

大型挤压铝型材淬火技术与装置*

张君¹ 杨合¹ 谢东钢² 韩炳涛²

(1. 西北工业大学材料科学与工程学院 西安 710072;

2. 中国重型机械研究院 西安 710032)

摘要: 分析大型挤压铝型材淬火热处理的必要性, 根据典型大型铝型材冷却速度曲线提出大型挤压铝型材淬火的技术要求。结合传热学, 推导出大型铝型材快速淬火时冷却介质的计算公式, 建立大型挤压铝型材淬火热处理的理论。介绍几种常用的铝型材快速冷却方式, 分析气水雾化联合淬火的技术特点。根据所建立的大型挤压铝型材淬火热处理理论提出大型铝型材气水雾化联合淬火的技术路线。研制出新型高效的气水雾化联合淬火装置, 采用所研制的气水雾化联合淬火装置进行试验。试验表明: 所建立的大型挤压铝型材淬火热处理理论正确, 所提出的技术路线可行。对研制的大型气水雾化联合淬火装置进行推广, 能够提高大型挤压铝型材的质量。

关键词: 铝型材 挤压 淬火 气水雾化联合淬火

中图分类号: TG312

0 前言

大型挤压铝型材的淬火是获得优质大型铝型材的关键技术之一。大型铝型材一般要求具有较高的强度、良好的表面质量, 建筑装修中用的铝型材还须要漂亮的外观。合理有效的淬火工艺及装置可以提高铝型材的机械强度, 如 6000 系列合金中的 6001 在 500 °C 挤压后立即进行水冷淬火处理, 经过快速均匀的冷却, 在 Al 中生成 Mg₂Si 均匀分布的固溶相, 可以获得很高的强度, 但如果处理不当, 就会造成 Mg₂Si 析出相不均匀或较少, 这就降低了铝型材的强度。因此研究先进的大型挤压铝型材淬火技术与装置成为大型铝型材挤压过程迫切需要解决的重要课题。

铝挤压型材成形温度为 460~500 °C, 大型铝型材在挤压机前梁出口处温度为 490~540 °C, 一般要求在经过淬火装置后的温度为 200 °C。从而可以保证大型铝型材所要求的力学性能和组织性能^[1], 因此许多铝合金型材要求快速冷却。例如, AlMgSi 铝合金的冷却速度要求从 5~10 K/s 直到 50 K/s, 而高强度的航天材料要求更高的冷却速度。

当然, 一些铝合金挤压生产由于金相组织原因并不要求快速冷却, 但是快速充分的冷却可以改变铝型材挤压生产输出系统的工艺流程。如果铝型材在淬火装置中得到充分的冷却, 经过移动热锯锯到所需的商业长度后就可以直接进行拉伸, 然后进行

半连续时效处理, 从而省去了冷床后部出料系统装置等。在比较复杂的铝型材尤其是中空铝型材的挤压中可以省掉后步的校直工序, 不同的铝型材断面形状均可以达到所要求的几何形状公差, 这就提高了挤压机后部出料系统布置的合理性, 可以节省空间和用于横向传输投资的费用, 降低成本, 提高生产率^[2-5]。

挤压工艺的主要优点是可以根据所要求的强度和功能在断面中合理安排与分布材料, 这一优点通过快速冷却得到了加强, 而使轻合金挤压生产的应用更为广泛。

1 大型挤压铝型材快速冷却的技术要求与理论基础

1.1 技术要求

对于大型铝合金型材来讲, 在淬火过程中冶金性能和几何形状均发生改变, 冷却速度控制的不合适, 会导致大型铝型材发生较大的变形。经研究发现, 6000 系列大型挤压铝型材淬火速度曲线如图 1 所示^[6]。但是, 不同铝合金型材冷却时要求的热量转换系数变化范围很大。对于中等应力强度要求、壁厚较薄的 AlMgSi 铝合金, 冷却时要求的传热系数是 150 W/(m²·K); 而对于高冷却速度、壁厚较大的铝型材, 冷却时要求的热量转换系数是 4 000 W/(m²·K)。因此所要求的冷却速度变化幅度也较大, 如何控制冷却速度大幅度的变化, 是研究大型挤压铝型材淬火装置需要解决的一个关键问题。

* 国家杰出青年科学基金(50225518)、国家重点新产品(2004ED850025)和西安重型机械研究所博士后科研基金(K055412)资助项目。20060620 收到初稿, 20061208 收到修改稿

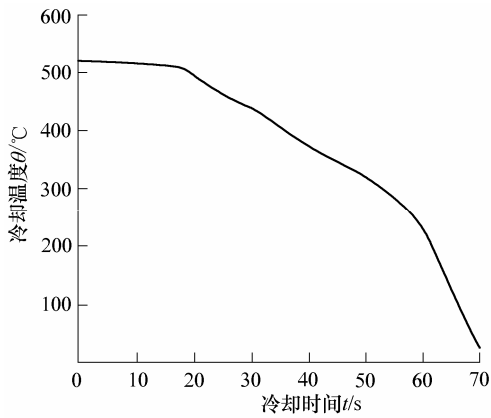


图 1 6000 系列大型挤压铝型材淬火速度曲线

快速冷却的另一个关键问题是如何控制淬火后的铝型材的变形程度与表面质量。对于断面较大的大型铝型材,由于铝对热量的传递比较快,采用快速冷却可降低断面温度场分布的不均匀性,减少淬火后的大型铝型材变形。

要获得高的冷却速度,快速冷却的位置应尽可能地接近压机前梁出口位置,因此淬火装置一般离前梁出口很近,中间只留牵引机夹持铝型材位置。

1.2 理论基础

大型铝型材的快速冷却是一个热量交换的过程,通过对流换热,冷却介质带走铝型材中的热量,从而降低大型铝型材的温度。

根据大型铝型材的冷却速度要求,可以计算冷却大型铝型材所需带走的热量。假设在时间 Δt 中大型铝型材从温度 θ_h 降低到 θ_l ,由传热学^[7]可以得出所需带走热量 Q_c 为

$$Q_c = c_A v_R R S (\theta_h - \theta_l) \Delta t \quad (1)$$

式中 c_A ——大型铝型材的比热容
 v_R ——挤压速度
 R ——挤压比
 S ——大型铝型材的断面积

采用空气冷却、水冷却、或气水雾化联合淬火热量交换均可认为是对流换热,热量计算公式为

$$Q_q = \alpha (\theta_o - \theta_i) S_f \quad (2)$$

式中 Q_q ——冷却带走的热量
 α ——传热系数
 θ_o ——冷却介质接触大型铝型材前的温度
 θ_i ——冷却介质接触大型铝型材后的温度
 S_f ——在淬火装置中大型铝型材与冷却介质接触的总面积

传热系数由式(3)确定

$$\alpha = \frac{q_c}{\theta_o - \theta_i} \quad (3)$$

式中 q_c ——热流密度

$$q_c = -\lambda \Delta t + \rho \varpi h \quad (4)$$

式中 λ ——热导率
 ρ ——冷却介质的密度
 ϖ ——冷却介质的流速
 h ——比焓

根据式(1)~(4),可以计算冷却介质的总量。

铝挤压型材冷却(包括空气冷却和水冷却)温度的范围是 500~230 °C。在此范围内,如果忽略铝型材沿壁厚方向由于热量传导引起温度场分布的不均匀性,平均冷却速度 dv/dt 与传热系数 α 成比例。铝合金密度为 2 700 kg/m³,平均比热容量为 1 kJ·(kg·K)⁻¹,对于一定的冷却速度,允许用式(5)估算传热系数

$$\alpha \cong 8s \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5)$$

式中 s ——热量传递路径的长度(对于一面冷却, s 为铝型材壁厚;对于两面冷却, s 为铝型材壁厚的一半)

2 大型挤压铝型材快速冷却的方式

大型铝型材快速冷却的方式可以是空气冷却、水冷却、驻波淬火和气水雾化联合淬火。选择大型铝型材的冷却方式主要考虑到以下两点:①大型铝型材的断面形状和壁厚。②铝合金类型和化学成分。

空气冷却是利用风机或空气压缩机产生的气流冷却铝型材,一般适用于壁厚较薄、强度不太高的大型铝型材。空气冷却效果由以下因素决定:①压缩空气速度。②喷射到大型铝型材表面的压缩空气温度。

采用空气动力学的理论,可以提高空气冷却的效率,在距离大型铝型材表面安装高速空气喷嘴,可以将空气冷却的效率提高 2~3 倍。

水冷却是将高压水(一般压力不小于 0.75 MPa)直接喷射到大型铝型材表面进行冷却,适用于棒、条及壁厚较大的大型铝型材,主要因为棒、条、壁厚较大的铝型材用其他方法冷却效果不好,而且棒、条、壁厚较大的铝型材容易在后部工序中校直。水冷却效果由以下因素决定:①水流量和速度。②喷射到大型铝型材表面的高压水温度。③离开大型铝型材表面的水温度。

在对大型铝型材进行水冷却过程中,平均传热系数是 4 000 W/(m²·K),水冷却温度范围是 230~

500 ℃。因式(5)按以上数据,可以算出10 mm壁厚的铝型材,冷却速度应为50 K/s;对于5 mm壁厚的铝型材,冷却速度应为100 K/s。但是,这样大的冷却速度对于壁厚小的铝挤压型材来讲,将导致较大的变形。

驻波淬火技术是将大型铝型材在形成驻波的水中冷却,驻波淬火可以比较均匀的提高热量转换效率。由于用水波淬火的方法控制复杂,而且不易产生平衡的效果,在实践中应用不多。

气水雾化淬火是采用气水雾化喷嘴,将高压水雾化喷射到大型铝型材表面,对大型铝型材进行冷却,由于大型铝型材各个表面上均安装有数个喷嘴,喷射流量和角度均可以调节,因此可以产生一个平衡的冷却效果。气水雾化淬火冷却效果由以下因素决定:①水流量和气水雾化喷射速度。②喷射到大型铝型材表面的高压水温度。③离开大型铝型材表面的水温度。

试验表明:在铝型材冷却的温度范围内,平均传热系数与铝型材冷却表面的喷射水密度成正比,而与水喷嘴形状(锥形或扁圆形等)、喷射水的动量以及喷嘴到铝型材表面的距离无关。由试验得

$$\frac{\alpha}{\rho_s} = C \quad (6)$$

式中 C ——常数

ρ_s ——大型铝型材冷却表面的喷射水密度,它是水流量 q_w 与冷却水喷射到大型铝型材表面面积 A 的比值,参见式(7)

$$\rho_s = \frac{q_w}{A} \quad (7)$$

为了讨论方便,假设大型铝型材冷却表面的喷射水密度由喷嘴区域的几何形状决定,也就是对于每个喷嘴流量为 q_w ,宽度为 b ,喷射至大型铝型材表面的长度为 l ,则喷射水的密度为

$$\rho_s = \frac{q_w}{lb} \quad (8)$$

面积 A 与淬火装置中管道上喷嘴的分布及管道的分布有关。假设式(6)给出的平均传热系数与空气冷却中的传热系数相同,则喷射水密度的上限为42 L/(m²·min),且考虑水流喷射到大型铝型材表面是均匀的。这也意味着对于大型铝型材,每个喷嘴的喷射水密度与平均值没有多大差别,因此合理的喷嘴数量与排布可以获得满意的淬火效果。

3 大型挤压铝型材气水雾化联合淬火技术路线

气水雾化淬火技术首先要将水很好地进行雾

化,因为空气与水之间的密度比高达800,因此在喷射到大型铝型材表面之前,水、气就会分离。如果雾化效果不好,水滴喷射到大型铝型材表面就会不均匀,在局部喷射水的密度与冷却速度与其他地方产生差异,导致冷却效果不平衡。只有通过非常细小的水滴与较小的喷射水密度,而且当水接触到大型铝型材表面或接近大型铝型材表面时已经汽化,才可获得均匀的气水雾化淬火效果。在这种情况下,冷却水的温度是25 ℃,湿度为50%。在冷却过程中,空气温度从30 ℃升至55 ℃,空气与水的混合比不小于0.035,以使水在传输中蒸发。较低的喷射水密度比高效的空气冷却(即风冷)更易使热量传热系数提高。

大型铝型材气水雾化淬火技术的技术路线如下所述。

(1) 根据大型铝型材气水雾化理论计算冷却所需的水流量。首先由铝合金种类确定出大型铝型材冷却前和冷却后的温度和其比热容,根据大型铝型材的断面积、挤压速度、挤压比和冷却时间可以确定其冷却所需带走的热量。根据铝型材的形状确定铝型材对流换热的全面积,由经验给出冷却介质冷却前后的温度,计算出冷却介质的传热系数和热流密度,根据热流密度可以计算出冷却介质的流速,从而确定水的流量。

(2) 根据冷却速度确定气水雾化淬火装置的长度。气水雾化联合淬火的长度 L_q 可由式(9)确定

$$L_q = vR\Delta t \quad (9)$$

式中 Δt ——冷却所需时间

(3) 根据空气与水的混合比选择合适的气水雾化喷嘴。由空气和水的混合比不小于0.035,可以计算出水 and 空气流量比约为1:22,目前气水雾化喷嘴可以在水和空气流量比约为1:14时保证水的颗粒不大于50 μm,因此一般选取水和空气流量比约为1:14的气水雾化喷嘴,此时空气和水的混合比为0.057。

(4) 确定压缩空气流量。根据水和空气流量比约为1:14可以确定压缩空气的流量。

(5) 确定高压水和压缩空气压力。按照空气压缩机压力等级和水泵压力等级以及经验,一般选取压缩空气压力为0.3~0.5 MPa,选取高压水的压力为不小于0.75 MPa。

(6) 由大型铝型材冷却速度的要求合理地布置喷嘴。

由图1所示的6000系列大型铝型材冷却速度曲

线可以看出: 6000 系列大型铝型材冷却是一个从小逐渐加大的过程, 在冷却过程中, 曲线存在 3 个不同的斜率, 在最初的 18 s 时, 冷却速度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$; 在 $18\sim 55\text{ s}$, 冷却速度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$; 后期冷却速度更快, 在 $18\sim 55\text{ s}$, 冷却速度为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。因此要求在气水雾化联合淬火中喷嘴排布沿大型铝型材冷却长度方向水喷射密度逐渐加大, 具体排布如图 2 所示。

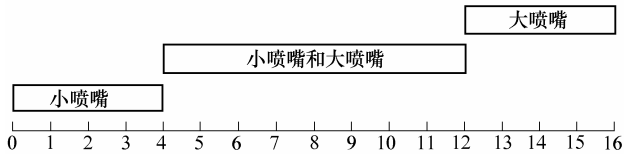


图 2 气水雾化联合淬火喷嘴沿长度方向排布

对于大型铝型材挤压来讲, 挤压成形的铝型材断面形状千变万化(这里列出来的不是铝型材的各种断面形状), 可分为管材、板材、棒材和铝型材等, 管材又分为有缝管材和无缝管材, 铝型材分为中空铝型材、实心铝型材等, 如图 3 所示。因此要求气水雾化联合淬火喷嘴沿铝型材断面方向的喷射流量可以调整, 以适应铝型材各个方向壁厚的变化, 达到平衡的冷却效果。同时喷射角度也可以调节, 以适应铝型材形状的变化。大型铝型材上下左右四个表面均应布置多个喷嘴, 从而保证在气水雾化联合淬火过程中铝型材的各个外表面均可以得到冷却。

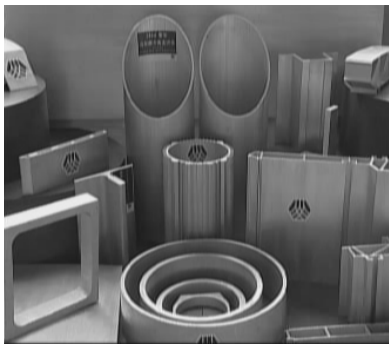


图 3 不同断面形状的大型铝型材

4 大型挤压铝型材气水雾化联合淬火装置研制

大型铝型材的气水雾化不仅能进行高性能的气水雾化联合淬火, 而且可以完成快速的空气冷却和水冷却, 是一种联合装置。

依据以上的理论和技术路线, 计算出大型铝型材气水雾化联合淬火装置的技术参数如表所示。

表 大型铝型材气水雾化联合淬火装置的技术参数

序号	技术参数内容	数值
1	铝型材(长 \times 宽) $l'\times b/\text{m}\times\text{m}$	0.26×1
	管材 l/m	0.600
2	冷却空气流量 $q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	≥ 44.4
3	冷却空气压力 p_1/Pa	≥ 2100
4	冷却水流量 $q_2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	≥ 0.056
5	冷却水压力 p_2/kPa	70
6	压缩空气流量 $q_3/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	≥ 0.083
7	压缩空气压力 p_3/kPa	50
8	冷却装置长度 l/m	10

气水雾化联合淬火装置在挤压铝型材长度方向分为两段, 每段又分为两个冷却区(每个冷却区长度约为 2.4 m), 因此共有四个冷却区。第一个冷却区安装小喷嘴, 形成冷却速度为 $0.5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却区; 第二个冷却区交错安装大喷嘴和小喷嘴, 第三个冷却区也交错安装大喷嘴和小喷嘴, 形成冷却速度为 $3\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却区; 第四个冷却区安装大喷嘴, 从而使冷却速度最大, 成为 $8\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却区。这种喷嘴的排布方式满足了图 1 中 6000 系列大型铝型材快速冷却的冷却速度要求。

图 4 所示为 100 MN 油压双动铝挤压生产线中的气水雾化联合淬火装置结构示意图。

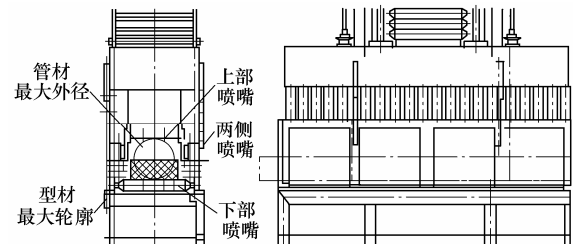


图 4 气水雾化联合淬火装置结构示意图

从图 4 可以看出, 在挤压铝型材长度方向, 按照前面所示的四个冷却区分布的原则安装了多排喷嘴, 在大型铝型材断面方向也分布了多个喷嘴, 在上表面分布着 $3\sim 5$ 个喷嘴, 小表面分布着 $4\sim 6$ 个喷嘴, 两侧面分布着 $2\sim 4$ 个喷嘴。喷嘴交错布置, 从而可以避免不同喷嘴之间的相互干涉。

为了使大型铝型材上、下表面喷射水获得相同的喷射速度, 达到平衡的冷却效果, 减少大型铝型材的变形, 上部喷嘴的缝隙应大于下部喷嘴的缝隙, 主要因为大型铝型材上表面与上部喷嘴的距离大于下部喷嘴与大型铝型材下表面的距离。由于铝型材冷却表面的喷射水密度主要取决于喷嘴尺寸, 因此较大的喷嘴尺寸可以补偿较长的距离。为了达到较好的冷却效果并使大型铝型材晶粒结构均匀细化, 此气水雾化联合淬火装置中喷嘴与冷却表面之间的距离约为喷嘴宽度的 $8\sim 10$ 倍。

图 5 所示为按照以上技术路线设计的 80 MN 单

动铝挤压生产线气水雾化联合淬火装置。

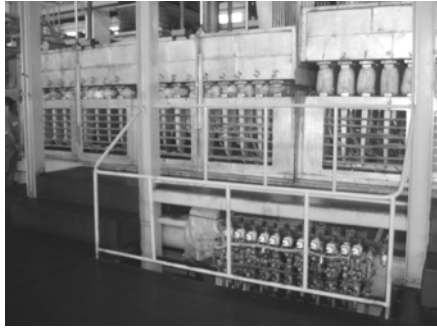


图5 气水雾化联合淬火装置

对于大型铝管材和高度较高的铝型材,要求旁边亦进行冷却。因此该气水雾化联合淬火装置在旁边也布置了雾化冷却喷嘴。

气水雾化联合淬火装置中雾化喷嘴的形状分为全锥形或扁平形。这些喷嘴沿长度方向安装在沿挤压方向四个不同的压力管道上,每一个压力管独立动作。它的一个优点是配备一个旋转装置,可以使喷射水直接喷射到铝型材的角落与缝隙中。大型铝型材冷却表面的喷射水密度与喷嘴出口处的流速成线性关系。考虑到泵的压力与沿程阻力损失,喷嘴的最高压力约为 100 kPa。能够满足喷嘴喷射形式的最低压力为其下限,大多数喷嘴为 10 kPa。因此,在最大流量时喷嘴的压力波动范围是 30~90 kPa。

喷嘴的压力波动在 10%范围内,可将热传导的值限制在 5%的波动范围,尤其是旁边喷嘴平衡均匀的冷却,可以完全避免所谓的香蕉效应,即在快速冷却过程中大型铝型材从旁边沿挤压方向开裂现象。

在气水雾化联合淬火装置两端各布置了一排压缩空气喷嘴,主要为了消除从空气直接进入气水雾化联合淬火装置的突然过渡,防止色斑等现象的产生,同时阻止水滴的飞溅。

实践中,在 80 MN 单动铝挤压生产线上采用气水雾化联合淬火装置对挤压的 6061 大型铝型材进行了快速冷却。冷却前的温度为 520 °C,通过气水雾化联合装置的时间为 80 s,温度降低至 200 °C,经过检验,达到了所要求的强度,经过淬火后大型地铁铝型材产品如图 6 所示。

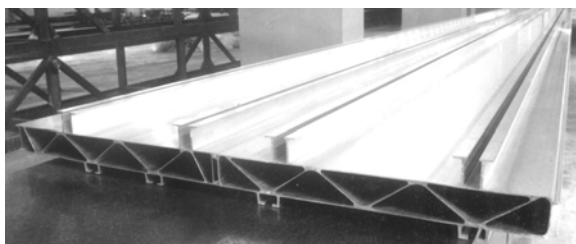


图6 经过淬火后大型地铁铝型材产品

大型铝型材气水雾化联合淬火技术已得到推广应用,已应用在 80 MN 油压单动短行程铝挤压机生产线、75 MN 油压单动短行程铝挤压机生产线和 55 MN 油压双动铝挤压机生产线、100 MN 油压双动铝挤压机生产线和正在研制的 125 MN 油压双动铝挤压机生产线中,替代了国外技术,使我国大型铝型材的淬火技术达到了国际先进水平。

5 结论

通过对大型铝型材快速冷却的研究提出了大型铝型材淬火的技术要求,建立了大型铝型材快速冷却的理论基础,并提出了气水雾化联合淬火的技术路线。在此基础上,研制了通过气水雾化喷嘴合理布置,改变喷嘴流量实现气水雾化联合淬火的新型高效装置。实践证明,该装置能够明显提高了大型铝型材的质量,在大型铝型材挤压生产线上得到了广泛应用。

参 考 文 献

- [1] 刘静安,谢建新.大型铝合金型材挤压技术与工模具优化设计[M].北京:冶金工业出版社,2003.
- [2] BRYANT A L, ROGER A P. Downstream extrusion process control, Quenching, Cooling, Aging[J]. Light Metal Age, 2003(4): 14-27.
- [3] PETERSON W S, DORE J E. Super-quenching of Aluminium extrusion[C]//Aluminium Association. First extrusion technology seminar, 1969, New Orleans. New Orleans: Aluminium Association, 1969: 26-30.
- [4] JONOS R, GRAMLET A. Smart-quenching. Proceeding[C]//Aluminium Association. Seventh extrusion technology seminar, 2000, Chicago, Chicago: Aluminium Association, 2000: 188-193.
- [5] STREHMEL W, PLATA M, BOURQUI B. New technologies for cooling and quenching of medium to large size aluminium extrusions[C]// Aluminium Association. Sixth extrusion technology seminar, 1996, Chicago, Chicago: Aluminium Association, 1996: 317-325.
- [6] 张君,杨合,何养民,等.铝型材挤压中的淬火装置[J].重型机械,2001(3): 8-11.
- [7] 伊萨琴科,奥西波娃,苏科缅.传热学[M].王丰,译.北京:高等教育出版社,1987.

FAST-COOLING TECHNIQUE AND EQUIPMENTS OF LARGE-SIZE ALUMINIUM PROFILE

ZHANG Jun¹ YANG He¹
XIE Donggang² HAN Bingtao²

(1. College of Materials Science and Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. China Heavy Machinery Research Institute,
Xi'an 710032)

Abstract: The necessity of cooling quickly large-size aluminium profiles extruded is analyzed. Based on the typical large-size aluminium profiles cooling velocity curve, the technical requirements for the quench process of large size profiled aluminum profiles is put forward. On base of thermal conduction theory, equations to calculate the quantity of cooling medium for large-size aluminium profiles quench are gained. And the corresponding foundation for fast cooling is established.

Several fast cooling methods in common use are introduced. The technical characteristics of air-water combined quench are analyzed. On the foundation of large-size aluminium profiles quench theoretic, the technical process route for large-size aluminium profiles air-water combined quench is also put forward. Further the new and effective air-water combined quench equipment is developed. The experiment is carried out on the new quench. Experiment shows that the theoretic foundation for large-size aluminium profiles fast cooling is correct and the technical process route is reliable. The new quench equipments are used in several large-size aluminium extrusion line, which makes it to greatly improve the quality of the large size aluminium profiles.

Key words: Aluminium profile Extrusion Quench

Fast-cooling and air-water combined quench

作者简介: 张君, 男, 1970 年出生, 博士后研究人员, 高级工程师。主要研究方向是有色金属挤压工艺、设备和计算机仿真。

E-mail: chungjun@sohu.com