

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.06.006

复杂 Miter 接头焊接坡口切割建模与仿真

王 强, 徐 雷*, 彭少峰

(四川大学 制造科学与工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要:针对现有文献对 Miter 管研究的不足,建立了复杂 Miter 管焊接装配面的数学模型,提出了切割加工时速度优化公式。应用空间解析几何推导了几种常见类型的复杂 Miter 接头相贯线和实际切割角数学模型;分析切割过程中实际切割角对相贯线轨迹成型的影响,并联系切割速度,提出了基于实际切割角的切割速度优化公式。切割速度优化公式能有效避免管件切割时发生未切透、棱角熔化和坡口变形等现象。所建立的数学模型和推导的切割速度优化公式对 Miter 管的数学建模和切割过程中速度控制有一定的参考。

关 键 词:Miter 接头;相贯线轨迹;实际切割角;切割速度

中图分类号:TH112

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)06-0025-04

Welding Groove Model and Simulation of Complex Miter Joint

WANG Qiang, XU Lei*, PEN Shaofeng

(School of Manufacturing Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Since the existing researches on Miter pipe were insufficient, its mathematical model was established and an optimization formula on cutting speed was presented. Several common types of Miter pipe intersecting line and actual cutting angle were deduced by utilizing the analytic geometry; analysis of the influence of the actual cutting angle on the intersecting line and considering the cutting speed, an optimization formula on cutting speed based on the actual cutting angle was presented. The optimization formula could effectively avoid defects when the pipe did not cut through the corners, edges melt and groove deformed. The established mathematical model and the derivation of the cutting speed optimization formula provide certain reference to the process of Miter pipe cutting.

Key words: Miter joint; intersecting line; actual cutting angle; cutting speed

在管道工程中, Miter 接头大量运用于管道弯头连接、多管道汇合以及分流运输^[1-3]; 与 Miter 接头管端切割类似的管板相贯在工程实际运用中就更为常见。对于两管对接和管板相贯的简单管端切割, 由于相贯线是圆形或椭圆, 故其难度在于坡口切割的处理方式, 而对于多管连接的复杂 Miter 接头的切割轨迹则是复杂的相贯线, 其切割的准确性和精度控制都存在一定的难度。现有的文献均只有描述简单两管弯头和管板相贯的切割轨迹数学模型和坡口处理方式, 实际切割角的处理都是比照管-管搭接焊接时的切割标准和规范, 同时采用它的经验公式进行的计算。针对这些问题, 本文研究了复杂 Miter 接头焊接坡口切割数学模型; 提出

了一种新的实际切割角处理方式, 并结合实际切割角优化了切割速度; 最后通过 AutoCAD 进行仿真验证。

1 Miter 接头焊接装配面数学模型

1.1 复杂 Miter 接头及管板相贯类型

Miter 接头一般为两管的弯头连接, 管板相贯指单管与板材独立连接。复杂 Miter 接头包括多管按不同形状相互拼接和多管与板材相接所形成的复杂混合接头。图 1(a) 为基本 Miter 接头和管板相贯, 它也是本文所涉及模型的基础。图中角度 α 为两管轴线间夹角或管轴线与板平面间夹角。图 2(b) 为最常见的 2 类复杂 Miter 接头: Y 型接头和 W 型接头。其中 α_n 为各管轴线间夹角, 各 α_n 值不同时, 就会出现非对称规

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-08-31

基金项目: 四川省科技支撑计划(2014KJT085); 成都市科技支撑计划(09RKYB980ZF-033)

作者简介: 王强(1990), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机辅助设计与制造。E-mail: 729318578@qq.com

则类接头, n 为管件数目, n 值越大, 各管间 α 范围越小, 管间焊接工艺就越复杂, 所以 n 有最大极限值。图 2(c) 为相交于接头的各根管的轴线不在同一平面的

Miter 接头, 其中 β 为相对于目标管轴线的转角。根据 α, β 取值的不同又可构成空间 Y 型和空间 W 型 Miter 接头。同理各 α, β 以及 n 值都有极限值的限制。

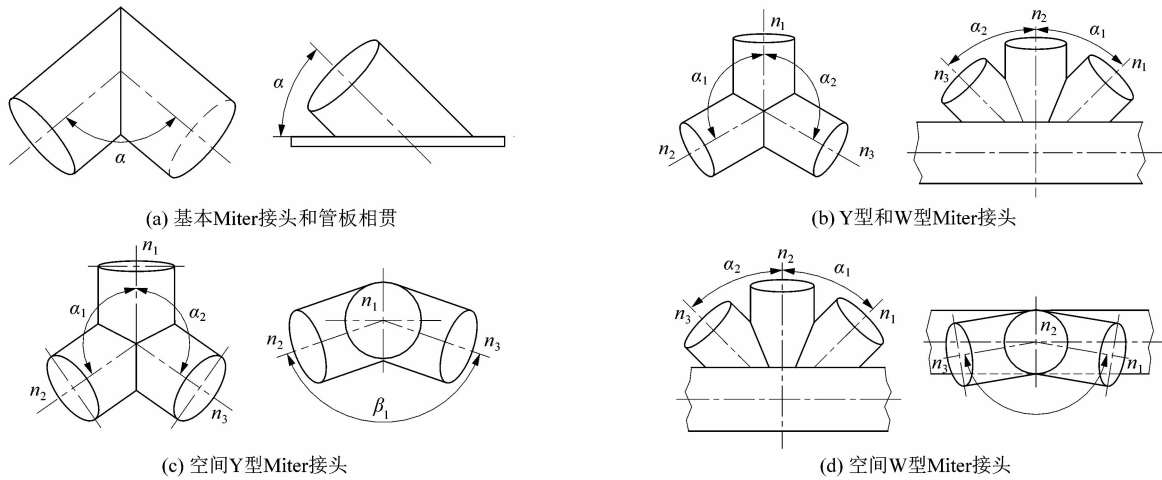


图 1 Miter 接头归类

Figure 1 Classification of Miter joint

1.2 Miter 接头及管板相贯的基本数学模型

Miter 接头及管板相贯线数学模型基本类似, 以同径两管相交的简单 Miter 接头为研究对象。设空间坐标系中有两管对接, 轴线间夹角为 α 。以图 2 所示建立空间坐标系 $o-xyz$, 基中 z 轴与右侧支管轴线重合, y 轴在两管相交所在的平面上, 向右为正方向, x 轴由右手定则确定。

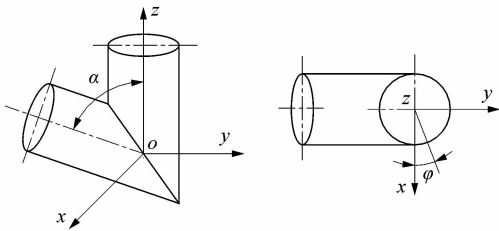


图 2 Miter 示意图

Figure 2 Schematic of Mite joint

设两管半径为 R , φ 为右侧支管内壁圆周上第 i 点与圆心的连线与 x 轴的交角, 利用空间坐标变换关系可得相贯线的方程

$$\begin{cases} x = R \times \cos \varphi \\ y = R \times \sin \varphi \\ z = -y / \tan (\alpha / 2) \end{cases} \quad (1)$$

1.3 复杂 Miter 接头及管板相贯的数学模型

Miter 接头在多管相贯时必须分析管件间的相对位置关系, 再判断实际相贯线形状^[4]。在 1.2 节的基础上, 可以分别推导出复杂 Miter 接头中 Y 型和 W 型

的相贯方程。如图 1(b) 所示 Y 型 Miter 接头中, 设管件数 $n=2$, 以计算 n_1 管相贯线为例, 联系各管间轴交角可以首先计算出任意一点 i 的可能性 z 值, 取较大的值为当前点 z 值, 则相贯线方程为

$$\begin{cases} z_1 = -y / \tan (\alpha_1 / 2) \\ z_2 = y / \tan (\alpha_2 / 2) \\ z = \max (z_1, z_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 为逆时针旋转时取负, 顺时针旋转时取正。可将其推广至管件数不超过极限值的任意情况。

同理, 在图 1(b) 右侧 W 型 Miter 管, n_1 和 n_3 是与板材或主管道相交的管, n_2 管是直接同径管相交的类型管。 n_2 管的计算与 Y 型 Miter 管相似, 不再赘述。现计算 n_1 管相贯线, 其计算方程式为

$$\begin{cases} z_1 = -y / \tan (\alpha_2 / 2) \\ z_2 = \frac{y \cos \alpha_2 - \sqrt{R^2 - x^2}}{\sin \alpha_2} \\ z = \max (z_1, z_2) \end{cases} \quad (3)$$

在图 1(c) 的空间 Y 型 Miter 管接头中, 管件数为 2。为了简化计算, 建立坐标系时, 将 y 轴设定在 n_1 和 n_2 管相交所在的平面上。 n_3 管相当绕 z 轴逆时针旋转 β , 以计算 n_2 管相贯线为目标, 其计算方程式为

$$\begin{cases} z_1 = \frac{x \cos \beta - y \cos \beta}{\tan (\alpha / 2)} \\ z_2 = \frac{-x \cos \beta + y \cos \beta}{\tan (\alpha / 2)} \\ z = \max (z_1, z_2) \end{cases} \quad (4)$$

在图 1(d)中, n_1 管同时与同径相交管和另一非同径相交管相贯(设其半径为 R_0),参照式(4)方程的推导方式, n_1 管相贯线的方程为

$$\begin{cases} z_1 = \frac{x \cos \beta - y \cos \beta}{\tan(\alpha/2)} \\ z_2 = \frac{x \cos \alpha \sin \beta - y \cos \alpha \cos \beta - \sqrt{R_0^2 - (x \cos \beta + y \sin \beta)^2}}{\sin \alpha} \\ z = \max(z_1, z_2) \end{cases} \quad (5)$$

式(1)~(5)分别为各类复杂类型 Miter 接头相贯线公式,其它复杂 Miter 都是在此基础上的衍生。

2 Miter 接头坡口切割数学模型

管道接头或管板相接的焊接节点处的强度要求大,同时需要避免较大的角焊缝尺寸,中厚板(≥ 6 mm)接头都要切制焊接坡口。根据焊接规范的要求,所开焊接坡口的角度值一般由相接两管或管板相贯线上各点的局部二面角来确定^[5-7]。同径相交的两管构成 Miter 接头,其相贯线实际相当于管-板相贯线^[8],因此可以将 Miter 管道接头的二面角由管板接头代替。计算时首先求得相贯线上任意一点管板之间的法向量,再根据二者的法向量求解出二面角。需要注意的是此时 Miter 管板之间的夹角为管管接头的一半,因此 Miter 接头及管板相贯相贯线上任意点的二面角 ψ 的计算公式为

$$\psi = \arccos(-\sin \varphi \cos \frac{\alpha}{2}) \quad (6)$$

根据 SY/T4802-92(API RP 2A)和美国标准学会/焊接学会(ANSI/AWS)有关规范,当 $\psi < 90^\circ$ 时坡口角 γ 为 $\psi/2$; $\psi > 90^\circ$ 时 γ 取 45° ^[9],理论切割角 B 的计算式为

$$B = \pi/2 - \psi + \gamma \quad (7)$$

又因理论切割角位于相贯线两相贯管法向量所在平面,该平面随着相贯线上的点坐标改变而变换,而数控管切割机床的割炬只能在切管轴剖平面内摆动,所以要将理论切割角换算成实际切割角 ω ,其计算公式为

$$\begin{cases} \omega = \arctan\left(\frac{\tan B}{\cos \xi}\right) \\ \xi = \arctan\left(\frac{\cos \varphi \cos \alpha \sin \theta - \sin \varphi \cos \theta}{\sin \alpha \sin \theta}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中 ξ 为切割点处被切管轴剖面与该点处法剖面组成的二面角。

3 切割速度的控制

3.1 实际切割角对切割速度的影响

在实际加工过程中,切割速度是影响切割轨迹和

坡口质量的最关键因素。切割速度过快会使割炬火焰产生较大的后拖量,使管壁不易切透;切割速度过慢则会造成管件相贯轨迹中的棱角熔化,而壁厚较薄的管件则会导致整个坡口形状的彻底改变^[10]。切割速度主要根据实际切割厚度调整,实际切割厚度则是指沿着割炬轴线方向从管件外壁到内壁的距离,即控制切割速度的关键参数是当前相贯线点上的坡口角值。因此可以根据相贯轨迹各处的坡口角变化情况动态地调整切割的线速度,以此提高切割质量。同时为了顺利排除熔渣和提高生产率,在保证切透的前提下尽可能选择较大的切割速度。切割时硬件设备启动后输入功率保持恒定,只能通过速度调整来优化加工工艺。而切割速度的优化是通过实际切割和待切管壁厚来实现的。

3.2 基于实际切割角切割速度的优化计算

数控切割机床对管件的切割运动的控制,是通过相对相贯线上离散点的控制来实现的,因此根据离散点的坐标值、实际切割角参数来实现对切割速度的优化是可行的。通过割炬全程零度偏转的切割实验来测试管件相贯轨迹形成的最优速度,即在保证功率最小、切割速度最快、坡口平整度符合要求的情况下,设此时切缝单位体积上的标准热量消耗为 Q ,切割速度为 v_0 ,该切割速度便是最优切割速度,其计算公式为

$$v_0 = \frac{Q}{\rho t W (c \Delta T + h_m)} \quad (9)$$

式中: ρ 为切缝金属的密度, c 为比热容, h_m 表示熔化相变的比焓, ΔT 为工件实际温升, t 为待切管壁厚, W 为切缝宽度。

在实际切割过程中,为了完成对坡口的加工,数控切割机的割炬是随实际切割角作相应摆动,如图 3 所示。

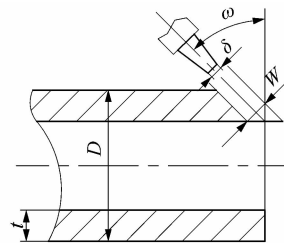


图 3 切缝示意图

Figure 3 Schematic of welding kerf

设喷嘴直径为 δ ,切缝宽度 W ,在任意位置如保证热量消耗为 Q' ,即能得出此时瞬时切割速度 v 与实际切割角 ω 的关系,即

$$Q' = \frac{\rho v t W}{\cos \omega} (c \Delta T + h_m) \quad (10)$$

联立式(12)和式(13)可得切割速度关于实际切割角的优化公式

$$v = v_0 \cos \omega_0 \tag{11}$$

4 仿真与验证

4.1 Miter 接头的三维实体仿真

为了检验上述数学模型的可靠性,选取图 1(b)所示的 Y 型 Miter 接头的进行实例运算,选择接头中的 n_1 管进行切割,各参数如下:被切管半径 $r = 50\text{ mm}$, $t = 5\text{ mm}$, $\alpha_1 = 120^\circ$, $\alpha_2 = 120^\circ$ 。编制程序,由此计算生成的各项数据摘录如表 1 所示。其中: φ 为相位角; x, y, z 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴的坐标值; ψ 为二面角; ω 为实际切割角。

表 1 实例参数

Table 1 Instance parameters

$\varphi/(^\circ)$	x/mm	y/mm	z/mm	$\psi/(^\circ)$	$\omega/(^\circ)$
0	50.000	0.000	0.000	90.000	49.106
45	35.355	35.355	20.412	69.295	57.388
71	16.278	47.275	27.294	61.786	59.543
90	0.000	50.000	28.567	60.000	60.000
135	-35.355	35.355	20.412	69.295	57.388
180	-50.000	0.000	0.000	90.000	49.106
209	-43.730	-24.240	13.995	75.971	55.121
331	43.730	-24.240	13.995	75.971	55.121

由表 1 数据可知:同径两管相交构成 Miter 接头,其相贯线、实际切割角都具有对称性。该实例中其焊接装配面是关于 $o\text{-}yz$ 平面对称的。运用 AutoCAD 对相贯线和坡口进行三维实体仿真,如图 4 所示。

联系表 1 数据,实例仿真符合理论和实际加工要求,从而验证了数学模型的可靠性和准确性。

5 结语

1) 分析 Miter 接头及管板相贯的相贯关系,推导出了其焊接轨迹及焊接坡口切割时的数学模型,并在此基础上对复杂 Miter 接头中相贯线模型和实际切割角模型进行了延伸。

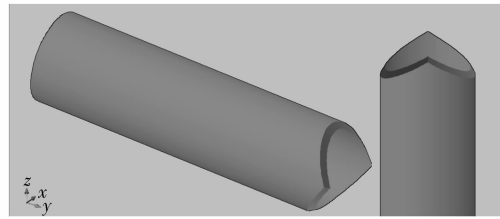


图 4 实例仿真图

Figure 4 Example results

2) 分析了切割过程中实际切割角对切割速度的影响,并通过建立切割过程中任意点位置切割速度与坡口角的数学模型,推导出了切割速度与坡口角数学公式,对切割过程中速度控制与优化有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] BLACKBURN J. Advancements in pipe cutting operations [J]. The Fabricator, 1994(9):14-17.
- [2] 赵基达,钱基宏,宋涛,等. 我国空间结构技术进展与关键技术研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(11):57-63.
- [3] 张明. Miter Joint 在管道建设中的应用 [J]. 科技与企业, 2012(23):276-278.
- [4] 王国栋,阎祥安,肖聚亮,等. 管端相贯线坡口切割割炬位姿控制 [J]. 天津大学学报, 2005, 38(8):684-688.
- [5] 谢新房,王国栋. 多管相贯焊接坡口数控切割研究 [J]. 工程图学学报, 2007, 28(4):150-155.
- [6] 邱杰,曲博林,曲翔宇. 相贯管切割角度计算分析 [J]. 中外能源, 2013, 18(8):64-68.
- [7] 王旗华,殷国富,徐雷,等. 管桁结构管端焊接装配面模型及切割精度控制 [J]. 焊接学报, 2011, 32(10):81-84.
- [8] 贾安东,李宝清,闫祥安,等. 数控切管机一次完成多次搭接相贯坡口切割方法 [J]. 焊接学报, 1999, 20(12):30-35.
- [9] 孙祥鼎,夏炳仁. 海洋平台建造工艺 [M]. 北京:人民交通出版社, 1997.
- [10] 聂晓根,刘艳斌,曾露莎. 管件数控火焰切割割炬轨迹建模 [J]. 工程图学学报, 2008, 29(3):145-150.

(上接第 24 页)

- [4] 赵威威,王顺花. 浅析镍及镍合金的焊接方法 [J]. 装备制造技术, 2012(9):237-239.
- [5] ALI H, MORI S, FUJII N, et al. Plasma welding of thin plate [J]. Quarterly Journal the Japan Welding Society, 2005, 23(2):245-251.
- [6] FOEST R, SCHMIDT M, BECHER K. Microplasmas, an emerging field of low temperature plasma science and technology [J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2006, 248(3):87-102.
- [7] 何建萍. 微束等离子焊小电流问题的研究 [J]. 上海工程技术大学学报, 1999, 13(2):97-99.
- [8] NISHIBATA T, HIRATA H, OGAWA K, et al. Effect of Ni content on

- weld hot cracking susceptibility of fully austenitic Fe-Cr-Ni alloy [J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2001, 19(1):77-84.
- [9] 王付鑫,何建萍,向锋. 微束等离子弧焊焊接不锈钢筛网的研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(1):128-133.
- [10] 孟庆森. 金属焊接性基础 [M]. 北京:化学工业出版社, 2010:132-136.
- [11] 沈亮,陈克选,王江,等. 镍合金等离子弧焊设备研制及工艺优化 [J]. 电焊机, 2014, 44(11):106-109.
- [12] 向锋. 超薄不锈钢的 P-PAW 焊缝成形质量控制和组织细化 [D]. 上海:上海工程技术大学, 2011:26-28.