

# 电子束焊接在齿轮焊接中的应用

楚大锋 唐磊 郑晓笛

(上海汽车变速器有限公司, 上海 201807)

**摘要:** 研究分析了电子束焊接的基本原理及焊接质量的主要影响因素。并结合项目开发实例,以某商用车六档手动变速器的从动六档齿为研究对象,介绍了优化焊接工艺参数及结构设计,解决焊接裂纹问题。试验发现:在焊接结构不变情况下,焊接深度较深时通过改变工艺参数难以消除焊接裂纹;同时优化焊接结构并搭配合适的焊接工艺可消除焊接裂纹,并可同时满足焊接深度等技术要求。

**关键词:** 电子束焊接 齿轮加工 裂纹 焊接结构

**中图分类号:** TG457.25 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230163

## Application of Electron Beam Welding in Gear Welding

Chu Dafeng, Tang Lei, Zheng Xiaodi

(Shanghai Automobile Gear Works, Shanghai 201807)

**Abstract:** This article studied and analyzed the basic principle of electron beam welding and the main factors affecting welding quality. In combination with the developing project case, this paper, taking the sixth driven gear of a 6-speed manual transmission of a commercial vehicle as the research object, introduced the optimization of welding process parameters and structural design to solve the welding crack problem. The experiment finds that when the welding structure remains unchanged, it is difficult to eliminate welding cracks by changing the process parameters when the welding depth is deeper; Simultaneously optimizing the welding structure and matching it with appropriate welding processes can eliminate welding cracks and meet technical requirements such as welding depth.

**Key words:** Electron beam welding, Gear processing, Crack, Welding structure

## 1 前言

电子束焊接是汽车变速器用齿轮常用连接方法之一<sup>[1]</sup>,与普通焊接方法不同的是其为高能束自熔焊接,通常不需要填充金属物使两种零件实现原子间的结合。因为电子束焊接具有功率密度高、焊接速度快、工件变形小、焊接过程处于真空环境不受外界空气及杂质影响等优势,目前已在航空航天、汽车等行业中被广泛应用。

齿轮类零件一般都选用低合金结构钢作为原材料,材料的化学成分不同,热处理状态不同,焊接性会有明显差异。电子束焊接实施过程需要考

虑诸多因素<sup>[2]</sup>,如碳含量,焊接零件结构设计,焊接工艺等等。

## 2 电子束焊接简介

电子束焊接(Electron Beam Welding, EBW),是利用加速和聚焦的电子束轰击置于真空或非真空中的焊件所产生的热能进行焊接的方法。

电子通常是以热发射或场发射的方式从阴极逸出。在30~200 kV电压作用下,电子被加速至0.5倍左右光速向阳极运动。电场加速后的电子再通过电磁场的聚焦作用形成能量密度极高的电子束,这种高速运动的电子束轰击到工件表面时,

**作者简介:** 楚大锋(1984—),男,高级工程师,硕士学位,研究方向为汽车传动齿轮等部件的电子束、激光焊接,渗碳淬火、氮化等热处理,表面处理等。

### 参考文献引用格式:

楚大锋,唐磊,郑晓笛. 电子束焊接在齿轮焊接中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2023(11): 40-45.

CHU D F, TANG L, ZHENG X D. Application of Electron Beam Welding in Gear Welding[J]. Automobile Technology & Material, 2023(11): 40-45.

电子的巨大动能将转化为热能,使焊缝处工件金属熔化,形成熔池,从而实现对工件的焊接。电子束焊接是会在被焊接工件上“钻”出一个锁形小孔,称为“匙孔”<sup>[3]</sup>。匙孔被液态金属包围,随着电子束和工件的相对移动,液态金属沿小孔周围流向熔池后部,逐渐冷却形成焊缝。

图1所示为常用的三极电子枪枪体示意<sup>[3]</sup>,其电极系统由阴极和阳极组成。阴极处于高的负电压,它与接地的阳极直接形成电子束的加速电场。通过调节偏压电位的大小、形状及位置可以调整电子束流的大小和改变电子束的形状。

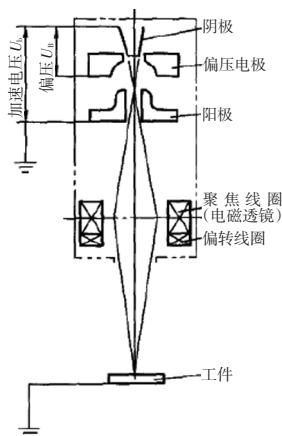


图1 三极电子枪枪体结构示意图<sup>[3]</sup>

电子束焊接有诸多优点:功率密度高,可达 $104 \sim 109 \text{ W/cm}^2$ ;可通过电场、磁场对电子束作快速、精确的控制;电子束斑点尺寸极小,功率密度大,穿透能力强,焊缝的深宽比大;焊接速度可达 $1\,000 \text{ mm/min}$ 并可形成自上而下宽度均匀的焊缝;高温作用时间短,合金元素烧损少,避免焊接接头晶粒长大,焊接接头力学性能,特别适合对传动扭矩和尺寸精度要求高的齿轮类零件焊接。

### 3 电子束焊接焊缝质量的主要影响因素:

焊接质量的影响因素主要包括:母材的碳含量与碳当量,P、S等杂质元素含量,钢材的热处理状态(对齿轮类零件主要分为渗碳淬火热处理前和渗碳淬火热处理后),焊接工艺参数,焊接结构设计,零件清洗状态,配合零件的过盈量等,下面对其中5种因素做简要介绍。

#### 3.1 钢材的碳含量与碳当量

随着含碳量的提高,材料的焊接性能会明显

下降。一般认为碳当量 $< 0.4\%$ 时,钢材焊接性能良好,一般不需要进行预热;碳当量 $> 0.4\%$ 时,尤其是超过 $0.6\%$ 时,随着 $C_E$ 的升高,钢材冷裂倾向就会明显增加。国际焊接学会推荐的碳当量 $C_E(\text{IIW})$ 计算公式如下<sup>[4]</sup>(式中的元素符号均表示该元素的质量分数)。

$$C_E(\text{IIW}) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (1)$$

#### 3.2 过盈量

相配合零件过盈量的选择不仅影响产品焊接质量,还影响零件的压装质量。过盈量大易造成零件压装不到位,配合面毛糙等不良现象。一般过盈量的选择不超过 $0.05 \text{ mm}$ ,压配力不超过 $30 \text{ kN}$ 。

#### 3.3 焊接速度及功率

焊接速度和功率的配合主要影响着焊接线能量,速度慢功率大相应可以得到更深的焊接深度,同时焊接的宽度也将增加,导致焊接变形大。反之速度快功率低工件焊接变形小,深度和宽度降低。

#### 3.4 焦点位置

焦点即能量密度最大的位置,焦点位置通常可分为正离焦和负离焦。焦平面位于工件上方为正离焦,反之为负离焦。

#### 3.5 焊接结构设计

由于零件设计或加工因素可能导致接头装配中出现不能排出气体的密闭空腔,可能导致焊接异常,因此要尽量减小空腔体积,否则应通过排气孔放气。

同时压配结合面长度不应过大,否则易造成变形及焊缝处应力较大,产生焊接裂纹风险。焊接结构设计应避免焊缝离内孔过近,否则焊接应力易引起内孔变形,如热处理后焊接,易造成硬化层发生退火,造成影响硬度降低。

## 4 电子束焊接在齿轮焊接中的实例分析

#### 4.1 零件原材料及基本信息

此手动变速器从动六档齿轮,所用材料为 $20\text{CrMnTiH}$ ,主要元素含量见表1。

热处理后产品理化技术要求见表2。产品焊接后形貌件如图2所示,焊接后结合齿端面跳动不大于 $0.06 \text{ mm}$ ,焊接后零件四等分割开检测焊缝质

量。

表 1 齿轮化学成分(质量分数)								%
元素种类	C	Mn	Cr	Si	P	S	Ti	Fe
含量	0.18 ~ 0.23	0.9 ~ 1.3	1.0 ~ 1.3	0.17 ~ 0.37	≤ 0.035	≤ 0.035	0.04 ~ 0.10	余下

表 2 热处理后产品技术要求		
名称	项目	技术要求
齿轮&结合齿	表面硬度/HV30	680 ~ 780
齿轮	芯部硬度/HRC	33 ~ 48
齿轮	550 HV1 有效硬化层深/mm	0.6 ~ 0.9
结合齿	550 HV1 有效硬化层深/mm	0.3 ~ 0.6
焊缝	深度/mm	≥ 3
	宽度/mm	≤ 2

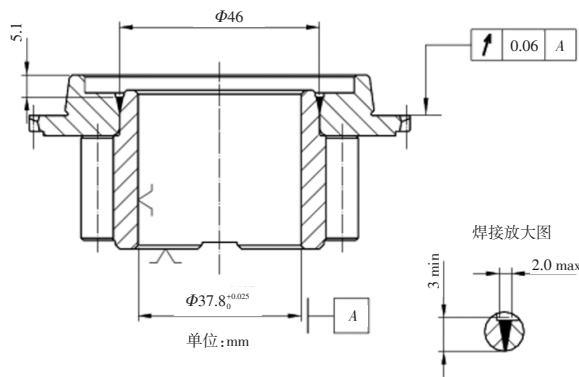


图 2 从动六档齿轮形貌

焊接之前对渗碳淬火回火后焊接的齿轮和结合齿做硬车渗碳层处理,按照以往经验对此零件的车碳层设定为齿轮 1.3 mm,结合齿 0.8 mm。

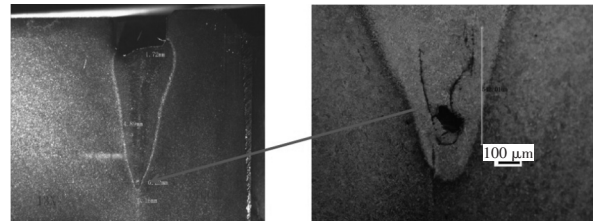
#### 4.2 缺陷件剖解分析

如图 3a 所示,缺陷件焊接深度 4.8 mm 焊缝宽度 1.7 mm,焊接尾部存在 0.2 mm 气缩孔,围绕气孔存在长度为 0.54 mm 的 U 形裂纹,图 3b 为图 3a 缺陷位置放大图。判定此裂纹为中部裂纹,气孔可能是清洁度问题造成的。中部裂纹是电子束焊接中一种典型缺陷,解决方案一般为降低焊接速度,减小焊缝深度,延缓熔合区凝固时间,释放焊接过程应力。

#### 4.3 通过调整工艺减小焊接深度:

减小焊接束流,降低焊接速度等手段控制焊接深度在 2.7 ~ 3.2 mm,焊缝形状如图 4,焊接深度

为 3.0 mm,宽度 2.0 mm,对中为 0.14 mm。锁定工艺参数为:电流 11.5 mA,焦点位置 745 mm,焊接速度 12 mm/s,电流上升时间 0.5 s,束流下降时间 1.0 s。



(a)缺陷件焊缝 (b)图 a 局部放大示意

图 3 缺陷件焊缝照片

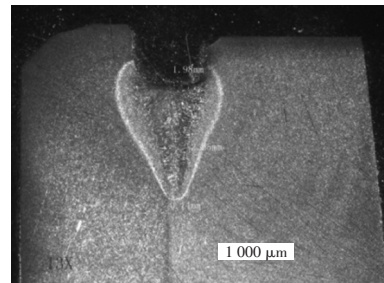


图 4 焊缝

小批量(70件)试验下来,检测显示裂纹问题已经解决。但有约 30%的零件深度不满足 ≥ 3.0 mm 要求,且对中性不稳定。

#### 4.4 增大焊接深度以满足技术要求

##### 4.4.1 增大电流

选取焊接站四工位中工装夹具跳动较好的一个(和工件底面接触的工装端面跳动 0.03 mm,和工件内孔接触的工装径向跳动 0.04 mm)进行工艺试验。同时增大电流至 12.5 mA,其他工艺参数同 4.3 章节。焊接深度增加至 3.6 ~ 4.1 mm,满足技术要求。0°位置试块,底部发现 U 型裂纹,长度为 0.35 mm,如图 5a 和图 5b 所示,图 5b 为图 5a 裂纹的放大图。如图 5c 所示,90°位置试块,底部依然存在 0.36 mm 大小的气孔。对中有明显改善,为 0.08 mm。通过增大焊接束流,可增大焊接深度。但依然存在焊接裂纹和气孔。

##### 4.4.2 调整聚焦电流

调整聚焦电流由 745 mA 调整为 765 mA,其他工艺参数同 4.3 章节。焊接深度有增加为 3.7 ~ 4.4 mm,深度满足技术要求。

焊缝整体形貌照片如图 6,0°位置试块底部发现一个长度为 0.21 mm 的 U 形裂纹和一个长度为 0.37 mm 的 L 形裂纹;90°位置试块,底部存在

0.18 mm 的小气孔和长度为 0.36 mm 的 U 形裂纹。增大焦点位置,可提高焊接深度,但依然存在焊接

裂纹和气孔,且焊接深度落差较大,推断可能和功率稳定性及碳层未去除干净有关。

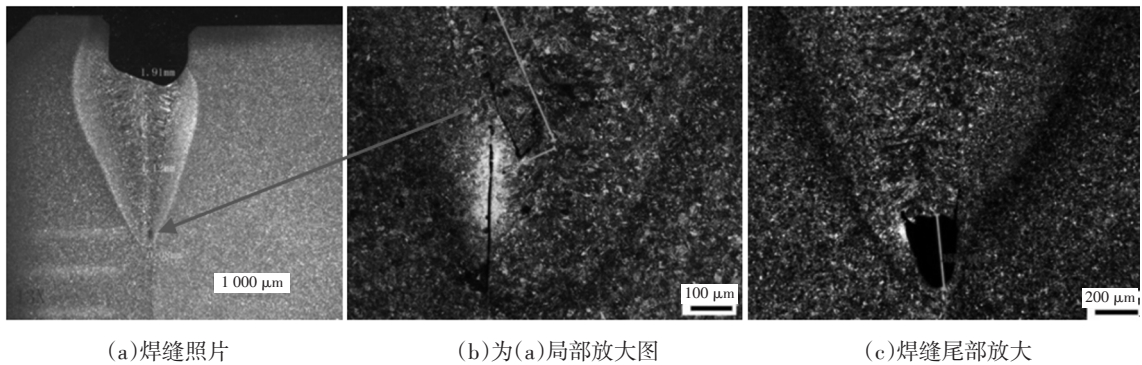


图5 增大束流焊缝整体及局部放大照片

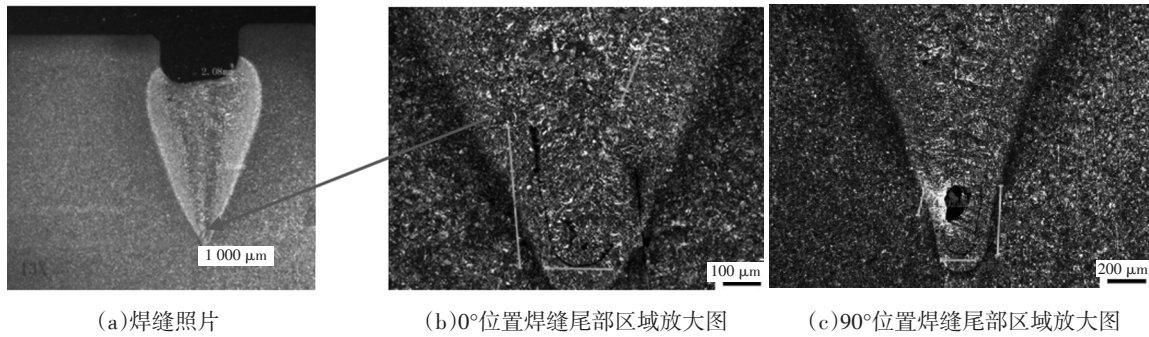


图6 调整聚焦电流后焊缝整体及局部放大照片

#### 4.5 稳定电压

通过试验发现通过焊接工艺参数的调整难以解决焊缝裂纹,对设备情况排查发现此电子束焊接设备没有配备稳压装置,设备的输入电压波动将直接影响电子束的功率。工艺参数同 4.3 章节,

试验发现零件焊接深度在 3.2 ~ 3.6 mm。如图 7 所示,焊接深度为 3.5 mm,对中 0.03 mm,在焊缝的右上侧发现有长度为 0.5 mm 的微裂纹。增加稳压装置后同样工艺的焊接深度有所增加且稳定性较之前工艺有改善。

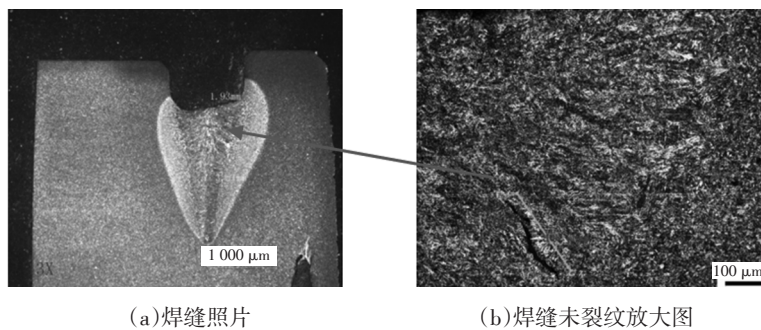


图7 焊缝整体及微裂纹

#### 4.6 焊接件在渗碳淬火时涂防渗剂

热处理后焊接零件需进行车碳层处理,采用热处理涂防渗剂加热后硬车工艺,可以确保焊接面的碳含量与基体保持一致。

热处理渗碳淬火时增加涂层保护,热后硬车余量保持不变。焊接后焊缝仍有裂纹存在,如图 8 所示,底部发现一个大小为 0.2 mm 的气孔,近尾部

处有显微裂纹,未连成线,但亦有趋势。试验说明,气孔的出现具有偶然性,可能和清洁度及零件压配尾部气体未抽干净有关,涂防渗剂零件焊接后仍存在微裂纹,所以热后焊接件硬车深度满足是后可不涂防渗剂,下面对焊接零件结构进行优化试验。

#### 4.7 优化焊接结构

对裂纹产生的原因进行分析,主要是焊缝应力较

大所致。对于渗碳淬火回火后的齿轮零件焊接,母材零件零件刚度大,焊接应力大,本文通过增加尾部倒角,有利于焊接过程应力的释放,进而降低焊缝裂纹

的产生风险。通过在齿轮和(或)结合齿焊接面增加倒角( $X$ 和 $Y$ ),增加倒角同时可以减少压配面的结合长度( $H$ )并保证压装尾部气体排尽。倒角示意图如图9。

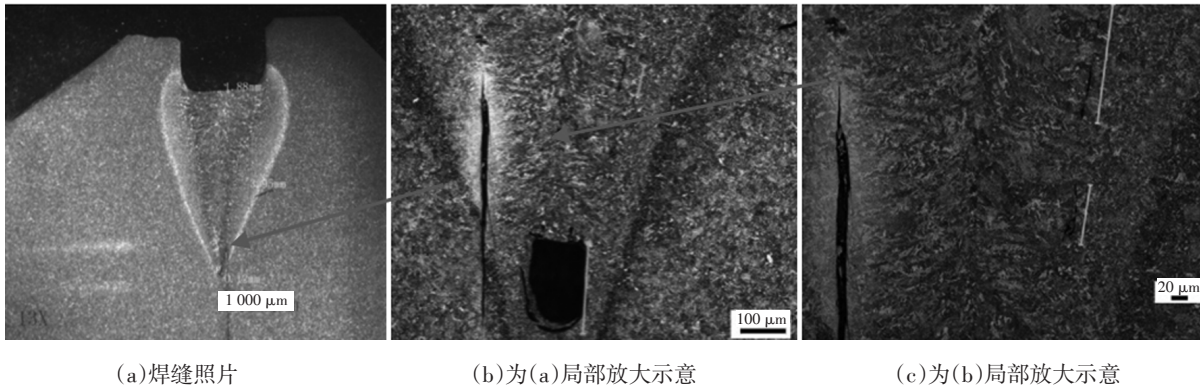


图 8 焊缝整体及微观缺陷示意

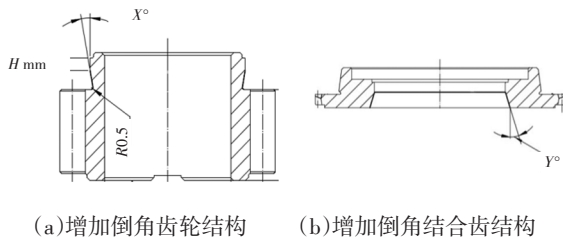


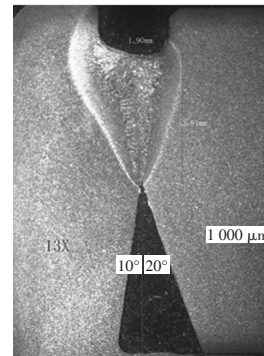
图9 倒角齿轮及结合齿结构示意图

#### 4.7.1 齿轮和结合齿两侧倒角

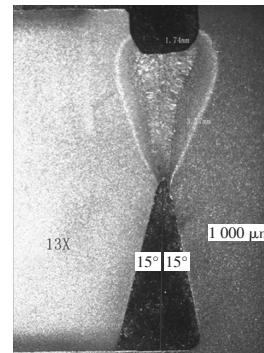
保留 4.0 mm 的可焊深度值,剩余长度的齿轮和结合齿侧分别倒角。如图 10a 侧所示,齿轮侧倒角为  $X=10^\circ$ ,结合齿侧倒角为  $Y=20^\circ$ ;如图 10b,齿轮和结合齿两侧倒角均为  $X=Y=15^\circ$ 。焊接工艺同 4.3 章节,试验结果显示 2 种状态零件焊接深度分别为 3.9 mm 和 3.8 mm;宽度为 1.9 mm 和 1.7 mm,均无裂纹、气孔等缺陷。

#### 4.7.2 结合齿一侧倒角

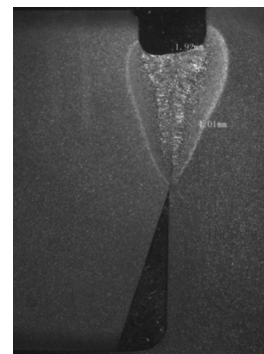
由于齿轮焊接处单边厚度(齿轮内孔至增加倒角斜边的最小距离)只有 4.0 mm,增加倒角后可能会影响齿轮的强度。故取消齿轮侧的倒角,保留 4.0 mm 的可焊深度值,其余长度的结合齿侧倒角  $17^\circ$ 。焊缝照片见图 10c 所示:焊接深度为 4.0 mm;宽度为 1.9 mm,无裂纹、气孔等缺陷。为减小焊接宽度,提升生产效率,增加焊接速度,焊接深度可控制在 3.5 mm,宽度在 1.6 mm,亦无气孔、裂纹等缺陷。连续焊接 100 件抽检均满足焊缝质量要求,使用扭力扳手对零件进行检测,可承受  $700 \text{ N}\cdot\text{m}$  的扭矩。



(a) 焊缝照片( $X=10^\circ, Y=20^\circ$ )



(b) 焊缝照片( $X=15^\circ, Y=15^\circ$ )



(c) 焊缝照片( $X=17^\circ$ )

图 10 不同倒角形式的焊缝

## 5 结论

a.渗碳淬火回火的齿轮零件电子束焊接,通过焊接优化工艺,减小深度有利于消除焊接裂纹;

b.在焊接结构不变时,通过增加束流、调整焦点位置难以消除裂纹产生;

c.渗碳淬火回火件后零件焊接,母材件焊接处车余量足够,热处理过程中可不涂防渗剂;

d.优化焊接结构(如增加焊缝尾部倒角)有利于焊接裂纹的消除。

### 参考文献:

- [1] 林祖强. 电子束焊接在齿轮加工中的应用[J]. 机电工程, 2007(24): 52-53.
- [2] 陈伟东. 浅析电子束焊接在齿轮加工中的应用[J]. 科学技术应用, 2016(5): 191-192.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册. 第1卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 482-486.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册. 第2卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 157-158.