直放置,对顶上所取点分别进行周向残余应力 $\sigma_y$ 与径向残余应力 $\sigma_x$ 测试;将镐型截齿水平放置,对母线上所取点分别进行周向残余应力 $\sigma_y$ 与轴向残余应力 $\sigma_z$ 的测试。分析计算得到其钎焊残余应力,将实验与仿真得到的截齿残余应力做比较,得到结果见表2。

由表2可以看出,镐型截齿的钎焊残余应力仿真值与实测值较为吻合,沿截齿刀体母线方向,截齿残余应力的变化趋势一致,证明了仿真模型的正确性。

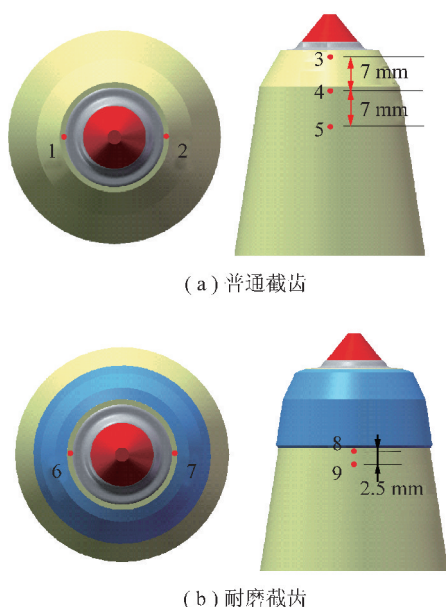


图6 残余应力测量位置示意

Fig. 6 Location of residual stress test point

但仿真结果与实测结果仍存在一定偏差,所测点的周向残余拉应力仿真值略大于实测值,径向残余压应力略小于实测值。其中,靠近刀体顶部点的周向残余应力平均误差达到5%,截齿母线上点的平均误差达到6%。原因可能是钎焊仿真过程未考虑熔池内部的化学反应,影响了仿真结果。

表2 钎焊残余应力测量值与仿真值对比

Table 2 Comparisons of brazing residual stress between computational and experimental results MPa

取点	测量值			仿真值		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
1	-10.8	433		-15.9	457	
2	-5.6	422		-16.3	452	
3		335	10		370	-15
4		206	45		212	58
5		57	2		22	-26
6	-145	370		-200	393	
7	-150	375		-205	402	
8		35	16		24	-45
9		19	5		13	-32

### 3 工作过程的钎焊接头应力模拟

#### 3.1 镐型截齿外部载荷的获取

对截齿工作过程中接头应力仿真所需的载荷输入进行了实验研究<sup>[19]</sup>。镐型截齿破岩实验在回转切削实验台上进行,齿座上方安装有三向力传感器,设置截割速度为40 mm/s,截割深度为12 mm,进行截

割角度为45°的镐型截齿三向力测试实验,如图7所示。

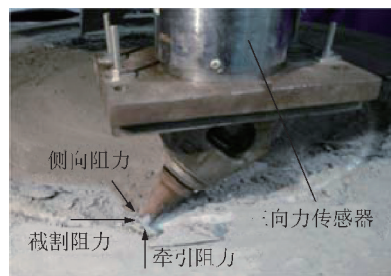
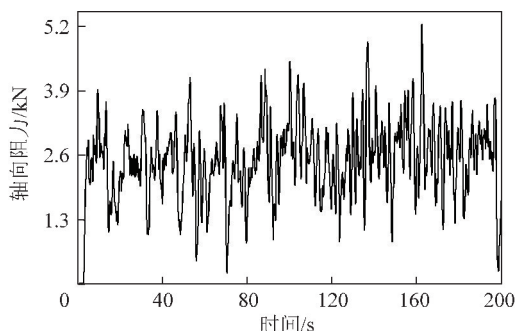


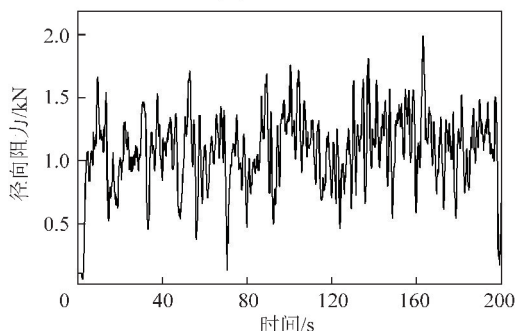
图7 镐型截齿三向力

Fig. 7 Three-axis cutting force diagram of pick

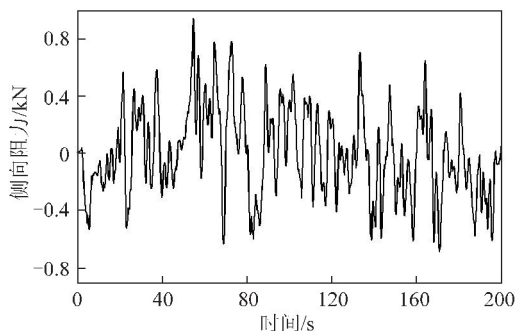
实验取样时间为200 s,由三向力传感器可得到镐型截齿的截割阻力、牵引阻力以及侧向阻力。将实验得到的截割阻力 $F_1$ 与牵引阻力 $F_2$ 数据通过计算转化成轴向阻力 $F_z$ 与径向阻力 $F_x$ ,侧向阻力 $F_y$ 保持不变,得到的载荷曲线如图8所示。



(a) 轴向阻力



(b) 径向阻力



(c) 侧向阻力

图8 镐型截齿三向载荷曲线

Fig. 8 Three-axis cutting force curves of pick

通过对实验数据的分析处理,可以得到镐型截齿所受到的最大载荷与平均载荷,见表3。将三向载荷的最大值作为镐型截齿仿真的外部载荷输入。

表3 镐型截齿所受外部载荷

Table 3 Cutting force of pick

载荷	轴向阻力 $F_z$	径向阻力 $F_x$	侧向阻力 $F_y$
最大值	5 257	2 080	952
平均值	2 501	1 123	0

### 3.2 工作温度对钎焊接头应力的影响

在镐型截齿截割煤岩时,煤岩硬度、工作时长以及喷嘴对截齿的降温效果等都会影响到截齿齿尖的工作温度。根据工程实际,截齿的工作温度在  $100 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在截齿残余应力模型的基础上,分别施加工作温度  $100 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,进行热结构耦合分析,得到其应力分布情况。研究工作温度对截齿受载侧钎焊接头最大应力的影响,如图9所示。

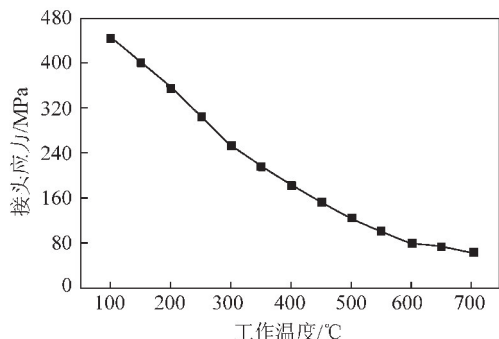


图9 工作温度对接头最大应力的影响

Fig. 9 Effect of working temperature on maximum stress of joint

可以看出,截齿工作过程中的钎焊接头应力随着工作温度的增大而减小,且下降趋势逐渐变缓。当工作温度达到  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  时,接头应力仅为  $63 \text{ MPa}$ 。主要原因在于温度的升高导致了钎焊残余应力下降,且较高的工作温度使得钎料层出现了轻微软化,导致其与两侧材料之间的拉力变小了,连接强度大大降低。

### 3.3 不同截齿工作过程的钎焊接头应力分布规律

取截齿工作温度  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,研究其工作过程中的接头应力分布规律,提取仿真结果中的等效应力  $\sigma_{eq}$ 、径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$  展开分析。

#### 3.3.1 截齿径向路径的应力分析

路径2是截齿齿尖沿径向穿越刀体、钎料层与硬质合金头的直线路径。分别对普通截齿与耐磨截齿工作时沿路径2的接头应力分布规律进行分析,如图10,11所示。

可以看出,两种截齿工作时,钎焊接头处均存在明显的拉应力,且在钎料层附近出现应力集中现

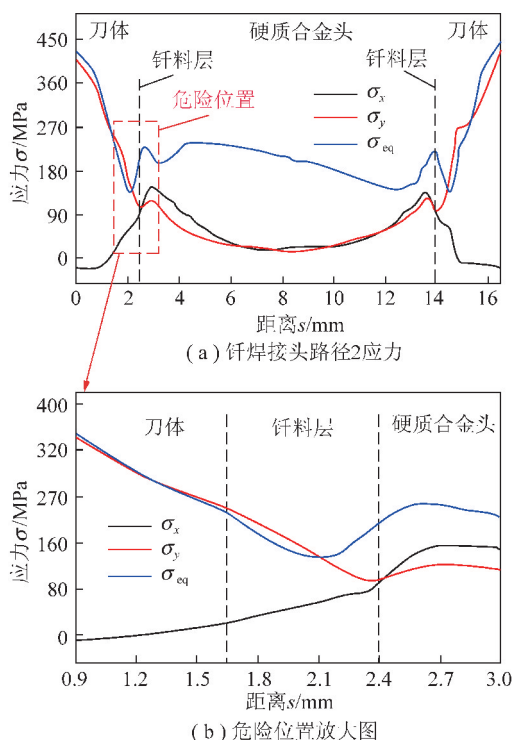


图10 普通截齿路径2应力分布

Fig. 10 Stress distribution of common pick in path 2

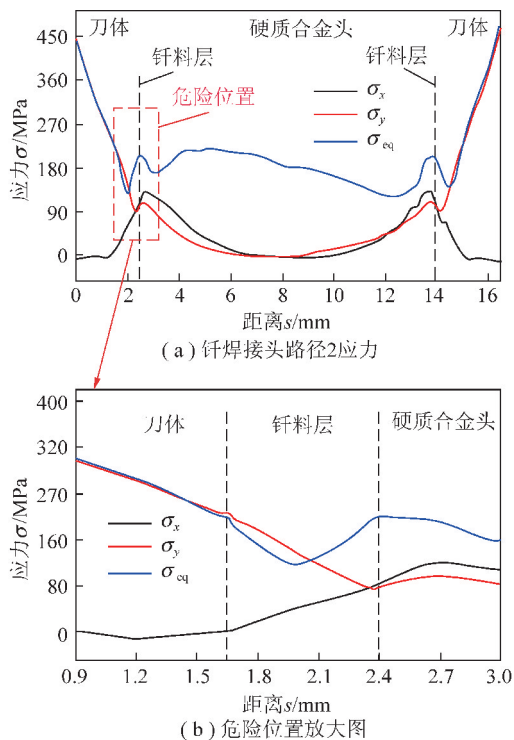


图11 耐磨截齿路径2应力分布

Fig. 11 Stress distribution of wear-resistant pick in path 2

象。两者的等效应力  $\sigma_{eq}$  最大值都出现在截齿受载侧的钎料层处,即图2中的位置1,分别达到  $212 \text{ MPa}$  与  $210 \text{ MPa}$ 。其中,普通截齿的最大等效应力位于钎料层与刀体的交界面处,耐磨截齿的最大等效应力出现在钎料层与硬质合金头的交界面



处,说明这两个位置分别是两种截齿钎焊接头最易发生破坏的危险部位。原因在于,钎焊残余应力最大的位置在钎料层与硬质合金头的交界面处,但高温的工作环境下,钎焊残余应力大幅降低,使得其对工作过程中接头应力的影响有所降低;在外部载荷的作用下,普通截齿钎焊接头的危险位置转移至钎料层与刀体的交界面处。耐磨截齿由于耐磨层结构的存在,增大了钎焊接头处的残余应力,减小了外部载荷对接头应力的影响,使得其危险位置仍出现在钎料层与硬质合金头的交界面处。

普通截齿钎焊接头在危险位置上的周向应力  $\sigma_y$  达到 219 MPa,远大于径向应力  $\sigma_x$ ,说明周向应力  $\sigma_y$  是导致普通截齿工作过程中钎焊接头结构破坏,引起硬质合金头脱落的主要原因。耐磨截齿在其危险位置,径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$  分别为 102 MPa 与 96 MPa,二者相差无几,说明耐磨截齿是在径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$  的共同作用下,导致钎缝开裂从而使合金头脱落的。

### 3.3.2 截齿轴向路径的应力分析

为了进一步研究钎焊接头处的应力分布规律,提取其轴向直线路径上的应力数据。路径 3 位于钎料层与硬质合金头的交界面处,路径 4 位于钎料层与刀体的交界面处。对两种截齿工作过程中钎焊接头在路径 3 上的应力进行分析,得到其应力分布曲线如图 12 所示。

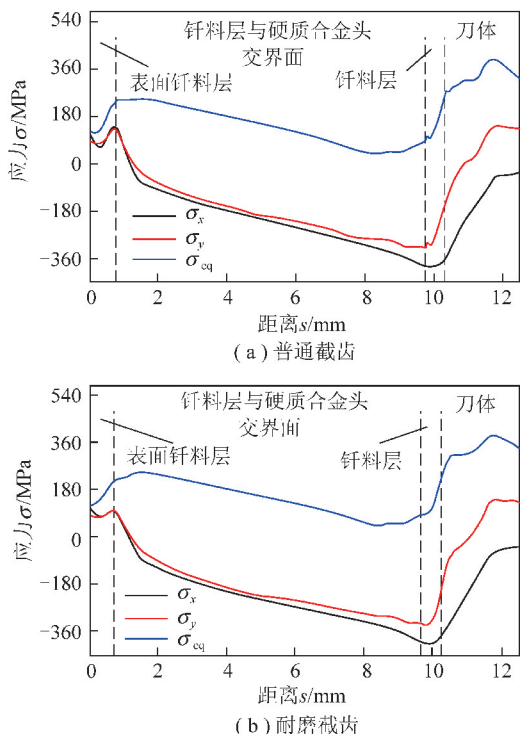


图 12 钎焊接头路径 3 应力分布

Fig. 12 Stress distribution of brazed joint in path 3

可以看出,普通截齿与耐磨截齿在路径 3 上的接头应力分布趋势大致是相同的,从外至内都是先增大后减小,在靠近刀体的部位再增大。等效应力  $\sigma_{eq}$  在表面钎料层与硬质合金头连接处以及钎料层与刀体连接处取到极值。在表面钎料层附近,径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$  均为拉应力且数值相近,普通截齿的  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  达到 130 MPa 左右,耐磨截齿的该数值下降至大约 90 MPa。在靠近刀体位置,截齿的  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  变为压应力,且径向应力  $\sigma_x$  要大于周向应力  $\sigma_y$ 。

对两种截齿工作过程中钎焊接头在路径 4 上的应力进行分析,得到其应力分布曲线如图 13 所示。

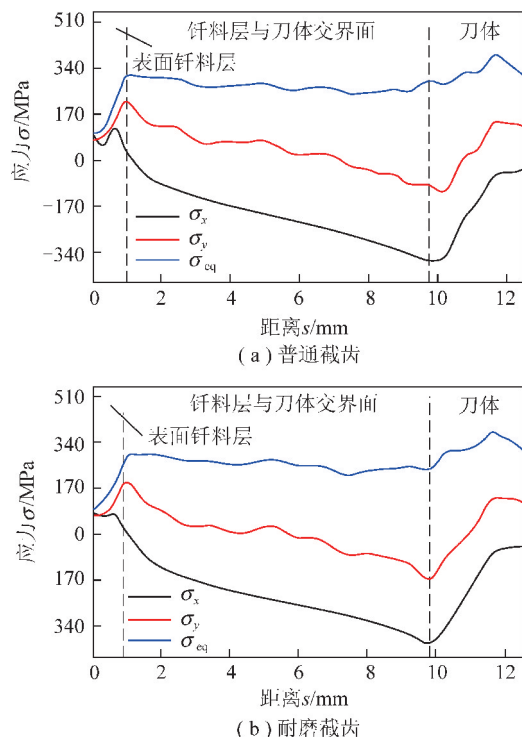


图 13 钎焊接头路径 4 应力分布

Fig. 13 Stress distribution of brazed joint in path 4

可以看出,等效应力  $\sigma_{eq}$  从外到内呈现先增大然后逐渐趋于平缓的趋势,在表面钎料层与刀体连接处达到峰值。在表面钎料层附近,径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$  均为拉应力,普通截齿的  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  分别达到 24 MPa 和 220 MPa,耐磨截齿的  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  分别为 3 MPa 和 198 MPa。可见耐磨层使得工作过程中的截齿钎焊接头应力有所降低。

### 3.4 钎料层厚度对钎焊接头工作应力的影响

镐型截齿在冷却降温过程中,通过钎料层的塑形变形来协调钎焊接头的收缩差异,缓解接头部位的残余应力<sup>[20]</sup>。在工作过程中,不同钎料层厚度也对镐型截齿的载荷传递及应力分布产生影响。为了研究了不同厚度的钎料层(0.050 ~ 0.225 mm)对工作过程中接头应力的影响,在接头表面选择最大应力的节

点,提取该节点的径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$ ,如图 14 所示。

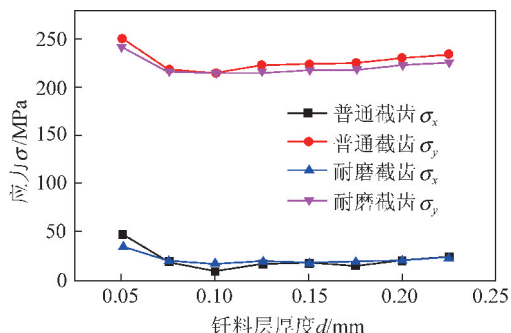


图 14 钎料层厚度对接头最大应力的影响

Fig. 14 Effect of brazing filler thickness on maximum joint stress

可以看出,钎料层厚度从 0.05 mm 增大到 0.225 mm 过程中,普通截齿与耐磨截齿的最大应力均呈现先下降后上升的趋势,在 0.1 mm 处得到最小值。钎料层厚度为 0.1 mm 时,普通截齿的径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$  分别为 11 MPa 和 215 MPa,耐磨截齿的径向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_y$  分别达到 18 MPa 和 213 MPa,钎焊接头内部应力最小,镐型截齿接头的连接强度最好。说明两种镐型截齿最优钎料层厚度的选择是一致的。从图 14 也可以看出,堆焊耐磨层使得镐型截齿钎焊接头的周向应力  $\sigma_y$  减小,一定程度上增强了接头的连接性能。

## 4 结 论

(1)普通截齿与耐磨截齿的等效残余应力  $\sigma_{EQ}$  最大值均出现在钎料层与硬质合金头交界面附近,这说明该处容易发生因热应力过大导致的镐型截齿钎缝开裂。堆焊耐磨层使得截齿钎焊接头该处的径向残余应力  $\sigma_x$  增大了 39 MPa,对周向残余应力  $\sigma_y$  影响不大。

(2)两种镐型截齿钎焊残余应力的测量结果与数值分析结果基本吻合,说明了模型的正确性。

(3)分析镐型截齿工作过程中接头应力沿径向路径的分布情况,得到:普通截齿的最大等效应力位于钎料层与刀体的交界面处,达到 212 MPa,周向拉伸应力  $\sigma_y$  是其结构破坏的主要原因;耐磨截齿的最大等效应力出现在钎料层与硬质合金头的交界面处,达到 210 MPa。耐磨层对截齿整体应力的分布影响不大,但却使得截齿最大应力出现的位置发生了偏移,这使得截齿硬质合金头脱落的危险位置发生变化。

(4)分析镐型截齿工作过程中接头应力沿轴向路径的分布情况,得到:在钎料层与硬质合金头的交

界面处,等效应力  $\sigma_{eq}$  在表面钎料层与硬质合金头连接处以及钎料层与刀体连接处达到极值;钎料层与刀体的交界面处,等效应力  $\sigma_{eq}$  在表面钎料层与刀体连接处达到峰值。

(5)普通截齿与耐磨截齿的最优钎料层厚度选择是一致的,均在钎料层厚度为 0.1 mm 时得到接头应力最小值。堆焊耐磨层使得镐型截齿的周向应力  $\sigma_y$  减小,一定程度上增强了接头的连接性能。

## 参考文献 (References):

- [1] 张强,刘志恒,王海舰,等. BP 神经网络在截齿合金头失效识别中的应用[J]. 振动,测试与诊断,2018,38(3):508-516.  
ZHANG Qiang, LIU Zhiheng, WANG Haijian, et al. Application of BP neural network in failure identification of pick alloy head[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(3): 508-516.
- [2] 高瑞婷,李晓延,朱永鑫,等. 加载速率和钎料厚度对 SnAgCu/Cu 焊点剪切行为影响[J]. 焊接学报,2016,37(2):94-98,133.  
GAO Ruiting, LI Xiaoyan, ZHU Yongxin, et al. Effect of loading rates and solder thickness on shear behavior of SnAgCu/Cu lead-free solder joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(2): 94-98, 133.
- [3] 王立平,蒋斌松,张翼,等. 基于 Evans 截割模型的镐型截齿峰值截割力的计算[J]. 煤炭学报,2016,41(9):2367-2372.  
WANG Liping, JIANG Binsong, ZHANG Yi, et al. Calculation of peak cutting force of conical picks based on Evans' cutting model[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2367-2372.
- [4] 王立平,蒋斌松,张强. 镐型截齿截槽非对称的峰值截割力计算[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2876-2882.  
WANG Liping, JIANG Binsong, ZHANG Qiang. Calculation of peak cutting force of conical picks under conditions of dissymmetrical slotting[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2876-2882.
- [5] BAKAR M Z A. Evaluation of saturation effects on drag pick cutting of a brittle sandstone from full scale linear cutting tests[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 34(1): 124-134.
- [6] JEONG H Y, JEON S. Characteristic of size distribution rock chip produced by rock cutting with a pick cutter[J]. Geomechanics & Engineering, 2018, 15(3): 811-822.
- [7] 张倩倩,韩振南,张梦奇,等. 冲击载荷作用下锥形截齿磨损的实验和数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2016,35(13):58-65.  
ZHANG Qianqian, HAN Zhenan, ZHANG Mengqi, et al. Tests and simulation for wear of conical pick under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13): 58-65.
- [8] WANG S, LI X, DU K, et al. Experimental investigation of hard rock fragmentation using a conical pick on true triaxial test apparatus[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2018, 79: 210-223.
- [9] LIU S, LIU Z, CUI X, et al. Rock breaking of conical cutter with assistance of front and rear water jet[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2014, 42: 78-86.
- [10] LIU X, LIU S, JI H. Mechanism of rock breaking by pick assisted



- with water jet of different modes[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2015, 29(12): 5359-5368.
- [11] 刘春生, 王庆华, 李德根. 镐型截齿截割阻力谱的分形特征与比能耗模型[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(11): 2623-2628.  
LIU Chunsheng, WANG Qinghua, LI Degen. Fractal characteristic and specific energy model of conical picks cutting resistance spectrum[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2623-2628.
- [12] 王想, 王清峰, 梁运培. 截割参数对镐型截齿截割比能耗的影响[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 563-570.  
WANG Xiang, WANG Qingfeng, LIANG Yunpei. Effects of cutting parameters affecting on specific cutting energy of conical picks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 563-570.
- [13] DERAKHSHAN E D, YAZDIAN N, CRAFT B, et al. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 104: 170-182.
- [14] MIRZAEI-SISAN A. Welding residual stresses in a strip of a pipe[J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2018, 159: 28-34.
- [15] RIKKEN M, PIJPERS R, SLOT H, et al. A combined experimental and numerical examination of welding residual stresses[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 261: 98-106.
- [16] 种晓宇, 汪广驰, 杜军, 等. ZTA<sub>p</sub>/HCCI 复合材料凝固过程中的温度场和热应力的数值模拟[J]. *金属学报*, 2018, 54(2): 314-324.
- CHONG Xiaoyu, WANG Guangchi, DU Jun, et al. Numerical simulation of temperature field and thermal stress in ZTA<sub>p</sub>/HCCI composites during solidification process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(2): 314-324.
- [17] SALERNO G, BENNETT C, SUN W, et al. On the interaction between welding residual stresses: A numerical and experimental investigation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 144: 654-667.
- [18] PARK J U, AN G, WOO W. The effect of initial stress induced during the steel manufacturing process on the welding residual stress in multi-pass butt welding[J]. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, 2017, 10(2): 129-140.
- [19] 梁运培, 王想, 王清峰. 截割厚度与截线距对镐型截齿破岩力学参数的影响[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(3): 27-33.  
LIANG Yunpei, WANG Xiang, WANG Qingfeng. Effects of cut depth and cut spacing on tool forces acting on a conical pick in rock cutting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(3): 27-33.
- [20] 杜金松, 颜家振, 曹建国, 等. 蓝宝石/4J33 合金钎焊接头残余应力的数值模拟分析[J]. *焊接学报*, 2017, 38(8): 87-90, 132-133.  
DU Jinsong, YAN Jiazhen, CAO Jianguo, et al. FEM analysis of distribution of thermal stresses at sapphire/kovar alloy brazed joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(8): 87-90, 132-133.