http://pmse.scu.edu.cn

硬聚氯乙烯轴向中空壁管冷却定型工艺优化与数值模拟

郭泽元[1]，胡少伟[3]，陈 伟[1]，金文粲[2]，唐鹏飞[2]，潘福渠[4]

（1.武汉理工大学 土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430000；2. 广西大学 土木建筑工程学院，广西 南宁 530000；
3. 郑州大学 黄河实验室，河南 郑州 450000；4. 山东东信塑胶科技有限公司，山东 聊城 252000）

摘要：文中对外径500 mm的硬聚氯乙烯（PVC-U）轴向中空壁管的冷却定型过程进行了数值模拟研究与工艺优化。通过建立热传递模型和热力耦合模型研究了冷却方式、冷却时间、冷却温度和真空负压对管道冷却定型工艺的影响，并对冷却定型设备进行了优化设计。结果表明，在冷却水温为25 ℃、冷却时间为1500 s和真空负压－0.09 MPa的条件下，通过外径定型的真空喷淋式冷却定型工艺进行管道加工最为理想。工艺和设备优化后生产的管道成品内外径尺寸满足要求，弯曲度≤0.2%、不圆度≤0.14%、环刚度为9.47 kN/m^2，环柔性良好。

关键词：轴向中空壁管；硬聚氯乙烯；冷却定型；数值模拟

中图分类号：TQ325.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）11-0096-14

硬聚氯乙烯（PVC-U）管道以其质量轻、耐腐蚀的特点被广泛用于城市排水和农业灌排领域[1]。针对城市排水用管道和农业灌排用管道具有管内不承受水压或承受较低水压（<0.4 MPa）的特点，相关企业规划设计了节省材料且造价更低的PVC-U轴向中空壁管[2~4]。PVC-U轴向中空壁管的生产过程为：首先将原料充分混合制备成PVC混配料，然后通过螺杆挤出机将混配料加热搅拌为熔融体，再在挤出机头中通过高温和加压使熔融体充分塑化并通过模具挤出，最后通过冷却套筒设备对挤出后的管道进行冷却定型[5~7]。冷却定型工艺是控制塑料制品成型尺寸的重要环节，合适的冷却定型工艺能够降低管道成品的不圆度和弯曲度，从而减少管道在使用过程中的应力集中问题，最终提高管道的力学性能、耐久性和使用寿命[8~10]。

国内外部分研究人员对塑料制品的冷却定型问题进行了研究。例如，严庆光等[11]利用MATLAB建立了一种适用于聚苯乙烯微孔发泡制品的冷却定型工艺的数值模型，其研究结果表明，合适的冷却时间可以增加气泡密度、减小气泡尺寸，从而提高成品质量；杨云珍等[12]通过ANSYS对PVC异型材进行数值模拟，得到该型材冷却时的温度分布，其研究结果表明异型材冷却时中心节点温度的控制十分重要；Nóbrega等[13]对管材和型材的冷却定型过程进行了数值模拟研究和优化分析，认为型材的冷却定型筒中应该具有3个连续的冷却水槽，以实现对型材外形的良好控制；而李静等[14]通过ANSYS有限元软件对塑料管道的冷却定型过程进行了瞬态传热分析，得到了其工况下的对流传热系数，并认为相较于3槽冷却定型筒（3倍标准管长），精准温度调控下的2槽冷却定型筒更适合管道的冷却定型工艺，且不会造成能源的大量浪费；Pittman等[15]建立了一种用于PVC管材挤出过程的冷却定型和重力诱导的流固耦合数值模型，并在一条外径315 mm管材的挤出生产线上进行了实际生产使用；Rajkumar等[16]基于开源计算库OpenFOAM对热塑性型材进行了模拟探究，开发

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0185
收稿日期：2023-10-22
基金项目：国家重点研发计划（2022YFC3004401）；国家自然科学基金重点项目（52130901）；河南省自然科学基金资助项目（232300421003）；泰山产业领军人才项目（tscx202306104）
通讯联系人：胡少伟，主要从事水利交通领域工程结构试验与安全评价分析研究，E-mail: hushaowei@zzu.edu.cn；
陈伟，主要从事工程项目管理方面的研究，E-mail: iamhappychen@163.com

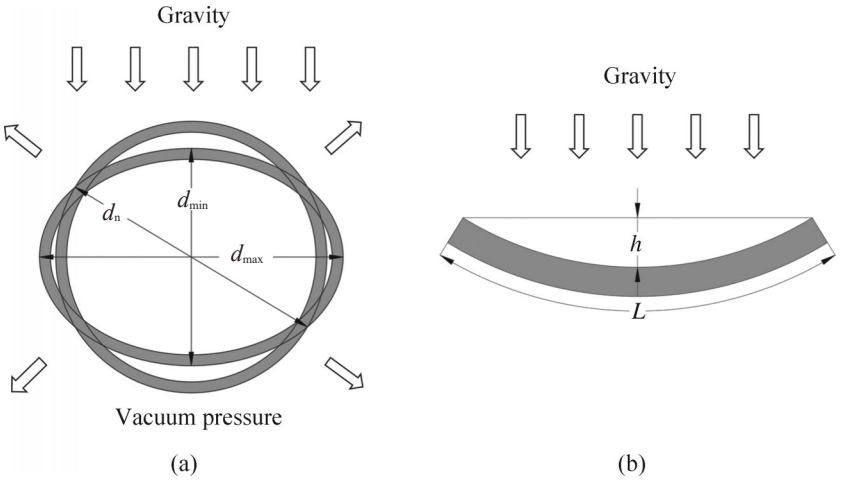


Fig. 1 Appearance requirements for pipeline cooling and shaping: (a) out of roundness of pipeline cross-section; (b) longitudinal curvature of pipeline

了一套用于预测冷却定型时型材与冷却筒间热交换的程序,并对其进行了实际应用。不过该程序尚不能满足大规模工业应用的需求。Mousseau等[17]以100 mm宽的PVC型条为例,提出了一种可以评估从挤出材料传递到冷却筒的热量和热交换模式的逆向计算方法。

现有冷却定型工艺研究的不足点在于研究对象都是小口径管道或小体积型材,实际生产时发现这些研究结论并不适用于大体积管材的冷却定型加工。同时,现有管材的冷却定型研究对象皆为实壁管材,缺少针对PVC-U轴向中空壁管冷却定型过程的研究。本文对外径500 mm的轴向中空壁管的冷却定型工艺进行了数值模拟研究,通过数值模型对相关冷却设备和冷却条件进行了优化设计,从而提高了成型管道质量,保障了轴向中空壁管在农业灌排系统中长期稳定运行。

数值模拟分为2步:第1步对管道的冷却方式进行模拟研究,优选适合外径500 mm轴向中空壁管的冷却方式和冷却设置;第2步基于优化设计的冷却设置进行温度-位移耦合的冷却定型模拟,通过模拟得到理想的冷却定型方案。

1　轴向中空壁管冷却模拟

挤出后高温软化状态下的管道的弹性模量较低,此时在重力的作用下,管道的横截面会出现塌扁变形趋势,管道的纵向会出现弯曲变形趋势,如Fig.1所示。同时,大直径的管道其冷却收缩程度也较为明显,因此需要对其进行快速冷却定型以控制管道横截面的不圆度和管道纵向的弯曲度,从而提高管道成型质量。规范国标GB/T 18477.3-2019,GB/T 13664-2006,GB/T 8806-2008和GB/T 20221-2006规定,管道的横截面不圆度不大于2.4%,管道的同方向弯曲度不大于1%,且不能呈S状。

影响真空冷却定型的因素主要有冷却方式、冷却时间和真空度。冷却方面,冷却速度过快即冷却介质温度过低,管道壁面的内外温差会增大并造成管道内应力增加,最终导致管材脆性增大;反之,则会使管道出现冷却不良和弯曲变形,并降低管道生产效率。因此,冷却方式的合适与否决定了管材的冷却速度能否满足要求,而冷却时间的控制则决定了管材工业整体的生产效率。真空度方面,真空压力偏小会导致管外径尺寸不足且管道不圆度偏高;反之,真空压力偏大则会出现管道抽胀现象,即相邻2个定型套间的管体胀大变形。

1.1　管道冷却模拟设置

为提高管道的成型效率和成型质量,管道的冷却定型速率需要和管材牵引速度、管材挤出速度相匹配。据已有研究[4]表明,外径500 mm轴向中空壁管材挤出机在高速生产过程中的管材挤出温度为185 ℃、挤出速度约为7.8×10^{-3} m/s。考虑到在生产过程中,管材的牵引速度需要比挤出速度略快1%以形成适当的拉力,从而避免管道在冷却筒中受到挤压

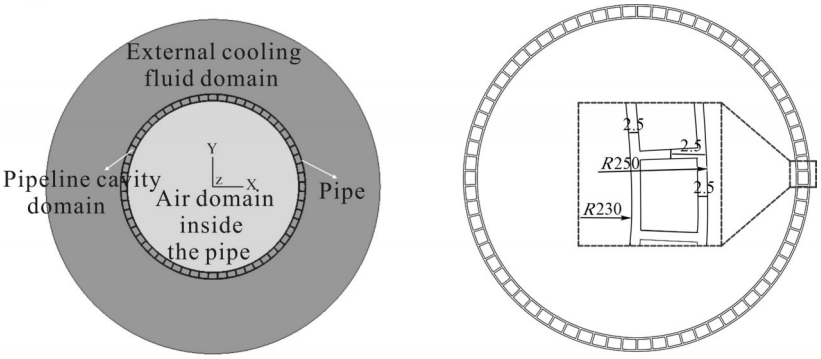


Fig. 2 Numerical modeling: (a) model; (b) pipe section size

Tab. 1 Simulation working condition

Number	Working condition	Cooling medium	Medium temperature /℃	Temperature of pipes/℃	Heat transfer mode
1	natural cooling	air	25	185	heat conduction
2	immersion cooling	water	25	185	heat conduction
3	air cooling	air	25	185	thermal convection
4	spray cooling	water	25	185	thermal convection

变形，且常见的冷却筒长度为12 m（2倍标准管长）。因此，管材从185 ℃降至预定温度的时间应不大于1520 s。管材冷却时间如式(1)所示，

$$t=\frac{Q}{\Phi}=\frac{c_p\times m\times\Delta T_p}{\Delta T\times A\times h_b}\leqslant\frac{L_t}{V_q} \tag{1}$$

式中：t——管材冷却时间，s；Q———冷却热量，J；Φ——传热功率，J/s；c_p——管材比热容，J/(kg·K)；m——管材质量，kg；A——冷却面积，m²；ΔT_p——管道冷却前后的温度差，K；ΔT——冷却介质的温度变化，K；h_b——表面传热系数，W/(m²·K)；L_t——冷却筒长度，m；V_q——管材牵引速度，m/s。

模拟采用如下假设：(1)管道及冷却介质皆为均质材料；(2)挤出后的管道各点温度相同；(3)忽略管道轴向的热传递作用（管道轴向的热传递对冷却定型过程影响较小）；(4)忽略冷却筒体设备外部的温度影响。综合以上假设，模拟采用2D平面实体单元建模；模型相邻部件间采用绑定接触以实现温度传递；管外流体域的外表面边界条件选择表面热交换，以实现模型与外部空间的热交换；模型网格采用四边形划分，网格单元类型为热传递单元，模型总计3万个单元。模型由管内空气、管道、管道空腔和管外冷却流体四部分组成，其中冷却流体区域按照冷却定型筒体的尺寸设计为内径500 mm、外径900 mm的圆环，如Fig.2（a）所示。管道截面尺寸为外径500 mm、总壁厚20 mm、外壁厚2.5 mm、内壁厚2.5 mm、壁间支撑厚2.5 mm、空腔一周60个，如Fig.2(b)所示。

另一方面，根据冷却形式的不同，管道的冷却方式可分为风冷、水浴冷却和喷淋冷却3种，因此模拟设有4种工况，如Tab.1。管道冷却定型时的水温或气温一般在15~35 ℃的范围内，本文将冷却介质设置为25 ℃。这样设置的优点为便于实际生产中水温或气温的控制，避免冷却水温或冷却气体温度与室温之间存在的温差对试验造成影响。

1.2 控制方程

冷却模拟中考虑了热传导和热对流2种情况。其中，非稳态热传导的控制微分方程如下，

$$\frac{\partial T}{\partial x}=\alpha\nabla^2T+\frac{\dot{Q}}{\rho c} \tag{2}$$

能量方程：

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial x}=\alpha\left(\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}\right) \tag{3}$$

同时，模拟中热传导适用第3类边界条件，即假定管材表面的热流量与模型温度（T）和环境温度（T_a）

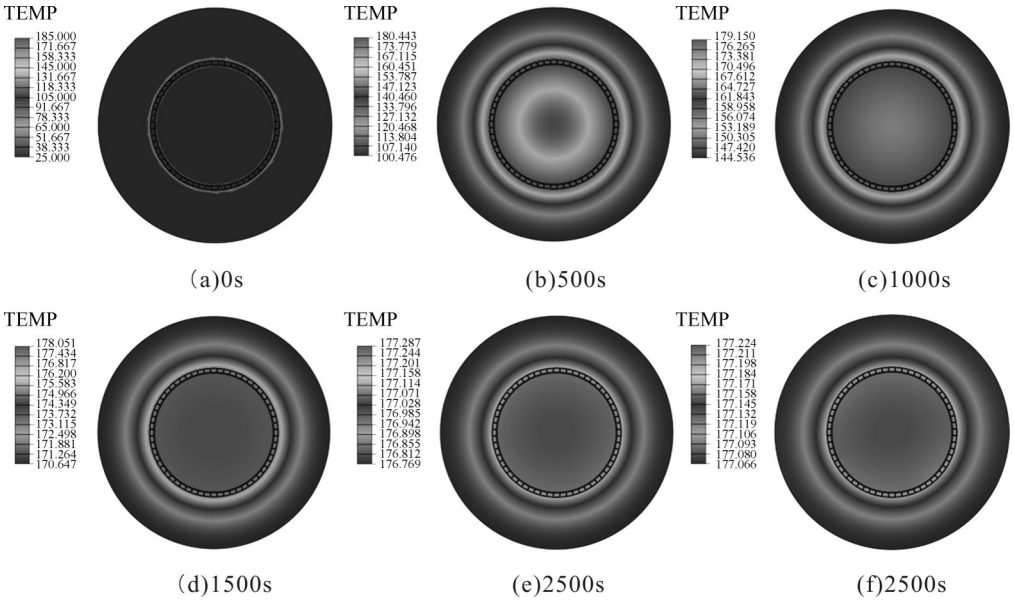


Fig. 3 Temperature contour map of natural pipeline cooling

之差成正比。因此,其表面热交换边界条件控制方程为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \beta(T - T_a) - q = 0 \tag{4}$$

而热对流方面,遵循牛顿冷却定律,即管材边界的热对流换热效率与管材和冷却介质间的温差成正比,

$$q = h_c(T - T_a) \tag{5}$$

上述式(2)~式(5)中,T——模型温度,K;T_a——环境或冷却介质的温度,K;t——时间,s;α——热扩散率,m^2/s;$\dot{Q}$——单位体积热生成率,W/m^3;ρ——材料密度,kg/m^3;∇——拉普拉斯算子;q——热输入,kJ/kg;λ——管材的导热率,W/(m·K);n——边界表面的外法线方向;β——表面热交换系数,$W/(m^2 \cdot K)$;h_c——对流换热系数,$W/(m^2 \cdot K)$。

1.3　管道冷却模拟结果

第1组模拟的是将管道放置在筒体中进行自然冷却的工况。Fig.3展示了工况1中模型在第0 s,500 s,1000 s,1500 s,2000 s和2500 s时的温度变化等值线图。模拟结果表明,自然冷却时管道的冷却速率极低,这将严重影响后续的生产步骤。造成该现象的原因是:静止时空气的传热系数过小,导致管道的热量难以快速扩散;管道与冷却筒体所形成的密闭空间阻碍了设备内外的热交换;空气比热容较低的特征使得其在管道的冷却过程中迅速升温,而管道与冷却介质温差的缩小进一步降低了此工况下的管道冷却速率。该结果表明,通过人工手段对管道进行强制冷却是提升管材生产效率的必要环节。

第2组模拟的是在冷却筒体中对管道进行水浴冷却的工况。Fig.4展示了工况2中模型在第0 s,100 s,500 s,1000 s,2000 s和7500 s时的温度变化等值线图,Fig.5展示了自然冷却和水浴冷却的温度变化曲线。结合Fig.4和Fig.5可以发现:水拥有较高的比热容和导热系数,这使得水浴冷却效率要明显高于自然放置冷却。但水浴冷却依旧存在明显缺陷:(1)随着时间的推移,热量会逐渐由管道转移至周围的冷却水中并导致冷却水升温,而冷却水升温不仅会降低管道的冷却速率,而且会影响大批量生产时管道的冷却质量。(2)管道高速生产时需要将冷却时间控制在1520 s以内,而静置水浴的冷却效率无法满足该要求。(3)虽然可通过使水体流动来提高管道的冷却效率,但是实际生产中对大口径管道进行均匀的流动水浴冷却较为困难。(4)高温下的管道弹性模量较低且管内介质为空气,冷却水的质量过大会使其挤压变形。

第3组模拟的是在冷却筒体中对管道进行风冷

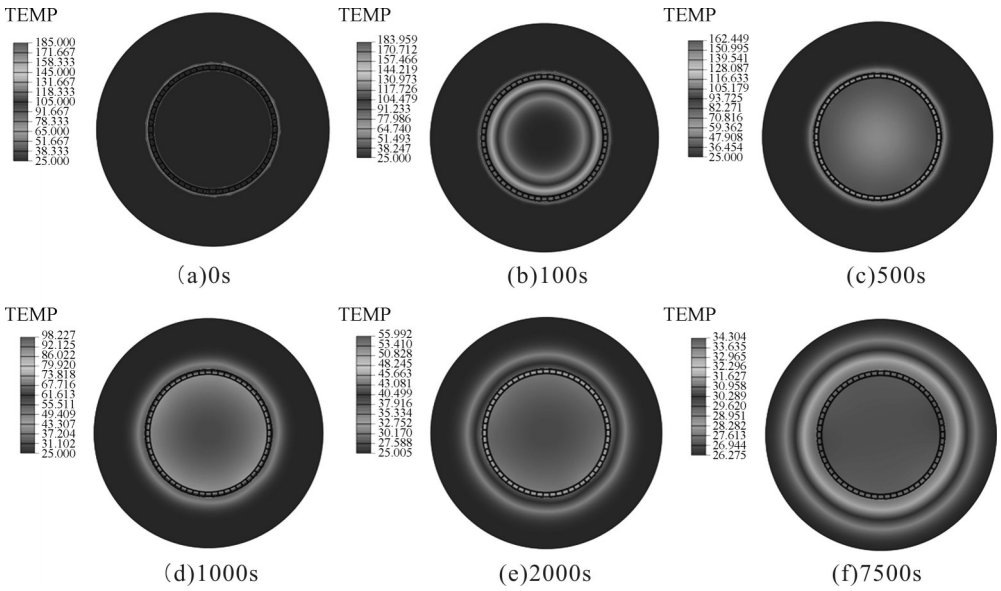


Fig. 4 Temperature contour map of pipeline immersion cooling

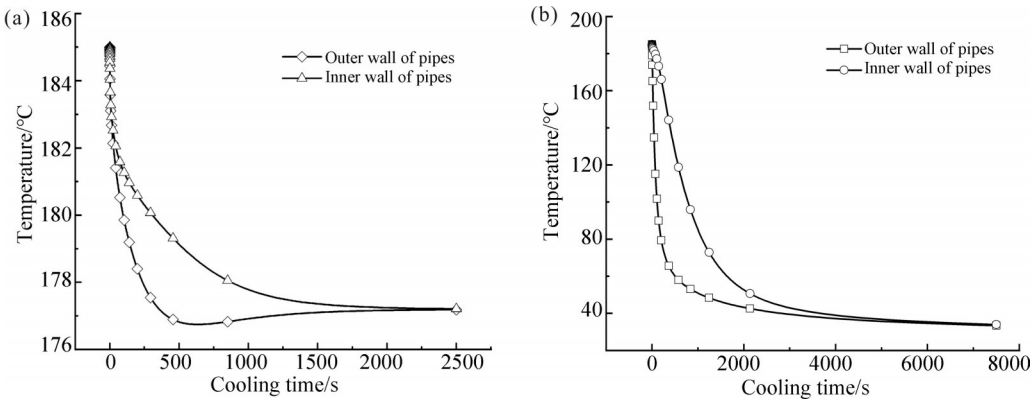


Fig. 5 Temperature variation curves: (a) natural cooling; (b) immersion cooling

的工况。Fig.6展示了工况3中模型在第0 s，100 s，500 s，1000 s，2000 s和4000 s时的温度变化等值线图。模拟结果表明，强制对流时空气的传热系数出现明显的提高，并于第4000 s时使管道内外壁温度均降至25 ℃。通过送风机对管道进行风冷显著改善了管道的冷却效率。但风冷式冷却模式又存在明显的缺陷，即无法在冷却的同时对管道施加真空负压。在管道的冷却定型工序中，小口径的管材只需要进行简单的冷却，而大口径的管材需要额外施加真空负压来降低冷缩作用对管道外径大小的影响。因此风冷不适用于大口径管道的冷却定型工艺。

第4组模拟的是在冷却筒体中对管道进行喷淋冷却的工况。喷淋冷却方式是通过高压喷头将水雾均匀的喷至管壁各处，通过水雾与管道的温度差对管道进行冷却降温，如Fig.7所示。这种冷却方式的优点在于对管道进行喷淋时可以施加真空负压以控制管道外径尺寸，而真空负压又同时能提高水的雾气化程度，提高冷却的均匀性。其另一个优点在于对水温的控制。水雾与管壁接触后会聚拢成水滴并快速滴落至冷却筒体下侧的空槽内，因此，这种冷却方式可以忽略管道与水体进行热量交换所造成的冷却水升温的问题。Fig.8展示了工况4中模型在第0 s，100 s，500 s，1000 s，2000 s和3000 s时的温度变化等值线图。模拟结果表明：相较于风冷和水浴冷却，

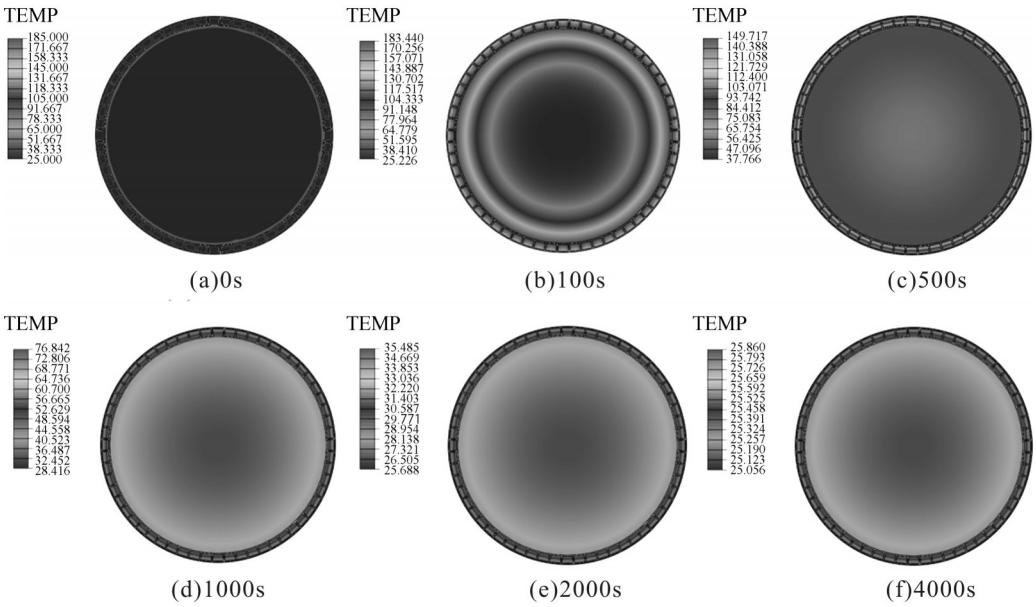


Fig. 6 Temperature contour map of pipeline air cooling

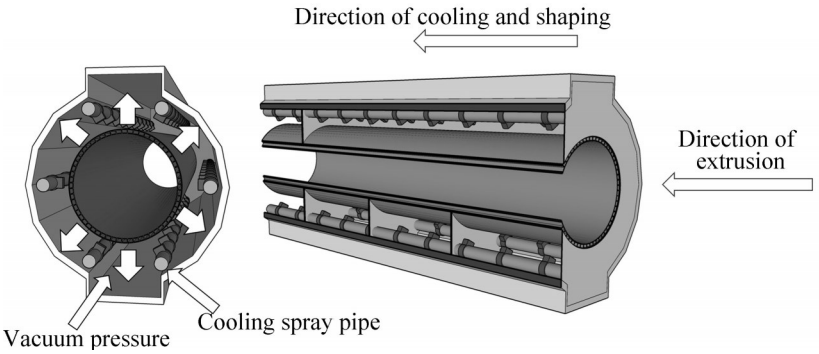


Fig. 7 Diagram of cooling and shaping process

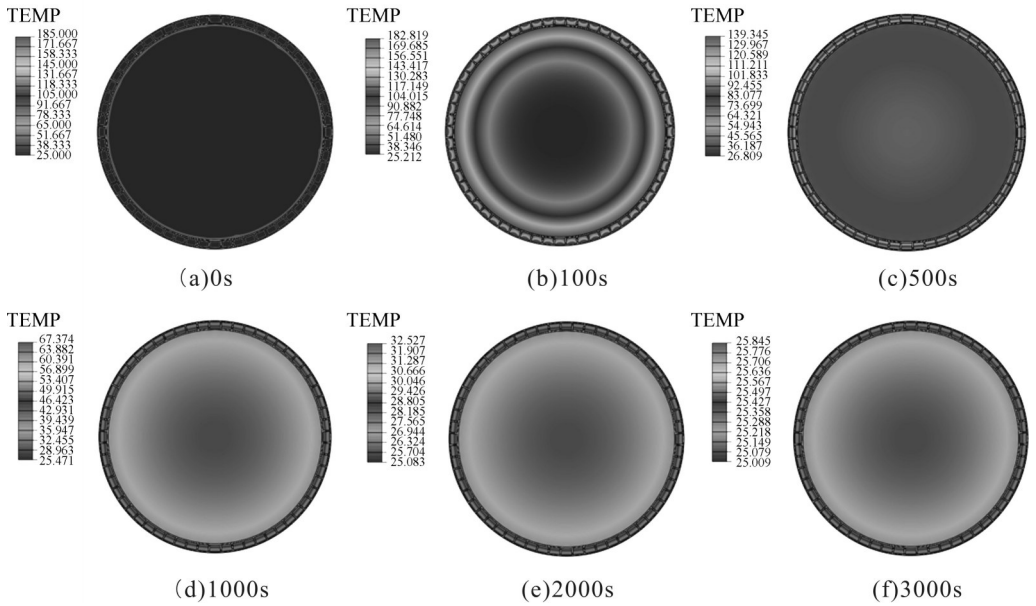


Fig. 8 Temperature contour map of pipeline spray cooling

喷淋冷却的冷却效率更高；2000 s时管材的温度已降至25~30 ℃，3000 s时管材冷却完成。

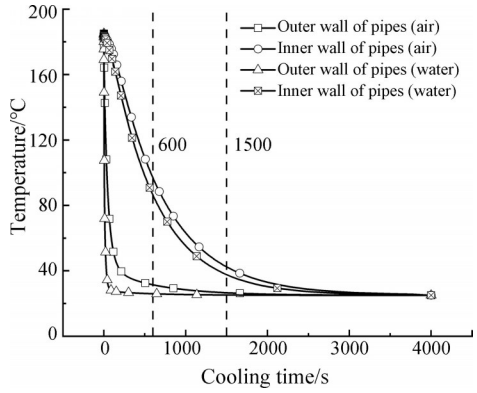


Fig. 9 Temperature variation curves for air cooling and spray cooling

Fig.9为风冷和喷淋冷却的管道内外壁温度变化曲线。曲线表明，冷却过程中管道内外壁的温度变化有明显的差异。管道外壁的温度下降速度较快，通过直接与冷却介质接触，管道外壁的温度在第600 s时已降至25 ℃。而管道内壁需要通过空腔内的空气和壁间支撑将热量传导至冷却介质中，且空气与PVC皆为热的不良导体，这使得内壁的降温速度较低。但根据国标GB/T 18477.3-2019可知，我国对轴向中空壁管的外径大小的要求较为严格，对轴向中空壁管内径大小的要求较为宽松。以外径500 mm的SN8（环刚度8 kN/m^2）的轴向中空壁管为例，规范要求将管道的外径大小控制在500~500.9 mm的范围内，而内径只要求大于432 mm（常见500 mm轴向中空壁管的内径为460 mm）。因此，在保证管道外壁降温充分的情况下适当的放松冷却定型完成时内壁的温度要求，可以在满足规范要求的同时显著提高管道的冷却定型效率，并最终提高轴向中空壁管的生产效率。综合考虑冷却模拟结果和管材挤出速度，将冷却时间设置为1500 s较为合适。此时管道的外壁温度为25 ℃，内壁温度为35 ℃。

2 轴向中空壁管冷却定型模拟

2.1 冷却定型模拟设置

管道的弯曲度最大值取决于其挠度的大小，如式(6)和式(7)所示。影响管道弯曲度的主要因素为管道计算长度（L）和管道弹性模量（E）。当管道从挤出机头模具中被挤出时，185 ℃高温状态下管道的弹性模量最低约为100 MPa，此时重力作用下管道会产生较大的挠度。因此需要通过缩短管道的计算长度来降低挠度，实际生产时则是在冷却筒体内等距设置定型套环来支撑管体。如Fig.10(a)所示，在弹性模量为100 MPa时，管道的弯曲度随着计算长度的减小而减小。当弯曲度为1%时，管道计算长度约为5.6 m，即定型套筒间的距离需要小于5.6 m。同时，观察Fig.10(a)曲线可以发现，当管道计算长度小于2 m时，管道的弯曲较小（<0.05%），而当管道计算长度超过2 m时，管道的弯曲度开始快速上升。因此，将管道计算长度设计为2 m，即冷却筒体内每隔2 m设置1个定型套环，这样既可以满足定型套环的等距设置需求（1根标准管道长6 m），又能使管道在

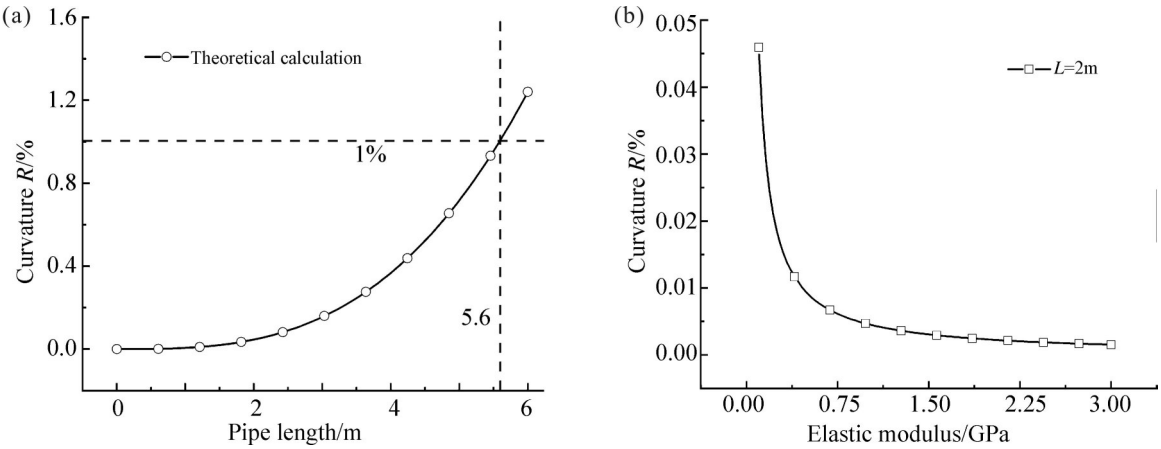


Fig. 10 Curvature of pipeline: (a) curvature-calculated length feature; (b) curvature-elastic modulus characteristics

冷却定型过程中保持较低的弯曲度(Fig.10(b))。

$$R=\frac{h}{L}\leqslant 1\% \tag{6}$$

$$h=\frac{qL^4}{128EI} \tag{7}$$

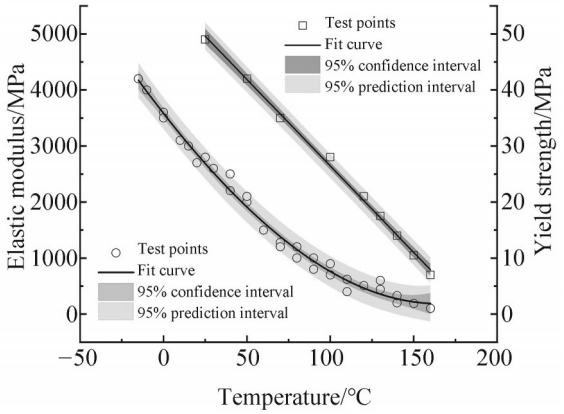


Fig. 11 Mechanical properties of the pipe material

模拟使用ABAQUS有限元软件。管道模型长2 m且横截面构造不变,采用可变形实体单元建模;冷却筒体支座采用离散刚体建模以减少计算;分析步采用完全温度-位移耦合分析方式;管段与筒体支座之间采用简支接触;管段外表面设置表面热交换边界条件以模拟喷淋冷却中的热对流过程;管段采用六面体网格划分,网格单元类型为温度位移耦合单元,单元数量为62.6万个;PVC-U轴向中空壁模型采用考虑温度影响的弹塑性材料,其温度-拉伸性能如Fig.11所示;冷却定型模拟的管材的应力应变遵循Mises屈服准则,其应力应变关系为

$$\{d\sigma\}=[D]\{d\varepsilon\}-\{C\}\,dT \tag{8}$$

式中:[D]——弹塑性矩阵;{C}——与温度有关的向量矩阵。

模拟设有12种工况,如Tab.2所示,其中工况1为管道在无真空压力且无重力作用下的模拟对照组,工况2为考虑重力但不作用真空压力的对照组,工况3~12为重力作用下不同真空压力的试验组。管道初始温度为185 ℃,冷却定型后管道的外壁温度降为25 ℃,管道的内壁温度降为35 ℃。

2.2　冷却定型模拟结果

模拟完成后,在管道模型的外壁环周设置尺寸测量点,测量点间隔15°,1周共24个。随后,计算各测量点的位移大小。各工况下管道外径位移形变的极坐标曲线如Fig.12所示,图中的极轴表示位移大小;极径表示冷却定型后的各测量点的位移值,单位为mm;极角表示各测量点的角度坐标,单位为(°);同时按照所处工况对曲线进行了编号。Fig.12能够较为直观的展示模拟前后,管道各点的实际变形情况。管道内外径尺寸及不圆度的具体数值如Tab.3所示。其中,管段的不圆度计算方式如式(9),

$$\frac{d_{\max}-d_{\min}}{d_{\mathrm{n}}}\leqslant 2.4\% \tag{9}$$

结合Fig.12与Tab.3可知:冷却定型工序中,500 mm口径管材的冷却收缩效应较为明显,当管材外壁温度从185 ℃降低至25 ℃、管材内壁温度从185 ℃降低至35 ℃时,管道的外径变小6.6 mm至493.4 mm(工况1)。管道的外径尺寸不仅影响管道的环刚度、环柔性等力学性能,同时影响着管线的接口密封性。6.6 mm的尺寸误差将造成管线的承口与插口间出现较大的间隙,这将严重降低输水管线的密封性

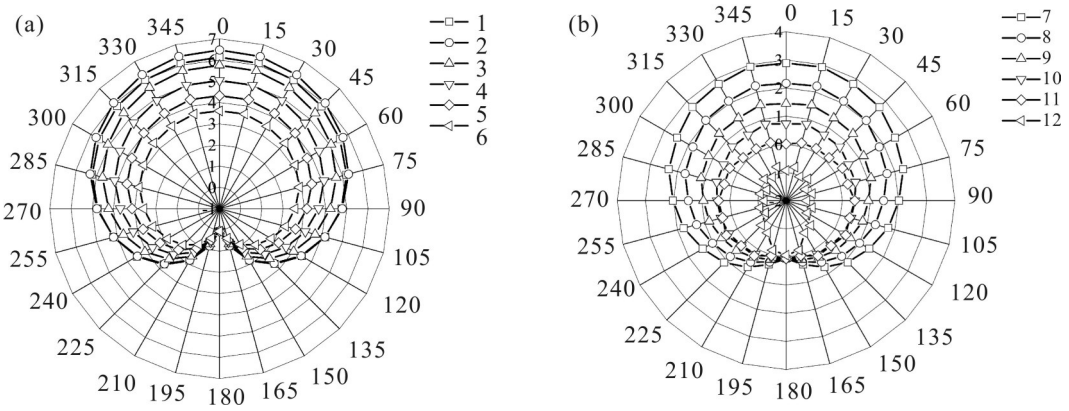


Fig. 12 Deformation displacement curve for pipeline cooling shaping: (a) group 1~6; (b) group 7~12

Tab. 2 Simulation conditions configuration

Number	Vacuum pressures/MPa	Gravity /（N·kg^{-1}）	Initial temperature /℃	（end）Outer wall temperature/℃	（end）Inner wall temperature/℃
1	0		185	25	35
2	0		185	25	35
3	-0.01	9.8	185	25	35
4	-0.02	9.8	185	25	35
5	-0.03	9.8	185	25	35
6	-0.04	9.8	185	25	35
7	-0.05	9.8	185	25	35
8	-0.06	9.8	185	25	35
9	-0.07	9.8	185	25	35
10	-0.08	9.8	185	25	35
11	-0.09	9.8	185	25	35
12	-0.10	9.8	185	25	35

Tab. 3 Simulation results

Number	Vacuum pressures /MPa	$d_{em,\ min}$/mm	$d_{em,\ max}$/mm	$d_{im,\ min}$/mm	Out of roundness /%
1	0	493.4	493.4	453.5	0
2	0	492.6	493.6	452.7	0.2
3	-0.01	493.5	494.3	454.0	0.16
4	-0.02	494.4	495.0	454.9	0.12
5	-0.03	495.3	495.7	455.8	0.08
6	-0.04	496.2	496.5	456.7	0.06
7	-0.05	497.1	497.2	457.5	0.02
8	-0.06	497.8	498.0	458.2	0.04
9	-0.07	498.6	498.9	458.9	0.06
10	-0.08	499.3	499.8	459.6	0.10
11	-0.09	500.0	500.8	460.2	0.16
12	-0.10	500.9	502.4	460.9	0.30

d_{em}: mean outside diameter; d_{im}: mean inside diameter

能，甚至可能导致输水管线运行时出现爆管现象。而对比工况1和2可以发现,重力使管道外径的竖向尺寸进一步降低，因此必须对其施加真空负压来控制管道外径大小。

Fig.13为管道内外径尺寸和不圆度随真空压力变化的特征曲线。结合Fig.12，Fig.13和Tab.3可知,当负压值从－0.01增长至－0.05时，管道的外径逐渐增大，且管道的外径不圆度逐渐降低。这表明真空负压可以降低温度变化和重力对管道外径尺寸和不圆度造成的不利影响。工况7的结果说明，－0.05 MPa的负压已基本抵消了重力对管道竖向的变形的不利影响。在此之后，随着负压值的进一步增长，冷却筒体支座形成的边界条件开始限制管道竖向的变形，这使得管道的不圆度出现上升（工况8~11）。但不圆度总体远小于规范要求的2.4%，因此真空负压的增长对管道的变形依旧形成有利影响。其中，当

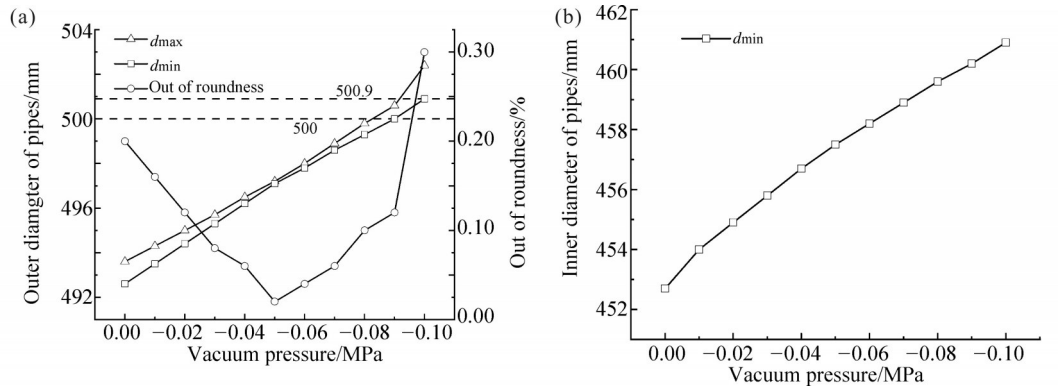


Fig. 13 Variation in pipeline cross-sectional dimensions: (a) outer diameter; (b) inner diameter

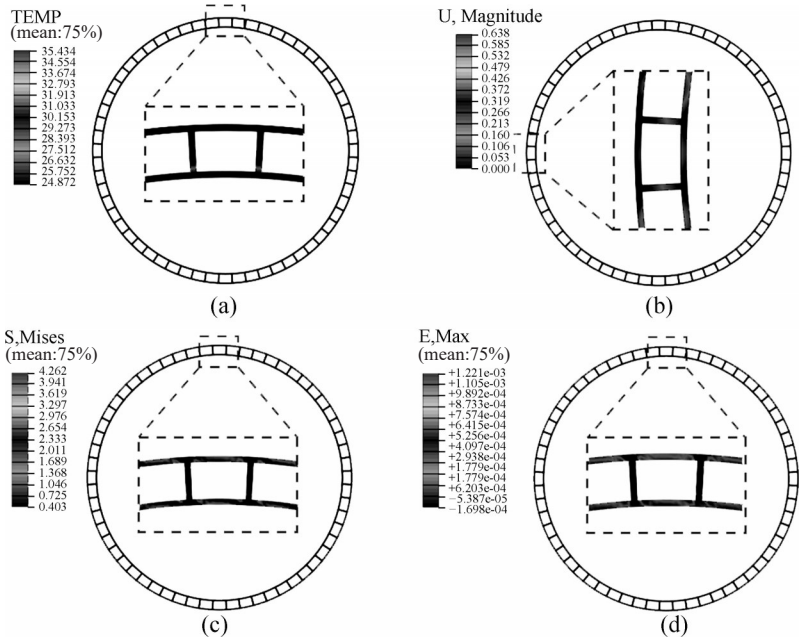


Fig. 14 Cooling shaping simulation contour map: (a) temperature; (b) displacement; (c) stress; (d) strain

负压值为－0.09 MPa时，管道的外径尺寸为500.0~500.8 mm，达到规范要求。而当负压值达到0.10 MPa时（工况12），管道的外径增大到500.9~502.4 mm，超过规范允许的外径大小，此时相邻定型套间的管段外径大于定型套内径，即出现抽胀现象。管道内径大小变化如Fig.13(b)所示，其最小值在452.7~460.9 mm的范围内变化，皆满足规范要求（$d_{im,\,min}$>432 mm）。因此工况11最为理想。

Fig.14为工况11模拟结果的等值线图。此时，管段的内壁温度为35 ℃，管段外壁温度为25 ℃。在温度应力作用下，管段的残余应力最大值仅为4.262 MPa。结果表明，适当放宽管段内壁的温度要求，在大幅提升管道的冷却定型效率的同时对成型管道质量的影响较小。Fig.14(b)为冷却定型完成后，管段各点的位移值。由Fig.14(b)可知，此时管道各点的位移范围为0~0.638 mm，即管道外壁尺寸的大小在500.0~500.6 mm的范围内，满足规范要求（500.0~500.9 mm）。该工况模拟结果理想。

3　冷却定型试验

基于模拟的优化方案设计制造了适用于外径500 mm的轴向中空壁管的外径定型式真空喷淋冷

却定型设备，并利用该设备对挤出后高温状态下的轴向中空壁管进行冷却定型试验。如Fig.15所示，冷却定型设备分为冷却筒体外壳、纵向喷淋管及高压喷头、定型套和支撑支座、控制面板及监控设备4个部分。其中，冷却定型筒体外壳分为2段，每段长6 m，该设备用于形成工艺所需的密闭空间，如Fig.15(a)所示。筒内设置有6个纵向喷淋冷却管，喷淋管上每隔10 cm设有1个高压喷嘴，该设备用于管材喷淋冷却，如Fig.15(b)所示。筒体每隔2 m设有1个定型套，相邻的定型套间设有2个支撑支座，该设备用于管道的支撑和外径定型，同时具有分隔空间便于真空压力的调整的功能，如Fig.15(b, e)所示。冷却筒外部设有用于水温控制、管道温度监测和真空压力设置的控制面板，并每隔2 m设有1个量程为0~0.1 MPa的压力监测表，如Fig.15(c, d)所示。

管道真空冷却定型工艺的具体流程如Fig.16所示。首先，将螺杆挤出机挤出的高温成型管材送入冷却定型筒中，此时冷却筒内的定型套和管材紧密贴合使得冷却筒内每隔2 m形成了1个封闭空间。随后，通过控制平台对各区间进行真空压力的调整并启动喷淋管对管体进行冷却降温。同时，冷却定型过程中通过压力表和温度测量仪对筒内压力和管道温度进行实时监测。最后，通过牵引机将冷却定型完成后的管道拉至加工平台进行激光切割和下线。优化后的冷却定型工艺可以做到在管段通过12 m冷却筒的过程中即完成了冷却定型加工，使得生产线能够连续不断地生产管材，避免频繁地开关挤出机，从而提高了管材的生产效率。

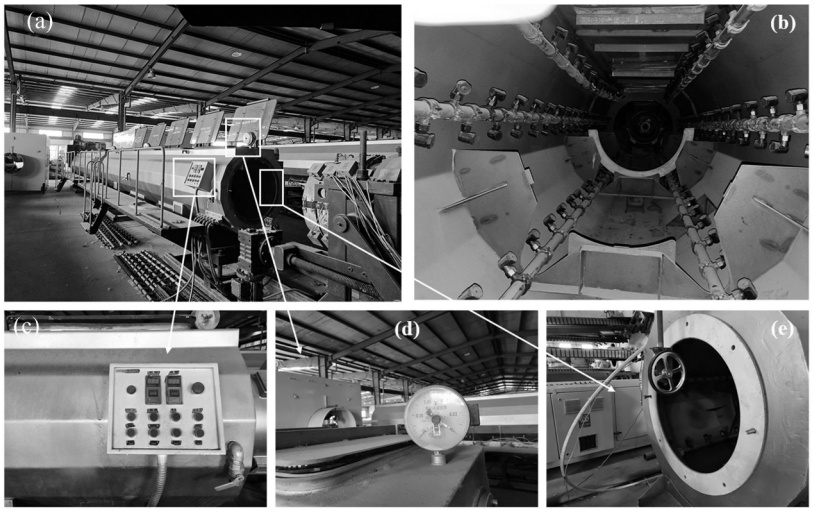


Fig. 15 Cooling shaping equipment: (a) outside of cooling and shaping equipment; (b) inside the cooling and shaping equipment; (c) control panel; (d) pressure monitoring; (e) sleeve

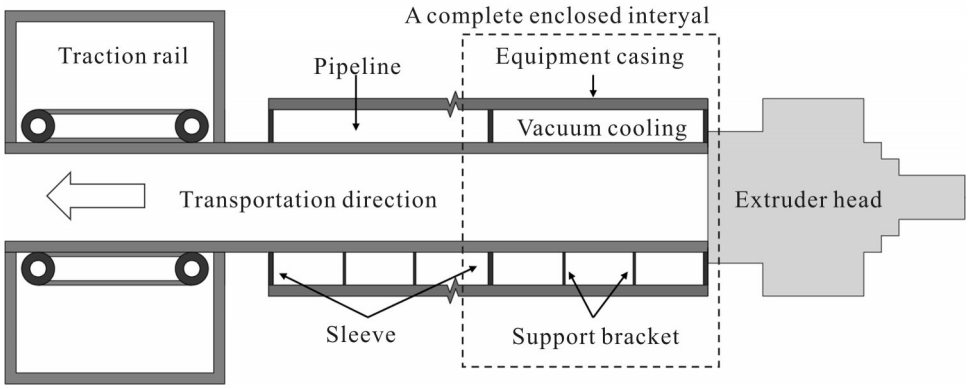
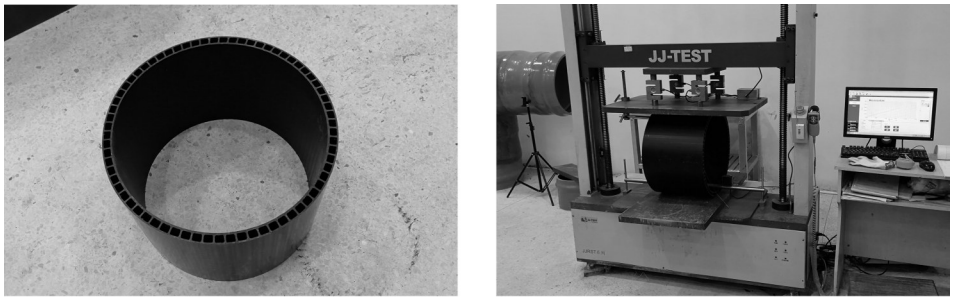


Fig. 16 Flow chart of cooling and shaping process

Tab. 4 Final product pipeline dimensions

Number		$d_{em,\ min}$/mm	$d_{em,\ max}$/mm	Out of roundness/%	Longitudinal curvature/%
1	1-1	500.1	500.5	0.08	0.2
	1-2	500.3	500.9	0.14	
	1-3	500.2	500.8	0.12	
2	2-1	500.2	500.5	0.06	0.1
	2-2	500.1	500.3	0.04	
	2-3	500.1	500.2	0.02	
3	3-1	500.3	500.5	0.04	0.1
	3-2	500.3	500.7	0.08	
	3-3	500.0	500.3	0.06	



(a)　　(b)

Fig. 17 Performance testing of pipes: (a) sample; (b) equipment

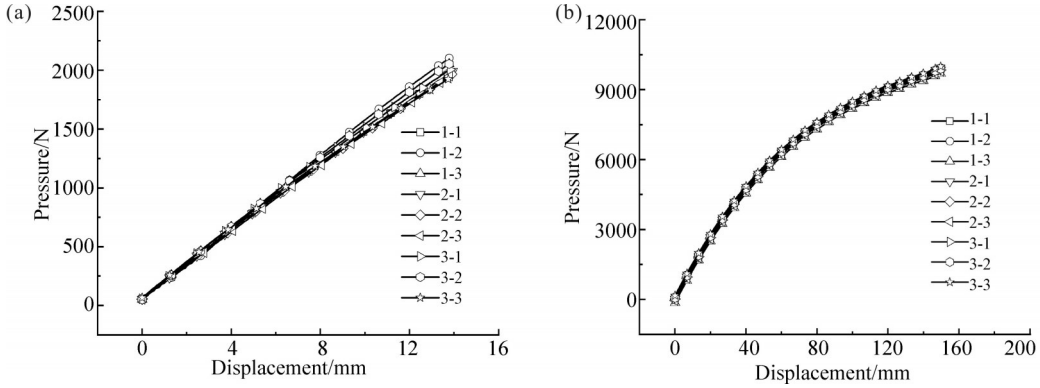


Fig. 18 Mechanical properties of pipes: (a) ring stiffness; (b) ring flexibility

基于工况11的模拟设置进行实际生产后,随机抽取3根管材通过轴向中空壁管生产线上的激光测距仪测量其弯曲度。随后在每个试件管材上随机截取3个长300 mm的管段,根据国标GB/T 8806-2008规范测量其内外径大小和不圆度,结果如Tab.4所示。测量结果表明,冷却定型质量较好,管材各项指标满足规范的要求。

测量完毕后对试样管段进行环刚度和环柔性测试。如Fig.17所示,采用承德市金建检测仪器有限公司生产的JJRST-1412环刚度试验机,根据国标GB/T9647—2015进行测试。环刚度测试管段长300 mm,压缩的加载速度为20 mm/min,压缩度为3%,压缩位移采用内径测量。管材的环刚度曲线如Fig.18所示,9个试样管段的环刚度依次为9.38 kN/

m^2，9.44 kN/m^2，9.63 kN/m^2，9.56 kN/m^2，9.35 kN/m^2，9.31 kN/m^2，9.54 kN/m^2，9.59 kN/m^2和9.46 kN/m^2，其平均值9.47 kN/m^2满足规范对SN8管材的环刚度要求（≥8 kN/m^2）。管材环柔性测试的压缩加载速度为20 mm/min，压缩度为30%，加载完成时立刻卸载并观察管材的外观。结果表明，卸载后的管身无裂缝、无断筋、无发白，且回弹状况良好，达到规范的环柔性要求。

4 结论

为优化外径500 mm的PVC-U轴向中空壁管的冷却定型工艺，解决实际生产过程中存在的冷却速率低、冷却不充分和管道变形较大的问题。本文通过数值模拟和试验验证的方法，研究了管道冷却方式、冷却温度、冷却时间和真空压力对管道的成型尺寸和压扁性能的影响，并基于ABAQUS有限元软件建立了适用于轴向中空壁管冷却定型工艺的热传递模型和温度-位移耦合模型。具体结论如下。

（1）自然冷却、风冷冷却、水浴冷却和喷淋冷却4种冷却方式中，喷淋式冷却最适合大口径轴向中空壁管的冷却定型工艺，且该方式的冷却效率最高。

（2）当冷却水温为25 ℃时，冷却时间应设置为1500 s，真空负压值应设置为－0.09 MPa。此时，管道的冷却效率较高，冷却定型质量较好。

（3）为降低管材冷却定型时的弯曲度，应在冷却定型筒内每隔2 m设置1个定型套环，同时相邻套环间应等距加设2个支座以便于管道对齐引出。

（4）工艺优化后，管道的冷却定型质量稳定，成型管道的内外径尺寸满足要求，管道的弯曲度≤0.2%、不圆度≤0.12%、环刚度为9.47 kN/m^2，环柔性良好。

参考文献：

[1] Yang J H, Hu S W. Estimation of burst pressure of pvc pipe using average shear stress yield criterion: experimental and numerical studies[J]. Applied Sciences 2021, 11: 10477.

[2] 唐鹏飞, 胡少伟, 刘国安, 等. 排水用PVC轴向中空壁管力学性能及结构优化分析[J/OL]. 工程科学与技术,2023 (2023-09-18) [2024-05-02]. https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300362.
Tang P F, Hu S W, Liu G A, *et al.* Mechanical properties and structural optimization analysis of PVC axial hollow- wall pipe for drainage[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 2023 (2023-09-18) [2024-05-02]. https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300362.

[3] Guo Z Y, Hu S W, Jin W C, *et al*. Application of digital twin in the industry of axial hollow- wall pipes[J]. Applied Sciences, 2023, 13: 8093.

[4] 郭泽元, 胡少伟, 金文粲, 等. PVC-U轴向中空壁管挤出成型工艺优化与数值模拟[J]. 塑料工业, 2023, 51(9): 94-101.
Guo Z Y, Hu S W, Jin W C, *et al.* Optimization and numerical simulation on extrusion molding process of PVC-U axial hollow-wall pipe[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(9): 94-101.

[5] 王其兵. 美式复合聚合物异型材挤出成型关键技术[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(5): 123-126.
Wang Q B. Key technology for the extrusion molding of american composite polymer profile[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(5): 123-126.

[6] 刘奎, 王敏杰, 申振楠, 等. 尼龙6棒材挤出成型及制品性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(4): 115-121.
Liu K, Wang M J, Shen Z N, *et al*. Extrusion process of nylon 6 rod and product performance[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(4): 115-121.

[7] Wang Q B, Wang Z M, Peng A H. Optimization design of cooling system of vacuum calibrator for plastics profile extrusion[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168: 959-962.

[8] 常旭阳, 王新宇, 李征, 等. 聚醚醚酮物理老化行为与成型模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(10): 131-137.
Chang X Y, Wang X Y, Li Z, *et al.* Physical aging behavior of poly- ether- ether- ketone and molding simulation[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(10): 131-137.

[9] Kiwan S, Zeitoun O, Alkhalidi A. Transient heat transfer for the cooling of PVC tubes using water jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 102: 539-547.

[10] Feng S, Kamat A M, Pei Y. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: review and progress updates[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 171: 121082.

[11] 严庆光, 王绘芳, 郑勇福. 聚苯乙烯微孔发泡中气泡长大及冷却定型模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1182-1191.
Yan Q G, Wang H F, Zheng Y F. Numerical simulation of bubble growth and solidification in microcellular foamed polystyrene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(5): 1182-1191.

[12] 杨云珍, 孙利民, 王华, 等. 塑料型材挤出成型冷却分析[J]. 塑料工业, 2004, 32(4): 29-31.
Yang Y Z, Sun L M, Wang H, *et al.* Cooling analysis of plastics profiled material during extrusion[J]. China Plastics Industry, 2004, 32(4): 29-31.

[13] Nóbrega J M, Carneiro O S. Optimising cooling performance of calibrators for extruded profiles[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2006, 35: 387-392.

[14] 李静, 梁剧, 曾诚, 等.挤出塑料管定型冷却系统的瞬态传热分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 81-86.
Li J, Liang J, Zeng C, *et al*. Transient heat transfer analysis of calibration and cooling system for extruded plastic pipe[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(7): 81-86.

[15] Pittman J F T, Whitham G P, Beech S, *et al.* Cooling and wall thickness uniformity in plastic pipe manufacture: an experimental study and computer simulations[J]. International Polymer Processing, 1994, 9: 130-140.

[16] Rajkumar A, Habla F, Fernandes C, *et al*. Profile extrusion: experimental assessment of a numerical code to model the temperature evolution in the cooling/calibration stage[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59: 2367-2376.

[17] Mousseau P, Delaunay D, Lefevre N. Analysis of heat transfer in PVC profiles during the extrusion calibration/cooling step[J]. International Polymer Processing, 2009, 24: 122-132.

Optimization and Numerical Simulation of Cooling Shaping Technique for PVC-U Axial Hollow-Wall Pipe

Zeyuan Guo[1], Shaowei Hu[3], Wei Chen[1], Wencan Jin[2], Pengfei Tang[2], Fuqu Pan[4]

(*1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530000, China; 3. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 4. Dongxin Plastic Technology Co., Ltd., Liaocheng 252000, China*)

ABSTRACT: The present study conducted numerical simulation and technique optimization for the cooling and shaping technique of PVC-U axial hollow-wall pipe with an outer diameter of 500 mm. Utilizing established heat transfer and thermal coupling models, an investigation on the influence of cooling methods, cooling duration, cooling temperature, and vacuum negative pressure on the pipeline cooling and shaping technique was carried out. Additionally, the study involved the optimization of the cooling and shaping equipment design. The results indicate that, under the conditions of a cooling water temperature of 25 °C, a cooling duration of 1500 s, and a vacuum negative pressure of -0.09 MPa, the vacuum spray shaping technique for outer diameter shaping is the most ideal for pipeline processing. After post-optimization, the produced pipeline exhibits dimensions within the required specifications, curvature ≤0.2%, non-circularity ≤0.14%, a ring stiffness of 9.47 kN/m², and excellent ring flexibility.

Keywords: axial hollow-wall pipe; unplasticized polyvinyl chloride; cooling shaping process; numerical simulation